

STUDI PERILAKU WEB POST BUCKLING DAN VIERENDEEL MECHANISM PADA CASTELLATED BEAMS

Tri Widya Swastika¹, Hidajat Sugihardjo² dan Budi Suswanto³

¹Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta, Kampus UI Depok, Phone 021-7270036,

^{2,3}Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Sukulilo Surabaya, Telp 031-5946094

Email: ¹triwidyaswastika@gmail.com, ²hidajat.sugihardjo@gmail.com, ³budi_suswanto@ce.its.ac.id

Abstract

The world needs construction material will castellated Beams profile steel is increasing in line with the human need to get a strong structure, rapid implementation time while still promoting the aesthetic value of the structure. That is because the profile castellated Beams very practical and proven to have advantages over steel usual profile, the stiffness and strength of the profile will increase with increasing high web resulted in the addition of the modulus of section and moment of inertia of the cross section without adding weight profile original (weight profile at the moment greater inertia). But unfortunately, found some failure in the castellated Beams, ie web post buckling and vierendeel mechanism most be special attention from researchers because it is a major failure of the most frequent and more complex in its formulation.

The study compared three types of castellated Beams are hexagonal, octagonal and circular castellated Beams with dimensions and opening the same area where each type has a length of 4 meters under review due to gravity load (distributed load) with eigen-value buckling analysis. Evaluation of web post buckling failure and vierendeel mechanism with the formulation of Aglan and Redwood and Soltani, et al (2011) which will be known typical castellated beam that has the smallest effect due to the influence of such failure to the parameters that have been determined.

From the analysis it can be concluded that due to the distributed load turns web post buckling and vierendeel mechanism greatest influence on octagonal castellated beam while the smallest effect occurs in hexagonal castellated beam.

Keywords: castellated beam, distributed load, web post buckling, vierendeel mechanism, finite element analysis

Abstrak

Kebutuhan dunia konstruksi akan material baja profil Castellated Beams semakin bertambah seiring dengan kebutuhan manusia untuk mendapatkan struktur yang kuat, cepat waktu dalam pelaksanaan namun tetap mengedepankan nilai estetika dari struktur tersebut. Hal tersebut dikarenakan profil Castellated Beams sangat praktis dan terbukti memiliki keunggulan dibandingkan baja profil biasa, yaitu kekakuan dan kekuatan profil akan bertambah seiring penambahan tinggi web yang mengakibatkan penambahan modulus of section dan moment of inersia penampang tanpa menambah berat profil aslinya (berat profil sama dengan momen inersia lebih besar). Namun sayangnya, ditemukan beberapa kegagalan dalam Castellated Beams, yaitu web post buckling dan vierendeel mechanism yang paling menjadi perhatian khusus dari para peneliti karena merupakan kegagalan major yang paling sering terjadi dan lebih kompleks dalam perumusannya.

Penelitian ini membandingkan tiga tipe Castellated Beams yaitu hexagonal, octagonal dan circular Castellated Beams dengan dimensi dan luasan opening yang sama dimana masing-masing tipe memiliki panjang 4 meter yang ditinjau akibat beban gravitasi (distributed load) dengan eigen-value buckling analysis. Evaluasi kegagalan web post buckling dan vierendeel mechanism dengan rumusan dari Aglan and Redwood serta Soltani, et al (2011) yang nantinya akan diketahui tipikal Castellated Beam yang mempunyai pengaruh efek terkecil akibat kegagalan tersebut dengan parameter-parameter yang telah ditentukan.

Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa akibat distributed load ternyata web post buckling dan vierendeel mechanism berpengaruh paling besar pada octagonal Castellated Beam sedangkan pengaruh terkecil terjadi pada hexagonal Castellated Beam.

