

# PERILAKU BALOK BAJA I NON PRISMATIS (TAPERED BEAM)

Titin Sundar<sup>1</sup>, Agoes Soehardjono<sup>2</sup> dan Wisnumurti<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mahasiswa / Program Pasca Sarjana / Jurusan Teknik Sipil / Fakultas Teknik /  
Universitas Brawijaya

<sup>2</sup> Dosen / Jurusan Teknik Sipil / Universitas Brawijaya Malang  
Korespondensi: tari1273@yahoo.co.id

## ABSTRACT

*The use of bending structure components becomes economical if the cross section of the beam follows the moment-diagram form. In this research is a simple beam with concentrated load in the middle of the span, so that the height of the beam is maximum in the middle of span, too. The research purpose is to obtain the bending capacity and to know the buckling behavior for optimum design. The results are compared with theoretical calculations, and ANSYS validation. Concluded of this research that the larger the tapered constant, the greater the bending capacity. The smaller the tapered angle the greater bending capacity. For the same tapered angle with higher  $h_{max}$ , the bending capacity is also greater. The collapse occurring on this beam is the lateral torsional buckling.*

**Keywords:** tapered constant, angle tapered, moment capacity, lateral torsional

## 1. PENDAHULUAN

Balok non prismatis adalah balok yang mempunyai penampang tidak sama di sepanjang bentangnya, Penggunaan komponen struktur lentur menjadi ekonomis jika penampang balok mengikuti bentuk bidang momennya. Contohnya, *simple beam* dengan beban terpusat di tengah bentang diagram momennya *bilinear* [1], oleh karena itu ukuran tinggi balok dibuat bentuk *tapered* sesuai bidang momen. Dasar pemikiran sistem *tapered* ini sederhana bahwa ukuran (tinggi) balok disesuaikan dengan besarnya momen yang terjadi [2]. *Tapered (varying depth)* adalah salah satu teknik baru dalam desain agar ekonomis dan mengurangi berat sendirinya [3].

Dalam penelitian ini balok baja *tapered* dibuat dengan memotong lembaran pelat baja menjadi elemen-elemen pelat untuk sayap dan badan dengan menggunakan pengelasan sehingga membentuk suatu profil I dengan sayap prismatis dan badan non prismatis (badan *tapered*). Konstruksi balok baja ini bertumpuan sederhana dengan dibebani beban perpusat  $P$  ditengah bentang.

Tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai menganalisis kapasitas lentur balok baja profil I non prismatis (*tapered I beam*) dari berbagai bentuk geometri yang berbeda dengan volume yang sama sehingga diketahui kapasitas yang maksimum, dan mendapatkan perilaku tekuk akibat lentur yang terjadi pada berbagai bentuk model tersebut.

## 2. KAJIAN PUSTAKA

Seperti kita ketahui bahwa balok merupakan kombinasi dari elemen struktur tekan dan elemen struktur tarik. Bagian sayap tekan balok dihubungkan dengan bagian sayap tarik melalui badan balok sehingga dapat mencegah terjadinya ketidakstabilan sayap tekan terhadap tekuk. Komponen tekan dari suatu balok disokong seluruhnya oleh komponen tarik yang stabil. Jadi tekuk global dari komponen tekan tidak akan terjadi sebelum kapasitas momen batas penampang belum tercapai. Namun jika momen  $M$  ditambahkan terus sampai momen kritis  $M_{cr}$  maka saat itulah terjadi tekuk kearah lateral yang disebut sebagai *lateral torsional buckling*

(LTB), yaitu balok mengalami deformasi arah lateral dan berotasi cukup besar secara tiba-tiba sehingga struktur tidak stabil dan terjadilah keruntuhan total.

