

Study Alternatif Penggunaan Baja *Castella* Pada Struktur Pengaku Antar Kolom (Studi Kasus: Gedung Laboratorium dan Bengkel Jurusan Teknik Mesin PNUP)

Alternative Study on Using Castellated Steel in Inter-column Stiffeners (Case Study: Laboratory and Workshop Building of the Mechanical Engineering Department, PNUP)

Hermana Kaselle^{1,a)}, Agus Salim²⁾, Abdullah Latip³⁾, Nurul Syafitri Ramadhani⁴⁾, Muh. Agung Perdana⁵⁾

^{1,2,3,4,5)} Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar

Koresponden : ^{a)} h.kaselle@poliupg.ac.id

ABSTRAK

Gedung Laboratorium dan Bengkel Jurusan Teknik Mesin di Kampus PNUP diharuskan dengan desain struktur berupa bentang panjang dan bebas kolom, hal ini membutuhkan alternatif penggunaan material yang sesuai untuk bentang lebar seperti baja *castella*. Dengan alternatif penampang ini diharapkan dapat mengurangi berat struktur serta menjaga agar lendutan yang terjadi tidak terlalu besar. Penelitian ini dilakukan dengan memodelkan dan menganalisis gedung eksisting dengan model truss (Model 1) dalam *ETABS* v.18. Selanjutnya, memodelkan ulang struktur pengaku antar kolom menjadi balok *castella* (model 2). Hasil analisis struktur untuk model 1 diperoleh nilai rasio kekuatan penampang > 1 kemudian didesain ulang menggunakan model 2 yaitu penampang baja *castella* profil IWF450.150.6,5.9. Hasil perhitungan diperoleh nilai $P_u = 302,725 \text{ kN} > P_r = 268$; $M_c = 2279,55 \text{ Kn.m} > M_r = 114 \text{ kN.m}$; $I_{max} = 0,887 < 1$; $\phi_b M_n = 9,59354 \text{ kN.m} \geq M_u = 3,22$; $\phi_v R_n = 73,125 \text{ kN} \leq V_{rh} = 21,4 \text{ kN}$. Lendutan yang diperoleh dari hasil analisis model 2 sebesar 75,1408 mm dan perhitungan manual sebesar 97,44 mm lebih kecil dari lendutan izin struktur yaitu 120,833 mm sehingga pengaplikasian baja *castella* sebagai struktur pengaku antar kolom direkomendasikan mengganti struktur *truss* yang telah ada. Pada metode pengangkatan dilakukan analisis dengan menghitung lendutan yang terjadi dengan menggunakan variasi jumlah tali crane. Dari hasil perhitungan, pengangkatan balok baja *castella* dapat menggunakan 2 *mobile crane* dengan jumlah ikatan tali sebanyak 4 tali *crane*, metode ini lendutan terbesar 1,185 mm dibandingkan dengan penggunaan 1 *mobile crane* dengan 2 tali *crane* diperoleh lendutan sebesar 96 mm.

Kata Kunci : Pengaku, *Truss*, Baja *Castella*, Kapasitas Desain, Metode Pengangkatan

PENDAHULUAN

Meningkatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi menjadi semakin memungkinkan manusia bisa membangun infrastruktur yang cukup sulit seperti bangunan bebas kolom. Material

baja dinilai cukup efektif karena memiliki kekuatan tarik dan perbandingan kekuatan per volume yang lebih tinggi daripada material beton bertulang, membuat struktur baja menjadi material yang digunakan pada bangunan bentang lebar. Baja adalah jenis

logam yang dibuat berdasarkan campuran unsur utama besi dan unsur penguat karbon. Penggunaan dalam pembuatan baja menggunakan unsur besi sekitar 97%, sedangkan karbonnya sekitar 0,2 sampai 2,1% (Arifi, 2020).

