

**TESIS**

**PENGARUH PANJANG DOGBONE TERHADAP PERILAKU  
BALOK KASTELLA**

***THE EFFECT OF DOGBONE LENGTH ON CASTELLATED  
BEAM DUCTILITY***

**MICHAIL AMIN**  
**D012171019**



**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2020**

## TESIS

**PENGARUH PANJANG DOGBONE TERHADAP PERILAKU  
BALOK KASTELLA**

Disusun dan Diajukan Oleh

**MICHAIL AMIN****Nomor Pokok D012171019**

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis

Pada tanggal 31 Januari 2020

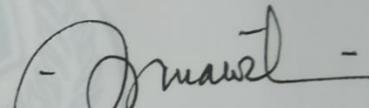
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui

Komisi Penasehat

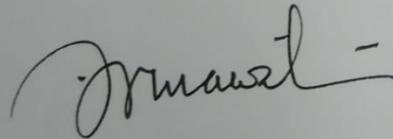


Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng  
Ketua



Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT  
Sekertaris

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Sipil



Dr. Eng. Rita Irmawaty, ST., MT

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. H. Muh. Arsyad Thaha, MT

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertandatangan di bawah ini :

Nama : Michail Amin

NIM : D012171019

Program Studi : Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar – benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, November 2019

Yang menyatakan

Michail Amin

## ABSTRAK

**MICHAIL AMIN**, Pengaruh Panjang Dogbone Terhadap Perilaku Daktilitas Balok Kastella

(dibimbing oleh **Herman** Parung dan **Rita Irmawaty**)

Studi eksperimen mengenai *Reduced Beam Section (RBS)* pada balok kastela bertujuan untuk menganalisa perilaku daktilitas balok kastela menggunakan RBS berbentuk "dogbone". Penelitian ini menggunakan dua jenis balok uji untuk memeriksa pengaruh "dogbone" yang terbuat dari balok baja IWF 150 x 75 x 5 x 7 mm kemudian menjadi balok kastela IWF 225 x 75 x 5 x 7 mm. Ada dua variasi panjang dogbone RBS yaitu panjang 100 mm dan 150 mm yang dipasang pada jarak 100 mm dari muka kolom. Penggunaan dua buah LVDT 100 mm yang diletakkan 300 mm dari puncak kolom untuk mengukur besarnya *displacement* yang terjadi. pengujian dilakukan dengan menggunakan beban siklik yang terdiri dari 8 siklus dimana setiap siklus terdiri 3 sub-siklus. Setiap siklus diberikan *displacement* sebesar 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, dan 100 mm dengan kecepatan ram 0.1 mm/detik. Hasil penelitian menunjukkan kemampuan dari benda uji RBS dengan panjang 100 mm menghasilkan nilai daktilitas rata-rata sebesar 3.133, sedangkan RBS 150 mm menghasilkan nilai daktilitas rata-rata sebesar 3.163.

**Kata kunci** : *Reduced Beam Section*, Siklik, *Dogbone*, Balok kastela

## ABSTRACT

**MICHAIL AMIN**, The Effect of Dogbone Length on Castellated Beam Ductility

(supervised by **Herman Parung** and **Rita Irmawaty**)

The objective of this experimental study of reduced beam section (RBS) on castellated beams to analyze the behavior of castellated beam ductility using RBS with dogbone shape. This study uses two types of test beams to analyze the dogbones effect construct of IWF 150 x 75 x 5 x 7 mm steel beams to become IWF 225 x 75 x 5 x 7 mm castellated beams. There are two variations of RBS dogbone i.e 100 mm in length and 150 mm in length, which install at 100 mm from the edge of the column. Using two LVDT 100 mm which is placed 300 mm from the top of column to measure displacement. The test is carried out using a cyclic load consisting of 8 cycles where each cycle consists of 3 sub-cycles. Each cycle is given a displacement of 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, and 100 mm with a ram speed of 0.1 mm / sec. The results showed that the ability of RBS specimens with 100 mm in length have an average ductility value of 3.133, while an RBS with 150 mm in length have an average ductility value of 3.163.

**Keyword :** Castellated Beam, Reduced Beam Section, Cyclic load, Dogbone

## KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah SWT atas Izin-Nya sehingga penulisan proposal penelitian dengan judul “**Pengaruh Panjang Dogbone terhadap perilaku balok kastella**”. dapat terselesaikan. Tak lupa pula penulis haturkan shalawat dan salam atas junjungan Nabi Muhammad SAW sebagai suri tauladan bagi sekalian umat dalam segala aspek kehidupan, sehingga menjadi motivasi penulis dalam menuntut ilmu di Universitas Hasanuddin.

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang begitu besar kepada bapak **Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng.** selaku ketua komisi penasehat yang telah banyak memberikan waktu, gagasan dan pengetahuan serta dorongan semangat dan motivasi kepada penulis. Ucapan dan penghargaan yang sama kami sampaikan kepada bapak **Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.** selaku sekretaris komisi penasehat yang telah banyak memberikan waktu, gagasan dan pengetahuan serta dorongan semangat dan motivasi kepada penulis.

Penghargaan yang setinggi-tingginya kepada: ibu **Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, MA.**(Rektor Universitas Hasanuddin), bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc** (Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin), bapak **Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.**(Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin), bapak **Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge. S.T.,M.T.** (Ketua Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas

Hasanuddin), bapak **Dr. Eng. Ir. H. Muh. Farouk Maricar, M.T.**(Ketua Program Studi S2 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin), dan Bapak/Ibu Dosen Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah mengarahkan dan membimbing dalam proses perkuliahan. Bapak/Ibu staf Pascasarjana Universitas Hasanuddin, dan Staf Prodi S2 Teknik Sipil yang sangat membantu dalam proses administrasi, kami sampaikan terima kasih.