Besarnya kapasitas lentur/kuat nominal momen lentur dari penampang ditentukan sebagai berikut:

**Kasus 1**, agar penampang dapat mencapai kuat nominal  $M_n=M_p$ , maka penampang harus kompak untuk mencegah terjadinya tekuk lokal. Syarat penampang kompak ditentukan sesuai SNI 03-1729-2002 [4], yaitu  $\lambda$  untuk flens ( $b/2t_f$ ) dan untuk *web* ( $h/t_w$ ) tidak boleh melebihi  $\lambda_p$ . Selain harus kompak, pengaku lateral harus dipasang sehingga panjang bentang tak terkekang  $L$  tidak melebihi  $L_{pd}$  ( $L \leq L_{pd}$ ).

$$L_{pd} = \frac{25000 + 15000 \left(\frac{M_1}{M_2}\right)}{f_y} \times r_y \quad (1)$$

**Kasus 2**, agar penampang dapat mencapai momen plastis  $M_p$ , dengan kapasitas rotasi  $R < 3$ , maka penampang harus kompak dan tidak terjadi tekuk lokal. Pengaku lateral dipasang sehingga  $L < L_p$ .

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{f_y}} r_y \quad (\text{untuk } E = 200000 \text{ MPa}) \quad (2)$$

**Kasus 3**, dalam kasus ini terjadi tekuk torsi lateral untuk penampang kompak ( $\lambda < \lambda_p$ ). Kuat nominal didekati dengan hubungan linear antara titik 1 ( $L_p, M_p$ ) dengan titik 2 ( $L_r, M_r$ ) pada **Gambar 2**. Kuat momen lentur nominal ditentukan :

$$M_n = C_b \left( M_r + (M_p - M_r) \left( \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right) \right) \leq M_p \quad (3)$$

**Kasus 4**, terjadi jika:

$$L_p < L < L_r;$$

$$\lambda_p < (\lambda = b/2t_f) < \lambda_r \text{ (flens tak kompak);}$$

$\lambda_p < (\lambda = h/t_w) < \lambda_r$  (*web* tak kompak), maka kuat momen lentur nominal dihitung berdasarkan keadaan yang paling kritis dari tekuk lokal flens, tekuk lokal *web*, atau tekuk torsi lateral. Untuk membatasi terhadap tekuk lokal flens serta tekuk lokal *web*, SNI 07-1729-2002 [4] merumuskan:

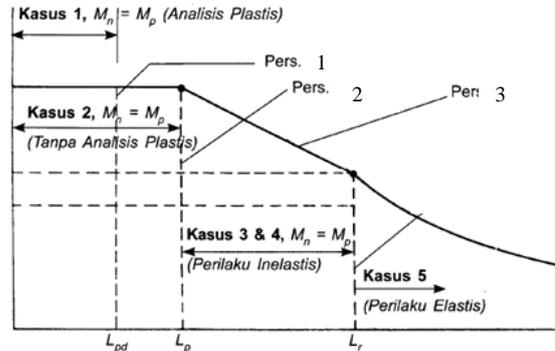
$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \quad (4)$$

Sedangkan kondisi batas untuk tekuk torsi lateral ditentukan berdasarkan:

$$M_n = C_b \left( M_r + (M_p - M_r) \left( \frac{L_r - L}{L_r - L_p} \right) \right) \leq M_p \quad (5)$$

**Kasus 5**, terjadi bila  $L > L_r$ , dan kelangsingan dari flens dan *web* tidak melebihi  $\lambda_r$  (penampang kompak). Kuat nominal momen lentur dalam kondisi ini ditentukan:

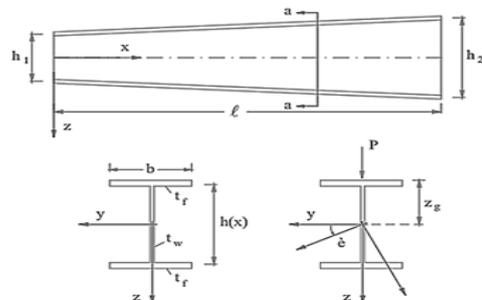
$$M_n = M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 I_y C_w} \quad (6)$$



**Gambar 1.** Kuat momen nominal akibat tekuk torsi lateral

Sumber: Setiawan A [5]

