

## VARIASI DIAMETER TERHADAP KEMAMPUAN *BUCKLING* PADA KOLOM BERTINGKAT

Sufiyanto\*

### Abstraksi

Salah satu cara untuk mengurangi defleksi lateral yang terjadi pada sebuah kolom adalah dengan meningkatkan kekakuan kolom. Cara yang digunakan untuk memperbesar kekakuan kolom adalah dengan membuat kolom bertingkat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi diameter kecil kolom bertingkat terhadap kemampuan menahan defleksi lateral dan perubahan berat yang ditimbulkan dengan peningkatan diameter.

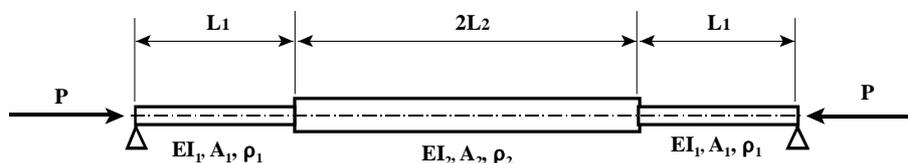
Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan diameter kecil kolom bertingkat akan meningkatkan kekakuan sehingga defleksi lateral berkurang. Tingkat penurunan rasio defleksi yang besar terjadi pada kolom bertingkat yang memiliki rasio massa  $\bar{M} \leq 0.8$

**Kata Kunci :** Kekakuan Kolom, Kolom Bertingkat, Defleksi Lateral

### PENDAHULUAN

Kolom tumpuan sederhana yang mengalami *buckling* mempunyai distribusi momen bending terbesar di tengah-tengah panjang kolom dan terkecil di ujung kolom, karena defleksi lateral terbesar yang dialami kolom terjadi di tengah panjang kolom. Dengan adanya hal tersebut maka timbul suatu gagasan untuk membuat sebuah kolom yang berbentuk tirus yang membesar dari ujung sampai di tengah panjang kolom, dimana bentuk tirus ini berfungsi sebagai penguat pada bagian tengah kolom. Kolom dengan bentuk tirus ini dapat lebih efisien karena memiliki massa yang lebih kecil dibandingkan dengan kolom dengan penampang seragam untuk menahan beban buckling yang sama.

Kekurangan yang timbul pada kolom berbentuk tirus adalah tingkat kesulitan dalam proses pembuatannya lebih besar dibandingkan dengan kolom berpenampang lurus. Untuk mengantisipasi hal tersebut maka kolom dengan penampang bertingkat di bagian tengahnya seperti ditunjukkan pada gambar dibawah merupakan pendekatan dari kolom berbentuk tirus. Bentuk geometri yang bertingkat ini sangat potensial untuk meningkatkan efisiensi kolom tirus tanpa mengakibatkan kompleksitas pada proses pembuatannya.



**Gambar 1. Kolom Bertingkat Tumpuan Sederhana dengan Penampang Konstan**

Effisiensi kolom ditentukan oleh rasio optimum antara panjang bagian bertingkat ditengah dan bagian terluar berdasarkan beban buckling yang terjadi dan perubahan massa yang dimiliki dibandingkan kondisi kolom dengan penampang merata. Pada kenyataannya

\* Dosen Jurusan Mesin Fak. Teknik Univ. Merdeka Malang

bahwa apabila panjang bagian bertingkat bertambah panjang maka beban buckling yang mampu diterima dan massa kolomnya secara keseluruhan juga akan bertambah besar. Tetapi pada kondisi tertentu dimana rasio antara panjang bagian bertingkat dan bagian terluarnya mencapai optimum yang terjadi adalah penambahan beban buckling lebih signifikan dibandingkan dengan penambahan massa kolom.

Untuk meningkatkan efisiensi kolom usaha yang dapat dilakukan adalah dengan menambahkan penguat pada bagian tengah kolom dan selanjutnya disebut kolom bertingkat. Tingkat efisiensi kolom bertingkat dipengaruhi oleh panjang dan diameter penampang bagian bertingkat. Untuk menentukan seberapa besar tingkat efisiensi yang dapat dicapai, maka perlu dilakukan analisis *buckling* pada kolom dengan bentuk penampang bertingkat berdasarkan variasi diameter.