Salah satu Gedung yang dirancang menggunakan material baja adalah Gedung Laboratorium dan Bengkel Jurusan Teknik Mesin di Kampus PNUP. Gedung ini difungsikan sebagai laboratorium dan bengkel maka diharuskan desain struktur yang ada berupa bentang panjang dan bebas kolom. Pada saat perencanaan dipilih struktur *truss* namun pada saat pengangkatan struktur tersebut mengalami deformasi lendutan yang terlalu besar. Penelitian ini mencoba mengganti struktur menjadi profil *castella* yang dinilai cukup efektif pada struktur yang didominasi momen dan cocok untuk struktur bentang lebar (Dewobroto, 2015). Baja *castella* adalah konsep peningkatan penampang dengan badan berlubang dengan cara merubah dan memperluas penampang. Dengan ukuran profil yang sama baja *castella* dapat menghasilkan momen geometris inersia yang lebih besar sehingga juga memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan baja standar karena distribusi beban yang lebih baik.

Tujuan pada penelitian ini adalah untuk mendesain dimensi penampang efektif dengan menggunakan baja *castella* yang aman pada Gedung Laboratorium dan Bengkel Jurusan Teknik Mesin di Kampus II Politeknik Negeri Ujung Pandang, menghitung deformasi lendutan gedung setelah pengaplikasian baja *castella* dan untuk merencanakan metode pelaksanaan yang aman untuk pengangkatan struktur rangka baja *castella*.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu melakukan permodelan analisis struktur eksisting dan struktur *redesign* dengan menggunakan aplikasi

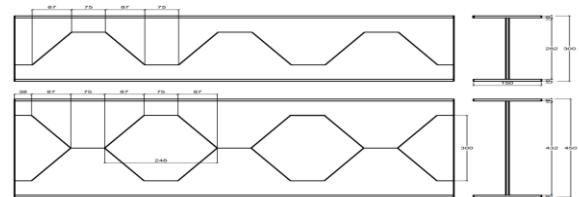
ETABS, kemudian hasil output perhitungan analisa struktur digunakan untuk mendesain struktur pengaku antar kolom dengan mengganti struktur *truss* menjadi struktur baja *Castella*. Desain kapasitas dilakukan Model 2 (baja *Castella*) dengan mengacu pada AISC 2016 untuk baja *Castella*.

ANALISIS PENELITIAN

Geometri Penampang Balok Baja *Castella*.

Profil yang digunakan adalah IWF300.150.6,5.9 untuk *tee* atas dan *tee* bawah sehingga diperoleh profil baja *castella* IWF450.150.6,5.9. Berikut adalah desain dimensi penampang balok *castella*:

$$\begin{aligned}
 d_b &= 300 \text{ mm} & & \\
 h &= d_b/2 & = 300/2 & \\
 &= 150 \text{ mm} & & \\
 D_g &= d_b + h & = 300 + 150 & \\
 &= 450 \text{ mm} & & \\
 b &= h / \tan \phi & = 150/\tan (60^\circ) & \\
 &= 87 \text{ mm} & & \\
 h_o &= h \times 2 & = 150 \times 2 & \\
 &= 300 & & \\
 d_{T/e} &= (d_b - h)/2 & = (300-150)/2 & \\
 &= 75 \text{ mm} & & \\
 S &= 2(b + e) & = 2 (87 + 75) & \\
 &= 324 \text{ mm} & & \\
 B &= 2b + e & = 2 \times 87 + 75 & \\
 &= 248 \text{ mm} & &
 \end{aligned}$$



Gambar 1. Geometri Penampang Baja *Castella* IWF450.150.6,5.9

Desain Balok Baja *Castella*.

