

# Pengaruh Tinggi Pemotongan Profil (h), Terhadap Perilaku Lentur pada Balok Baja Kastela (*Castellated Beam*)

Andys Wicaksono Saputro

## ABSTRAK

Pada konstruksi balok baja kebanyakan dikenal dengan struktur balok utuh dan balok berlubang (balok baja kastela). Balok baja kastela adalah balok yang dipakai untuk konstruksi bentang panjang (lebih dari 10 meter), yang berupa 2 profil baja yang disatukan menjadi 1 untuk mendapatkan tinggi profil yang sesuai. Balok kastela disebut juga *honey comb beam*, karena bentuk lubang segi enamnya yang menyerupai sarang lebah (*honey comb*). Profil tersebut dilubangi untuk memperkecil berat sendiri profil dan agar sambungan lasnya dapat lebih efektif dan efisien. Spesifikasi profil yang ditingkatkan kekuatan komponennya dengan memperpanjang kearah satu sama lain dan di las sepanjang pola. *Castellated beam* ini mempunyai tinggi (h) hampir 50% lebih tinggi dari profil awal sehingga meningkatkan nilai lentur axial, momen inersia ( $I_x$ ), dan seksion modulus ( $S_x$ ).

Dalam penelitian ini digunakan 6 benda uji berupa balok kastela sebagai sampelnya, yaitu  $h_1=0$ mm (utuh),  $h_2=26$ mm,  $h_3=50$ mm,  $h_4=76$ mm,  $h_5=102,5$ mm, dan  $h_6=150$ mm. Sistem pengujian *castellated beam* yang dilakukan di laboratorium adalah dengan memberi beban terpusat di sekitar tengah bentang balok baja, kemudian pada daerah uji (*test region*) dipelajari perilaku balok baja saat menerima beban terpusat tersebut. Dari hasil uji tersebut akan didapatkan besarnya beban,  $\Delta$  (lendutan), grafik hubungan waktu-beban, hubungan tegangan-regangan, hubungan beban-lendutan, hubungan lendutan-tegangan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan tinggi pemotongan profil (h) pada baja kastela, maka didapatkan momen inersia yang besar. Dengan besarnya nilai momen inersia maka akan menambah tingkat kekakuan dari baja kastela tersebut. Dengan semakin kakunya baja kastela tersebut maka akan didapatkan lendutan yang kecil, sehingga dapat menahan momen yang besar serta dapat menahan tegangan yang besar. Dalam penelitian ini didapatkan tinggi optimal baja kastela adalah tidak boleh lebih dari 50% dari tinggi profil sebelum dibuat balok kastela.

**Kata kunci:** *castellated beam*, momen, momen inersia, lendutan, tegangan.

## Effect of Cutting High Profile (h), Against Bending Behavior on Castellated Beam Steel

Andys Wicaksono Saputro

## ABSTRACT

In the most recognized steel beam construction with block structure intact and perforated beam (steel castellated beam). Steel castellated beam is the beam used for the construction of long span (over 10 meters), in the form of two steel profiles are incorporated into 1 to obtain the corresponding height profile. Castellated beam also called honey comb beam, because the shape of the hole in terms that resemble the sixth beehive (honey comb). The profile it self hollowed out to reduce weight and allow the connection profile welding can be more effective and efficient. Enhanced profile specification component force structure by extending toward each other and welded along the pattern. This has a castellated beam height (h) is almost 50% higher than the initial profile thus increasing the value of axial bending, the moment of inertia ( $I_x$ ), and seksion modulus ( $S_x$ ).

This study used a 6 specimen castellated as the sample, this is  $h_1=0$ mm (intact),  $h_2=26$ mm,  $h_3=50$ mm,  $h_4=76$ mm,  $h_5=102.5$ mm, and  $h_6=150$ mm. Castellated beam system testing performed in the laboratory is to provide the load centered around the middle span steel beam, then the test region studied the behavior of steel beam to receive the concentrated load. From the test results will be

obtained magnitude of the load,  $\Delta$  (deflection), the load-time graph relationships, stress-strain relationship, relationship load-deflection, deflection-stress relationship.

The results showed that with the addition of cutting height profile (h) on castellated beam steel, so he found a large moment of inertia. With the value of the moment of inertia, it will increase the level of rigor of the castellated beam steel. With the rigidity of the castellated beam steel it will get a small deflection, so it can withstand a great moment, and can withstand large stress. In this study, the optimum height castellated beam steel is not more than 50 % of pre-made high-profile beam castellated.

**Keywords:** castellated beam, moment, moment of inertia, deflection, stress.

## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang Masalah

Pada era pembangunan di Indonesia saat ini banyak pekerjaan konstruksi bangunan menggunakan konstruksi baja sebagai struktur utama. Di samping kemampuan baja yang cukup besar untuk menahan kekuatan tarik dan tekan walaupun dari bahan baja dengan jenis yang paling rendah kekuatannya, juga mempunyai perbandingan kekuatan per volume yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan-bahan bangunan lainnya yang umum dipakai.

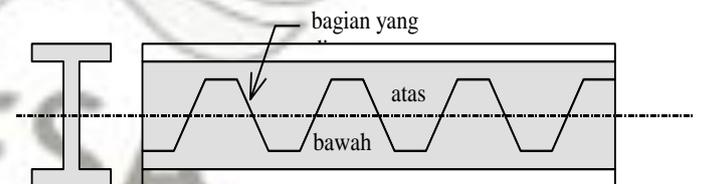
Batang-batang struktur baik kolom maupun balok harus memiliki kekuatan, kekakuan, dan ketahanan yang cukup sehingga dapat berfungsi selama umur layanan struktur tersebut. Dalam mendesain batang tarik yaitu balok baja harus memberikan keamanan dan menyediakan cadangan kekuatan yang diperlukan untuk menanggung beban layanan, yakni balok harus memiliki kemampuan terhadap kemungkinan kelebihan beban (*overload*) atau kekurangan kekuatan (*understrength*). Kelebihan beban dapat terjadi akibat perubahan fungsi balok, terlalu rendahnya taksiran atas efek-efek beban karena penyederhanaan yang berlebihan dalam analisis strukturalnya dan akibat variasi-variasi dalam prosedur konstruksinya.

Dengan harga bahan bangunan khususnya bahan baja yang relatif harganya semakin meningkat, maka dengan menggunakan balok kastela (*castellated beam*) dalam pelaksanaan konstruksi akan diperoleh suatu penghematan biaya yang cukup berarti dari segi penggunaan material

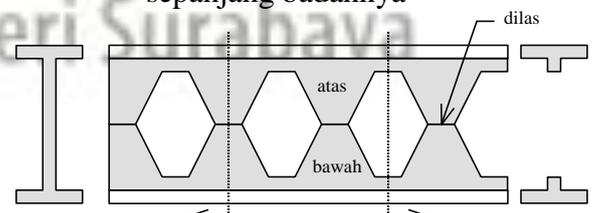
baja, di samping itu juga lebih bersifat padat karya.

Bentuk badan profil baja kastela tergantung dari teknis pembelahan pelat badan profil yang disesuaikan dengan kebutuhannya. Ada beberapa macam bentuk yang sering dipergunakan dilapangan, salah satunya adalah bentuk belah zig-zag horisontal.