## **KAJIAN PUSTAKA**

### **Kolom**

Efek *buckling* pada sebuah kolom ditandai dengan terjadinya defleksi lateral akibat pembebanan aksial yang diterima kolom. Defleksi lateral terbesar yang dialami kolom terjadi dibagian tengah-tengah panjang kolom karena momen lentur terbesar terjadi pada bagian tersebut.

Defleksi lateral yang terjadi pada sebuah kolom berdasarkan rumus Euler-*buckling* (Popov, 1986) dipengaruhi oleh kondisi tumpuan, panjang dan kekakuan kolom. Kekakuan kolom ditentukan oleh nilai modulus elastisitas bahan (E) dan nilai inersia penampang (I) berdasarkan bentuk penampang yang dimiliki oleh kolom.

Adapun usaha untuk meningkatkan kekakuan kolom dilakukan dengan cara memperbesar inersia penampang kolom secara keseluruhan atau dengan menambahkan penguat pada bagian yang dianggap kritis. Penguat pada kolom diberikan pada bagian tengah-tengah panjang kolom karena defleksi terbesar terjadi pada bagian tersebut. Penurunan defleksi akibat adanya penguat tersebut sangat ditentukan oleh seberapa panjang dan besarnya penambahan inersia penampang dari penguat yang diberikan pada kolom tersebut.

Kolom bertingkat adalah salah satu usaha untuk meningkatkan kekakuan kolom, dimana bagian tengah kolom mempunyai penampang yang lebih besar dibandingkan dengan penampang bagian ujung-ujungnya. Peningkatan kekakuan yang dihasilkan ditentukan oleh panjang dan perubahan penampang dari bagian bertingkat pada kolom tersebut.

### **Effisiensi Kolom**

Berdasarkan analisis numeris *buckling* [Mark S. Lake dan Martin Mikulas, Jr., 1991], kolom bertingkat mempunyai nilai efisiensi kolom. Nilai efisiensi kolom ditentukan oleh peningkatan beban kritis *buckling* pada kolom bertingkat dibandingkan beban kritis

*buckling* pada kolom penampang merata dengan penambahan massa atau berat yang terjadi seminimal mungkin. Sebuah kolom bertingkat mempunyai efisiensi yang besar apabila terjadi peningkatan beban kritis *buckling* yang signifikan dengan penambahan berat yang minimal. Panjang dan penambahan inersia penampang pada bagian bertingkat akan menentukan tingkat efisiensi kolom.

Dalam menentukan efisiensi kolom, digunakan beberapa parameter non dimensi sebagai berikut :

Rasio kolom bertingkat ( $\alpha$ ) :

$$a = \frac{l_2}{l_1 + l_2} \quad (1)$$

dimana  $\alpha$  = merupakan perbandingan antara panjang bagian bertingkat ( $l_2$ ) dan panjang keseluruhan kolom ( $l_1 + l_2$ )

Rasio kekakuan bending ( $\beta$ ) :

$$b = \frac{(E.I)_2}{(E.I)_1} \quad (2)$$

dimana  $\beta$  = merupakan perbandingan antara kekakuan bending bagian bertingkat dengan kekakuan bending bagian ujung kolom

Beban kritis kolom bertingkat :

$$\bar{P}_{cr} = \frac{P_{cr}}{\frac{p^2(E.I)_1}{4.(l_1 + l_2)^2}} \quad (3)$$

dimana  $\bar{P}_{cr}$  = merupakan beban *buckling* yang terjadi untuk kolom bertingkat dibandingkan dengan beban *buckling* untuk kolom dengan penampang seragam yang mempunyai kekakuan bending  $(E.I)_1$ .

Parameter-parameter diatas berhubungan dengan efisiensi kolom berdasarkan pertimbangan beban kritis *buckling* yang mampu diterima. Ada dua parameter non dimensi tambahan yang digunakan untuk menentukan efisiensi kolom berdasarkan massa yang dimiliki oleh kolom, yaitu :

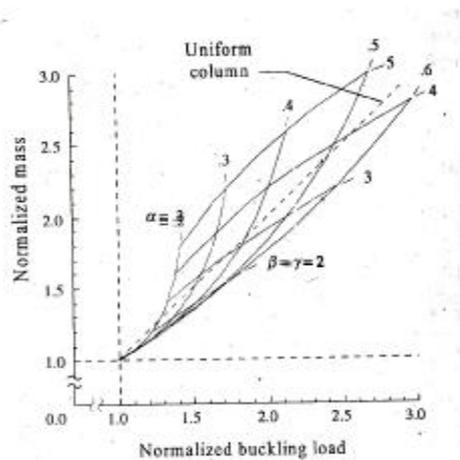
$$g = \frac{r_2 \cdot A_2}{r_1 \cdot A_1} \quad (4)$$

dimana  $\gamma$  = merupakan perbandingan massa per unit panjang bagian bertingkat dibandingkan bagian ujung.