Kata kunci: castellated beam, distributed load, web post buckling, vierendeel mechanism, finite element analysis

PENDAHULUAN

Kata *castellated* berasal dari pola lubang web yang berbentuk seperti “*castle*”, yang berarti “*built like a castle, having battlements, or regular holes in the walls, like a castle*”, maksudnya adalah “dibangun selayaknya *castle* (benteng) yang kokoh dan kuat [1]. *Castellated Beams* adalah suatu spesifikasi profil yang ditingkatkan kekuatan komponen strukturnya dengan memperpanjang ke arah satu sama lain dan dilas sepanjang pola. *Castellated Beams* ini mempunyai tinggi (h) hampir 50% lebih panjang dari profil awal sehingga meningkatkan nilai momen lentur, momen inersia (I_x), dan modulus section (S_x) [2].

Dalam beberapa tahun terakhir, pertumbuhan penggunaan *Castellated Beams* sangat meningkat dan menjadi *trend* tersendiri untuk alasan praktis, hal ini disebabkan keuntungan dari *castellation* dalam meningkatkan kekakuan lentur vertikal, dari penelitian yang dilakukan oleh Komal dan Pachpor (2010), terbukti efisien untuk bentang sedang bahkan cocok untuk bentang panjang. Selain itu, *Castellated Beams* juga menjadi populer dari segi arsitektural karena *opening web* yang *ter-expose* menampilkan kesan artistik pada bangunan [1].

Diantara beberapa kegagalan yang terjadi pada *Castellated Beams*, *web post buckling* adalah kegagalan yang paling menjadi perhatian khusus dari para peneliti selama beberapa tahun karena lebih kompleks dalam perumusannya [3]. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tipikal *Castellated Beam* yang mempunyai pengaruh efek terkecil dari *web post buckling* dengan parameter-parameter yang telah ditentukan, yang ditinjau dari gaya geser yang terjadi akibat beban gravitasi (*distributed load*).

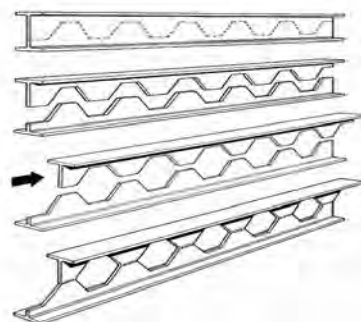
Dasar Teori

Castellated Beams

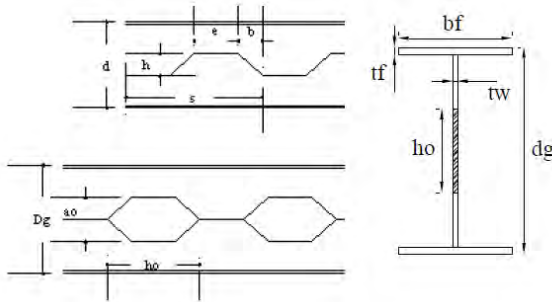
Castellated Beams dibentuk dari profil baja H, I, atau U yang kemudian pada

bagian badannya dipotong memanjang dengan pola zig-zag. Kemudian potongannya digeser atau dibalik setengah bagian profil dan disambung. Penyambungan setengah profil dilakukan dengan cara di las pada bagian “gigi-giginya” sehingga terbentuk profil baru dengan lubang berbentuk segi enam (*hexagonal*), segi delapan (*octogonal*), dan lingkaran (*circular*) [4].

Akibat bertambahnya ketinggian dari bagian badan (*web*) balok, *Castellated Beams* memiliki kekakuan lentur (*bending stiffness*) yang jauh lebih besar dari profil sebelum pemotongan. Kekuatan transversal yang dapat diterima menjadi lebih kecil. Dengan alasan ini, *Castellated Beams* sangat cocok untuk bentang besar. Untuk mencegah tekuk (*buckling*) dari bagian badan (*web*) yang berlubang, ditambahkan *infill plate* pada ujung pertemuan balok kolom.