Cara pembelahan zig-zag horisontal yaitu dengan cara mengukur sama antara bagian ujung bentang dan bagian tengah bentang, ada juga yang pembelahannya berbentuk belah ketupat dan persegi delapan. Gambar 1, menunjukkan profil I yang dibelah zig-zag lurus di tengah pelat badan, kemudian hasil belahan bagian bawah dibalik dan disatukan kembali dengan bagian atas dengan cara dilas seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Profil Balok I dipotong zig-zag sepanjang badannya



Gambar 2. Balok kastela segi enam

Sudut  $\theta$  dapat digunakan antara  $45^{\circ}$  sampai dengan  $70^{\circ}$ , sedangkan yang banyak dipakai dilapangan adalah  $45^{\circ}$  dan  $60^{\circ}$ . Sudut  $\theta$  ditentukan dengan memperhitungkan tegangan geser yang terjadi pada bagian garis netral badan sehingga tidak melebihi tegangan ijinnya. Menurut beberapa literatur sudut  $\theta$

yang paling bagus adalah sebesar  $60^{\circ}$ . Jarak  $e$  boleh bervariasi sesuai tegangan geser yang bekerja.

Sedangkan untuk tinggi ( $h$ ) pemotongan profil *castellated beam* di lapangan sendiri belum pernah dikaji secara spesifik dan belum ada ketentuan yang terperinci untuk menentukan besar tinggi pemotongan profil *castellated beam*.

## B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari sub latar belakang di atas maka permasalahan dapat dirumuskan sebagai berikut: Bagaimana pengaruh tinggi pemotongan profil ( $h$ ), terhadap perilaku lentur pada balok baja kastela (*castellated beam*) jika beban diletakan pada bagian baja yang tidak berlubang?

## C. Tujuan Penelitian

Untuk memberi arah pada penelitian, terlebih dahulu diketahui apakah tujuan dari penelitian. Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah: Untuk mengetahui ketinggian pemotongan profil ( $h$ ) baja *castellated beam* yang optimal terhadap kekuatan dan beban dari profil *castellated beam* jika beban diletakan pada bagian baja yang tidak berlubang tersebut.

## D. Manfaat Hasil Penelitian

Manfaat yang diharapkan pada penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh tinggi pemotongan profil ( $h$ ), terhadap perilaku lentur pada balok baja kastela (*castellated beam*) jika beban diletakan pada bagian baja yang tidak berlubang.
2. Memberikan sumbangan pemikiran terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dalam teknik sipil utamanya untuk perencanaan struktur baja *castellated beam*.
3. Membuktikan secara praktik tentang kebenaran ketentuan tabel baja *castellated beam*, bukan hanya sekedar secara teori saja.
4. Tambahan referensi bagi kalangan akademis khususnya Jurusan Teknik Sipil di UNESA.

## E. Batasan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, maka analisa ini peneliti batasi pada:

1. Perencanaan hanya terbatas pada tinggi pemotongan profil. Pada penelitian ini di rencanakan tinggi pemotongan profil adalah  $h_1= 0\text{mm}$  (utuh),  $h_2= 26\text{mm}$ ,  $h_3= 50\text{mm}$ ,  $h_4= 76\text{mm}$ ,  $h_5= 102,5\text{mm}$ , dan  $h_6= 150\text{mm}$ .
2. Sudut  $\varnothing$  yang digunakan untuk benda uji adalah sudut  $60^{\circ}$ .
3. Benda uji yang dipakai adalah profil WF 200.100.5,5.8.
4. Penelitian hanya terbatas pada balok untuk struktur bangunan gudang.

## KAJIAN PUSTAKA

### A. Balok Baja Kastela (*Castellated Beam*)

Balok kastela (*castellated beam*) adalah balok yang dipakai untuk konstruksi bentang panjang (lebih dari 10 meter), yang berupa 2 profil baja yang disatukan menjadi 1 untuk mendapatkan tinggi profil yang sesuai.

#### 1. Proses Pembuatan

#### 2. Keuntungan dan Kekurangan Profil *Castellated Beam*

##### a. Keuntungan Profil *Castellated Beam*

Menurut Jihad Dokali Megharief (1997) dan Johann Griinbauer (2001), beberapa keuntungan dari profil *castellated beam*:

- 1) Dengan lebar profil yang lebih tinggi ( $d_g$ ), menghasilkan momen inersia dan modulus *section* yang lebih besar sehingga lebih kuat dan kaku bila dibandingkan dengan profil asalnya.
- 2) Mampu memikul momen lebih besar dengan tegangan ijin yang lebih kecil.
- 3) Bahannya ringan, kuat, serta mudah dipasang.

##### b. Kekurangan Profil *Castellated Beam*

Menurut Johann Griinbauer (2001), Profil *castellated beam* memiliki beberapa kekurangan antara lain:

- 1) *Castellated beam* kurang tahan api. Sehingga harus ditambah lapisan tahan api 20% lebih tebal agar

mencapai ketahanan yang sama dengan profil awalnya.

- 2) Kurang kuat menerima gaya lateral, sehingga perlu diberi satu atau lebih plat pada ujung-ujung (dekat dengan pertemuan balok-kolom).

### 3. Kegagalan pada Profil *Castellated Beam*

Ada beberapa kegagalan dari pembuatan *castellated beam* antara lain:

- a. *Lateral – Torsional – Buckling*
- b. *Rupture of Welded Joint*

### B. Dimensi *Castellated Beam*

Menurut L. Amayreh dan M.P. Saka (2005), dimensi geometri penampang *castellated beam* dibagi menjadi tiga parameter, yaitu:

1. Sudut Pemotongan ( $\emptyset$ )
2. *Expansion Ratio*/Tinggi Pemotongan (h)
3. *Welding Length*/Lebar Pemotongan(e)

### C. Perhitungan *Castellated Beam*

Menurut jurnal Banu Adhibaswara (2010), rumus perhitungan *castellated beam* adalah:

1. Menentukan Dimensi *Castellated Beam*
2. Pembebanan
3. Kontrol Penampang
4. *Bottom dan Top Tee*
5. Kontrol Lendutan

### D. Momen

1. Momen Eksperimen

$$M = \frac{1}{4} PuL$$

2. Momen Teori

$$M_n = (Nt_1 \times Z_1) + (Nt_2 \times Z_2)$$

### E. Kontrol Geser

$$V_u = \frac{1}{2} P \quad ; \quad V_n = 0,6 \times f_y \times d_t \times t_w$$

Kontrol geser:  $V_u \leq V_n$

### F. Sambungan Las

Proses pengelasan yang paling umum terutama untuk mengelas baja struktural memakai energi listrik sebagai sumber panas, yang paling banyak digunakan adalah busur listrik (nyala). Busur nyala adalah pancaran arus listrik yang relatif besar antara elektroda

dan bahan dasar yang dialirkan melalui kolom gas ion hasil pemanasan, kolom gas ini disebut plasma. Pada pengelasan busur nyala, peleburan terjadi akibat aliran bahan yang melintasi busur dengan tanpa diberi tekanan.

Sambungan kuat bila:

$$\sigma_w = P/A\sigma \text{ (N/mm}^2\text{)} \leq \sigma_{wijin} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\tau_w = P/A\tau \text{ (N/mm}^2\text{)} \leq \tau_{wijin} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

### G. Tegangan

Tegangan adalah gaya yang bekerja pada baja per satuan luas penampang baja. Regangan merupakan respon dari tegangan, regangan yaitu perbandingan antara pertambahan panjang yang terjadi akibat tegangan dengan panjang baja mula-mula. Tegangan dasar adalah tegangan leleh yang dibagi dengan faktor keamanan. Hal ini diharapkan tegangan yang terjadi pada struktur tidak akan melampaui tegangan batas elastis, sehingga batang struktur selalu kembali ke bentuk semula pada saat tidak ada pembebanan. Jenis tegangan adalah sebagai berikut:

#### ❖ Tegangan Leleh

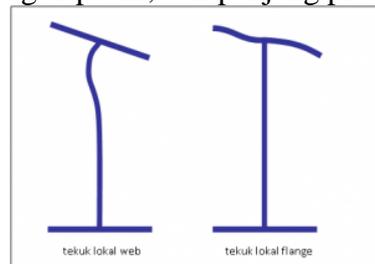
Tegangan leleh untuk perencanaan ( $f_y$ ) tidak boleh diambil melebihi nilai yang diberikan pada tabel sifat mekanisme baja struktural.