A. Data Perencanaan.

Dibawah ini merupakan data perencanaan balok baja *caastella*:

1. Bentang = 29 m

2. Baja (mutu BJ41)

$$\begin{aligned}
 F_y &= 250 \text{ MPa} \\
 F_u &= 410 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$E_s = 200000 \text{ MPa}$

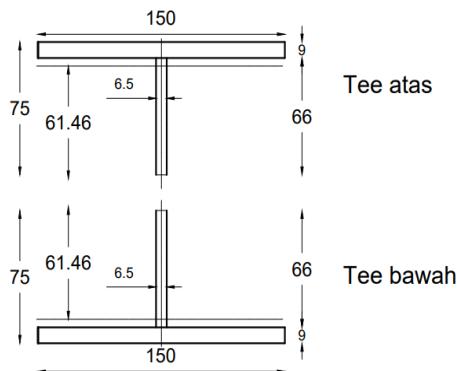
3. Properti penampang

a. Properti profil awal

$$\begin{aligned} d_{top} &= d_{bot} = 300 \text{ mm} \\ h &= 282 \text{ mm} \\ bf &= 150 \text{ mm} \\ tw &= 6,5 \text{ mm} \\ tf &= 9 \text{ mm} \\ A &= 4533 \text{ mm}^2 \\ Sx &= 462167,940 \text{ mm}^3 \\ Ix &= 69325191 \text{ mm}^4 \\ Zx &= 522076,5 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

b. Properti *tee* atas dan bawah

$$\begin{aligned} A_{tee} &= 1779 \text{ mm}^2 \\ y_{tee} &= 61,46 \text{ mm} \\ Ix &= 622641,460 \text{ mm}^4 \\ Iy &= 2532760,438 \text{ mm}^4 \\ Sx-top &= 187016,180 \text{ mm}^3 \\ Sx-bot &= 10131,335 \text{ mm}^3 \\ Zx &= 22237,5 \text{ mm}^3 \\ J &= 43315,625 \text{ mm}^4 \\ rx &= 18,708 \text{ mm} \\ ry &= 37,732 \text{ mm} \\ yo &= 56,957 \text{ mm} \end{aligned}$$



Gambar 2. Profil *Tee* Atas dan Bawah

c. Properti bagian penampang netto balok

$$\begin{aligned} A_{net} &= 2A_{tee} \\ &= 2 \cdot 1779 \\ &= 3558 \text{ mm}^2 \\ y &= \frac{d_g}{2} \\ &= \frac{450}{2} \\ &= 225 \text{ mm} \\ d_{effec} &= d_g - 2(dt - y_{tee}) \\ &= 450 - 2(75 - 61,46) \\ &= 422,914 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{x-net} &= 2I_{x-tee} + 2A_{tee} \\ &= (d_{effec}/2)^2 \\ &= 2(622641,460) + 2(1779)422,914/2 \\ &= 160337916 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{x-net} &= \frac{I_{x-net}}{\left(\frac{d_g}{2}\right)} \\ &= \frac{160337916}{450/2} \\ &= 712613 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{x-net} &= 2A_{tee} (d_{effec}/2) \\ &= (1779)(422,914/2) \\ &= 752364 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

d. Properti bagian penampang bruto balok

$$\begin{aligned} A_{gross} &= A_{net} + h_0 \cdot tw \\ &= 3558 + 300,6,5 \\ &= 3729 \text{ mm}^2 \\ I_{x-gross} &= I_{x-net} + \left(\frac{t_w h_0^3}{12}\right) \\ &= 160337916 + \left(\frac{6,5 \cdot 300^3}{12}\right) \\ &= 174962916 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{x-gross} &= \frac{I_{x-net}}{\left(\frac{d_g}{2}\right)} \\ &= \frac{174962916}{450/2} \\ &= 777612,96 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{x-gross} &= Z_{x-net} + 2twh(h/2) \\ &= 75236 + 2 \cdot 6,5 \cdot 150 \\ &= 898614 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

B. Hasil Analisis Gaya Dalam.

Dari hasil analisis gaya dalam balok *castella* profil IWF450.300.6,5,9 pada ETABS, diperoleh nilai maksimum gaya geser global terfaktor (V_r) dan momen global terfaktor, (M_r) disetiap as lubang bukaan balok baja *castella* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai X_i , M_r dan V_r tiap Bukaan

No. Bukaan	$x_i, \text{ m}$	$M_r, \text{ kN.m}$	$V_r, \text{ kN}$
47	15,104	113,500	0,054
88	28,388	-30,377	28,095