$$\bar{M} = \frac{r_1 \cdot A_1 \cdot l_1 + r_2 \cdot A_2 \cdot l_2}{r_1 \cdot A_1 \cdot (l_1 + l_2)} \quad (5)$$

dimana  $\bar{M}$  = merupakan perbandingan massa yang dimiliki oleh kolom bertingkat dengan kolom penampang seragam dimana panjang kedua kolomnya sama.

Dari hasil analisa numerik pada buckling kolom bertingkat tumpuan sederhana dengan penampang konstan [Mark S. Lake dan Martin Mikulas, Jr., 1991] diperoleh grafik hubungan antara beban buckling dan massa seperti pada gambar dibawah.



**Gambar 1. Grafik Hubungan Beban Buckling Dan Massa Kolom Untuk  $0,2 < \alpha < 0,6$**

Dari gambar grafik diatas dapat dijelaskan sebagai berikut. Garis miring putus-putus menggambarkan kondisi kolom dengan penampang seragam, dimana massa yang dimiliki oleh kolom akan meningkat seiring dengan peningkatan beban bucklingnya. Untuk kolom bertingkat dengan  $\alpha = 0,2$  beban buckling dapat meningkat sampai mendekati 1,3 kali dan massa yang dimilikinya lebih kecil dibandingkan kolom penampang merata. Tetapi apabila beban bucklingnya ditingkatkan lebih dari 1,3 maka yang terjadi adalah kolom bertingkat akan mempunyai massa yang lebih besar dibandingkan dengan kolom penampang merata. Nilai  $\alpha$  pada grafik ini ditentukan untuk  $\alpha = 0,2$  sampai dengan  $\alpha = 0,6$ .

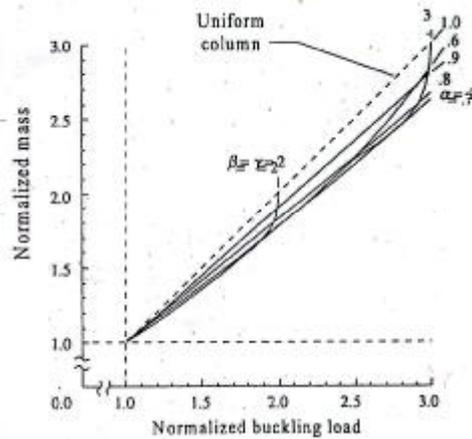
Effisiensi kolom terjadi apabila kolom bertingkat dapat menunjukkan peningkatan beban buckling dan massa yang dimilikinya masih dibawah kolom penampang merata dengan panjang yang sama.

Effisiensi juga dapat ditentukan berdasarkan kekakuan *bending* yang dimiliki oleh kolom bertingkat. Kekakuan *bending* ( $\beta$ ) ditentukan oleh besarnya perubahan inersia penampang kolom bagian bertingkat dibandingkan dengan penampang awal. Dengan bertambahnya kekakuan *bending* maka beban kritis buckling dan massa kolom bertingkat juga meningkat. Dari gambar 4 dapat dilihat bahwa untuk  $\beta = 2$ , peningkatan beban buckling kritis yang dialami oleh kolom bertingkat tidak diikuti oleh peningkatan massa yang

signifikan dan massa yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan massa yang dimiliki oleh kolom dengan penampang merata.

Untuk  $\beta = 3$ , apabila peningkatan beban kritis buckling yang terjadi dibawah 1,8 maka massa yang dimiliki kolom bertingkat lebih besar dibandingkan massa kolom dengan penampang merata. Tetapi apabila kenaikan beban kritis buckling yang terjadi dapat melebihi 1,8, massa kolom bertingkat menjadi lebih kecil.