Akhir kata penulis berharap semoga proposal ini dapat bermanfaat utamanya bagi penulis sendiri dan bagi pengembangan ilmu pengetahuan pada umumnya.

Makassar, Agustus 2019

Michail Amin

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN SAMPUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGAJUAN</b> .....	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN</b> .....	iv
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>BAB I    PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Tujuan Penelitian .....	4
D. Manfaat Penelitian.....	4
E. Batasan Masalah .....	4
F. Sistematika Penulisan .....	5
<b>BAB II    TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Balok Kastella .....	6
1. Pengertian Umum.....	7

2. Pengertian Bagian-bagian Umum Pada Balok	
Kastella.....	7
3. Tipe-tipe balok kastella .....	8
4. Keuntungan dan Kekurangan Balok	
Kastella.....	9
B. Reduced Beam Section (RBS) .....	11
1. Prosedur Desain RBS .....	14
2. Kriteria Keandalan Sistem Struktur .....	18
a. Kekakuan .....	18
b. Daktilitas.....	19
c. Envelope Curve.....	20
d. Kurva Hysteris.....	21
e. Potensial Energi dan Kekakuan Siklus.....	23
C. Penelitian Terdahulu .....	24
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
A. Diagram Alir Penelitian .....	28
B. Waktu dan Lokasi Penelitian.....	29
C. Kerangka Pengujian .....	29
D. Benda Uji .....	30
E. Alat dan Bahan Penelitian .....	31
F. Pelaksanaan Pengujian .....	34
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
A. Beban Hasil Pengujian .....	40

B. Penentuan Titik Leleh .....	41
C. Daktilitas .....	50
D. Perilaku Sambungan Kolom.....	52
<b>BAB V PENUTUP</b>	
A. Kesimpulan dan Saran .....	54
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>56</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR TABEL

1.	Parameter daktilitas struktur gedung (SNI – 1726 – 2002) .....	20
2.	Dimensi variasi bukaan balok kastella dan RBS .....	30
3.	Lendutan dan beban pada masing-masing benda uji .....	41
4.	Nilai Hubungan Beban dan Displacement pada RBSC – 1 .....	44
5.	Nilai Hubungan Beban dan Displacement pada RBSC – 2 .....	46
6.	Daktilitas Kolom.....	51

## DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1.	(a). Pemotongan balok baja sesuai dengan pola tertentu yang diinginkan, (b). Pemisahan bagian balok baja menjadi dua bagian, (c). Penyambungann kembali balok baja menjadi balok kastella dengan menggunakan las..... 7
2.	Bagian-bagian pada balok kastella ..... 8
3.	Balok kastella dengan bukaan hexagonal ..... 8
4.	Balok kastella dengan bukaan <i>diamond</i> ..... 8
5.	Balok kastella dengan bukaan lingkaran ..... 9
6.	Jenis-jenis RBS ..... 12
7.	Desain RBS pada flens balok terkoneksi (ANSI/AISC, 2016).... 13
8.	Freebody untuk nilai $M_{RBS}$ (ANSI/AISC, 2016)..... 16
9.	Kriteria Kekakuan (Aswad, 2017) ..... 19
10.	Hysteretic Curve dan Envelope Curve (Aswad, 2017) ..... 20
11.	(a). Disipasi energi relative (b). Prilaku histeresis yang tidak dapat diterima (c). Disipasi Energi..... 22
12.	Diagram Alir penelitian ..... 28
13.	Kerangka Pengujian Balok Kolom ..... 29
14.	a). RBS Panjang 150 mm dan c). RBS Panjang 100 mm ..... 31
15.	Hydraulic Actuator ..... 31
16.	Personal Computer dan Data Logger..... 32
17.	Load Cell ..... 32

18.	Strain Gauge .....	33
19.	LVDT(Linear Variable Differential Transformer) .....	33
20.	Kerangka pengujian (a) RBSC- 1, (b) RBSC- 2.....	34
21.	Pola Pembebanan.....	36
22.	Pola Riwayat Pembebanan .....	37
23.	Riwayat pembebanan setiap pengujian (Displacement Control)	40
24.	(a) Grafik beban-lendutan RBSC-1 (b) Kurva <i>back bone</i> titik leleh pertama dan titik maksimum daerah tarik dan dorong. ....	43
25.	(a) Grafik beban-lendutan RBSC- 2 (b) Kurva <i>back bone</i> titik leleh pertama dan maksimum daerah tarik dan dorong.....	45
26.	Grafik beban maksimum terhadap perpindahan pada masing-masing benda uji. ....	46
27.	Pengujian eksperimental .....	47
28.	Teori Kurva $P - \Delta$ .....	48
29.	Kurva perbandingan model Reduced Beam Section ( RBS ) ...	49
30.	Kurva Kontrol Terhadap Benda Uji Normal .....	50
31.	Tekuk Lateral pada Area RBS 1.....	52
32.	Tekuk Lateral pada Area RBS 2.....	53

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **A. Latar Belakang**

Komponen material utama dari bangunan-bangunan di dunia saat ini adalah baja dan beton, terkhusus pada bangunan tinggi. Meninjau dari segi kekuatan, kekakuan, dan daktilitas, material baja lebih unggul dibandingkan beton. Oleh karenanya baja selalu ditemukan disetiap konstruksi bangunan, meski tidak mendominasi dalam segi volume (Dewobroto, 2016).