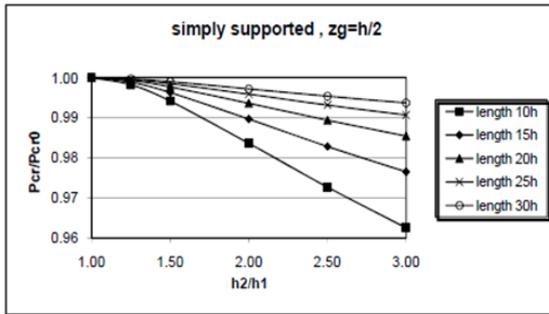
Berdasarkan penelitian Raftoyiannis, IG dan Adamakos T[6] mempelajari stabilitas *tapered I beam* terhadap beban lentur dengan penentuan beban tekuk kritis LTB dari badan *tapered I beams* dengan karakteristik geometrik seperti **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Karakteristik geometrik dari *tapered I-beam*

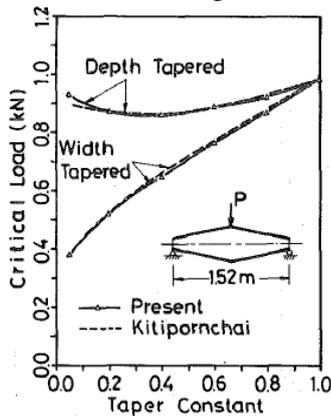
Sumber: Raftoyiannis, IG [6]

Hasil penelitiannya seperti pada **Gambar 3** bahwa rasio beban kritis  $P_{cr}/P_{cr0}$  versus rasio *tapered*  $h_2/h_1$  dengan berbagai variasi panjang yang terbuat dari profil IPE-300. Beban terdiri dari beban terpusat P yang diaplikasikan di tengah bentang pada *top flange* dengan  $z_g = h_0/2$ . Terlihat jelas bahwa rasio *tapered* meningkat dari  $h_2/h_1 = 1$  (*uniform beam*) ke  $h_2/h_1 = 3$  (*tapered beam*), beban kritis  $P_{cr}$  menurun dan bahkan lebih jelas pada kasus balok dengan bentang pendek.



**Gambar 3.** Rasio beban kritis  $P_{cr}/P_{cr0}$  versus rasio taper  $h_2/h_1$  untuk variasi rasio kelangsingan dari *simple supported beam* dengan beban terpusat P diaplikasikan di sayap  
 Sumber: Raftoyiannis, IG [6]

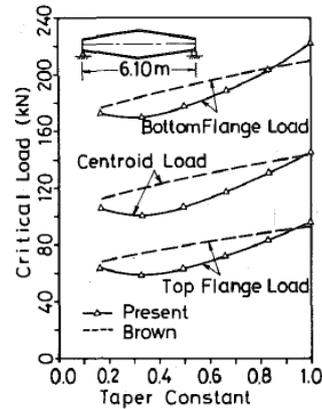
Berdasarkan penelitian Yeong-Bin Yang, A. M. ASCE, dan Jong Dar Yau [7], bahwa beban kritis *tapered I beam* untuk *simple beam* dengan beban terpusat di sayap atas, lebar sayap dan tinggi *web* bervariasi linier dari tengah ke tepi. Hasil kedua kasus ini seperti ditunjukkan **Gambar 4**. Seperti ditunjukkan pada **Gambar 4**, bahwa solusi Yeong sesuai dengan Kitipornchai and Trahair (1972), yaitu untuk *taper constant* mulai 0,1 sampai 0,4 beban kritis turun untuk *depth tapered* kemudian untuk *taper constant* lebih besar dari 0,4 beban kritis naik lagi. *Taper constant* dalam hal ini adalah nilai  $h$  minimum dibanding dengan  $h$  maksimum di tengah bentang.



**Gambar 4.** Beban kritis *tapered beam* dengan beban di sayap atas  
 Sumber: Yang, YB [7]

Yeong juga meneliti pengaruh variasi posisi pembebanan pada balok tapered. Pengaruh / efek dari posisi beban terpusat pada balok *tapered*, yaitu bahwa beban kritis semakin kecil secara berurutan jika posisi beban dilakukan di *bottom flange*, *centroid*, dan