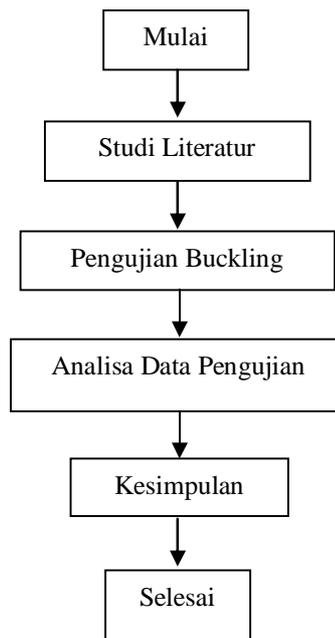
Dibawah ini ditunjukkan hubungan beban buckling dan massa kolom untuk nilai  $\alpha = 0,6$  sampai dengan  $\alpha = 1,0$ .



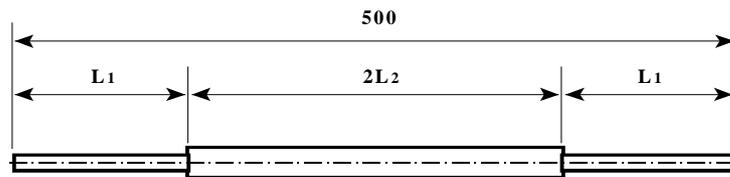
**Gambar 2. Grafik Hubungan Beban Buckling Dan Massa Kolom Untuk  $0,6 < \alpha < 1,0$**

## METODOLOGI PENELITIAN

### Diagram Alir Penelitian



### Dimensi Spesimen Uji



**Gambar 3. Dimensi Spesimen**

### Fasilitas dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Fakultas Teknik Jurusan Mesin Universitas Merdeka Malang.



**Gambar 4. Alat Uji Buckling**

### PEMBAHASAN

#### Data Hasil Pengujian

**Tabel 1. Defleksi Rata-Rata Dengan Tumpuan Jepit - Jepit**

Beban (Kg)	Defleksi Rata-rata ( $d$ ) (mm)				
	$\text{Ø}=10\text{mm}$	$\text{Ø}_2=9\text{mm}$	$\text{Ø}_2=8\text{mm}$	$\text{Ø}_2=7\text{mm}$	$\text{Ø}_2=6\text{mm}$
3	0.04	0.06	0.07	0.11	0.14
6	0.07	0.12	0.14	0.20	0.23
9	0.15	0.19	0.26	0.31	0.38
12	0.24	0.27	0.35	0.40	0.50
15	0.31	0.34	0.46	0.57	0.73

**Tabel 2. Defleksi Rata-Rata Dengan Tumpuan Jepit - Engsel**

Beban (Kg)	Defleksi Rata-rata ( $d$ ) (mm)				
	$\text{Ø}=10\text{mm}$	$\text{Ø}_2=9\text{mm}$	$\text{Ø}_2=8\text{mm}$	$\text{Ø}_2=7\text{mm}$	$\text{Ø}_2=6\text{mm}$
3	0.06	0.07	0.09	0.14	0.19
6	0.11	0.18	0.20	0.26	0.33
9	0.18	0.29	0.36	0.39	0.55
12	0.32	0.37	0.47	0.62	0.71
15	0.37	0.56	0.64	0.85	0.94

**Tabel 3. Defleksi Rata-Rata Dengan Tumpuan Engsel – Engsel**

Beban (Kg)	Defleksi Rata-rata ( d ) (mm)				
	Ø=10mm	Ø <sub>2</sub> =9mm	Ø <sub>2</sub> =8mm	Ø <sub>2</sub> =7mm	Ø <sub>2</sub> =6mm
3	0.08	0.09	0.14	0.19	0.23
6	0.13	0.21	0.22	0.35	0.43
9	0.24	0.28	0.44	0.52	0.65
12	0.37	0.42	0.54	0.77	0.94
15	0.44	0.61	0.74	0.95	1.24

**Tabel 4. Hasil Perhitungan Penelitian**

Ø <sub>1</sub> (mm)	Ø <sub>2</sub> (mm)	I <sub>1</sub> (mm <sup>4</sup> )	I <sub>2</sub> (mm <sup>4</sup> )	M <sub>1</sub> (mm <sup>3</sup> )	M <sub>2</sub> (mm <sup>3</sup> )	$a = \frac{L_1}{L_2}$	$b = \frac{I_2}{I_1}$	$\bar{M} = \frac{M_2}{M_1}$
10	10	490.625	490.625	50240	50240.0	0.469	1.000	1.000
10	9	490.625	321.899	50240	19075.5	0.469	0.656	0.899
10	8	490.625	200.960	50240	15072.0	0.469	0.409	0.808
10	7	490.625	117.799	50240	11539.5	0.469	0.240	0.729
10	6	490.625	63.585	50240	8478.0	0.469	0.129	0.660