Salah satu model penggunaan baja yang sangat sering dijumpai pada dunia konstruksi yaitu model baja yang digagas oleh H.E. Horton dari Chicago dan Iron Work pada tahun 1910 yang mana dikenal sebagai balok kastella. Balok ini merupakan baja-baja yang mempunyai bukaan di bagian badan (web). Profil baja kastella mempunyai beberapa kelebihan, diantaranya adalah mempunyai momen inersia dan modulus penampang yang lebih besar sehingga lebih kuat dan kaku, bahannya ringan dan cocok untuk bentangan panjang (Megharief, 1997). Kelebihan lainnya adalah memiliki performa yang sangat efisien terhadap ketahanan lentur (Jamadar, 2015). Di samping kelebihan, profil baja kastella juga mempunyai beberapa kelemahan yaitu tidak tahan api dan tidak kuat menerima gaya lateral sehingga perkuatan perlu diberikan pada sambungan balok dengan kolom (Grunbauer, 2001).

Herman Parung, (2013) telah melakukan penelitian dengan variasi

sudut dan panjang bukaan dengan tinggi bukaan  $0,6 H$  yang diberi pembebanan monotonik. Profil baja solid yang dipabrikasi menjadi balok kastella adalah IWF 200 100 5.5 8. Hasil penelitiannya menunjukkan sudut bukaan  $60^{\circ}$  dan panjang bukaan  $e = 3b = 9 \text{ cm}$  memberikan hasil yang terbaik dari sudut dan panjang bukaan untuk bukaan segi enam (*hexagonal*).

Aswad dkk (2017) melakukan eksperimen dengan menggunakan balok yang *dirreduce* dengan model radius menunjukkan bahwa kerusakan terjadi pada area RBS yang selisih beban dan lendutan pada beban puncak tidak terlalu berbeda. Kerusakan berkonsentrasi di area RBS flans bawah.

Miller (1998) melaporkan bahwa salah satu jenis retak pada gempa Northridge dimulai pada titik bagian sesi antara las lubang dan balok dibawah flens. Nakashima et al.,(1998) pada gempa Kobe (1995) juga melaporkan bahwa retakan diamati terjadi pada balok ke kolom pada las konektor diakibatkan oleh pengelasan logam, zona terkena panas, logam dasar, dan plat diafragma, yang sebagian besar berada di flens balok bawah. Beberapa penelitian eksperimental dan kajian analitis telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja sambungan, beberapa sambungan sering digunakan untuk meningkatkan daktilitas pada beban gempa yang besar, antara lain (i) pelat penutup atau *haunch*, (ii) perkuatan dengan lempeng segitiga (*rib*) dan (iii) adalah *reduced beam section* (RBS) yang dikenal juga sebagai '*dogbone*'.

Pada sambungan dengan penambahan plat (*haunch* dan *rib*) pada area sambungan balok kolom dengan menggunakan lempeng baja tambahan

menyebabkan pekerjaan lebih banyak dan tidak ekonomis dengan bertambahnya lempeng plat tersebut, sementara pada RBS lebih ekonomis namun dapat mengakibatkan penurunan kekakuan elastis dari momen *frame*, (Kim T, dkk).

*Reduced Beam Section* (RBS) adalah modifikasi pada bagian flens balok dengan memberikan pengurangan luasan dengan jarak tertentu dari tumpuan. Pengurangan luasan tersebut menyebabkan perlemahan pada balok, diharapkan ketika terjadi beban berlebih akibat gempa, sendi-sendi plastis dapat terbentuk di daerah ini. Pengurangan luasan balok juga menyebabkan kapasitas nominal balok menjadi berkurang. Dengan demikian kapasitas nominal kolom yang dituntut untuk menjamin terjadinya mekanisme *strong column weak beam* juga semakin kecil.

Berdasarkan penelitian di atas maka penulis melakukan penelitian terhadap **“Pengaruh Panjang Dogbone terhadap perilaku balok kastella”**.

## **B. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang dikemukakan di atas, maka penulis merumuskan beberapa masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perilaku daktilitas terhadap model variasi panjang RBS pada balok kastella

2. Bagaimana pengaruh kekuatan sambungan RBS *dogbone* pada balok kastella akibat beban siklik.

### **C. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian tersebut adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa perilaku daktilitas terhadap model variasi pajang RBS pada balok kastella
2. Menganalisa nilai kekakuan dan penurunan kekakuan terhadap model variasi pajang RBS pada balok kastella

### **D. Manfaat Penelitian**

1. Pada peneltian ini penggunaan balok kastella dengan RBS pada flens dapat menambah sebuah metode redaman struktur khusus desain gedung bangunan tahan gempa.
2. Dapat dijadikan acuan dan masukan kepada para praktisi tentang *Reduce Beam Section* pada desain balok kastella pada struktur sebagai salah satu cara pendekatan penempatan terbentuknya daerah momen plastis.

### **E. Batasan masalah**

Agar penelitian dapat berjalan efektif dan mencapai sasaran, maka peneliti memberikan batasan masalah yang mencakup sebagai berikut :

1. Membuat sambungan balok kastella dengan menggunakan RBS material baja dengan menggunakan sambungan *End plat*.
2. Balok kastella dibuat dari balok solid IWF 150x75x5 mm menjadi balok IWF 225x75x5 mm.
3. Menentukan dan meletakkan jarak RBS pada flans balok kastella dari muka kolom
4. Menentukan dan meletakkan jarak bukaan balok kastella dari muka kolom.
5. Model bukaan balok kastella yang digunakan yaitu bukaan segi enam (*hexagonal*) dengan sudut  $60^{\circ}$ .
6. Model pembebanan siklik.
7. Tidak membahas kekuatan baut
8. Tidak membahas faktor- faktor yang mempengaruhi karakteristik baja seperti pengaruh suhu, radiasi ultraviolet serta pengaruh asam, basa dan garam

## F. Sistematika Penulisan

Penulisan tesis ini disusun dalam bentuk per bab yang berisi ringkasan secara umum berdasarkan sistematika penulisan berikut ini:

**BAB I PENDAHULUAN**, berisi tentang uraian latar belakang masalah, maksud dan tujuan penulisan, ruang lingkup penelitian dan batasan masalah, serta sistematika penulisan.