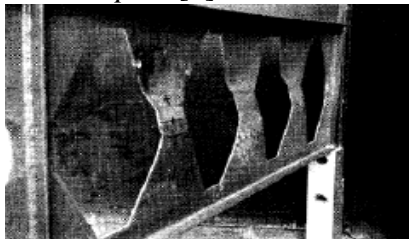
Gambar 1. Proses pembuatan Hexagonal *Castellated Beams* (Grunbauer, 2001)



Gambar 2. Detail Hexagonal Castellated Beam (ASCE journal page 3319)

Web Post Buckling Mechanism

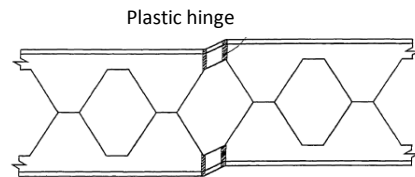
Web post buckling dikenal sebagai kegagalan utama dari Castellated Beams sejak 1996 ketika Zaarour dan Redwood (1996) menguji 12 bentang pendek (3000 mm) dengan tebal web Castellated Beams yang tipis dan lebar web post minimum untuk membuka rasio kedalaman antara 0,18-0,26. Dalam pengujiannya menghasilkan, terjadi double curvature buckling shape pada web post semua spesimen tetapi balok yang mengalami web buckled hanya terjadi single curvature. Hasil tes menunjukkan bahwa beban web post buckling tidak terlalu berpengaruh pada momen/ rasio geser [6]. Kegagalan ini disebabkan oleh beban terpusat yang secara langsung dibebankan melebihi web-post [7].



Gambar 3. Web Post Buckling (Redwood dan Demirdjian, 1998)

Vierendeel Mechanism

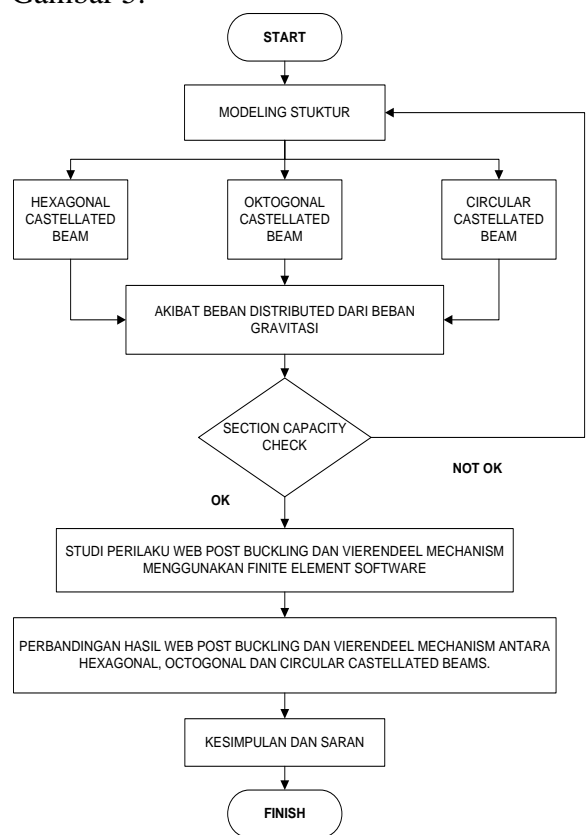
Kegagalan ini berbanding lurus dengan tegangan geser yang cukup tinggi pada balok. Sendi plastis terjadi pada ujung balok (reentrant corners) pada lubang dapat merubah bentuk bagian T (tee section) menjadi seperti jajaran genjang (parallelogram) [5].



Gambar 4. Vierendeel mechanism pada Castellated Beam (Altifillisch 1957 dan Toprac dan Cook 1959)

METODOLOGI

Perilaku web post buckling dan vierendeel mechanism ditunjukkan pada diagram alir Gambar 5.



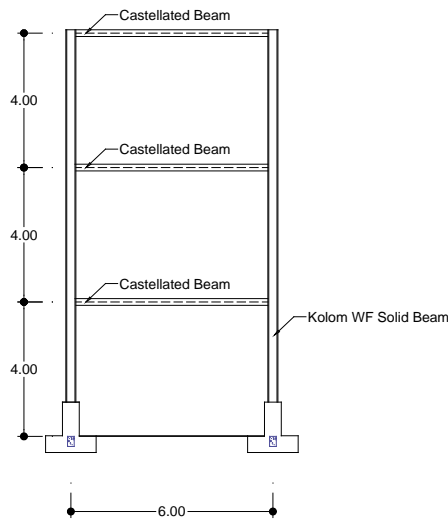
Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