#### ❖ Tegangan Putus/Runtuh

Tegangan putus untuk perencanaan ( $f_u$ ) tidak boleh diambil melebihi nilai yang diberikan pada tabel sifat mekanisme baja struktural.

### H. Gaya Tekuk Lateral (*Buckling*)

Gaya tekuk lateral terjadi apabila elemen penampang pada sumbu Y tidak bisa menahan gaya aksial yang terjadi, sehingga terjadi pembengkokan pada bagian badan profil seperti pada gambar berikut. Faktor yang mempengaruhi gaya tekuk antara lain, karakteristik kekakuan, bentuk penampang, kelangsingan profil, dan penjang profil.



Gambar 3. Tekuk lateral (*buckling*)

## METODOLOGI PENELITIAN

“Metode penelitian merupakan cara yang ditempuh oleh peneliti dalam melakukan penelitian” (Suharsimi Arikunto, 2002). Jadi metode dapat diartikan sebagai cara yang teratur dalam mengumpulkan, mengolah, dan menganalisa data untuk menentukan suatu teori atau mengembangkannya dan menguji kebenaran dari teori tersebut secara ilmiah. Kegiatan penelitian harus didasarkan pada ciri-ciri keilmuan, yaitu:

1. Rasional
2. Empiris
3. Sistematis

### A. Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimen, penelitian yang menggunakan profil baja sebagai bahan utama dalam penelitian. Dalam penelitian ini profil baja yang digunakan adalah profil baja berukuran WF 200.100.5,5.8.

Pada eksperimen ini akan dibuat 6 benda uji baja *castellated beam* dengan ukuran panjang masing-masing benda uji  $\pm 1,5$  meter dengan lubang yang berbeda-beda, untuk melihat kecenderungannya. Ukuran yang dibuat berbeda pada masing-masing benda uji adalah tinggi pemotongan profil ( $h$ ) yaitu,  $h_1=0$ mm (utuh),  $h_2=26$ mm,  $h_3=50$ mm,  $h_4=76$ mm,  $h_5=102,5$ mm, dan  $h_6=150$ mm yang kemudian akan diuji dengan menggunakan alat uji lentur.

### B. Metode Pengumpulan Data

Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Metode Eksperimen
2. Metode Dokumentasi
3. Metode Literatur atau Kepustakaan

### C. Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang dimanipulasi untuk dilihat pengaruhnya pada variabel lain. Variabel bebas penelitian ini adalah tinggi ( $h$ ) pemotongan profil baja.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel akibat yang keadaannya akan tergantung pada variabel bebas. Sehingga variabel terikat pada penelitian ini adalah kekuatan lentur dari profil *castellated beam*.

### 3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah perlakuan yang disamakan terhadap penelitian yang dilakukan. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah:

- a. Sudut  $\emptyset$  pemotongan profil. Dalam penelitian ini digunakan sudut  $60^\circ$ .
- b. Mutu Baja
- c.  $e$  (lebar pemotongan profil). Dalam penelitian ini digunakan  $e=5,125$ cm.
- d. Jenis profil yaitu WF 200.100.5,5.8
- e. SAP 2000

### D. Pelaksanaan Penelitian

#### 1. Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada semester genap tahun ajaran 2012/2013.

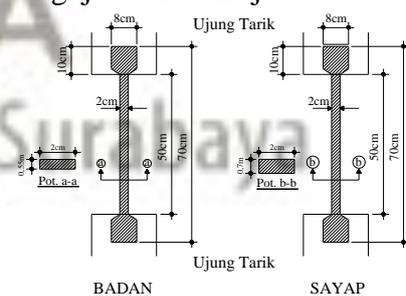
#### 2. Tempat Penelitian

Tempat penelitian adalah di Laboratorium Ilmu Bahan Universitas Negeri Surabaya.

#### 3. Tahap-Tahap Penelitian

- a. Masa Persiapan
- b. Preliminary Design
- c. Pelaksanaan Pembuatan Benda Uji
- d. Pengujian Benda Uji

##### a) Pengujian Mutu Baja



Gambar 4. Set-up pengujian uji tarik

##### b) Uji Kuat Lentur

Sistem pengujian baja *castellated beam* yang dilakukan di laboratorium adalah dengan memberi beban terpusat di sekitar tengah bentang balok baja, kemudian pada daerah uji (*test region*) dipelajari perilaku balok

baja saat menerima beban terpusat tersebut.

Di samping itu nilai hasil pengujian juga dibaca pada *dial gauge* yang meliputi data *buckling*, lendutan, dan pertambahan panjang. Data tersebut digunakan sebagai pembandingan dengan data yang didapat pada *Pc/software*.

### c) Pengolahan Data

Setelah melakukan penelitian di laboratorium, akan diperoleh data hasil pengujian yang mencakup:

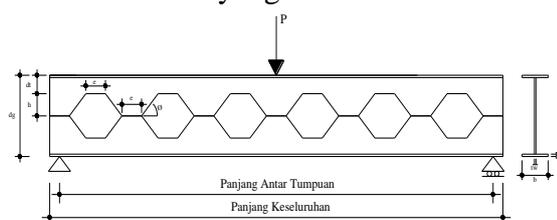
- Data hasil pengujian momen lentur
- Data hasil pengujian tegangan lentur
- Kontrol geser pada bagian berlubang
- Kontrol geser pada bagian tidak berlubang
- Data hasil pengujian lendutan pada P maksimal
- Data hasil pengujian lendutan pada P yang sama
- Data hasil pengujian *buckling* pada P maksimal
- Data hasil pengujian *buckling* pada P yang sama

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### A. Pemeriksaan Bahan

#### 1. Penyajian Terhadap Ukuran Dimensi Balok Kastela (*Castellated Beam*)

Balok baja kastela yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai ukuran dimensi yang berbeda-beda.



Gambar 5. Dimensi baja kastela (*castellated beam*)

### 2. Uji Tarik

Hasil pengujian uji tarik pada baja WF 200.100.5,5.8 pada bagian badan, sayap atas, dan sayap bawah dapat diketahui mutu bajanya. Mutu baja akan dinyatakan dalam bentuk grafik hubungan tegangan dan regangan.

Hasil pengujian tarik didapat rata-rata mutu baja yang digunakan sebagai benda uji pada balok baja kastela seperti pada tabel berikut:

Tabel 1. Mutu baja

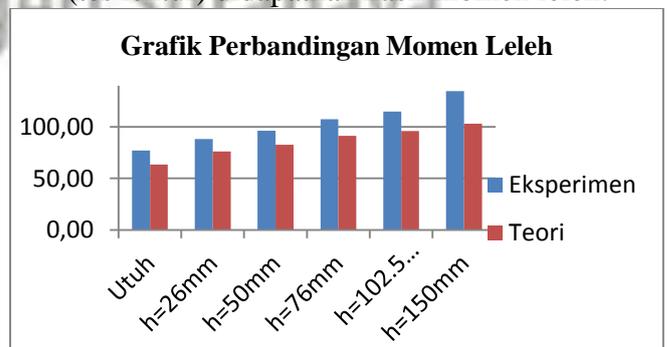
No	Profil	$\sigma$ Leleh (Mpa)	Rata-Rata Fy Leleh (Mpa)	$\sigma$ Runtuh (Mpa)	Rata-Rata Fy Runtuh (Mpa)
1	Badan	372,73	372,73	527,27	527,27
2	Sayap Bawah	384,26	370,33	572,3	569,31
3	Sayap Atas	356,4		566,32	
Rata-Rata Fy Keseluruhan		371,13		555,3	

Dari hasil pengujian tarik yang dilakukan dilaboratorium didapat nilai modulus elastis ( $E$ ) baja WF 200.100.5,5.8 sebesar  $45580,81 \text{ N/mm}^2$ . Hasil modulus elastisitas tersebut nilainya jauh di bawah nilai standart yang dinyatakan dalam SNI yaitu  $200000 \text{ N/mm}^2$ .