C. Gaya Aksial Lokal dan Lentur *Tee* (Momen *Vierrendel*).

Adapun perhitungan gaya aksial lokal dan moment *vierrendel* adalah sebagai berikut: Gaya aksial lokal.

$$\begin{aligned}
 P_r(47) &= \frac{M_r(47)}{d_{effec}} \\
 &= \frac{113,500}{0,432} \\
 &= 268,376 \text{ kN} \\
 M_{vr}(88) &= \left(\frac{V_r}{2}\right) \left(\frac{e}{2}\right) \\
 &= \left(\frac{28,095}{2}\right) \left(\frac{0,075}{2}\right) \\
 &= 0,527 \text{ kN.m}
 \end{aligned}$$

D. Kuat Lentur *Web Post*.

$$\begin{aligned}
 M_p &= 0,25t_w(e+2b)^2f_y \\
 &= 0,25 \times 6,5 (75 + 2(87,00))^2 \times 250 \\
 &= 25187906,3 \text{ N.mm} \\
 &= 25,188 \text{ kN.mm} \\
 \frac{2h}{e} &= \frac{2(150)}{75} \\
 &= 4 \text{ mm} \\
 \frac{e}{t_w} &= \frac{75}{6,5} \\
 &= 11,538 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Sudut } \theta &= 60^\circ \\
 \text{Untuk } e/t_w &= 10 \\
 &= \frac{M_{ocr}}{M_p} 0,587(0,917)^{\frac{2h}{e}} \leq 0,493 \\
 &= 0,587(0,917)^4 \leq 0,493 \\
 &= 0,415 \leq \\
 0,49 &\text{ Untuk } e/tw = 20 \\
 &= \frac{M_{ocr}}{M_p} 1,96(0,699)^{\frac{2h}{e}} \leq 0,493 \\
 &= 0,587(0,917)^4 \leq 0,493 \\
 &= 0,468 \leq 0,493
 \end{aligned}$$

$e/tw = 11,538$ digunakan interpolasi untuk mencari nilai momen kritis,

$$\frac{M_{ocr}}{M_p} = 0,423$$

Kekuatan lentur desain:

$$\begin{aligned}
 x M_p &= 0,9 \times 0,423 \times 25,188 \\
 \frac{\phi_b M_{ocr}}{M_p} &= 9,593 \text{ kN.mm}
 \end{aligned}$$

Cek kekuatan *web post*:

$$\frac{M_{u-web}}{M_p} \leq \frac{\phi_b M_{ocr}}{M_p}$$

$$3,216 \leq 9,593 \text{ OK!}$$

E. Lendutan Balok Baja *Castella*.

Menghitung lendutan balok baja *castella* dapat diperkirakan dengan menggunakan 90% momen inersia pada penampang netto dengan asumsi tumpuan sederhana.

$$\begin{aligned}
 I_x &= 160337916 \text{ mm}^4 \\
 \text{Bentang} &= 29000 \text{ mm} \\
 E_s &= 200000 \text{ Mpa} \\
 \text{Beban Mati (D)} &= 1682 \text{ N/m} \\
 \text{DL} &= 1,4D \\
 &= 2354,8 \text{ N/m}
 \end{aligned}$$

Sehingga Lendutan Akibat Beban Mati

$$\begin{aligned}
 \Delta_{DL} &= \frac{5DL^4}{384E_sI_x0,9} \\
 &= \frac{5 \times (2354,8/10^6) \times 29000^4}{384 \times 200000 \times 1749629160,9} \\
 &= 75,1408 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$L/240 = 29000/240$$

$$L/240 = 120,833 \text{ mm}$$

$$\Delta_{DL} \leq L/240$$

$$75,1408 \text{ mm} \leq 120,833 \text{ mm...Ok}$$

Lendutan dalam *ETABS*

$$\begin{aligned}
 \Delta_{DL} &= 1,4 (D + \Delta_{DL}) \leq L/240 \\
 &= 97,44 \text{ mm} \leq 120,833 \text{ mm ... Ok}
 \end{aligned}$$

F. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Desain Baja *Castella*.