- Baja BJ37
- $f_y = 240 \text{ Mpa}$
- $f_u = 370 \text{ Mpa}$
- $E = 200000 \text{ MPa}$

Permodelan Struktur Pada SAP 2000

Permodelan di SAP 2000 tidak mempertimbangkan *buckling*, sebatas untuk mengetahui gaya-gaya yang bekerja pada elemen *Castellated Beams*, yang nantinya akan dijadikan data input untuk permodelan di *Finite Element Analysis software*.



Gambar 6: Model Struktur

Pola pembebanan yang akan diberikan adalah beban statik gravitasi akibat *dead load*, *live load* dan beban gempa berdasarkan WG 5 tanah lunak. Elemen balok yang ditinjau dalam *finite element software* merupakan elemen balok untuk beban pada lantai terbawah dengan *Boundary Conditions* dan dengan cara *displacement control*.

Tabel 1. Beban Merata yang ditahan oleh balok

Akibat beban lantai	DL	=	2616.6 kg/m'
	LL	=	1500 kg/m'
Akibat beban atap	DL	=	2244.6 kg/m'
	LL	=	600 kg/m'

Tabel 2. Parameter-parameter pada permodelan Castellated Beams

Castellated Beam Profile	d_g	b_f	t_w	t_f	h_o	h_p	e	b	d_w	b_{wc}	p	a_o	$b_o = e$	l_o	A_{hollow} (mm ²)
	mm														
HC 300x100x5.5x8					205	-	51.25	59.45		47.5	221.4	170.15	51.25	110.7	22693.5
CC 300x100x5.5x8	300	100	5.5	8	170.026	-	51.25	-	284	64.99	221.276	170.026	51.25	110.6	22693.5
OC 300x100x5.5x8					211.073	60	51.25	43.81		44.46	190.122	138.872	51.25	95.06	22693.50

Elemen *Castellated Beams* memiliki panjang 4 meter dengan luas *opening* yang sama.

Dimana:

- d_g = Tinggi *castellated beam*
- b_f = Lebar pelat sayap
- t_w = Ketebalan pelat badan
- t_f = Ketebalan pelat sayap
- h_o = Tinggi lubang
- h_p = Tinggi *Infilled plate*
- e = *Throat distance (i.e. length of welded joint)*
- b = Lebar *one sloping edge of the hole*
- d_w = Tinggi pelat badan
- b_{wc} = Jarak *tee section*
- p = $2e + 2b$
- a_o = $e + 2b$
- l_o = Rasio dari *the length to the outstand depth* = $(a_o + b_o)/2$
- A_{hollow} = Luasan *web opening*

Analisa Vierendeel Mechanism dan Web Post Buckling berdasarkan penelitian Soltani, et al (2012)

Vierendeel Mechanism

Tahanan total untuk *vierendeel bending* lokal (M_{vrd}), sama dengan jumlah dari *vierendeel resistance* dari bagian atas dan bawah *tee-sections*, seperti berikut:

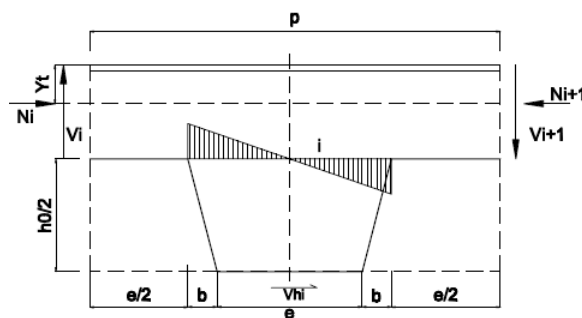
$$M_{vrd} > V_{sd} \times l_{eff} \dots \dots \dots (1)$$

dimana :

V_{sd} = gaya geser global yang harus ditransfer sepanjang *web opening* i

l_{eff} = panjang efektif dari *web opening*;