### B. Kuat Lentur Balok

#### 1. Perbandingan Momen Teori dengan Momen Eksperimen Terhadap Tinggi Pemotongan Profil ( $h$ )

Dari hasil pengujian di laboratorium (tes lentur) didapatkan hasil momen leleh:

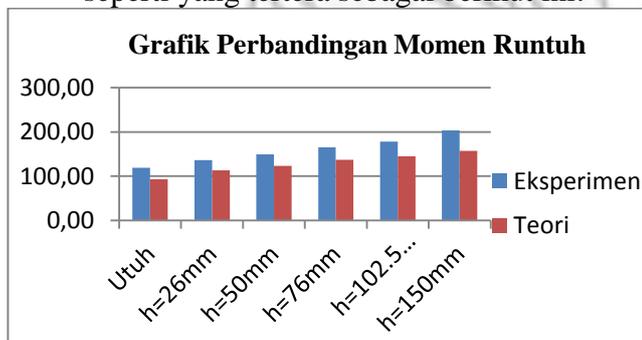


Gambar 6. Grafik perbandingan momen leleh teori dan eksperimen

Dalam hal ini bila ditinjau secara teoritis semakin tinggi pemotongan profil ( $h$ ) maka semakin besar pula momen inersianya, sehingga kemampuan menahan momen balok baja kastela semakin besar

yang pada akhirnya akan membuat balok tersebut menjadi kuat dan kaku. Kemudian setelah menarasikan data penelitian pada kondisi leleh dari benda uji, dilihat kecenderungan bahwa semakin tinggi pemotongan profil (h), benda uji maka momen inersia yang dihasilkan juga semakin besar ini dibuktikan bahwa besarnya momen yang dihasilkan semakin meningkat dari benda uji ke-1 sampai ke-6. Dimana momen inersia akan berbanding lurus dengan besarnya momen eksperimen dan juga tingkat kekuatan dan kekakuan dari balok baja tersebut. Jadi semakin tinggi pemotongan profil (h), maka akan dihasilkan momen yang semakin besar.

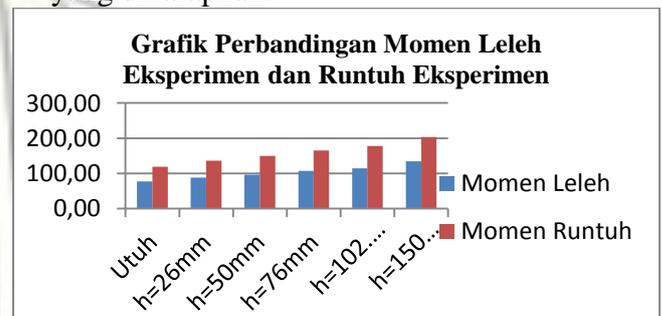
Dari hasil pengujian di laboratorium (tes lentur) didapatkan hasil momen runtuh seperti yang tertera sebagai berikut ini:



Gambar 7. Grafik perbandingan momen runtuh teori dan eksperimen

Dalam hal ini bila ditinjau secara teoritis semakin tinggi pemotongan profil (h) maka semakin besar pula momen inersianya, sehingga kemampuan menahan momen balok baja kastela semakin besar yang pada akhirnya akan membuat balok tersebut menjadi kuat dan kaku. Kemudian setelah menarasikan data penelitian pada kondisi runtuh dari benda uji, dilihat kecenderungan bahwa semakin tinggi pemotongan profil (h), benda uji maka momen inersia yang dihasilkan juga semakin besar ini dibuktikan bahwa besarnya momen yang dihasilkan semakin meningkat dari benda uji ke-1 sampai ke-6. Dimana momen inersia akan berbanding lurus dengan besarnya momen eksperimen dan juga tingkat kekuatan dan kekakuan dari balok baja tersebut. Jadi semakin tinggi pemotongan profil (h), maka akan dihasilkan momen yang semakin besar. Namun yang membedakan untuk kondisi

leleh dan runtuh adalah adanya gejala *buckling*. Jadi dengan adanya tinggi pemotongan profil (h), semakin tinggi pemotongannya maka gejala *buckling* yang terjadi juga akan semakin bertambah. Namun pada kondisi tertentu harus diambil optimalnya supaya tidak terjadi *buckling* yang besar, sehingga balok baja kastela masih memiliki kekuatan dan kekakuan yang diharapkan.



Gambar 8. Grafik perbandingan momen runtuh eksperimen dan leleh eksperimen

Tabel 2. Kekuatan lentur residu

Benda Uji	Bentang (L) (m)	P Maksimal Eksperimen (KN)	Momen (KN.m)		Kekuatan Lentur Residu (%)
			Leleh	Runtuh	
Utuh	1,170	406,46	77,07	118,89	54,25
h=26mm	1,315	413,72	88,21	136,01	54,19
h=50mm	1,283	466,05	96,41	149,48	55,05
h=76mm	1,495	441,70	107,38	165,09	53,73
h=102.5mm	1,285	554,36	114,87	178,09	55,03
h=150mm	1,080	753,32	134,83	203,40	50,85
RATA-RATA					53,85

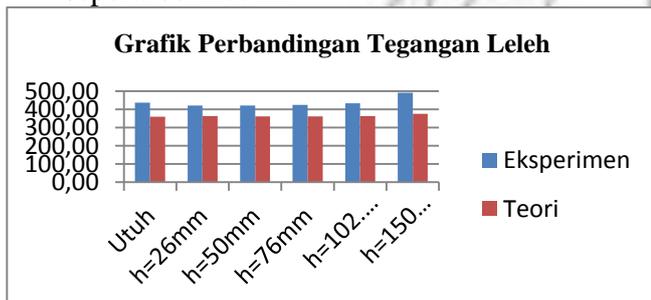
Berdasarkan rumus momen teori yang tercantum pada kajian pustaka pada BAB II dengan adanya penambahan tinggi pada profil balok kastela ini menyebabkan nilai dari momen meningkat secara linear. Hal ini sudah sesuai dengan perencanaan awal bahwa diharapkan untuk nilai momen eksperimennya akan lebih besar dibandingkan dengan nilai momen teorinya. Berdasarkan Tabel 2 dihitung pula kekuatan lentur balok (kekuatan residu) yang dihasilkan antara momen eksperimen leleh dan momen eksperimen runtuh. Rata-rata hasil nilai kekuatan lentur balok adalah sebesar 53,85%.

Jadi dapat ditarik kesimpulan bahwa berdasarkan beberapa analisis di atas,

bahwa untuk keamanan kekuatan lenturnya, tinggi potongan profil (h) balok baja kastela dianjurkan tidak melebihi 50% dari tinggi pemotongan profil (h) sebelum dibuat kastela.

