



Pengaruh Model Dan Sifat Material Pada Analisis Metode Elemen Hingga Balok Tabung-Baja Bundar Diisi Beton

✉ **Mahmud Kori Effendi**

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang (UNNES)

Kata Kunci/ Keywords :

concrete, steel-tube, finite element, half model, a quarter model

tabung-baja, beton, elemen hingga, setengah model, seperempat model

Abstract/ Abstrak:

The composite material concrete filled steel tubes, CFST) begin widely recommended in modern structural projects. This CFST structure has better ductility than the conventional structure. The three-dimensional finite element model by means of MSC Marc Mentat software is done by using non-linear material properties for both the steel and concrete. The non-linear geometry is also considered. The results of the finite element analysis method are then compared with experimental results of circular steel tubes filled with concrete. The results of this analysis for both load-deflection and collapse conditions are quite agree with the experimental results. However, the buckling phenomena cannot be modeled in the analysis of the finite element method. The effect of finite element model, which is half span and a quarter of half span, is investigated. The results of this analysis are similar to the results of full-scale analysis. There is plastic hinge in the middle of the beam span. The influence of the material properties of linear and non-linear geometric properties are also investigated. The the plastic hinge did not occur in the middle of beam span.

Material komposit tabung baja diisi beton mulai banyak direkomendasikan dalam proyek struktural modern. Struktur CFST ini mempunyai daktilitas yang lebih baik dibanding struktur konvensional. Model elemen hingga tiga dimensi dilakukan dengan memakai sifat material baja dan beton non linier. Sifat non linier geometri juga diperhitungkan. Hasil dari analisis metode elemen hingga lalu dibandingkan dengan hasil eksperimen tabung baja bundar diisi beton. Hasil dari analisis ini menghasilkan beban-lendutan dan kondisi balok pada beban runtuh hampir sama dengan hasil eksperimen. Fenomena buckling tidak bisa dimodelkan dalam analisis metode elemen hingga. Pengaruh pemodelan setengah bentang dan model setengah penampang setengah bentang balok diperhitungkan. Hasil analisis sama dengan hasil analisis skala penuh. Sendi plastis terjadi di tengah bentang balok. Pengaruh sifat material linier dan sifat geometri non linier diperhitungkan. Hasilnya tidak terjadi sendi plastis di tengah bentang balok.

Sitasi:

Effendi, Mahmud Kori. (2017). Pengaruh Model dan Sifat Material pada Analisis Metode Elemen Hingga Balok Tabung-Baja Bundar Silinder Diisi Beton. *Jurnal Teknik Sipil & Perencanaan*, 19(2), 106-114.

© 2017 Universitas Negeri Semarang

✉ Mahmud Kori Effendi:
Gedung E4, Kampus Sekaran
Universitas Negeri Semarang, Kota Semarang
E-mail : pak_kori@yahoo.com

p-ISSN 1411-1772
e-ISSN 2503-1899

PENDAHULUAN

Material komposit adalah suatu material yang terbuat dari dua atau lebih bahan material dengan sifat fisik dan sifat kimia yang berbeda secara signifikan dan setelah digabungkan menghasilkan suatu material dengan karakteristik yang berbeda dari komponen pembentuknya.

Material komposit tabung baja diisi beton (concrete filled steel tubes, CFST) mulai banyak direkomendasikan dalam proyek struktural modern. Material ini terbuat dari tabung baja yang diisi dengan beton. Struktur CFST ini mempunyai daktilitas yang lebih baik dibanding struktur konvensional.

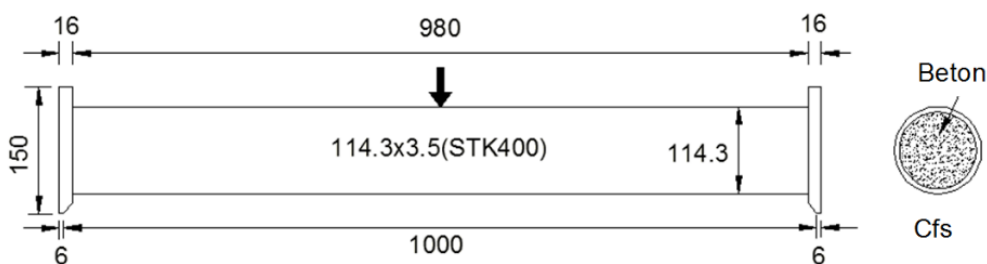
Tabel 1 . Sifat Material Baja dan Beton

Nama Spesimen	Tabung Baja				Beton		
	sD or sB (mm)	s_t (mm)	sD/st or sB/st	$s\sigma_y$ (N/mm ²)	E_s (x103) (N/mm ²)	$s\sigma_B$ (N/mm ²)	E_c (x103) (N/mm ²)
Cfs	114.3	3.5	32.5	411	217	71.5	39.9

Beberapa eksperimen telah dilakukan untuk meneliti perilaku lentur balok baja diisi beton, seperti dalam (Oyawa, 2004, Elchalakani, 2001, Oyawa, 1999, Gho, 2004, Han, 2006, Lu, 1994, Wheeler, 2003, Effendi, 2015).