- BAB II TINJAUAN PUSTAKA**, berisi teori-teori yang digunakan sebagai landasan atau acuan penelitian.
- BAB III METODE PENELITIAN**, membahas mengenai tahapan, persiapan alat dan bahan, cara penelitian serta uraian tentang pelaksanaan penelitian.
- BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**, membahas mengenai pengolahan data penelitian
- BAB V PENUTUP**, membahas mengenai kesimpulan dari hasil penelitian

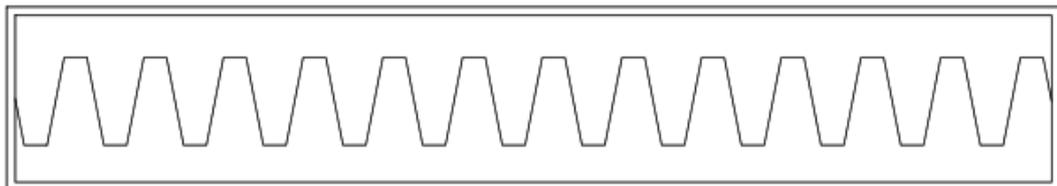
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

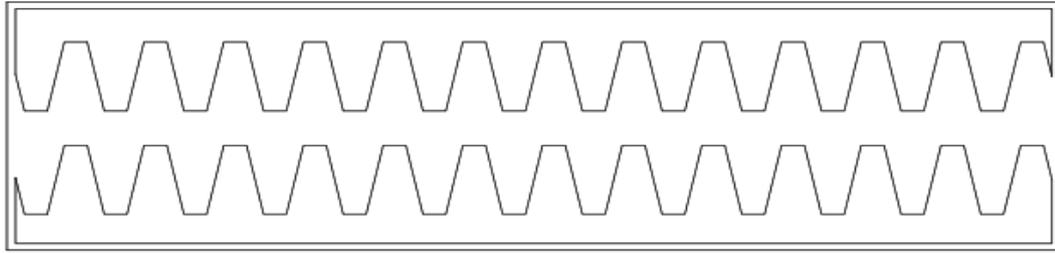
#### A. Balok kastella

##### 1. Pengertian umum

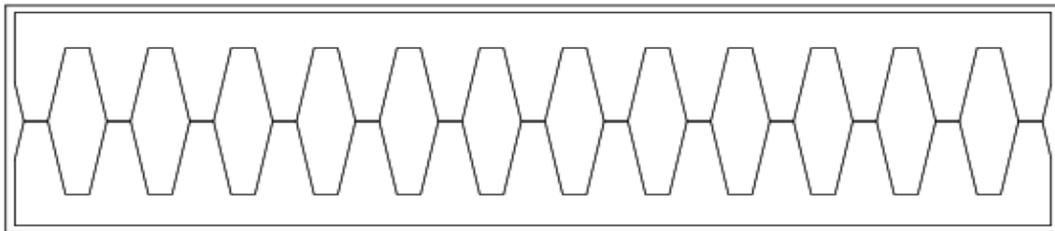
Balok kastella adalah salah satu jenis balok girder baja yang mempunyai bukaan lingkaran atau heksagonal pada bagian badan (*web*) sepanjang bentangan balok dengan interval tertentu (Soltani, 2012). Pengertian lain mengenai balok kastella, yaitu balok baja yang mempunyai lubang pada bagian badannya (Jamadar dan Kumbhar, 2015). Proses dari pembuatan balok kastella adalah dengan memotong secara zig-zag sepanjang *centerline* dan menyambungkan kembali bagian yang telah dipotong dengan cara dilas (*weld*) sehingga dapat meningkatkan kapasitas lentur dari balok tersebut (penambahan tinggi dari balok kastella biasanya kurang lebih 50% dari tinggi balok baja awal) dan mereduksi berat dari balok baja yang memungkinkan balok kastella dapat digunakan untuk konstruksi bentang menengah sampai bentang panjang (*medium to long span construction*).



(a)



(b)



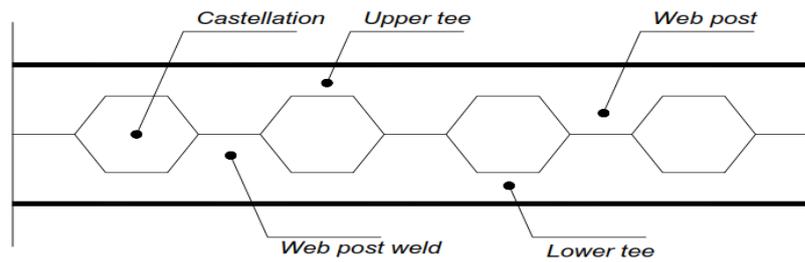
(c)

**Gambar 1.** (a). Pemotongan balok baja sesuai dengan pola tertentu yang diinginkan, (b). Pemisahan bagian balok baja menjadi dua bagian, (c). Penyambungann kembali balok baja menjadi balok kastella dengan menggunakan las.