## 2. Perbandingan Tegangan Teori dengan Tegangan Eksperimen Terhadap Tinggi Potongan Profil (h)

Dari hasil pengujian di laboratorium (tes lentur) didapatkan hasil tegangan leleh seperti berikut ini:



Gambar 9. Grafik perbandingan tegangan leleh eksperimen dan teori

Untuk momen inersia setiap benda uji balok kastela ini tidak sama, hal ini dikarenakan setiap benda uji memiliki dimensi yang berbeda satu sama lainnya. Semakin tinggi pemotongan profil (h), maka akan berbanding lurus dengan nilai dari momen inersianya. Dengan adanya peningkatan momen inersia tadi maka akan mengakibatkan peningkatan secara berkala terhadap tegangan eksperimen sesuai dengan pertambahan tinggi profil baja kastela. Karena besarnya momen inersia berbanding lurus dengan besarnya dari tegangan.

Dari hasil tegangan leleh pada Gambar 9, menunjukkan bahwa benda uji ke-6 (h=150mm) memiliki tegangan eksperimen yang paling besar. Hal tersebut juga sudah sesuai dengan teori bahwa pada benda uji ke-6 memiliki tegangan paling besar bila dibandingkan dengan benda uji yang lainnya.

Dari hasil pengujian di laboratorium (tes lentur) didapatkan hasil tegangan runtuh seperti berikut ini:



Gambar 10. Grafik perbandingan tegangan runtuh eksperimen dan teori

Sama halnya dengan tegangan leleh yang terjadi, bahwa dari hasil tegangan runtuh pada Gambar 10, hasilnya menunjukkan bahwa benda uji yang ke-6 (h=150mm) memiliki tegangan eksperimen yang paling besar. Hal tersebut juga sudah sesuai dengan teori bahwa pada benda uji ke-6 memiliki tegangan paling besar bila dibandingkan dengan benda uji yang lainnya.

Untuk mengetahui perbandingan tegangan leleh dengan mutu baja, maka dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Perbandingan tegangan leleh dan mutu leleh

Benda Uji	Tegangan Leleh (N/mm <sup>2</sup> )	Mutu Leleh Sayap (N/mm <sup>2</sup> )
Utuh	437,69	370,33
h=26mm	421,46	370,33
h=50mm	421,50	370,33
h=76mm	425,81	370,33
h=102.5mm	434,40	370,33
h=150mm	491,78	370,33

Untuk mengetahui perbandingan tegangan runtuh yang dihasilkan pada uji laboratorium dengan mutu baja, maka dapat dilihat pada Tabel 4 sebagai berikut:

Tabel 4. Perbandingan tegangan runtuh dan mutu runtuh

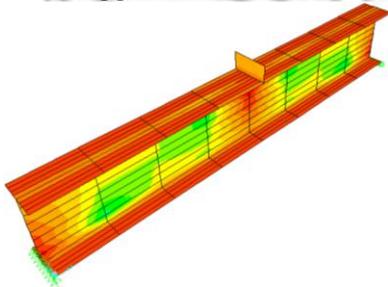
Benda Uji	Tegangan Runtuh (N/mm <sup>2</sup> )	Mutu Runtuh Sayap (N/mm <sup>2</sup> )
Utuh	675,15	569,31
h=26mm	649,83	569,31
h=50mm	653,55	569,31
h=76mm	654,60	569,31
h=102.5mm	673,46	569,31
h=150mm	741,85	569,31

Jadi didapatkan data penelitian di atas nilai tegangan dan mutu baja yang didapat dari pengujian tarik memiliki nilai yang berbeda. Hal ini dikarenakan hasil kedua didapat dari data tersebut memakai alat pengujian yang berbeda, karena setiap alat memiliki hasil pembacaan yang berbeda.

Dari Tabel 3 dan Tabel 4 didapat kesimpulan bahwa dimana tegangan yang terjadi (baik tegangan leleh maupun tegangan runtuh) melebihi mutu baja yang dihasilkan, sehingga hal tersebut menunjukkan pada balok baja kastela tersebut terjadi kerusakan lentur, bukan kerusakan geser atau yang lainnya.

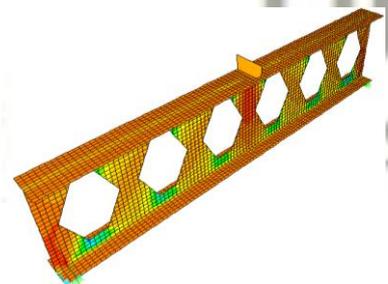
### 3. Analisis Dengan SAP 2000

a. Analisis Benda Uji Utuh ( $h_1 = 0\text{mm}$ ) dengan Menggunakan SAP 2000



Gambar 11. Benda uji utuh

b. Analisis Balok Baja Kastela ( $h_5 = 102,5\text{mm}$ ) dengan Menggunakan SAP 2000



Gambar 12. Benda uji ke-5

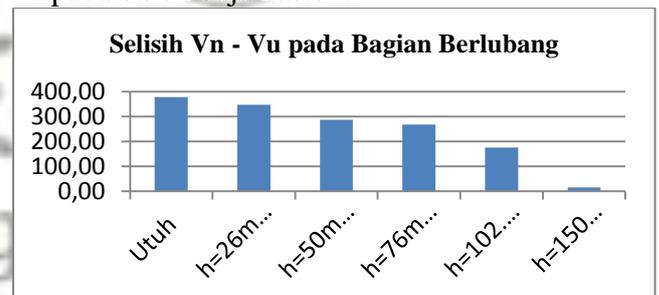
Berdasarkan analisis didapat disimpulkan bahwa pada benda uji baja utuh ketika dilakukan uji tekan dengan beban terpusat, beban vertikal sudah ditransfer ke seluruh penampang baja. Dimana bagian atas dari garis netral tertekan dan bagian bawah dari garis netral tertarik sehingga pada bagian atas garis netral terjadi perpendekan dan

bagian bawah garis netral terjadi perpanjangan. Tampak bahwa suatu balok merupakan kombinasi antara elemen yang tertekan dengan elemen yang tertarik. Sedangkan pada balok baja kastela, beban yang diberikan dapat tersalurkan secara merata keseluruh penampang sampai pada bagian bawah balok kastela, namun bagian sayap bawah masih belum mencapai tegangan maksimal dan tidak mengalami tarikan.

Jadi pada benda uji utuh maupun benda uji balok baja kastela tersebut yang terjadi adalah runtuh lentur bukan runtuh geser. Hal ini menunjukkan bahwa perletakan beban pada bagian penampang baja yang utuh atau tidak berlubang tersebut sudah tepat. Jadi penelitian ini sudah sesuai dengan perencanaan awal yakni diharapkan beban akan tersalurkan secara merata keseluruh penampang balok kastela dan terjadi runtuh lentur, sehingga dapat diketahui pengaruh besar sudut pemotongan profil terhadap perilaku lentur pada balok baja kastela.