Model elemen hingga tiga dimensi dilakukan dengan memakai sifat material non linier

baja dan beton. Hasil dari analisis metode elemen hingga lalu dibandingkan dengan hasil eksperimen tabung baja bundar diisi beton dites oleh Effendi, 2015, yang telah dilakukan di laboratorium struktur di Kyushu University sampai keruntuhan akibat beban lentur.



Gambar 1. Ilustrasi Benda Uji (satuan: mm)

Model elemen hingga tiga dimensi dibuat dengan ukuran sama dengan sampel eksperimen. Analisis dilakukan dengan pendekatan material non linier dan geometrik non linier. Model elemen hingga tersebut diadopsi untuk diterapkan pada balok tabung baja bundar diisi beton dengan perletakan sederhana sendi dan rol. Model tersebut kemudian diteliti lagi untuk meneliti pengaruh pemodelan elemen dimana pemodelan dibuat menjadi balok bundar setengah bentang (Half), model setengah penampang setengah bentang balok (model seperempat/Quarter Model) dan pengaruh sifat linier elastik dari material baja dan beton.

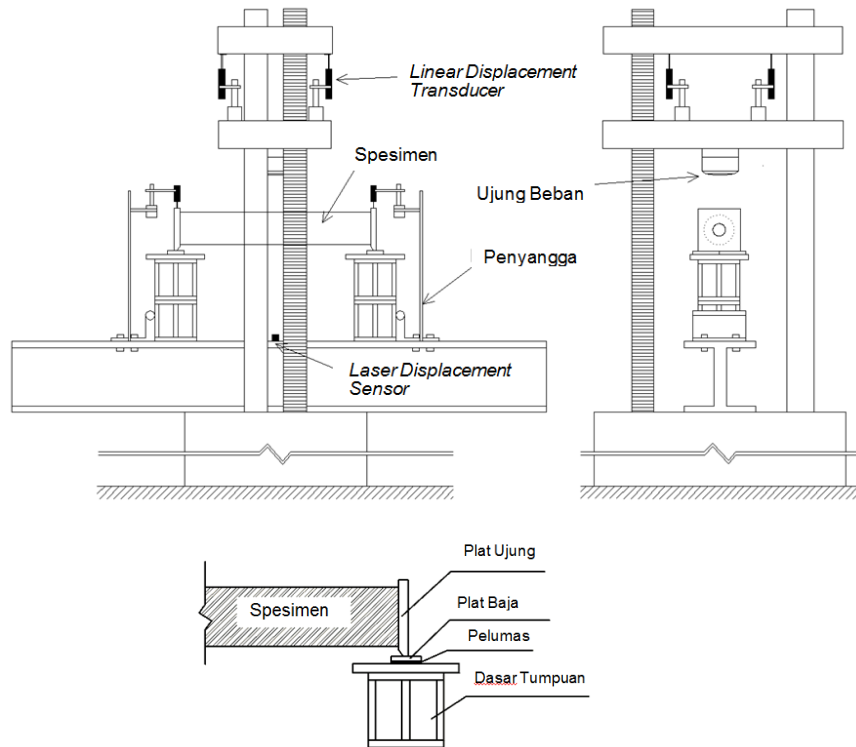
EXPERIMEN

Balok baja bundar diisi beton dites di laboratorium struktur Kyushu University. Detil sifat material dari penampang tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. Tabung baja yang digunakan adalah STK400 standar produk baja Jepang.

Spesimen balok baja bundar diisi beton dapat dilihat pada Gambar 1. Diujung balok diberi tutup pelat baja dan diujung lainnya ada lubang

agar supaya memperoleh kemudahan dalam pengecoran beton ke dalam tabung baja. Pelat baja ini juga nanti berfungsi sebagai peletakan tumpuan balok. Tumpuan balok pada dasarnya adalah sendi dan rol sehingga mudah bergerak. Lapisan pelumas diberikan di antara pelat baja tumpuan dengan frame tes struktur agar supaya tidak terjadi gesekan sehingga tumpuan tidak berperilaku menjadi sendi dan rol.

Penyetelan pengujian dapat dilihat pada Gambar 2. Pengujian dilakukan dengan kontrol lendutan dimana balok dibebani ditengah bentang sampai dengan nilai lendutan tertentu. Ujung beban dibuat bulat agar supaya tegangan akibat beban terbagi kepada balok. Untuk mengukur lendutan balok maka dipasang laser displacement sensor dibawah balok. Selain itu dipasang linear displacement transducer diatas balok uji untuk mengukur lendutan beban dan dipasang juga diatas tumpuan balok untuk mengukur lendutan pada tumpuan. Strain gauge dipasang juga pada bawah tengah bentang dan seperempat bentang untuk mengukur regangan.