## 2. Pengertian bagian-bagian umum pada balok kastella

Adapun bebrapa istilah-istilah yang digunakan dalam mendefinisikan bagian-bagian pada balok kastella, antara lain:

1. *Castellation* : *Area section* yang terbentuk setelah proses pelubangan
2. *Upper and lower tee* : Bagian “T” atas dan bagian “T” bawah setelah terjadi pelubangan
3. *Web post* : Luas daerah penampang solid dari balok kastella
4. *Web post weld* : Panjang daerah sambungan las hasil penggabungan dua bagian balok baja yang dipotong

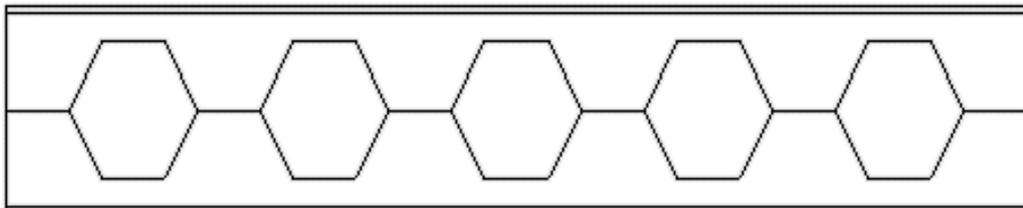


**Gambar 2.** Bagian-bagian pada balok kastella

### 3. Tipe-tipe balok kastella

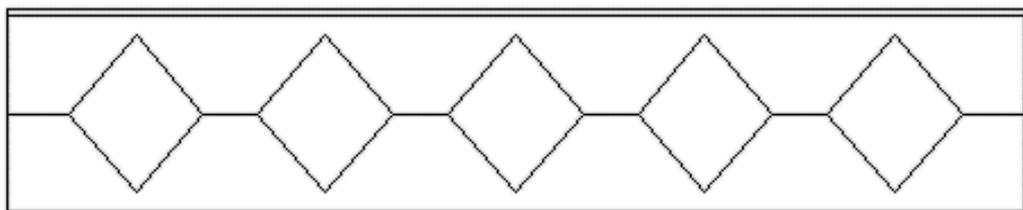
Secara umum, balok kastella yang biasanya digunakan dapat dikategorikan menjadi beberapa jenis berdasarkan bentuk bukaan badan (lubang pada badan), antara lain:

- a. Balok kastella dengan bukaan heksagonal (*hexagonal castellated beam*)



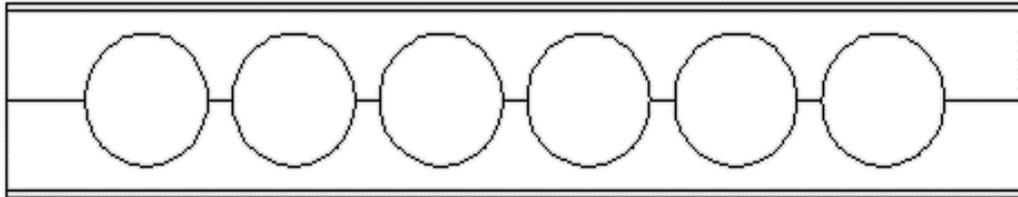
**Gambar 3.** Balok kastella dengan bukaan hexagonal

- b. Balok kastella dengan bukaan *diamond* (*diamond shape opening*)



**Gambar 4.** Balok kastella dengan bukaan *diamond*

- c. Balok Kastella dengan bukaan lingkaran (*circular shape opening*)



**Gambar 5.** Balok kastella dengan bukaan lingkaran

Adapun proses pabrikasi secara umum untuk mendapatkan balok kastella meliputi dua proses utama (Grunbauer, 2001), yaitu:

1. Profil badan yang digunakan merupakan profil baja *hot-rolled* (cetakan panas) yang berbentuk I, H, atau U dan dipotong dengan pola tertentu.
2. Setelah profil baja menjadi dua bagian, bagian pertama hasil potongan digeser serta bagian ujung atas dilas dengan bagian ujung bawah kiri bagian potongan kedua, dan sebaliknya. Proses ini juga dapat dilihat pada Gambar 4.

#### **4. Keuntungan dan kekurangan balok kastella**

Keuntungan dari penggunaan balok kastella dapat terlihat jelas dari penambahan tinggi profil jika dibandingkan dengan tinggi profil mula-mula. Secara umum, akibat positif dari penambahan tinggi ini adalah meningkatnya kekakuan terhadap lentur arah vertical, hal ini disebabkan peningkatan *section modulus* dari penampang balok baja tersebut.

Beberapa keuntungan lain dari balok kastella antara lain (Saka dan Amayreh, 2005):

- a. Balok kastella terbukti efisien jika digunakan untuk struktur dengan beban menengah dan bentang panjang, dimana kapasitas momen dan defleksi yang menjadi *variable control*.
- b. Balok kastella terkadang dapat digunakan sebagai pengganti balok girder hal ini dikarenakan rasio kekuatan berbanding berat dari baja kastella, serta biaya pemeliharaan yang rendah.
- c. Banyak penelitian menjadikan balok kastella sebagai unit pendukung struktur (*secondary units*) bahkan sebagai struktur utama (*main units*) untuk konstruksi struktur ringan hingga menengah dengan bentang menengah sampai bentang panjang.
- d. Balok kastella dapat digunakan untuk gedung bertingkat tinggi, gedung komersial, gudang-gudang industri, struktur portal.
- e. Bukaan pada bagian badan balok kastella dapat digunakan untuk melewati pipa, serta keperluan *ducting* lainnya yang memungkinkan untuk “menghemat” tinggi dari struktur secara keseluruhan.