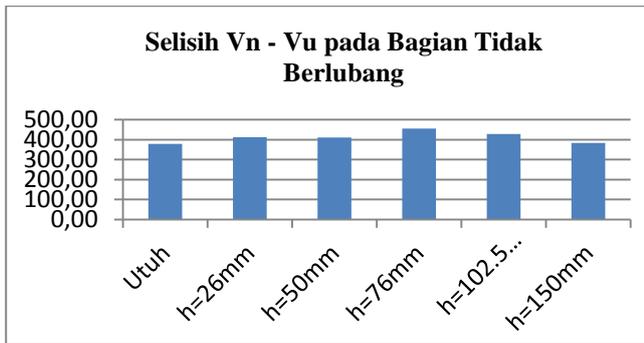
### 4. Kontrol Geser

Berikut ini merupakan grafik kontrol geser pada bagian berlubang yang terjadi pada balok baja kastela:



Gambar 13. Selisih  $V_u$  terhadap  $V_n$  pada bagian berlubang

Berikut ini merupakan grafik kontrol geser pada bagian yang tidak berlubang yang terjadi pada balok baja kastela:



Gambar 14. Selisih  $V_u$  terhadap  $V_n$  pada bagian tidak berlubang

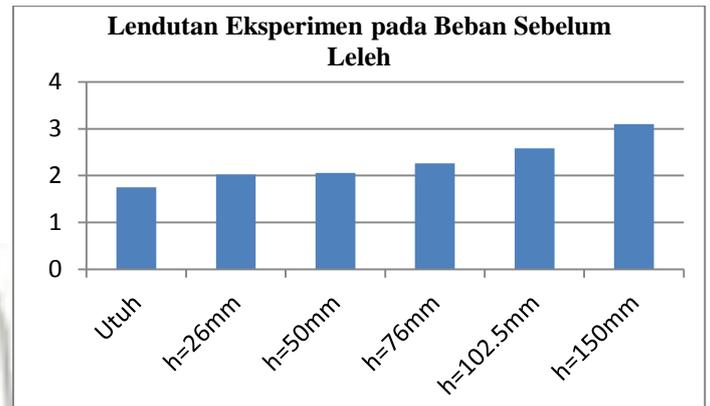
Untuk kontrol geser pada bagian yang berlubang memiliki kecenderungan selisih penurunan  $V_u < V_n$  secara konsisten, dimana nilai dari selisih penurunan  $V_u < V_n$  berbanding terbalik dengan tinggi pemotongan profil baja ( $h$ ). Hal ini sesuai harapan sehingga pada keseluruhan benda uji tersebut mengalami rusak lentur bukan rusak geser atau patah. Namun pada kondisi benda uji ke 6, mulai menunjukkan penurunan untuk kontrol gesernya. Sedangkan untuk kontrol geser pada bagian tidak berlubang memiliki kecenderungan yang relatif sama untuk kerusakan yang terjadi pada keseluruhan benda ujinya. Sehingga rata-rata yang terjadi pada penampang baja yang tidak berlubang ini mengalami kerusakan lentur.

Jadi untuk indikasi keamanan kontrol geser pada penampang balok kastela, tinggi pemotongan profil yang dianjurkan adalah  $h < 102,5\text{mm}$  atau dapat dikatakan tinggi pemotongan ( $h$ ) tidak boleh lebih dari 50% dari tinggi profil sebelum dibuat balok kastela.

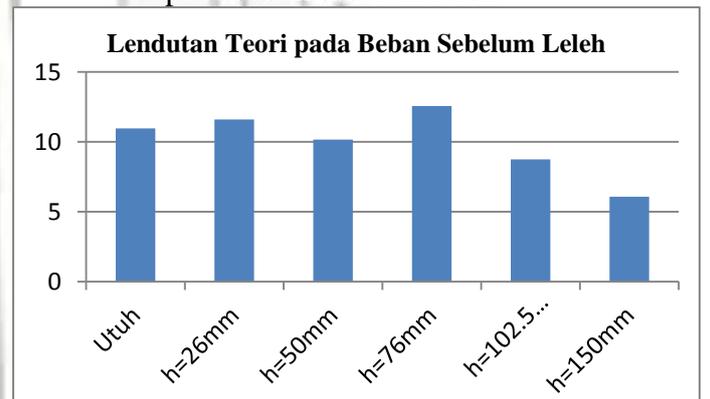
## C. Optimalisasi Balok Baja Kastela (*Castellated Beam*)

### 1. Lendutan

Dari hasil pengujian di laboratorium (tes lentur) didapatkan hasil nilai dari lendutan yang dibaca oleh alat *dial gauge* 3 seperti berikut ini:



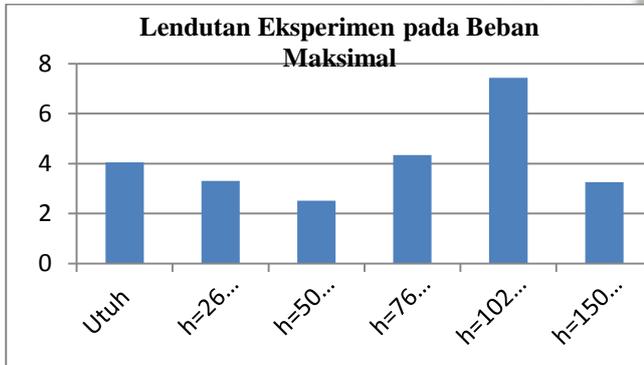
Gambar 15. Grafik lendutan eksperimen pada beban sebelum leleh



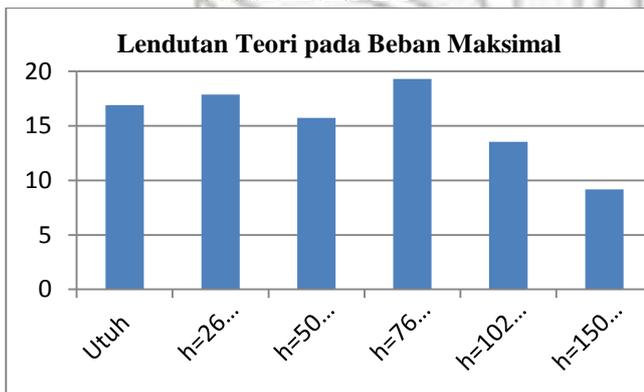
Gambar 16. Grafik lendutan teori pada beban sebelum leleh

Bila dilakukan analisis ulang berdasarkan data yang diperoleh ada kecenderungan yang tampak pada rasio terhadap bentang dan lendutannya sendiri. Pada beban maksimal grafik yang dihasilkan dari data eksperimen hasilnya naik secara konsisten. Hal yang berpengaruh mungkin dikarenakan beberapa faktor, antara lain nilai *buckling* yang semakin tinggi, sehingga mengakibatkan benda mengalami lendutan yang semakin besar, kemudian terjadi kesalahan dalam pembuatan benda uji, pembacaan dial dilakukan oleh orang yang berbeda-beda atau kesalahan pembacaan dial pada saat pegujian dilapangan. Namun setelah dilakukan perhitungan secara teoritis sebagai penguatan data penelitian, hasil dari grafik lendutan dan cenderung turun secara konsisten, kecuali pada benda uji ke-4. Benda uji tersebut mengalami loncatan yang cukup tinggi, dan setelah dianalisis ternyata pada benda uji ke-4 ini memiliki panjang bentang yang berbeda cukup jauh dari benda uji yang lainnya.

Jadi berdasarkan analisis data di atas, dapat ditarik kesimpulan bahwa apabila benda uji memiliki momen inersia besar maka akan dihasilkan momen yang besar pula, dan hal tersebut akan menambah kekuatan serta kekakuan pada balok baja kastela. Dengan didapatkannya kekakuan, maka lendutan yang dihasilkan semakin kecil.