Gambar 2. Penyetelan Benda Uji

ANALISIS DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Analisis metode elemen hingga dilakukan dengan software MSC Marc Mentat, 2012. Software ini adalah gabungan dari program MSC Marc dan MSC Mentat. MSC Mentat dipakai untuk menghasilkan ruas-ruas (mesh) dan menetapkan sifat material dan sifat geometri, kondisi pembebanan dan kondisi batas pada pengujian benda uji. Software ini juga dipakai untuk membaca hasil analisis. MSC Marc dipakai untuk menghitung model benda uji. Prosedur iterasi yang digunakan adalah Full Newton-Raphson. Untuk menghasilkan hasil analisis yang akurat maka dibuat setiap iterasi pembebanan yang sangat kecil sehingga akibatnya titik iterasi numerikal menjadi kecil.

Model Material Tabung Baja

Tabung baja dimodelkan dengan non linier penuh, isotropik. Strain hardening diperhitungkan dalam analisis. Hasil dari uji tarik baja dimasukkan dalam program MSC Marc Mentat dalam equivalent plastic strain. Model aliran plastic adalah kriteria leleh von Mises dan aturan kinematic hardening. Ratio Poisson sebesar 0,3.

Model Material Beton

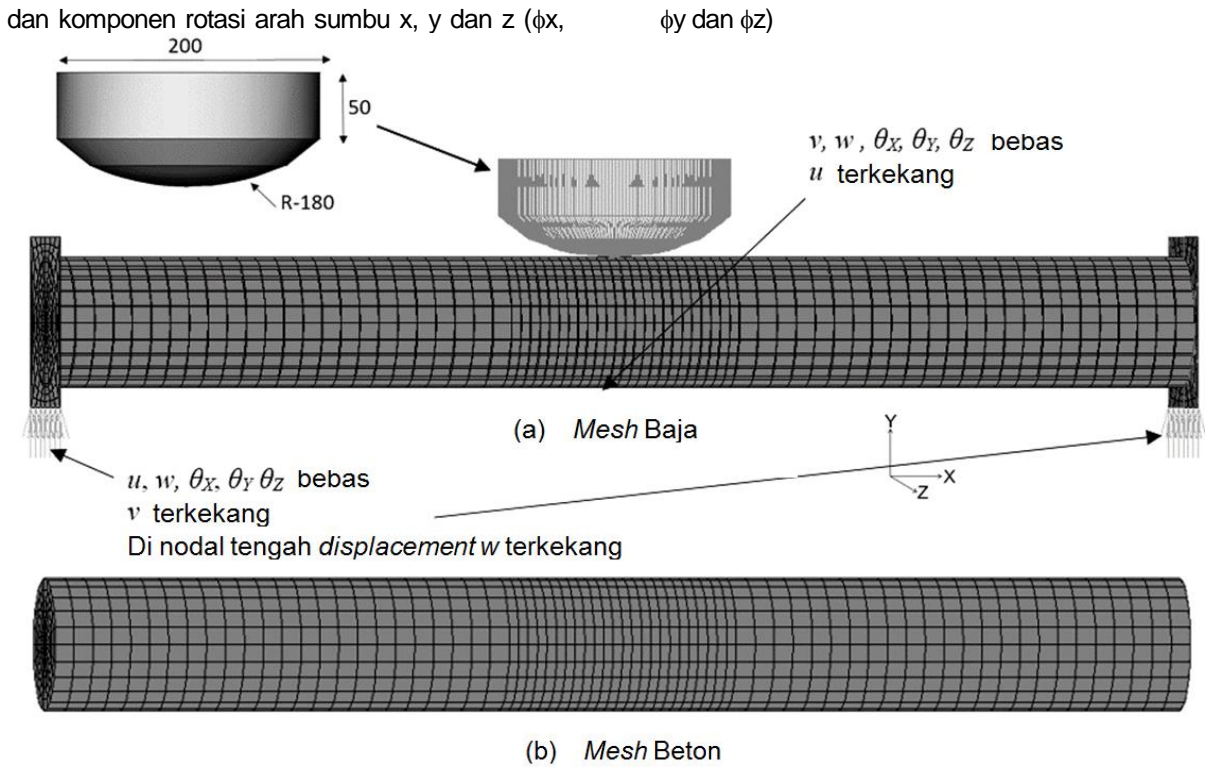
Beton yang dipakai adalah beton mutu tinggi dengan kekuatan beton sebesar 71.5 MPa. Aliran

plastic memakai linear Mohr-Coloumb. Untuk memodelkan retak seketika akibat tarik, pada pemodelan tarik beton dipakai kekuatan tarik mendekati angka nol. Rasio Passion sebesar 0,2.