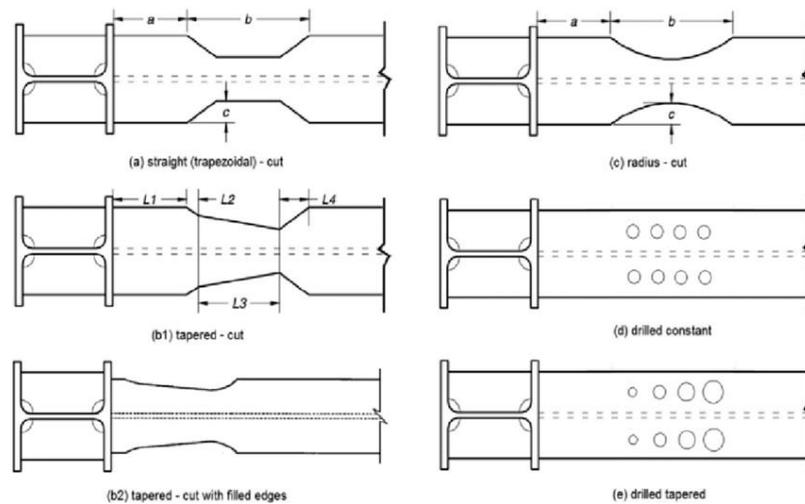
Bukaan pada badan yang terdapat pada balok kastella selain menguntungkan dengan konsekuensi dari “kemunculan” lubang tersebut adalah penambahan tinggi dari balok baja jika dibandingkan dengan tinggi balok baja semula (*parent beam*) juga merupakan kelemahan mendasar dari penyebab keruntuhan balok kastella, dengan hadirnya lubang pada

badan balok kastella (*web opening*), perilaku struktur dari balok kastella akan sangat berbeda jika dibandingkan dengan balok baja biasa karena kemungkinan kegagalan yang berbeda dari balok baja induk (*parent beam*) serta ditemukannya jenis kegagalan baru pada balok kastella. Balok kastella ini juga mempunyai derajat ketidakpastian yang cukup tinggi yang berakibat pada analisis yang rumit dan tidak sederhana.

Kekurangan lain dari balok kastella adalah tidak dapat memikul beban yang cukup besar dengan bentangan yang relatif pendek, karena akan mengakibatkan timbulnya geser yang sangat besar pada bagian *web post* dari balok kastella tersebut. Perilaku geser dan analisis defleksi pada bagian "T" menjadi lebih kompleks dan rumit jika dibandingkan dengan balok baja induk. Sudut-sudut dari bukaan juga dapat mengakibatkan adanya konsentrasi tegangan yang terjadi yang membatasi perilaku dari balok kastella pada saat efek dinamik timbul.

## **B. Reduced Beam Section (RBS)**

*Reduced Beam Section (RBS)* adalah modifikasi pada bagian flens balok dengan memberikan pengurangan luasan dengan jarak tertentu dari tumpuan. Pengurangan luasan tersebut menyebabkan perlemahan pada balok, diharapkan ketika terjadi beban berlebih akibat gempa, sendi-sendi plastis dapat terbentuk di daerah ini. Pengurangan luasan balok juga menyebabkan kapasitas nominal balok menjadi berkurang. Dengan demikian kapasitas nominal kolom yang dituntut untuk menjamin terjadinya mekanisme strong column weak beam juga semakin besar.



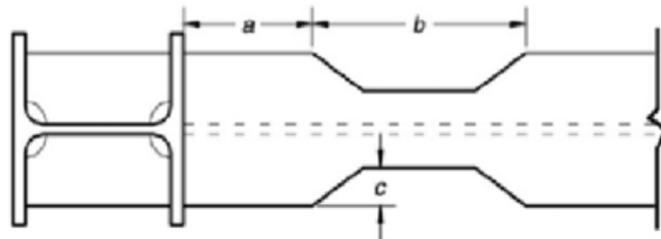
**Gambar 6.** Jenis-jenis RBS

Sebagian besar sambungan dengan menggunakan metode RBS telah diuji dalam berbagai kondisi oleh beberapa peneliti yang berbeda di seluruh dunia. Hasil yang diperoleh dari pengujian bahwa diperoleh sudut *interstory* minimal 0,04 radian akibat beban siklik secara konsisten. Pengujian pada sambungan RBS menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan pada bagian balok RBS dapat diperpanjang, sampai batas tertentu dari muka kolom. Kekuatan maksimal benda uji biasanya dicapai pada sudut *interstory* sekitar 0,02-0,03 radian. Kekuatan ini kemudian secara bertahap berkurang akibat tekuk lokal dan lateral-torsional balok. Kegagalan utama biasanya terjadi pada sudut *interstory* sekitar 0,05-0,07 radian, kegagalan ini terjadi pada flens daerah RBS.

Sambungan dengan RBS telah diuji menggunakan benda uji single-kantilever (satu balok yang melekat pada kolom), dan *double-sided* (spesimen yang terdiri dari satu kolom, dengan balok yang melekat pada

kedua flens). Pengujian telah dilakukan terutama pada benda uji dengan baja polos. Pengujian dengan lembaran komposit telah menunjukkan bahwa keberadaan slab memberikan efek menguntungkan dengan membantu untuk menjaga stabilitas balok pada sudut *interstory* lebih besar. (AISC, 2016)

Model atau desain RSB juga telah diatur pada standar ANSI/AISC 358-16 (2016) "*Prequalified Connection for Special and Intermediate Moment Frames for Seismic Applications*" sebagai acuan dalam desain RBS.



**Gambar 7.** Desain RBS pada flens balok terkoneksi (ANSI/AISC, 2016)

Dari berbagai bentuk potongan yang divariasikan untuk sambungan RBS, termasuk potongan runcing atau model trapezium dan potongan jari-jari atau radius melalui penelitian eksperimental sudah terbukti berhasil untuk mereduksi beban gempa. Dasar keseluruhan dalam ukuran RBS radius pemotongan prosedur desain ini adalah untuk membatasi momen maksimum balok yang dapat berkembang pada muka kolom pada saat plastis yang sebenarnya (sesuai hasil tegangan yang diharapkan) dan kekakuan dari balok pada saat bagian minimum RBS sepenuhnya dihasilkan.