$l_{eff} = e$



Gambar 7. *Web-post bending stresses* akibat gaya geser horisontal

Web-post Buckling

Ketahanan *web-post buckling* akibat lentur dianalisa dengan persamaan berikut ini:

$$\frac{M_{sd}}{M_{el,Rd}} \leq \min\{C_1 \alpha - C_2 \alpha^2 - C_3 0.6\} \dots \dots \dots (2)$$

dimana:

$M_{sd} = V_{hi} \times \frac{h_0}{2}$ → momen lentur elastic pada bagian kritis dari *web-post*

$M_{el,Rd} = \frac{t_w \times f_y \times (p-2b)^2}{6}$ → tahanan lentur elastic pada bagian kritis dari *web-post*

$$\alpha = \frac{p}{h_0} \rightarrow \text{aspec ratio}$$

C_1 , C_2 , dan C_3 merupakan parameter geometric konstan. Nilainya ditentukan sebagai berikut:

$$C_1 = 5.097 + 0.1464\beta - 0.00174 \beta^2$$

$$C_2 = 1.441 + 0.0625\beta - 0.000683 \beta^2$$

$$C_3 = 3.645 + 0.0853 \beta - 0.00108 \beta^2$$

dimana:

$$\beta = \frac{h_0}{t_w}$$

Dengan mengasumsikan jika gaya geser vertikal V_i dan V_{i+1} adalah senilai dan *axial forces* N_i dan N_{i+1} adalah gaya reaksi di *centroid top tee-section*, gaya geser horisontal ditentukan dengan mempertimbangkan kesetimbangan dari *free body diagram* pada Gambar 8, maka:

$$V_{hi} = V_i \frac{P}{(d_g - 2y_t)}$$

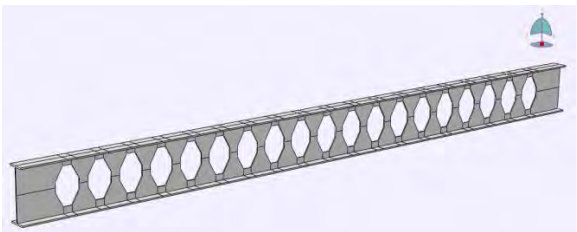
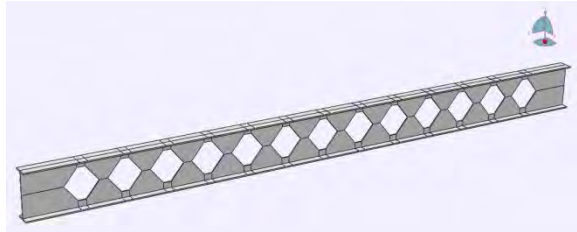
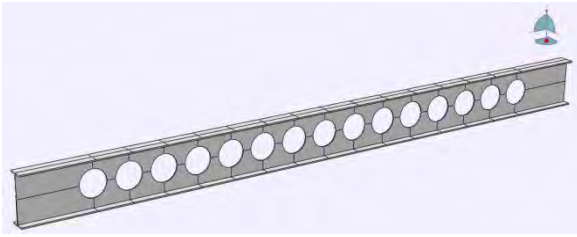
$$\dots \dots \dots (3)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Finite Element Software, struktur dianalisa menggunakan *Eigen-Value Buckling*. *Eigen-value buckling* merupakan bagian dari solusi untuk masalah *non-linear buckling*. Analisa ini digunakan untuk memprediksi kekuatan tekuk teoritis struktur elastis yang ideal, dengan mempertimbangkan efek sekunder (*geometric non linearity*). Hal ini dikenal sebagai "*classical Euler buckling analysis*". Setiap buckling mode dari analisis tekuk linear dapat digunakan untuk menghasilkan '*imperfections*' pada model yang akan digunakan dalam analisis non-linear buckling (*material and geometric nonlinearity*) [9].

Permodelan Castellated Beams

Elemen dimodelkan dengan *finite elemen analysis* dimana memiliki *meshing* dengan ukuran 100 yang berupa *flat shell elements*.