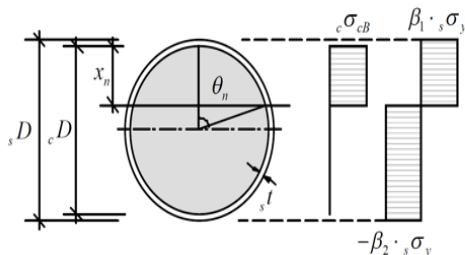
Meshing dan Pengkondisian Batas

Dalam pemodelan balok bundar tabung baja diisi beton, untuk tabung baja dan beton dimodelkan dengan memakai elemen solid. Elemen yang dipakai adalah elemen tipe 7 pada data elemen di MSC Marc Mentat.

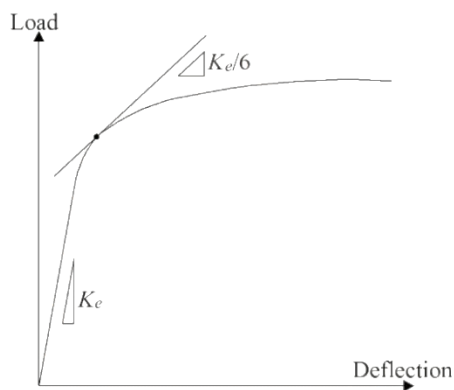
Elemen tipe 7 ini adalah elemen tiga dimensi, orde satu, 8 nodal, isoparametrik, heksahedral. Elemen ini memakai interpolasi fungsi trilinear. Regangan cenderung untuk konstan pada elemen ini. Elemen ini tidak cocok untuk memodelkan perilaku geser. Derajat kebebasan elemen ini adalah derajat kebebasan displacement arah sumbu x, y dan z (u, v, dan w). Untuk memodelkan pembebanan maka ujung baja bulat pada eksperimen dibuat dengan model geometri. Meshing baja, beton dan beban dapat dilihat pada Gambar 3. Untuk memodelkan pelat baja ujung balok dimana sebagai tumpuan sendi-rol pada saat eksperimen, maka pelat baja dimodelkan dengan elemen tipe 75. Elemen ini adalah bilinear, 4 nodal tipe shell termasuk efek tegangan transversal diperhitungkan. Elemen ini mempunyai 6 derajat kebebasan, yaitu komponen displacement arah sumbu x, y dan z (u, v, dan w)



Gambar 3. Meshing pada Model Tabung Baja diisi Beton Penyetelan Benda Uji



Gambar 4. Momen Ultimit Balok Bundar diisi Beton



Gambar 5. Beban Plastis hasil Eksperimen

Pada Gambar 3, terlihat bahwa meshing dibawah beban dibuat agak rapat. Hal ini agar supaya interpolasi fungsi matematis bisa menghasilkan hasil yang bisa memodelkan geometri lengkung. Analisis kontak antara tabung

baja dan beton juga diperhitungkan, begitu juga analisis kontak antara beban dengan tabung baja juga diperhitungkan.

Analisis yang dilakukan adalah analisis elemen hingga tiga dimensi. Untuk memodelkan eksperimen balok bundar beton diisi beton maka kondisi batas dalam analisis elemen hingga ini adalah pada tumpuan dibuat bahwa derajat kebebasan nodal pada bagian bawah dibuat tidak bisa bergerak pada displacement arah y (v) dan dibuat bebas derajat kebebasan lainnya.

Pada tengah bentang balok derajat kebebasan displacement arah x (u) dibuat tidak bisa bergerak dan derajat kebebasan lainnya dibuat bebas. Untuk menjaga keseimbangan analisis numerik maka pada nodal ditengah tumpuan dibuat tidak bergerak pada derajat kebebasan pada displacement arah sumbu z (w). Analisis dilakukan dengan pendekatan kontrol lendutan. Model geometri beban dibuat bergerak ke arah sumbu y negatif sampai nilai lendutan tertentu.

Momen Ultimit Balok Bundar Diisi Beton

Kekuatan lentur ultimit teoritis M_u , (AIJ, 2008), pada balok bundar diisi beton dapat dihitung dengan memakai distribusi blok tegangan seperti terlihat pada Gambar 4. Posisi sumbu netral x_n dapat diperoleh dengan menetapkan nilai total gaya aksial sama dengan nol di persamaan (1) dan kekuatan lentur ultimit dapat dihitung

dengan persamaan (2). Persamaan (3) sampai dengan persamaan (6) dapat dipakai sebagai prosedur untuk menghitung momen plastis ultimit balok bundar diisi beton.