## 1. Prosedur Desain RBS

Langkah awal dalam mendesain RBS yaitu sebagai berikut :

- a. Penentuan dimensi atau ukuran a, b, dan c atau dapat dilihat pada gambar 7.

$$0,5bf \leq a \leq 0,75bf \quad (1)$$

$$0,65d \leq b \leq 0,85d \quad (2)$$

$$0,1bf \leq c \leq 0,25bf \quad (3)$$

Dimana :

$bf$  = lebar sayap balok

$d$  = tinggi balok

- b. menghitung modulus plastis pada penampang minimum dari RBS

$$Z_e = Z_x - 2ct_{bf}(d - t_{bf}) \quad (4)$$

Dimana :

$Z_e$  = Modulus plastis balok pada area penampang minimum dari RBS ( $\text{mm}^3$ )

$Z_x$  = modulus plastis balok tanpa RBS ( $\text{mm}^3$ )

$t_{bf}$  = tebal sayap balok (mm)

- c. Menghitung momen maksimum pada daerah sendi plastis yang letaknya pada bagian penampang minimum dari RBS.

$$M_{pr} = C_{pr} \cdot R_y \cdot F_y \cdot Z_e \quad (5)$$

Dimana :

$C_{pr}$  = Faktor untuk menghitung kekuatan ultimate dari koneksi,

termasuk akibat *strain hardening*, *local restraint*, *additional reinforcement*, bergantung dari keadaan koneksi. Dalam AISC 358-05 dinyatakan standar dari nilai  $C_{pr}$  :

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y} \leq 1,2 \quad (6)$$

Dimana:

$F_y$  = tegangan leleh minimum ( $\text{N/mm}^2$ )

$F_u$  = tegangan pada saat *strain hardening* ( $\text{N/mm}^2$ )

$R_y$  = rasio dari tegangan leleh yang diharapkan dibanding tegangan leleh minimum diambil sebesar 1,5 untuk BJ 36 atau BJ 37

d. Menghitung gaya geser pada bagian tengah RBS ( $V_{RBS}$ ).

Gaya geser tersebut dapat dihitung dengan memperhitungkan pengaruh momen leleh pada bagian tengah RBS ( $M_{RBS}$ ) dan pengaruh geser dari kombinasi gaya gravitasi ( $w$ ) dan gaya gempa. Menurut AISC 358-16, kombinasi pembebanan yang digunakan adalah  $1,2D + f_1L + 0,2S$ .

e. Perhitungan momen maksimum yang mungkin terjadi pada muka kolom

Momen maksimum yang mungkin terjadi pada muka kolom dapat dihitung dari diagram *freebody* dari momen di tengah RBS seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8 menunjukkan bahwa berdasarkan diagram *freebody*, momen pada muka kolom adalah sebagai berikut :

$$M_f = M_{RBS} + V_{RBS}S_h \quad (7)$$

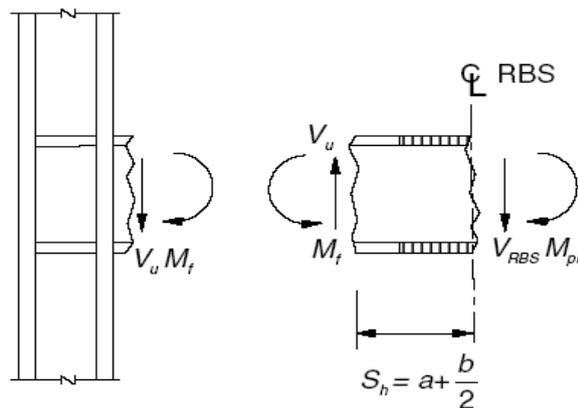
Dimana :

$M_f$  = momen maksimum yang mungkin terjadi pada muka kolom (N-mm)

$M_{RBS}$  = momen plastis yang mungkin terjadi (N-mm)

$V_{RBS}$  = gaya geser maksimum dari dua gaya geser di tengah RBS di tiap ujung balok (N)

$S_h$  =  $a + b/2$  (mm)



**Gambar 8.** Freebody untuk nilai  $M_{RBS}$  (ANSI/AISC, 2016)

- f. Menghitung momen plastis pada balok berdasarkan tegangan leleh yang diharapkan :

$$M_{RBS} = Z_b R_y F_y \quad (8)$$

Dimana :

$M_{RBS}$  = momen plastis berdasarkan tegangan leleh diharapkan (N – mm).

$Z_b$  = modulus penampang plastis ( $\text{mm}^3$ )

$R_y$  = Rasio dari tegangan leleh yang diharapkan dibanding tegangan leleh minimum

$F_y$  = tegangan leleh minimum (MPa)

Nilai  $M_f$  harus kurang daripada  $\Phi_d M_{RBS}$ . Jika hasilnya tidak memenuhi maka nilai  $c$  harus ditingkatkan atau mengurangi nilai dari  $a$  dan  $b$

$$M_f \leq \Phi_d M_{RBS} \quad (9)$$

dimana :

$M_f$  = Momen maksimum mungkin terjadi pada muka kolom  
(N-mm)

$\Phi_d$  = Faktor reduksi untuk daktilitas maksimum

$M_{RBS}$  = Momen plastis berdasarkan tegangan leleh diharapkan  
(N-mm)

g. Menghitung gaya geser ultimit dari balok

$$V_u = \frac{2M_{pr}}{L'} + V_{grav} \quad (10)$$

dimana :