Gambar 8. Hexagonal Castellated (kiri), Circular Castellated (kanan), Octagonal Castellated (tengah bawah)

Hasil Kontur Gaya-gaya Dalam

Hasil kontur terdiri dari Von Mises, Stress S33 (z – z local axis), S23 (y – z local axis), Maximum Principal Stress dan defleksi.

Tipe Hexagonal



Gambar 9a. S33 stress contour of Hexagonal Castellated Beams

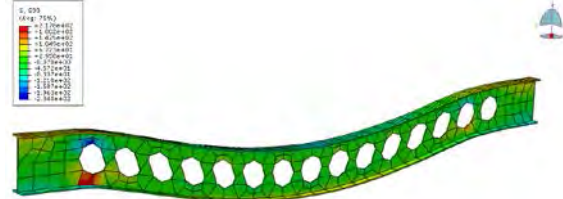


Gambar 9b. S23 stress contour of Hexagonal Castellated Beams

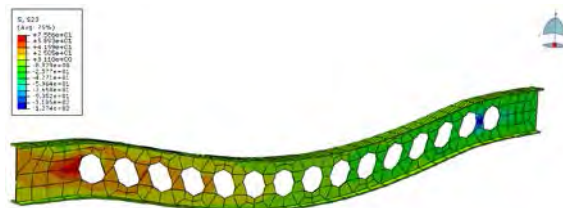


Gambar 9c. Displacement contour of Hexagonal Castellated Beams

Tipe Octagonal



Gambar 10a. S33 stress contour of Circular Castellated Beams



Gambar 10b. S23 stress contour of Circular Castellated Beams

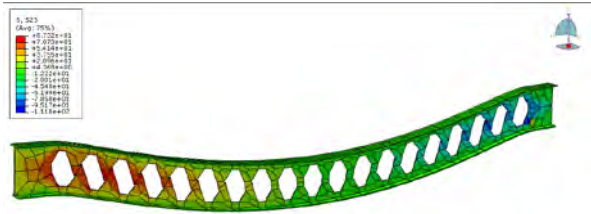


Gambar 10c. Displacement contour of Circular Castellated Beams

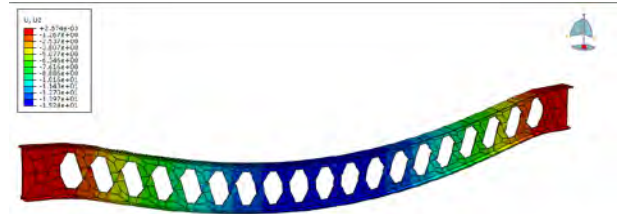
Tipe Circular



Gambar 11a. S33 stress contour of Octagonal Castellated Beams



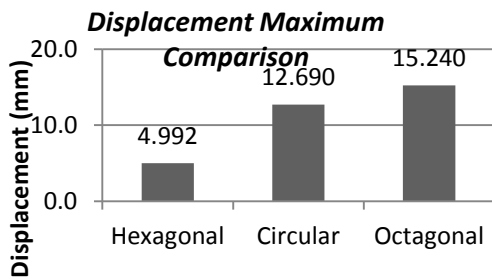
Gambar 11b. *S23 stress contour of Octagonal Castellated Beams*



Gambar 11c. *Displacement contour of Octagonal Castellated Beams*

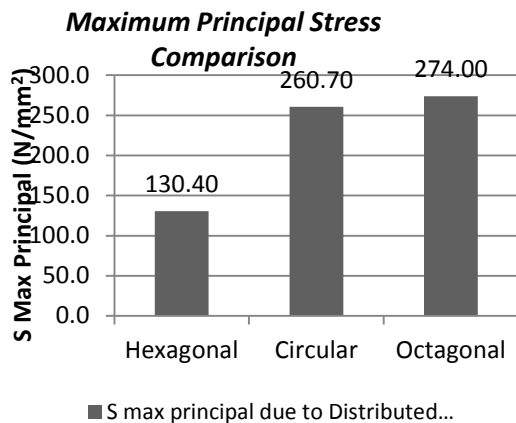
Tabel 3. Perbandingan hasil Maximum Principal Stress dan Displacement