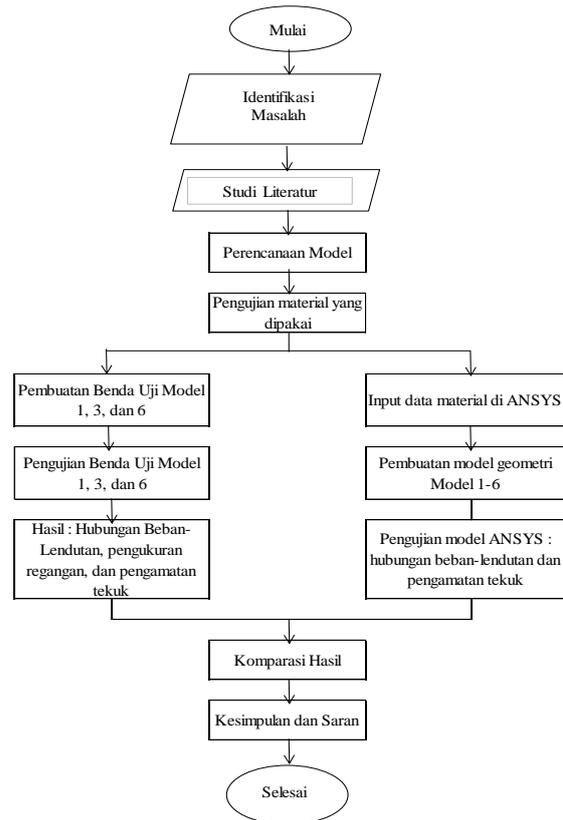
*top flange* dengan *trend line* yang sama seperti terlihat pada **Gambar 5**.



**Gambar 5.** Beban kritis *tapered beam* dengan variasi posisi beban  
 Sumber: Yang, YB [7]

### 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1. Diagram Alir Penelitian



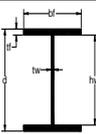
**Gambar 6.** Diagram alir penelitian.

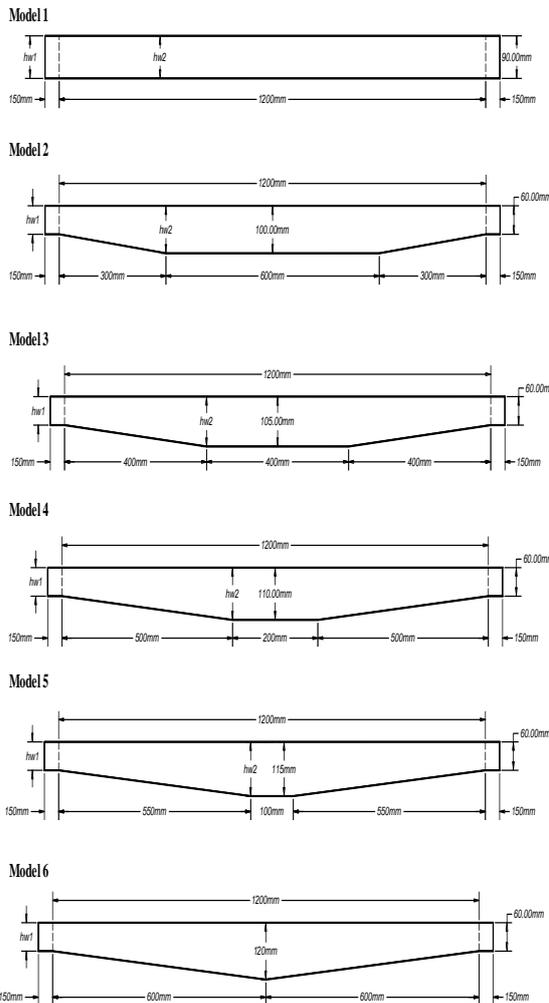
#### 3.2. Rancangan Penelitian

Ada 6 model benda uji dengan ukuran seperti ditunjukkan **Tabel 1** dan model variasi *tapered* ditunjukkan **Gambar 7**. Pengujian eksperimen yang dilakukan adalah model 1, 3,

dan 6 dengan jumlah benda uji 2 buah untuk masing-masing model.