Gambar 17. Grafik lendutan eksperimen pada beban maksimal



Gambar 18. Grafik lendutan teori pada beban maksimal

Dengan perlakuan semakin tinggi pemotongan profil (h) maka ada kecenderungan untuk nilai rasio terhadap bentang semakin besar juga. Hal ini menunjukkan bahwa tinggi pemotongan profil (h) sangat berpengaruh terhadap lendutan balok baja kastela. Disamping hal tersebut bentang pada setiap benda uji juga berpengaruh terhadap nilai rasio. Namun bila ditinjau dari ketinggian  $h > 50\%$  ( $h_5 = 102,5\text{mm}$ ) dari tinggi baja semula, maka indikasi terjadinya lendutan itu semakin besar. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar 17, dimana terjadi lonjakan yang cukup besar hal ini dimungkinkan sekali adanya faktor kesalahan pada saat pengujian yang tidak menyebabkan terjadinya lendutan melainkan terjadi

kerusakan geser atau *buckling*. Namun setelah dilakukan perhitungan secara teoritis sebagai penguatan data penelitian, hasil dari grafik lendutan cenderung turun secara konsisten, kecuali pada benda uji ke-4. Benda uji tersebut mengalami loncatan yang cukup tinggi, dan setelah dianalisis ternyata pada benda uji ke-4 ini memiliki panjang bentang yang berbeda cukup jauh dari benda uji yang lainnya.

Jadi berdasarkan analisis data di atas, dapat ditarik kesimpulan bahwa apabila benda uji memiliki momen inersia besar maka akan dihasilkan momen yang besar pula, dan hal tersebut akan menambah kekuatan serta kekakuan pada balok baja kastela. Dengan didapatkannya kekakuan, maka lendutan yang dihasilkan semakin kecil.

Untuk menunjukkan indikasi keamanan lendutan yang terjadi pada penampang balok kastela, tinggi yang dianjurkan adalah  $h < 102,5\text{mm}$  atau dapat dikatakan tinggi pemotongan (h) tidak boleh lebih dari 50% dari tinggi profil sebelum dibuat balok kastela.

## 2. Pergoyangan (*Buckling*)

Dengan adanya penambahan tinggi pemotongan profil (h) tentu ada resiko indikasi untuk terjadi *buckling*. Untuk menganalisis bahwa ada indikasi terjadi *buckling* pada pengujian, maka dari pembacaan *dial gauge* 5 didapat data untuk pengujian sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil pengujian *buckling* pada beban sebelum leleh

Benda Uji	Beban Eksperimen (KN)	Pergoyangan (mm)
Utuh	263,50	2,12
h=26mm	268,33	3,09
h=50mm	300,58	3,23
h=76mm	287,32	2,12
h=102.5mm	357,58	3,80
h=150mm	499,38	4,23

Dari data analisis tersebut diperoleh bahwa semakin tinggi lubang penampang baja kastela, maka penampang pada bagian bawah sayap (dt) dibagian berlubang akan

semakin kecil, sehingga momen dan tegangan yang diterima menjadi besar sehingga indikasi *buckling* atau keruntuhan prematur akibat tekuk (*buckling*) pada balok kastela juga semakin besar. Berdasarkan Tabel 5 didapatkan ada kecenderungan untuk nilai pergoyangan (*buckling*) pada saat pengujian. Pada pembacaan beban sebelum leleh nilai *buckling* berbanding lurus dengan lendutannya, semakin besar lendutannya maka semakin besar juga *buckling*-nya. Benda uji ke-4 nilai pergoyangannya turun kemungkinan disebabkan pembacaan *dial gauge* pada saat pengujian dilapangan, sedangkan benda uji ke-5 dan ke-6 nilainya *buckling* naik. Berdasarkan Tabel 5 kondisi *buckling* kemungkinan terjadi pada benda uji ke ke-5 dan ke-6. Hal ini dipengaruhi tinggi dari pemotongan profil (h). Disamping hal tersebut juga dapat dipengaruhi banyaknya lubang sehingga berpengaruh pada luasan penampang utuh yang ada. Semakin luas penampang utuh maka semakin kecil *buckling*-nya.

Tabel 6. Hasil pengujian *buckling* pada beban maksimal

Benda Uji	Beban Eksperimen (KN)	Pergoyangan (mm)
Utuh	406,46	6,00
h=26mm	413,72	5,83
h=50mm	466,05	4,80
h=76mm	441,70	4,09
h=102.5mm	554,36	12,42
h=150mm	753,32	8,05

Kecenderungannya pada penelitian ini sudah sesuai dengan perencanaan, bahwa nilai *buckling* yang dihasilkan berbanding lurus dengan tinggi pemotongan profil (h). Namun pada kondisi tertentu balok baja kastela ini akan mengalami *buckling*. Pada benda uji ke-5 dan ke-6 nilainya *buckling* naik cukup besar. Berdasarkan Tabel 6 kondisi *buckling* kemungkinan terjadi pada benda uji ke ke-5 dan ke-6. Hal ini dipengaruhi tinggi dari pemotongan profil (h). Disamping hal tersebut juga dapat dipengaruhi banyaknya lubang sehingga berpengaruh pada luasan penampang utuh

yang ada. Semakin luas penampang utuh maka semakin kecil *buckling*-nya.

Tabel 7. Hasil pengujian *buckling* pada beban yang sama

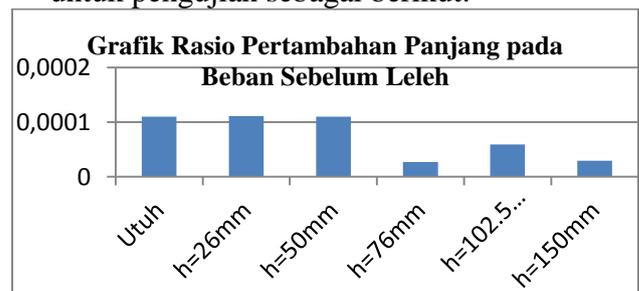
Benda Uji	Beban Eksperimen (KN)	Pergoyangan (mm)
Utuh	150,54	1,31
h=26mm	145,56	1,59
h=50mm	154,70	1,90
h=76mm	153,75	1,07
h=102.5mm	154,70	2,13
h=150mm	152,49	2,29

Pada benda uji ke-4 nilai pergoyangannya turun kemungkinan disebabkan pembacaan *dial* pada saat pengujian dilapangan. Besar kecilnya *buckling* yang terjadi dapat dipengaruhi oleh tinggi dari pemotongan profil (h). Disamping hal tersebut juga dapat dipengaruhi banyaknya lubang sehingga berpengaruh pada luasan penampang utuh yang ada. Semakin luas penampang utuh maka semakin kecil *buckling*-nya.

Jadi dapat disimpulkan bahwa berdasarkan data hasil pengujian dan hasil analisis di atas didapatkan bahwa untuk keamanan indikasi terjadinya *buckling* tersebut dianjurkan tinggi maksimal lubang tidak lebih dari  $h < 102,5\text{mm}$  atau dapat dikatakan tinggi pemotongan (h) tidak boleh lebih dari 50% dari tinggi profil sebelum dibuat balok kastela.

### 3. Pertambahan Panjang

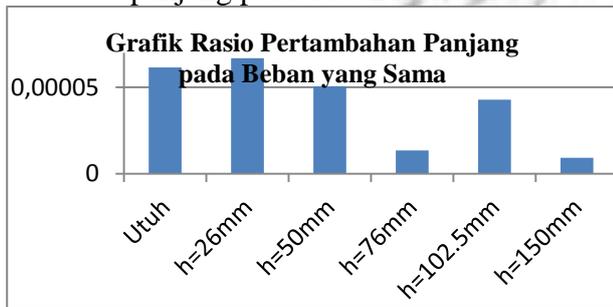
Untuk menganalisis bahwa ada indikasi terjadinya pertambahan panjang pada pengujian yang terjadi, maka dari pembacaan *dial gauge* 1 didapatkan data untuk pengujian sebagai berikut:



Gambar 19. Grafik rasio pertambahan panjang pada beban sebelum leleh



Gambar 20. Grafik rasio pertambahan panjang pada beban maksimal



Gambar 21. Grafik rasio pertambahan panjang pada beban yang sama

Dari Gambar-gambar didapat analisis bahwa semakin tinggi pemotongan profil ( $h$ ), maka ada kecenderungan untuk nilai pertambahan panjang semakin kecil, kedua hal ini saling berbanding terbalik. Dikarenakan pertambahan tinggi profil ini menyebabkan kerusakan runtuh terlebih dahulu sebelum pertambahan panjangnya itu terjadi secara maksimal. Namun pada salah satu benda uji yaitu  $h_4 = 76\text{mm}$  memiliki nilai yang cukup kecil, berbeda sekali dengan teori yang berlaku. Hal ini bisa saja dikarenakan adanya kesalahan dalam pembacaan data pada saat pengujian berlangsung.