Perbandingan defleksi pada beban ( d ) =  $\frac{d_2}{d_1}$

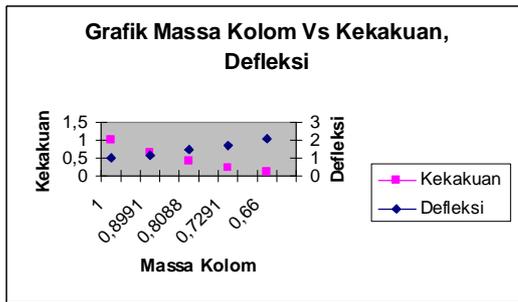
Dari hasil penelitian pengujian buckling maka dapat diketahui perbandingan defleksi antara kolom tak bertingkat dan kolom bertingkat. Sehingga dapat ditabelkan pada tabel dan gambar grafik berikut :

**Tabel 5. Rasio Defleksi**

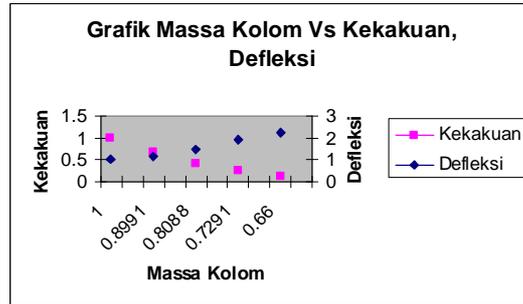
$\bar{M} = \frac{M_2}{M_1}$	$b = \frac{I_2}{I_1}$	Rasio defleksi dengan tumpuan jepit-jepit pada pembebanan					Rasio defleksi dengan tumpuan engsel-jepit pada pembebanan					Rasio defleksi dengan tumpuan engsel-engsel pada pembebanan				
		3	6	9	12	15	3	6	9	12	15	3	6	9	12	15
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,90	0,66	1,50	1,71	1,27	1,13	1,10	1,17	1,64	1,61	1,16	1,51	1,13	1,62	1,17	1,14	1,39
0,81	0,41	1,75	2,00	1,73	1,46	1,48	1,50	1,82	2,00	1,47	1,73	1,75	1,69	1,83	1,46	1,68
0,73	0,24	2,75	2,86	2,07	1,67	1,84	2,33	2,36	2,17	1,94	2,30	2,38	2,69	2,17	2,08	2,16
0,66	0,13	3,50	3,29	2,53	2,08	2,35	3,17	3,00	3,06	2,22	2,54	2,88	3,31	2,71	2,54	2,82

Dari table rasio defleksi (table 5.) dengan kondisi tumpuan yang berbeda, dapat dibuat grafik perubahan massa kolom terhadap kekakuan dan defleksi lateral pada kolom. Grafik yang ditampilkan untuk pembebanan aksial pada kolom 12 kg dan 15 kg, sebagai berikut :