**Tabel 1.** Ukuran model benda uji

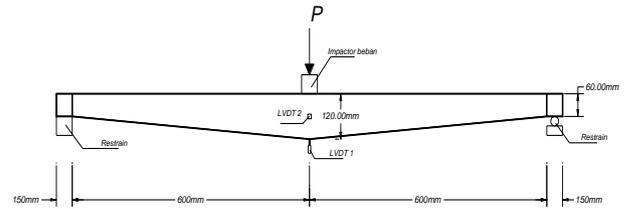
Model	Sudut tapered ( $\theta$ ) o	Tinggi web tengah ( $h_{max}$ ) mm	Volume model mm <sup>3</sup>	Ukuran penampang	Sketsa penampang
1	90	90	576000	Tebal flens (tf) : 3 mm	
2	7.60	100	576796	Lebar flens (bf) : 50 mm	
3	6.42	105	576757	Tebal web (tw) : 2 mm	
4	5.71	110	576148	Tinggi web tepi ( $h_{min}$ ) : 60 mm	
5	5.71	115	576823	Panjang balok (L) : 135 mm	
6	5.71	120	576898		



**Gambar 7.** Model dan ukuran benda uji

### 3.3 Pengujian Eksperimen

Untuk uji tarik material, model uji sesuai SNI 07-0371-1998[8] digunakan UTM (*Universal Testing Machine*) dan untuk uji specimen Model digunakan *Loading frame* dan *hydraulic jack* dengan *setting up* seperti berikut:



**Gambar 8.** Ilustrasi *setting up* pengujian

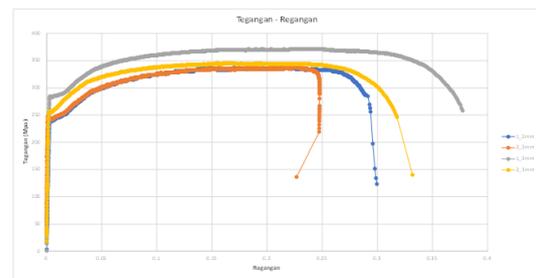
## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Uji Tarik

Dari hasil pengujian ini didapatkan bentuk putus pelat baja seperti **Gambar 9** dan kurva hubungan tegangan-regangan seperti **Gambar 10**, dengan rekapitulasi hasil uji ditunjukkan pada **Tabel 2**.



**Gambar 9.** Bentuk putus uji tarik pelat baja



**Gambar 10.** Kurva hubungan Tegangan-regangan

**Tabel 2.** Rekapitulasi Hasil Uji Tarik Pelat

Nama Benda Uji	Tegangan leleh (Mpa)	Tegangan ultimat (Mpa)	Modulus elastisitas (Mpa)
No 1 Tebal 2mm	236.68	336.96	116209
No 2 Tebal 2mm	236.68	336.96	757478
No 1 Tebal 3mm	281.307	371.38	124988
No 2 Tebal 3mm	252.24	345.23	194406

### 4.2 Hasil Pengujian

#### 4.2.1 Pembahasan analitis/teoritis

Perhitungan momen kapasitas penampang sesuai dengan syarat-syarat yang ada di SNI 03-1729-2002[4] untuk balok

prismatis (sudut *tapered* mendekati 90°) dan untuk balok non prismatis (*tapered*) dengan menggunakan tinggi penampang di tengah bentang ( $h_{max}$ ). Berdasarkan perhitungan analitis ini, dari Model 1 sampai dengan Model 6 termasuk kasus 3 yaitu terjadi tekuk torsi lateral untuk penampang kompak ( $\lambda < \lambda_p$ ) dengan kuat momen lentur nominal sesuai persamaan (3). Hasil hitungan disajikan pada **Tabel 3**, tekuk torsi lateral terjadi karena  $L < L_p$ .

**Tabel 3.** Momen kapasitas penampang

Model	Sudut $\theta$ °	<i>Tapered constant</i> (A/V)	Mn (kNm)
1	≈ 90	0.83	4.22
2	7.60	0.87	4.80
3	6.42	0.88	5.02
4	5.71	0.90	5.24
5	5.71	0.92	5.47
6	5.71	0.94	5.69

Seperti terlihat pada **Tabel 3**, bahwa makin kecil sudut *tapered* maka makin besar momen kapasitasnya. Untuk Model 4, 5, dan 6 dengan sudut *tapered* yang sama kapasitasnya semakin juga semakin besar hal ini karena  $h_{max}$  model 4, 5, dan 6 juga makin besar, sehingga dalam hal ini Model 6 dengan bentuk badan *tapered* sesuai diagram bidang momen yang mempunyai kapasitas maksimum. Sudut *tapered* adalah sudut yang dibentuk oleh selisih  $h_{max}$  dan  $h_{min}$  dibanding panjang horisontalnya, misal untuk Model 6, sudut  $\theta = \arctan((120-60)/600) = 5.71^\circ$ . *Tapered constant* disini adalah perbandingan luas penampang ditengah bentang dibanding dengan volume total (dalam hal ini volume benda uji adalah tetap/konstan). Jadi makin tinggi  $h_{max}$  di tengah bentang makin besar luas penampangnya dan makin besar pula *tapered constant*nya, makin besar *tapered constant* semakin besar kapasitasnya.