Model	Castellated Beams	b_{wc}	e	$A_{opening}$	A_{ot}	Load	Max Displacement	Max Principal Stress
		(mm)		(mm^2)				
1	HC 300x100x5.5x8	47.5	51.25	22693.5	295015.5	Distributed	4.992	130.40
	CC 300x100x5.5x8	64.99	51.25	22693.5	340402.5		12.690	260.70
	OC 300x150x7x10	44.46	51.25	22693.49917	431176.4842		15.240	274.00



Tabel 3, Gambar 12 dan 13 menunjukkan bahwa *Hexagonal Castellated Beam* menghasilkan *displacement* (lendutan) dan *maximum principal stress* terkecil, sedangkan *Octagonal Castellated Beam* menghasilkan *displacement* (lendutan) dan *maximum principal stress* terbesar.

Gambar 12. Perbandingan *Displacement*



Gambar 13. Perbandingan *Maximum Principal Stress*

Hasil Investigasi Perilaku Web Post Buckling dan Vierendeel Mechanism

Tabel 4. Web Post Buckling analysis berdasarkan rumus Soltani, et al

Distributed		Vr by Soltani, et al Formula (2011)												
Castellated Beam Profile	V _{hi} (N)	M _{sd} (Nmm)	M _{el,Rd} (Nmm)	α	β	C1	C2	C3	M _{sd} /M _{el,Rd}	C1.α	C2.α ²	C3. 0,6	Min	Condition of Web-post Buckling
HC300x100x5.5x8	77005.7434	7893088.694	2311375	1.08	37.27	8.14	2.82	5.32	3.4149	8.787	3.291	3.194	3.194	Web post buckling was occur
CC300x100x5.5x8	181829.8	15457917.25	3310059.386	1.301	30.91	7.96	2.72	5.25	4.6700	10.359	4.608	3.150	3.150	Web post buckling was occur
OC300x150x7x10	199260.501	21029245.89	2941750	0.90	30.2	7.93	2.70	5.24	7.1485	7.142	2.194	3.141	2.194	Web post buckling was occur

Tabel 5. Web Post Buckling analysis berdasarkan rumus Aglan dan Redwood

Distributed		Vhi by Aglan and Redwood Formula												
Castellated Beam Profile	V _{hi} (N)	M _{sd} (Nmm)	M _{el,Rd} (Nmm)	α	β	C1	C2	C3	M _{sd} /M _{el,Rd}	C1.α	C2.α ²	C3. 0,6	Min	Condition of Web-post Buckling
HC300x100x5.5x8	240200.9	24620597	2311375	1.08	37.3	8.14	2.82	5.32	10.6519	8.787	3.291	3.194	3.194	Web post buckling was occur
CC300x100x5.5x8	541308.5	46018319	3310059.386	1.3	30.9	7.96	2.72	5.25	13.9026	10.359	4.608	3.150	3.150	Web post buckling was occur
OC300x150x7x10	173308.4	18290359	2941750	0.90	30.15	7.93	2.70	5.24	6.2175	7.142	2.194	3.141	2.194	Web post buckling was occur

Tabel 6. Vierendeel Mechanism analysis based on Soltani, et al

Distributed		Vr by Soltani, et al Formula (2011)					Condition of Vierendeel Mechanism (VM)
Castellated Beam Profile	M _{vrd} (Nmm)	V _{sd top}	V _{sd bot}	V _{sd} (N)	V _{sd} x l _{eff} (Nmm)		
		(N)					
HC300x100x5.5x8	4505687.31	25196.700	25156.520	50353.22	2580602.55	VM was occur	
CC300x100x5.5x8	8386062.31	23060.604	14918.271	37978.87	1946417.33	VM was occur	
OC300x150x7x10	5824160.92	22596.792	21807.459	44404.25	2275717.87	VM was occur	