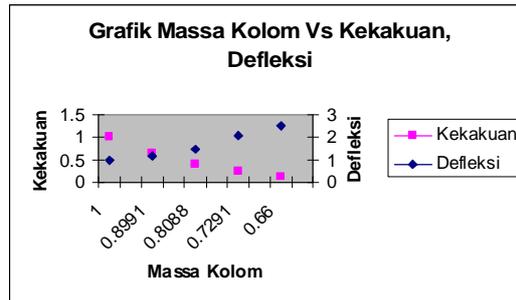
§ Pembebanan 12kg



a. Jepit-jepit

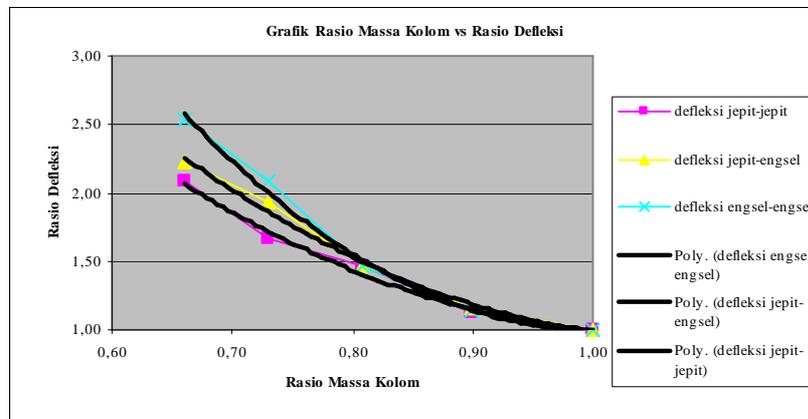


b. Engsel-jepit



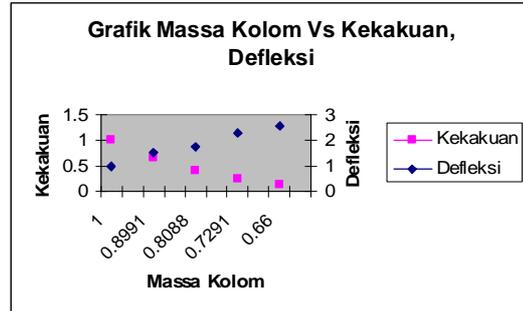
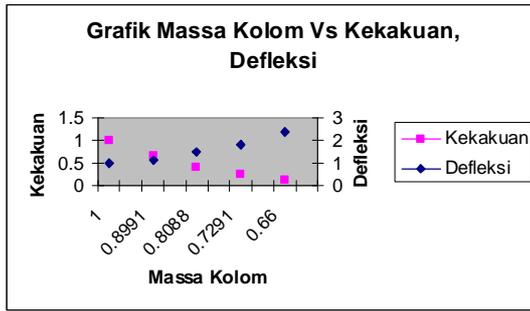
c. Engsel-engsel

**Grafik 1. Massa Vs Kekakuan & Defleksi Pada Pembebanan 12 kg**



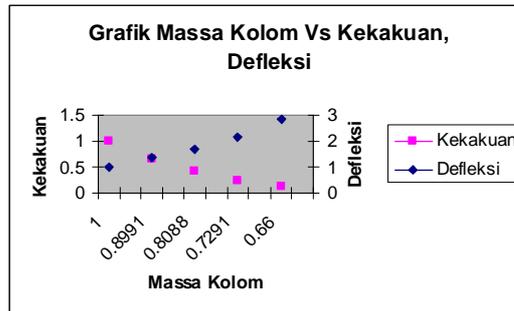
**Grafik 2. Perbandingan Jepit-jepit, Jepit-engsel, Engsel-engsel Pada Pembebanan 12 kg**

§ Pembebanan 15kg



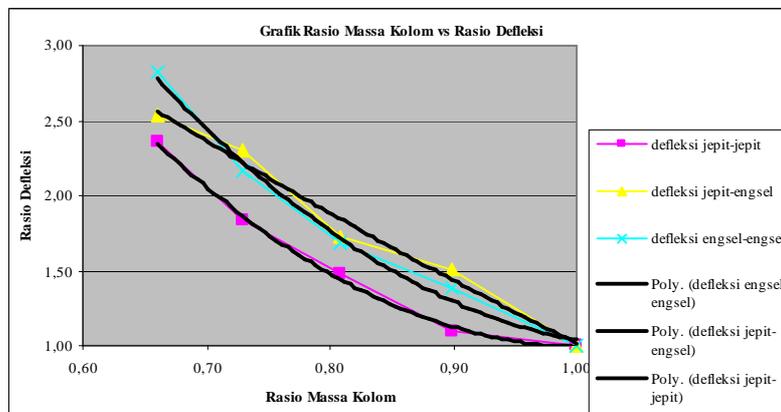
a. Jepit-jepit

b. Engsel-jepit



c. Engsel-engsel

**Grafik 3. Massa Vs Kekakuan & Defleksi Pada Pembebanan 15 kg**



**Grafik 4. Perbandingan Jepit-jepit, Jepit-engsel, Engsel-engsel Pada Pembebanan 15 kg**

Dari data hasil pengujian yang diperoleh seperti ditunjukkan pada tabel 1 s/d 3 dapat dinyatakan bahwa dengan kenaikan beban aksial tekan yang diberikan pada batang kolom mengakibatkan defleksi lateral yang terjadi semakin meningkat. Dengan perubahan diameter pada kolom bertingkat menunjukkan bahwa semakin besar diameter kolom maka defleksi lateral yang terjadi pada kolom bertingkat akan semakin kecil. Peningkatan diameter kolom mengakibatkan kekakuan kolom semakin besar karena inersia penampang kolom meningkat. Kekakuan kolom yang besar merupakan hambatan bagi kolom untuk mengalami deformasi, dalam hal ini defleksi lateral pada kolom.