### 5.2.2 Pembahasan eksperimen

Adapun *Setting up* pengujian dilakukan seperti pada **Gambar 10**. *Strain gage* dipasang pada sayap atas dan sayap bawah untuk mendapatkan nilai regangan. Perhitungan momen diambil pada saat nilai regangan sesaat sebelum leleh, yaitu pada saat awal mulai terjadi tekuk sebelum regangan mencapai regangan leleh ( $\epsilon_y = 0,0013$ ). Nilai momen didapatkan dari gaya *C* (*compression*) atau gaya *T* (*tension*) dikalikan lengan momennya. Nilai gaya *C* atau *T* ini diperoleh dari nilai regangan dikalikan *E* (modulus elastisitas)

dikalikan luas penampangnya.

Hasil perhitungan momen disajikan pada tabel 4, bahwa momen semakin besar dari model 1, 3, dan 6. Untuk model 1 hasil eksperimen hampir sama dengan teoritis selisih 0.72% lebih rendah dari teoritis. Untuk model 3 hasil eksperimen 5.38% lebih tinggi dari teoritis, dan untuk model 6, hasil eksperimen 7.21% lebih tinggi dari teoritis.



**Gambar 11.** *Setting up* pengujian

Dalam eksperimen ini kekakuan sayap dan badan penampang dibuat kompak untuk mencegah terjadinya tekuk lokal pada sayap dan badan. *Stiffner* dipasang hanya pada tumpuan sehingga  $L > L_p$  yang disyaratkan, dengan  $L$  adalah panjang bentang tak terkekang. Jadi seperti yang terjadi pada analisa perhitungan teoritis, bahwa terjadi tekuk torsi lateral untuk penampang kompak. Terjadinya tekuk torsi lateral ditandai dengan mulai tidak seimbang (ketidakstabilan) regangan pada sayap atas sayap bawah.

**Tabel 4.** Momen sesaat sebelum leleh ( $M_n$ )

Model	Sudut $\theta$ °	<i>Tapered constant</i> (A/V)	Benda uji 1	Benda uji 2	Rata-rata
1	≈ 90°	0.83	4.06	4.32	4.19
3	6.42	0.88	5.44	5.13	5.29
6	5.71	0.94	6.39	5.81	6.10

Tekuk torsi lateral yaitu suatu keruntuhan yang terjadi jika momen  $M$  ditambahkan terus sampai momen kritis  $M_{cr}$  maka saat itulah terjadi tekuk kearah lateral yang disebut sebagai *lateral torsional buckling* (*LTB*), yaitu balok mengalami deformasi arah lateral dan berotasi cukup besar secara tiba-tiba sehingga struktur tidak stabil dan terjadilah keruntuhan total seperti pada **Gambar 12**.



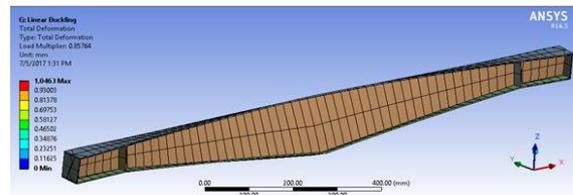
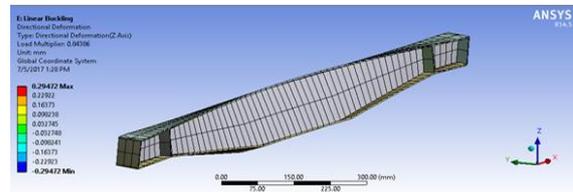
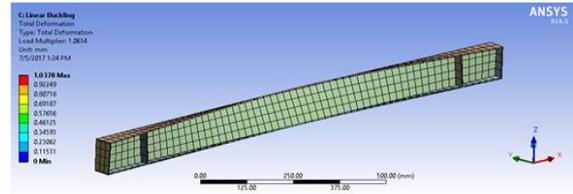
Gambar 12. Keruntuhan total pada benda uji