Tabel 7. Vierendeel Mechanism analysis based on Aglan and Redwood

Distributed		Vr by Aglan and Redwood Formula (Zaarour, 1995)					Condition of Vierendeel Mechanism (VM)
Castellated Beam Profile	M _{vrd} (Nmm)	V _{sd top}	V _{sd bot}	V _{sd} (N)	V _{sd} x l _{eff} (Nmm)		
		(N)					
HC300x100x5.5x8	3096189.96	25196.700	25156.520	50353.22	2580602.55	VM was occur	
CC300x100x5.5x8	3106568.61	23060.604	14918.271	37978.87	1946417.33	VM was occur	
OC300x150x7x10	4885946.04	22596.792	21807.459	44404.25	2275717.87	VM was occur	

Tabel - tabel diatas menunjukkan bahwa berdasarkan rumus Soltani et al serta Aglan dan Redwood formula kegagalan Web Post Buckling dan Vierendeel Mechanism terjadi pada semua tipe Castellated Beams, dan dapat diketahui bahwa tipe hexagonal memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kegagalan tersebut.

Dari hasil tersebut juga menunjukkan perbedaan hasil antara rumus Soltani dengan Aglan dan Redwood, karena rumus Aglan dan Redwood formula mempertimbangkan adanya four plastic hinges, sedangkan rumus Soltani berdasarkan kondisi sebenarnya dari elemen Castellated Beams yang dimodelkan dengan software Finite Element.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa:

- Ditinjau dari eigen-value buckling analysis tipe hexagonal menghasilkan defleksi sebesar 4.992 mm, tipe octagonal sebesar 12.690 mm dan tipe circular sebesar 15.240 mm. Maximum principal stress sebesar 130.40 N/mm² untuk tipe hexagonal, 260.70 N/mm² untuk tipe octagonal dan 274.00 N/mm² untuk tipe circular. Hexagonal Castellated Beam menghasilkan displacement (lendutan) dan maximum principal stress terkecil, sedangkan Octagonal Castellated Beam menghasilkan displacement (lendutan) dan maximum principal stress terbesar.

- Dengan menggunakan formula dari Soltani et al serta Aglan dan Redwood, menunjukkan bahwa bentuk *hexagonal* merupakan yang paling optimum ditinjau dari efek kegagalan *web post buckling* dan *vierendeel mechanism*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aglan. A.A., dan Redwood, R.G, (1974) *Web Buckling in Castellated Beams*. Proc. Instn. Civ. Engrs, London, U.K., Part 2, Vol. 57, pp 307-320.
- [2] Altifillisch, M.D., Cooke, B.R., dan Toprac, A.A., (1957). *An investigation of Open Web Expanded Beams*. Welding Research Council Bulletin, Series No.47. pp 77s-88s.
- [3] Bake Mohamadi dan Siamak, (2010) *Behaviour of Cellular Beams and Cellular Composite Floors at Ambient and Elevated Temperatures*. Tesis, The University of Manchester, Manchester, UK.
- [4] J. P. Boyer, (1964) *Castellated Beams - New Development*. The AISC National Engineering Conference, Omaha, Nebr.
- [5] Knowles, P.R, (1991) *Castellated Beams*. Proc. Instn Civ Engrs, Part 1, 90 (1991) 521-536.
- [6] M.R. Soltani, A. Bouchair, M. Mimoune, (2012), “*Nonlinear FE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams*”, International Journal of Constructional Steel Research 70 (2012) 101-114.
- [7] Toprac, A.A., dan Cooke, B.R, (1959) *An Experimental Investigation of Open-Web Beams*. Welding Research Council Bulletin, New York. Series No.47, pp 1 -10.
- [8] Tsavdaridis, K. D. & D’Mello, C.(2011), “*Finite Element Modelling Techniques For Web-Post Buckling Response Perforated Steel Beams with Closely Spaced Web Opening of Various Shapes*”, School of Engineering and Mathematical Science, City University, London.
- [9] Zaarour dan Redwood, (1996) *Web Buckling in Thin Webbed Castellated Beams*. J. Struct. Engrg, ASCE 122(8) 860-866.
- [10] Website:
<http://www.grunbauer.nl/eng/inhoud.htm>