Perubahan tumpuan pada kolom juga mempengaruhi nilai defleksi lateral pada kolom. Pada pembebanan yang sama, kolom dengan tumpuan jepit menunjukkan defleksi lateral yang lebih kecil dibandingkan kolom dengan tumpuan engsel. Kombinasi tumpuan jepit-jepit pada ujung kolom akan menghasilkan defleksi lateral yang lebih kecil dibandingkan tumpuan engsel-jepit dan tumpuan engsel-engsel. Dengan tumpuan jepit, ujung kolom akan menerima reaksi momen yang dapat menahan terjadinya deformasi yang besar pada kolom, sehingga defleksi lateral yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan tumpuan engsel.

Berdasarkan tabel 4, peningkatan diameter kolom bertingkat akan memperbesar nilai inersia penampang kolom yang akan berpengaruh terhadap peningkatan nilai rasio kekakuan kolom yang ditunjukkan dengan semakin besarnya nilai  $\beta$ . Di lain pihak, kenaikan diameter kolom bertingkat mengakibatkan peningkatan berat kolom yang ditunjukkan dengan peningkatan rasio massa kolom bertingkat.

Dari grafik massa vs kekakuan dan defleksi (grafik 1. dan grafik 3.) dapat dilihat bahwa dengan kenaikan massa kolom akan meningkatkan nilai kekakuan kolom dan sebaliknya terjadi penurunan defleksi lateral yang terjadi pada kolom. Pengaruh jenis tumpuan pada ujung kolom dapat dilihat pada grafik 2 dan grafik 4 dimana kolom dengan tumpuan jepit-jepit memiliki rasio defleksi yang paling kecil dibandingkan defleksi kolom dengan tumpuan engsel-jepit dan engsel-engsel.

Untuk mendapatkan perancangan kolom dengan pengurangan defleksi dengan peningkatan kekakuan yang besar tetapi kolom juga memiliki berat yang dapat dikurangi, maka perlu untuk menentukan berapa diameter kolom bertingkat yang akan digunakan. Dari grafik 2 dan grafik 4 dapat ditentukan bahwa kolom bertingkat yang memiliki rasio massa  $\bar{M} \leq 0.8$  akan menghasilkan tingkat penurunan rasio defleksi yang besar, sedangkan untuk  $\bar{M} > 0.8$  akan menghasilkan tingkat penurunan rasio defleksi yang kecil.

## SIMPULAN

1. Peningkatan diameter kolom bertingkat dapat mengurangi defleksi lateral akibat terjadinya peningkatan nilai kekakuan kolom.
2. Nilai kekakuan kolom yang besar yang diperoleh dengan memperbesar diameter kolom berakibat meningkatnya berat kolom.
3. Tingkat penurunan rasio defleksi yang besar terjadi pada kolom bertingkat yang memiliki rasio massa  $\bar{M} \leq 0.8$ .

## DAFTAR PUSTAKA

Alfred/ Chenoweth, 1991, **Kekuatan Bahan Terapan**, Erlangga, Jakarta

EP Popov, Edisi 2, 1986, **Mekanika Teknik**, Erlangga, Jakarta

Gere & Timoshenko, 2000, **Mekanika Bahan**, Jilid I, Erlangga, Jakarta.

L Singer, Ferdinand, Edisi 3, 1985, **Kekuatan Bahan**, Erlangga, Jakarta.

Mark S Lake & Martin M Mikulas, Jr., 1991, *Buckling and Vibration Analysis of a Simply Supported Column With A Piecewise Constant Cross Section*, NASA Technical Paper 3090.

Roark, Raymond J.; and Young, Warren C., 1982, *Formulas for Stress and Strain*, fifth ed. Mc. Graw-Hill Book Co.

**Column-Buckling**, <http://www.physics.uwstout.edu/statstr/statics/columns/colls61.htm>, 10:00, 20 Desember 2004.

**General Beam Analysis**, [http://www.engineerstoobox.com/doc/etb/mod/stat1/genbeam/genbeam\\_help.html](http://www.engineerstoobox.com/doc/etb/mod/stat1/genbeam/genbeam_help.html), 12:00, 22 Desember 2004.