### 5.2.3 Validasi dengan ANSYS

Pada tahapan *Engineering Data*, didefinisikan material jenis *Structural Steel Nonlinier* dengan sistem *multilinier isotropic*, sehingga bisa dimasukkan nilai tegangan-regangan yang dihasilkan dari pengujian material. Tahap *Geometry*, didefinisikan geometri dari model benda uji yang sebelumnya dibuat 3D dengan *Autocad*, kemudian hasilnya diimport ke *ANSYS* dengan format *iges*. Tahap *Model dan Set Up*, didefinisikan *contact body* antar elemen, jenis perletakan, dan *load step* yang akan diaplikasikan pada model benda uji sesuai dengan tahapan pemberian beban yang dilakukan pada saat pengujian eksperimen., agar perilakunya menyerupai *simple beam*. Dalam tahap ini juga didefinisikan ukuran dan bentuk *mesh* dari model benda uji. Tahap terakhir adalah *solution and result*.

Keruntuhan dari analisis ANSYS ini seperti digambarkan pada Gambar 13 dan perhitungan momen ditabelkan pada Tabel 5. Perhitungan momen dihitung dari hubungan beban-lendutan pada saat  $P$  mencapai kondisi in elastic, pada kondisi ini dilihat nilai tegangannya kemudian diperoleh nilai  $M_n$ .

Dari Tabel 5 juga menunjukkan momen  $M_n$  semakin besar dari model 1, 3, dan 6 dengan dengan nilai momen yang hampir sama dengan perhitungan teoritis SNI 03-1729-2002[4]. Untuk model 1, hasil eksperimen 3.46% lebih tinggi dari ANSYS, untuk model 3 hasil eksperimen 9.07% lebih tinggi dari ANSYS, dan untuk model 6 hasil eksperimen 7.02% lebih tinggi dari ANSYS. Hasil rekapitulasi dari ketiga pengujian ini ditunjukkan pada Tabel 6.



Gambar 13. Keruntuhan benda uji Model 1, 3, dan 6 berdasarkan analisa ANSYS

Tabel 5. Perhitungan momen berdasarkan analisa ANSYS

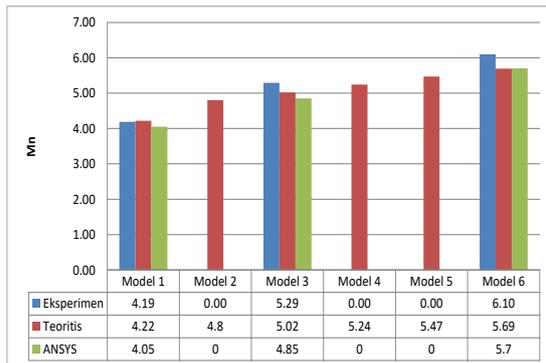
Model	Sudut $\theta$ °	Tapered constant (A/V)	Mn (kNm)
1	≈ 90	0.83	4.05
3	6.42	0.88	4.85
6	5.71	0.94	5.70

Tabel 6. Rekapitulasi hasil pengujian teoritis, eksperimen, dan ANSYS

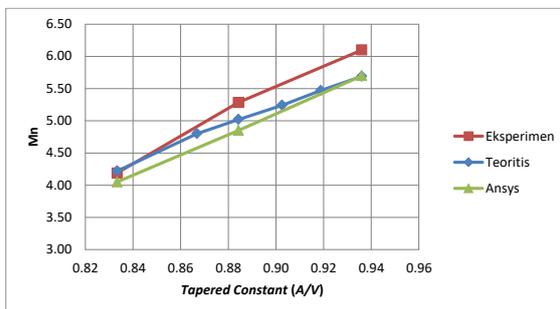
Model	Sketsa Model	Luas penampang	Volume	Mn	Mn	Mn	Tapered	Sudut
		ditengah bentang (A)	model (V)	(Teoritis)	(Eksperimen)	(ANSYS)	constant (A/V)	tapered
		m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	kNm	kNm	kNm		°
1		0.00048	0.000576	4.22	4.19	4.05	0.83	90
2		0.00050	0.00058	4.8	-	-	0.87	7.6
3		0.00051	0.00058	5.02	5.29	4.85	0.88	6.42
4		0.00052	0.00058	5.24	-	-	0.90	5.71
5		0.00053	0.00058	5.47	-	-	0.92	5.71
6		0.00054	0.00058	5.69	6.10	5.7	0.94	5.71