Berdasarkan data hasil pengujian dan hasil analisis di atas didapatkan bahwa untuk keamanan indikasi terjadinya pertambahan panjang tersebut dianjurkan tinggi maksimal lubang tidak lebih dari  $h < 102,5\text{mm}$  atau dapat dikatakan tinggi pemotongan ( $h$ ) tidak boleh lebih dari 50% dari tinggi profil sebelum dibuat balok kastela.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari hasil data dan analisis yang diperoleh, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi momen leleh dan momen runtuh dengan adanya penambahan tinggi pemotongan profil ( $h$ ) pada baja kastela, maka didapatkan momen inersia yang besar. Dengan besarnya nilai momen inersia maka akan menambah tingkat kekakuan dari baja kastela tersebut. Dengan semakin kakunya balok tersebut maka akan semakin kecil lendutan, sehingga dapat menahan momen yang besar serta dapat menahan tegangan yang besar.
2. Dalam hasil penelitian menunjukkan bahwa pada beban yang sama, semakin besar tinggi pemotongan profil ( $h$ ) menunjukkan adanya kecenderungan lendutan eksperimen yang terjadi semakin kecil namun belum menyeluruh yakni ada titik optimal pada kondisi tertentu. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada lendutan beban sebelum leleh, beban maksimal, dan beban yang sama, untuk keamanan kekuatan lentur balok baja kastela dari segi lendutan maka besar tinggi pemotongan profil ( $h$ ) yang optimal yaitu  $h$  tidak boleh melebihi 50% dari tinggi profil sebelum dibuat balok kastela.
3. Dalam hasil penelitian menunjukkan bahwa pada beban yang sama, semakin besar tinggi pemotongan profil ( $h$ ) menunjukkan adanya kecenderungan *buckling* yang terjadi semakin besar secara signifikan. Namun pada kondisi tertentu harus diambil optimalnya supaya tidak terjadi *buckling* yang besar, sehingga balok baja kastela masih memiliki kekuatan dan kekakuan yang diharapkan. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, kerusakan yang terjadi merupakan runtuh lentur karena *buckling* tingkat kecil yang terjadi pada sayap dan badan yang terkena beban terpusat di tengah bentang benda uji. Untuk keamanan kerusakan lentur balok baja kastela dari segi *buckling* baik pada beban yang sama, beban pada kondisi leleh, maupun pada beban maksimal maka besar tinggi pemotongan profil ( $h$ ) yang optimal yaitu  $h$  tidak boleh melebihi 50% dari tinggi profil sebelum dibuat balok kastela.

4. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada semua benda uji tegangan leleh dan tegangan runtuh eksperimen yang terjadi melebihi tegangan mutu baja, sehingga yang di alami benda uji pada saat pengujian adalah runtuh lentur.
5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua benda uji mengalami lentur dan tidak terjadi runtuh geser, itu terbukti dengan besarnya gaya lintang dari pembebanan ( $V_u$ ) lebih kecil dari kuat geser nominal ( $V_n$ ), atau dengan kata lain persamaan  $V_u < V_n$  sebagai perencanaan kuat geser telah terpenuhi.

### Saran

Berdasarkan uraian kesimpulan di atas didapat beberapa saran sebagai berikut:

1. Pada penelitian berikutnya sebaiknya bentang pada benda uji balok kastela dibuat hampir sama untuk memudahkan dalam menganalisis optimalisasi balok baja kastela.
2. Mengacu pada hasil penelitian, maka ditinjau dari momen, tegangan, lendutan, *buckling*, dan pertambahan panjang, sebaiknya untuk tinggi pemotongan profil (h) yang optimal yaitu h tidak boleh melebihi 50% dari tinggi profil sebelum dibuat balok kastela.
3. Penelitian selanjutnya disarankan supaya mempelajari terlebih dahulu sistem kerja alat uji lentur dan alat uji tarik, sehingga tidak terjadi kesalahan pada saat melakukan pengujian.
4. Untuk pembacaan *dial gauge* pada saat pengujian harus benar-benar fokus dan teliti serta dilakukan oleh orang yang sama dan menggunakan *dial gauge* yang sama juga agar kesalahan data yang diperoleh tidak terlalu besar dan nilai yang diperoleh lebih akurat.
5. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk lubang pada penampang badan baja dibuat dalam bentuk yang berbeda, seperti bentuk segi delapan dan belah ketupat.

*Institution of Civil Engineers*, 35:2, 2nd Quarter, pp 12-20. 1993.

- L. Amayreh and M. P. Saka Department of Civil Engineering, University of Bahrain. *Failure Load Prediction of Castellated Beams Using Artificial Neural Networks*. 2005.
- Nethercot. D.A., and Kerdal. O. *Lateral-Torsional Buckling of Castellated Beams Struct. Engr-60B:3*, 53-61 . 1982
- Sylvya, Anggraini. 2008. *Modifikasi Perencanaan Hotel Bahtera Balikpapan Menggunakan Hexagonal Castellated Beam*. ITS Surabaya: Skripsi (tidak diterbitkan).
- Adhibaswara, Banu. 2010. *Perencanaan Struktur Jembatan Baja Komposit dengan Profil Castellated Beam*. (<http://papers.gunadarma.ac.id/index.php/civil/article/viewFile/682/646>, diakses 3 Oktober 2012)
- Suprpto. 2005. *Panduan Uji Bahan Bangunan*. Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi Universitas Negeri Surabaya.
- Suprpto. 2005. *Metode Eksperimen Struktur*. Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi Universitas Negeri Surabaya.
- Arikunto, Suharsimi. 2002. *Metodologi Penelitian*. PT. Rineka Cipta, Jakarta.
- Davis, H.E., Troxel. G.E., Wiskocil, C.T., 1955. *The Testing and Inspection of Engineering Materials*. McGraw-Hill Book Company. New York, USA.
- Sudarmadi. 2008. *Evaluasi Kekuatan dan Lendutan Struktur Balok Baja Pada Gedung Dengan Uji Beban Lapangan*, (Online). (<http://www.scribd.com/doc/84649774/2308241249>, diakses 4 Oktober 2012).
- Griinbauer, Johann. 2001. *Engineering Theories of Software Intensive Systems*. (<http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=book&isbn=978-1-4020-3530-2>, diakses 4 Oktober 2012).
- Tim Penyusun. 2006. "Panduan Penulisan dan Penilaian Skripsi Universitas Negeri Surabaya. Surabaya". Universitas Negeri Surabaya.
- Widayanti, Fitri Rohmah. 2012. "Pengaruh Tinggi Pemotongan Profil (h), Terhadap Optimalisasi Tegangan Lentur dan Bahan Baja Balok Kastela (*Castellated Beam*) Ditinjau Dari Lendutan". Unesa: Skripsi (tidak diterbitkan).

### DAFTAR PUSTAKA

Dougherty, B.K. *Castellated Beams: Astate of the Art Report*. *Journal of the South African*