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

$${}_{cal} M_u = {}_c M_u + {}_s M_u \tag{2}$$

$${}_c N_u = (\theta_n - \sin \theta_n \cos \theta_n) \cdot \frac{{}_c D^2 \cdot {}_c \sigma_{cB}}{4} \tag{3}$$

$${}_c M_u = \sin^3 \theta_n \cdot \frac{{}_c D^3 \cdot {}_c \sigma_{cB}}{12} \tag{4}$$

$${}_s N_u = \{\beta_1 \theta_n + \beta_2 (\theta_n - \pi)\} \left(1 - \frac{{}_s t}{D}\right) \cdot D \cdot {}_s t \cdot {}_s \sigma_y \tag{5}$$

$${}_s M_u = (\beta_1 + \beta_2) \sin \theta_n \frac{(D - {}_s t)^2}{2} \cdot {}_s t \cdot {}_s \sigma_y \tag{6}$$

Dimana,

$${}_c \sigma_{cB} = {}_c r_U \cdot {}_c \sigma_B + \frac{1.56 {}_s t \cdot {}_s \sigma_y}{D - 2t} \tag{7}$$

Tabel 2. Perbandingan antara Kekuatan Ultimit dari Hasil Perhitungan dan dari Hasil Eksperimen

Nama Spesimen	Perhitungan		Eksperimen	Rasio
	${}_{cal} M_u$ (kNm)	${}_{cal} P_u$ (kN)	${}_e P_u$ (kN)	
Cfs	21.1	84.6	79.7	1.1

$$\theta_n = \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{{}_c x_n}{{}_c D}\right) \tag{8}$$

$$\beta_1 = 0.89, \beta_2 = 1.08 \tag{9}$$

Dimana, N_u adalah beban aksial ultimit total, M_u adalah momen lentur ultimit total, cN_u adalah beban aksial ultimit beton, sN_u adalah beban aksial ultimit tabung baja, cM_u adalah momen lentur ultimit beton, sM_u adalah momen lentur ultimit tabung baja, D adalah diameter luar tabung baja, $cru=1$ adalah faktor redukti untuk kekuatan beton, ${}_c D$ adalah diameter bagian beton, ${}_s t$ adalah tebal tabung baja, ${}_c x_n$ adalah posisi sumbu netral, and ${}_s \sigma_y$ adalah tegangan leleh tabung baja, ${}_c \sigma_{cB}$ adalah peningkatan

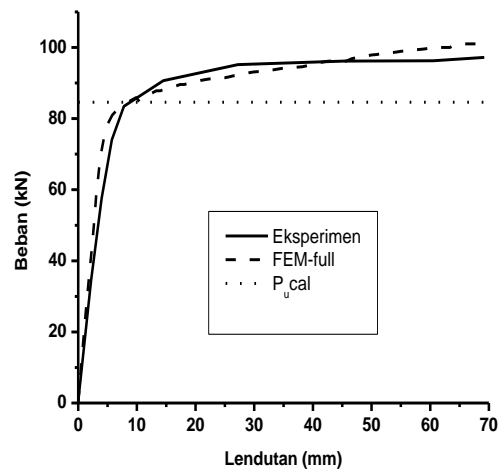
kekuatan beton terkekang, ${}_c \sigma_B$ kekuatan standar perancangan beton isi.

Kekuatan plastis hasil eksperimen didefinisikan sebagai beban hasil proyeksi titik singgung kekakuan tangen sebesar 1/6 kekakuan awal pada kurva beban-lendutan seperti terlihat pada Gambar 5.

HASIL PEMBAHASAN

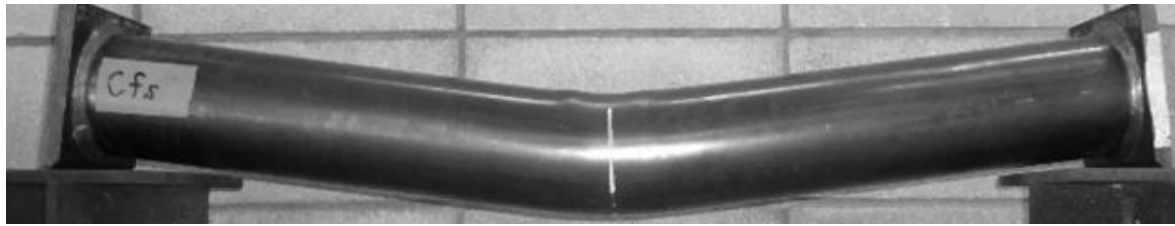
Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan dan Bentuk Collapse hasil Eksperimen dan Metode Elemen Hingga

Pada Gambar 6, terlihat bahwa kurva beban-lendutan hasil analisis dari model elemen hingga menghasilkan bentuk kurva bersesuaian dengan hasil eksperimen. Kekakuan awal hasil dari metode elemen hingga agak kaku sehingga hasil dari metode elemen hingga agak berbeda dari hasil eksperimen. Hal ini terjadi kemungkinan karena modulus elastisitas beton yang besar sehingga memperkaku balok.