Bahwa berdasarkan pengujian teoritis, eksperimen, maupun ANSYS menunjukkan bahwa semakin besar *tapered constant* kapasitas momen lentur juga meningkat.

Peningkatan kapasitas lentur dari model 1 sampai dengan model 6 ditunjukkan dengan diagram batang pada **Gambar 14**. Bahwa hasil pengujian teoritis, eksperimen, dan ANSYS mempunyai *trend* hampir sama dan hasil pengujian eksperimen lebih tinggi dibanding hasil teoritis dan ANSYS. Kurva hubungan *tapered constant* dengan momen kapasitas disajikan pada **Gambar 15**.



**Gambar 14.** Diagram batang kapasitas lentur dari berbagai model pada pengujian teoritis, eksperimen, dan ANSYS



**Gambar 15.** Kurva hubungan *tapered constant* dan momen kapasitas  $M_n$  untuk berbagai model pada pengujian teoritis, eksperimen, dan ANSYS.

## 6. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dengan perhitungan teoritis sesuai SNI 03-1729-2002 [4], pengujian eksperimen, maupun analisis numerik dengan ANSYS, dapat diambil beberapa kesimpulan seperti berikut:

1. Semakin besar luas penampang dengan volume yang sama (*tapered constant*) maka makin besar kapasitas lenturnya. Atau makin kecil sudut *tapered* kapasitas lenturnya makin besar (Model 1 sampai

dengan Model 3), untuk Model 4 sampai dengan Model 6 mempunyai sudut *tapered* yang sama tetapi  $h_{max}$  makin tinggi (bentuk *tapered* semakin mendekati bentuk diagram momen) maka luas penampang juga makin besar sehingga kapasitas lenturnya juga semakin besar. Peningkatan kapasitas lentur dari balok prismatis ke balok *tapered* ini sekitar 31%. Hasil yang diperoleh dari pengujian eksperimen lebih tinggi dibanding pengujian teoritis maupun ANSYS.

2. Jenis keruntuhan yang terjadi pada balok prismatis dan non prismatis (*tapered*) ini adalah keruntuhan tekuk torsi lateral.

### 6.2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengujian balok *tapered* dengan adanya pengaruh kekangan lateral terhadap kapasitas lentur *tapered beam*.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chen, W.F. and Lui, E. M. Structural Stability Theory and Implementation. New York: Elsevier Science Publishing Co., Inc. 1987.
- [2] Dewobroto, W. Struktur Baja Perilaku, Analisis, dan Desain-AISC 2010. Jakarta: Grand Melia. 2011
- [3] Bhurke, K. N et al. Strength of Welded Plate Girder with Tapered Web. International Journal of Engineering Research and Applications. ISSN: 2248-9622, Vol. 3, Issue 5, pp. 1947-1951. 2013.
- [4] Anonim. Standar Nasional Indonesia 03-1729-2002 Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung. Departemen Pekerjaan Umum. 2002.
- [5] Setiawan, A. Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD (Berdasarkan SNI 03-1729-2002). Jakarta: Erlangga. 2008.
- [6] Raftoyiannis, I. G and Adamakos, T. *Critical Lateral Torsional Buckling Moments I-beams*. The Open Construction and Building Technology Journal, 2010, 4, 105-112.
- [7] Yang, Y. B., ASCE, A. M., and Yau J. D. *Stability of Beam with Tapered I-Sections*. Journal of Engineering Mechanics, vol. 113, No. 9, ©ASCE, ISSN 0733-9399/87/0009-1337/\$01.00. 1987. Paper No. 21798.
- [8] Anonim. Standar Nasional Indonesia 07-0371-1998 Batang Uji Tarik untuk Bahan Logam. Badan Standar Nasional. 1998.