Berdasarkan nilai lendutan yang terjadi, balok *castella* profil IWF450.150.6,5.9 dengan bentang 29meter aman terhadap lendutan yang terjadi akibat beban mati.

Berikut ini rekapitulasi hasil hitungan desain baja *castella* yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Baja Castella

Nilai Perhitungan		Syarat	Ket
$P_u = 302,72 \text{ kN}$	$P_r = 268,38 \text{ kN}$	$P_u > P_r$	OK!
$M_c = 2279,5 \text{ kN.m}$	$M_r = 113,50 \text{ kN.m}$	$M_c > M_r$	OK!
$I_{max} = 0,887$	1	$I_{max} < 1$	OK!
$\phi_b M_n = 9,59 \text{ kN.m}$	$M_u = 3,22 \text{ kN.m}$	$\phi_b M_n \geq M_u$	OK!
$\phi_v R_n = 73,13 \text{ kN}$	$V_{rh} = 21,44 \text{ kN}$	$V_{rh} \leq \phi_v R_n$	OK!
$\phi_v V_n \text{ netto} = 131,63 \text{ kN}$	$V_{r-max} = 28,09 \text{ kN}$	$V_{r-max} \leq \phi_v V_n$	OK!
$\phi_v V_n \text{ gross} = 438,75 \text{ kN}$	$V_{r-max} = 28,09 \text{ kN}$	$V_{r-max} \leq \phi_v V_n$	OK!
$\Delta_{DL} = 75,14 \text{ mm}$	$L/240 = 120,83 \text{ mm}$	$\Delta_{DL} \leq L/240$	OK!

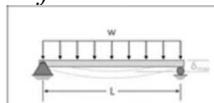
Analisis Perhitungan dan Metode Konstruksi (Pengangkatan Balok Baja Castella).

A. Lendutan Pada Saat Pengangkatan.

Adapun jumlah tali ikat dan mobile crane yang akan digunakan tergantung dari besar lendutan yang terjadi dan tidak boleh melebihi lendutan izin pada saat pengangkatan balok baja *castella*. Adapun besar lendutan izin balok baja *castella* pada saat pengangkatan adalah.

$$L/240 = 29/240 = 0,1208 \text{ m} = 120,8 \text{ mm.}$$

Untuk menentukan besar lendutan menggunakan *Simply-Supported Beam Deflection Formula*.



$$\delta_{max} = \frac{5wL^4}{384EI}$$

Gambar 3. *Simply-Supported Beam Deflection Formula*

1. Menggunakan 2 tali crane

$$\delta_{2 \text{ tali}} = \frac{5WL^4}{384EI}$$

$$= \frac{5 \times (36.700/10^6) \times 29000^4}{384 \times 200.000 \times 1.749.629.160,9}$$

$$\delta_{2 \text{ tali}} = 96 \text{ mm}$$

Kontrol terhadap lendutan izin

$$\delta_{2 \text{ tali}} \leq L/240$$

$$96 \text{ mm} \leq 120,833 \text{ mm.. Ok}$$

2. Menggunakan 4 tali crane

$$\delta_{4 \text{ tali}} = \frac{5WL^4}{384EI}$$

$$\delta_{4 \text{ tali}} = \frac{5 \times (36.700/10^6) \times 9700^4}{384 \times 200.000 \times 1.749.629.160,9}$$

$$\delta_{4 \text{ tali}} = 1,185 \text{ mm}$$

Kontrol terhadap lendutan izin

$$\delta_{2 \text{ tali}} \leq L/240$$

$$1,185 \text{ mm} \leq 120,833 \text{ mm....}$$

Ok

Dari hasil perhitungan jumlah *mobile crane* yang digunakan adalah 2 *Rough Terrain Crane*, masing-masing dengan kapasitas 40 ton dengan jumlah titik ikat tali sebanyak 4 titik ikat dengan panjang tali sekitar 22,9 meter untuk sudut tali 45°.