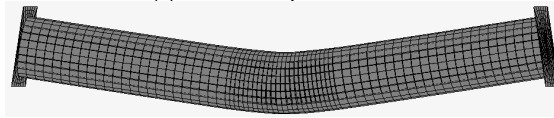


Gambar 6. Perbandingan Beban-Lendutan Hasil Eksperimen dan FEM material non linier

Pada Gambar 7, terlihat bahwa bentuk keruntuhan hasil analisis dari model elemen hingga skala penuh menghasilkan bentuk keruntuhan yang hampir mirip dengan hasil eksperimen. Pada hasil eksperimen terdapat tekuk (buckling) pada daerah tekan, akan tetapi tidak pada hasil analisis metode elemen hingga tidak terlihat buckling di daerah tekan. Hal ini terjadi dikarenakan model elemen hingga tidak bisa memodelkan fenomena tekuk (buckling) ini.



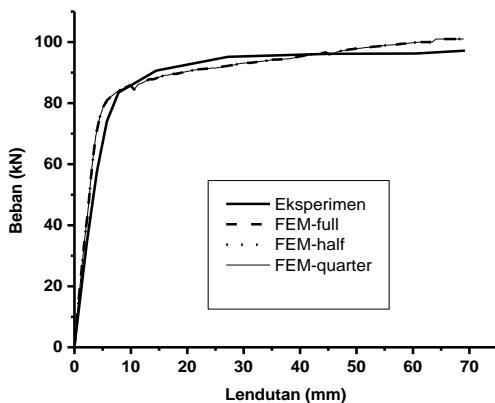
(a) Hasil Eksperimen



(b) FEM-material non linier

Gambar 7 . Perbandingan Penampang Balok pada saat Collapse antara hasil Eksperimen dan FEM-material non linier skala penuh

Beban plastis hasil dari analisis metode elemen hingga (${}_{cal}P_u$) mempunyai nilai yang hampir sama dengan nilai beban plastis hasil eksperimen (${}_{e}P_u$) dengan perbedaan 10% seperti terlihat pada Tabel 2. Hal ini terjadi karena kekakuan awal pada hasil metode elemen hingga lebih kaku dibandingkan dengan kekakuan hasil eksperimen.



Gambar 8. Perbandingan Beban-Lendutan Hasil Eksperimen dan FEM material non linier dengan memperhitungkan model analisis elemen hingga

Pengaruh Model Struktur dalam Pemodelan Metode Elemen Hingga

Dalam melakukan analisis metode elemen hingga dengan model skala penuh dikarenakan untuk iterasi matematis analisis numerik memerlukan iterasi yang lama sampai menghasilkan hasil yang konvergen.

Penyederhanaan model sangat diperlukan sehingga waktu analisis menjadi lebih cepat dan hasil yang didapat juga akurat. Model setengah bentang balok (model setengah/Half Model) dan

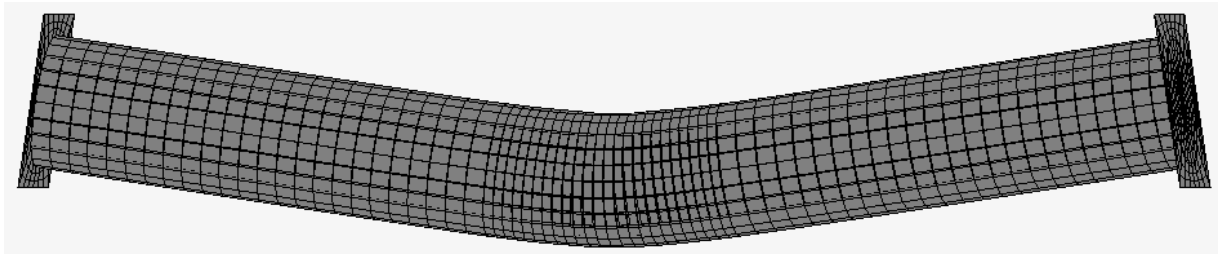
model setengah penampang setengah bentang balok (model seperempat/Quarter Model) dianalisis dalam penelitian ini.

Pada pemodelan setengah bentang balok (model setengah/Half Model) kondisi batas pada nodal di tengah bentang balok dibuat tidak bergerak displacement arah sumbu x. Untuk model setengah penampang setengah bentang balok (model seperempat/Quarter Model) nodal pada tengah bentang dibuat tidak bergerak displacement arah sumbu x dan pada nodal sisi samping setengah bentang dibuat tidak bergerak displacement arah sumbu z. Kondisi batas yang lain sama persis dengan model skala penuh.

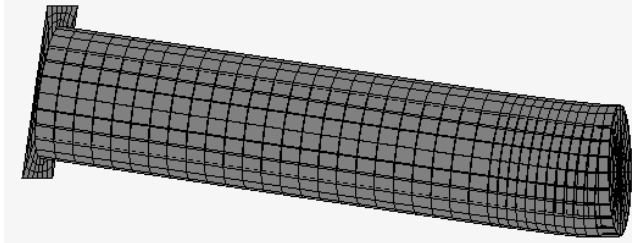
Perbandingan kurva beban-lendutan hasil dari analisis dengan penyederhanaan model dapat dilihat pada Gambar 8. Hasil perbandingan dari analisis skala penuh dengan model setengah bentang balok (model setengah/Half Model) dan juga hasil dari model setengah penampang setengah bentang balok (model seperempat/Quarter Model) didapatkan hasil yang sama persis. Pada Gambar 9, terlihat bahwa hasil analisis diperlukan waktu analisis yang sangat lama. Hal ini dari model elemen hingga skala penuh menghasilkan bentuk keruntuhan yang hampir mirip dengan analisis model setengah bentang balok (model setengah/Half Model) dan juga hasil dari model setengah penampang setengah bentang balok (model seperempat/Quarter Model).

Pengaruh Sifat Linier Material Baja dan Beton

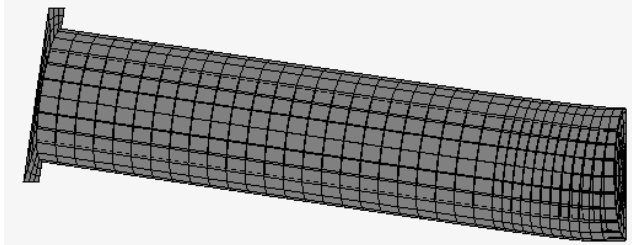
Untuk kemudahan dalam analisis dan perancangan elemen struktur bangunan, biasanya digunakan penyederhanaan sifat material linier elastic dan sifat geometric linier.



(a) Skala Penuh

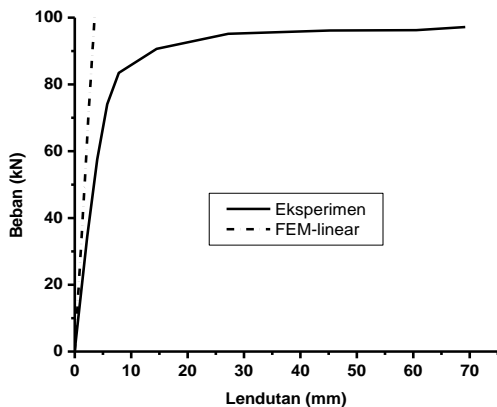


(b) Setengah Bentang Balok (*Half Model*)



(c) Seperempat Setengah Bentang Balok (*Quarter Model*)

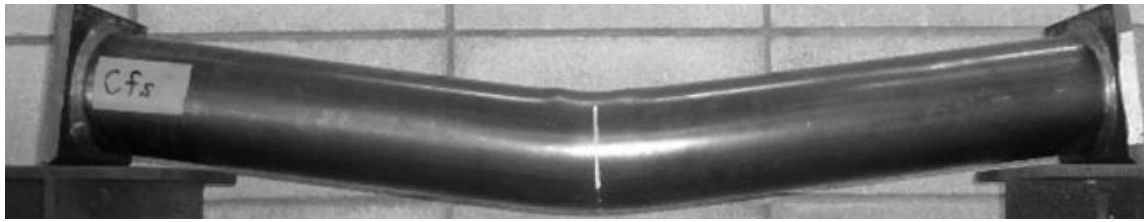
Gambar 9 . Perbandingan Penampang Balok pada saat Beban Runtuh antara hasil Eksperimen dan FEM-material dengan memperhitungkan model elemen hingga



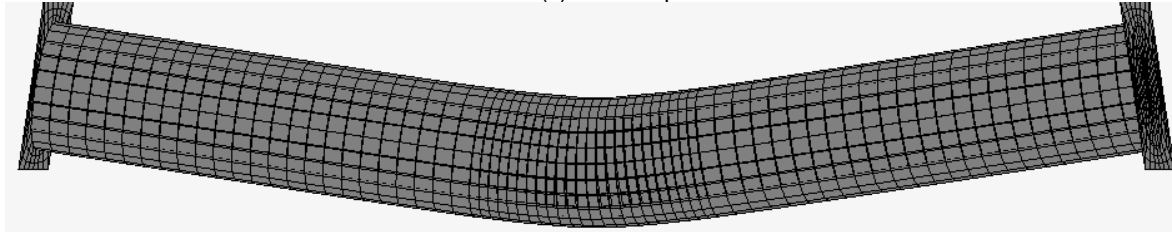
Gambar 10 . Perbandingan Beban-Lendutan hasil Eksperimen dan FEM material linier

Model elemen hingga pada kasus ini diberi beban berupa lendutan sampai dengan nilai lendutan yang sama dengan nilai lendutan pada analisis sifat material non linier dan sifat geometric