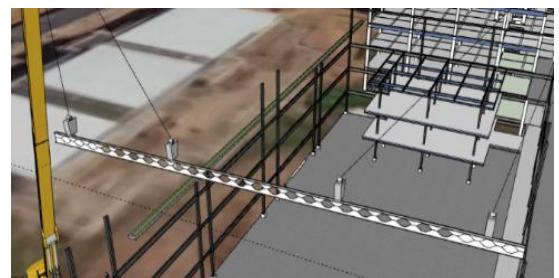
B. Metode konstruksi pada saat pengangkatan.

1. Mengatur posisi *mobile crane*



Gambar 4. Posisi *Mobile Crane*

2. Mengikat balok baja *castella* sesuai prosedur.



Gambar 5. Pengikatan Balok Castella

3. Mengangkat balok baja *castella* ke top kolom



Gambar 6. Pengangkatan Balok Castella Ke Top Kolom

KESIMPULAN

Dari hasil analisis dan desain, diperoleh kesimpulan dalam penggunaan baja *castella* pada struktur pengaku antar kolom sebagai berikut:

1. Dari analisis *ETABS* didapatkan nilai rasio *Truss* > 1 maka didesain ulang menggunakan model 2 dari hasil perhitungan diperoleh penampang baja *castella* yang aman pada struktur pengaku antar kolom sepanjang 29 m adalah IWF450.150.6,5.9, baik ditinjau dari $P_u = 302,725 \text{ kN} > P_r = 268$; $M_c = 2279,55 \text{ kN.m} > M_r = 114 \text{ kN.m}$; $I_{max} = 0,887 < 1$; $\phi_b M_n = 9,59354 \text{ kN.m} \geq M_u = 3,22$; $\phi_v R_n = 73,125 \text{ kN} \leq V_{rh} = 21,4 \text{ kN}$.
2. Lendutan yang diperoleh dari hasil analisis antara *ETABS* sebesar 75,1408 mm dan perhitungan manual sebesar 97,44 mm lebih aman dari lendutan izin struktur yaitu 120,833 mm sehingga pengaplikasian baja *castella* sebagai struktur pengaku antar kolom direkomendasikan untuk mengganti struktur *truss* yang sudah ada sebelumnya.
3. Metode pengangkatan yang paling aman untuk mengangkat balok baja *castella* yaitu menggunakan 2 *mobile crane* dengan jumlah ikatan

tali sebanyak 4 tali *crane*, karena menghasilkan lendutan terbesar 1,185 mm dibandingkan hanya menggunakan 1 *mobile crane* dengan 2 tali *crane* dengan lendutan 96 mm.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institut of Steel Construction. 2016. *Castellated and Cellular Beam Design. AISC Design Guide 31*. Amerika Serikat.
- Arifi, Eva dan Desi Setyowulan. 2021. *Perencanaan Struktur Baja: Berdasarkan SNI 1729:2020*. Malang: Universitas Brawijaya Press
- Badan Standardisasi Nasional. 2020. *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. SNI 1727:2020*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2020. *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. SNI 1729:2020*. Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. 2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung. SNI 1726:2019*. Jakarta.
- Blodgett, Orner W. 1966. *Design of Welded Structure*. Cleveland Ohio: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation.
- Boyer, J. P. 1964. Castellated Beams – New Development. AISC National Engineering Conference. *AISC Engineering Journal*. 3: 104-108.
- Dewobroto, W. 2015. *Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain AISC 2010*. Tangerang: Lumina Press.
- Demirdjian, Sevak. 1999. *Stability of Castellated Beam Webs*. Canada: Departemen of Civil Engineering and Applied Material. McGill University Montreal.

Grunbauer J. 2001. *What Makes Castellated Beams So Desirable As a Constructional Element.* Available from <http://www.grunbauer.nl/eng/inhoud.html> diakses 2 Januari 2024, (online)

Puskin PU. 2021. Desain Spektra Indonesia. (online): <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/> diakses 21 April 2024.