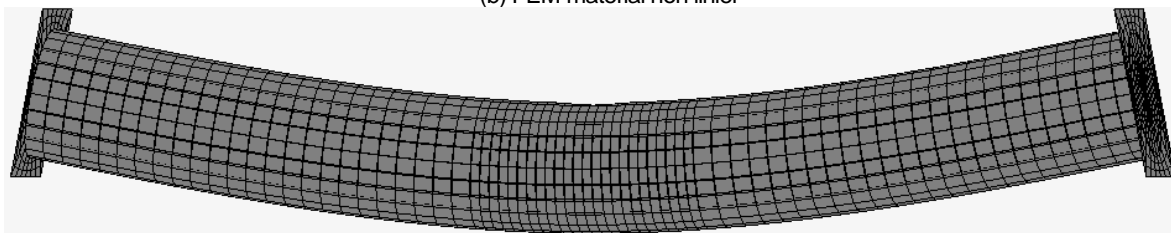
non linier. Pada Gambar 10, beban-lendutan hasil analisis metode elemen hingga ini tidak sama dengan hasil eksperimen. Beban naik linier dengan kenaikan lendutan. Pada Gambar 10 ini, untuk memudahkan perbandingan maka beban dipotong sampai nilai 100 kN. Pada Gambar 11, terlihat perbandingan balok pada saat kondisi runtuh. Perbandingan bentuk balok pada saat lendutan maksimum, pada balok dengan analisis metode elemen hingga dengan sifat material dan sifat geometri non linier terjadi sendi plastis ditengah bentang balok (Gambar 11 (b)) sedangkan pada balok dengan analisis metode elemen hingga dengan sifat material linier dan sifat geometri non linier (Gambar 11 (b)), tidak terjadi sendi plastis ditengah bentang balok. Hal ini membuktikan bahwa dalam analisis dengan material linier tidak menghasilkan adanya sendi plastis.



(a) Hasil Eksperimen



(b) FEM-material non linier



(c) FEM-material linier

Gambar 11 . Kondisi Balok saat Lendutan Maksimum

KESIMPULAN

Dari hasil analisis dan eksperimen, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Model elemen hingga yang diusulkan dapat memodelkan eksperimen balok bundar diisi beton dengan sangat baik.
2. Hasil beban- lendutan analisis metode elemen hingga skala penuh dengan sifat material hasil eksperimen bersesuaian dengan hasil eksperimen.
3. Bentuk spesimen hasil eksperimen dan hasil analisis elemen hingga skala penuh pada saat beban runtuh hampir sama, tetapi hasil elemen hingga tidak dapat memodelkan buckling.
4. Penyederhanaan model elemen hingga dengan model setengah bentang balok (model setengah/Half Model) dan juga hasil dari model setengah penampang setengah bentang balok (model seperempat/Quarter Model) didapatkan hasil yang sama persis..
5. Pengaruh sifat linier material baja dan beton menghasilkan hasil yang linier dimana kekakuan awal sangat tinggi.
6. Pada analisis metode elemen hingga dengan sifat material dan sifat geometri linier didapatkan hasil balok pada kondisi runtuh tidak menghasilkan sendi plastis tengah bentang.
7. Pada analisis metode elemen hingga dengan sifat material dan sifat geometri non linier

didapatkan hasil balok pada kondisi runtuh menghasilkan sendi plastis tengah bentang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas segala fasilitas penelitian yang diberikan oleh Prof. Akihiko Kawano, Departement of Architecture, Kyushu University, Japan.

DAFTAR PUSTAKA

- Effendi, M.K. et al. (2015). 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*, 22(86), pp.86_33-86_45.
- Elchalakani, M. et al. (2001). Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending. *Journal of Constructional Steel Research*, 57(11), pp.1141-1168.
- Gho, W. M., & Liu, D. (2004). Flexural behaviour of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 60(11), 1681-1696.
- Han, L. H., et al. (2006). Further study on the flexural behaviour of concrete-filled steel

- tubes. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(6), 554-565.
- Lu, Y. & D. Kennedy. (1994). "Flexural Behaviour of Concrete filled Hollow Structural Sections." *Canadian Journal of Civil Engineering* 21(1): pp. 11-130.
- Oyawa, W.O., et al. (2004). Flexural response of polymer concrete filled steel beams. *Construction and Building Materials*, 18(6), pp.367-376.
- Oyawa, W.O., et al. (1995). "Flexural deformation characteristics of filled steel beams subjected to pure bending", *J. Struct. Engrg., JSCE*, 45A, 105-116.
- Wheeler, A. and R. Bridge (2003). Thin-walled steel tubes filled with high strength concrete in bending. Engineering Foundation Conference, *Composite Construction V*, Kruger, South Africa.
- Marc, M. Mentat (2012) *User's Guide*, AE, MSC. Software Corporation, 2.