$V_u$  = gaya geser ultimate balok

$L'$  = jarak antara titik tengah RBS (mm)

$V_{grav}$  = gaya geser balok dari  $1,2D + 1,6L + 0,2S$ .

h. Pembatasan terhadap tebal sayap kolom , tebal sayap kolom harus memenuhi

$$t \geq \frac{(dz+wz)}{2} \quad (11)$$

dimana :

$t$  = tebal sayap kolom (mm)

$d_z$  = tebal panel zone (mm)

$w_z$  = lebar panel zone (mm)

## 2. Kriteria Keandalan Sistem Struktur

Secara umum keandalan sambungan dievaluasi melalui uji pembebanan lateral statik bolak-balik. Kurva histeresis antara perpindahan dan beban dijadikan dasar untuk mendapatkan parameter seperti beban ultimit, kekakuan, dan daktilitas.

### a. Kekakuan

Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk memperoleh satu unit *displacement*. Nilai kekakuan merupakan sudut kemiringan dari hubungan beban dan lendutan. Makin kaku suatu struktur makin besar nilai kekakuannya. Kekakuan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (12)$$

Dimana :

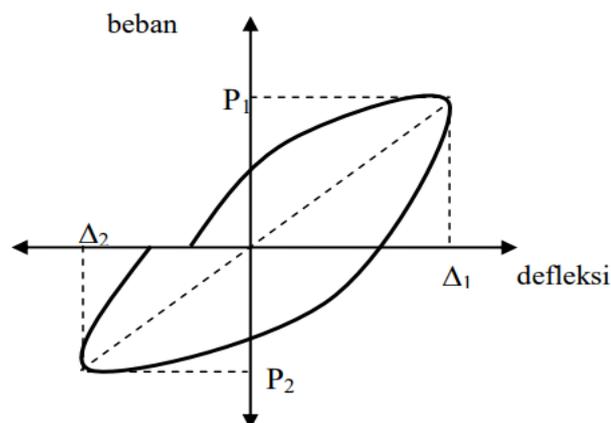
$k$  : Kekakuan (kN/mm)

$P$  : Gaya batang (kN)

$\Delta$  : Perpindahan batang (mm)

Untuk elemen atau struktur yang menerima beban siklik, menaksir karakteristik kekakuannya dengan menghitung *peak-to-peak stiffness*. Kekakuan tersebut ditetapkan sebagai kemiringan garis yang menghubungkan puncak-puncak beban maksimum baik nilai positif dan negatif, hal ini dapat terlihat pada kurva hubungan beban dan defleksi seperti pada Gambar 8 dan dengan persamaan berikut :

$$k = \frac{P_1 + P_2}{\Delta_1 + \Delta_2} \quad (13)$$



**Gambar 9.** Kriteria Kekakuan (Aswad, 2017)

#### b. Daktilitas

Daktilitas struktur adalah kemampuan suatu struktur atau komponen struktur untuk tidak mengalami keruntuhan secara tiba-tiba (getas) tapi masih mampu mengalami deformasi yang cukup besar pada saat beban maksimum tercapai sebelum struktur tersebut mengalami keruntuhan (Park dan Paulay, 1975).

Faktor daktilitas struktur adalah rasio antara simpangan/regangan maksimum struktur akibat pengaruh gempa rencana pada saat mencapai kondisi ambang keruntuhan ( $\Delta_u$ ) dan simpangan/regangan pada saat terjadi leleh pertama ( $\Delta_y$ ).

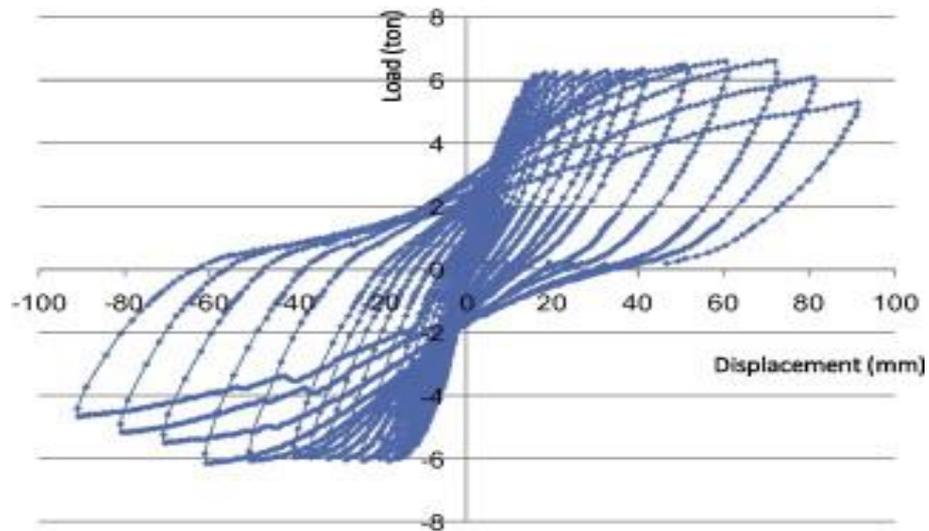
$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (23)$$

**Tabel 1.** Parameter daktilitas struktur gedung (SNI – 1726 – 2002)

Taraf Kinerja Struktur Gedung	$\mu$	R pers. (13)
Elastik Penuh	1.0	1.6
	1.5	2.4
Daktail Parsial	2.0	3.2
	2.5	4.0
	3.0	4.8
	3.5	5.6
	4.0	6.4
	4.5	7.2
	5.0	8.0
	Daktail Penuh	5.3

### c. Envelope Curve

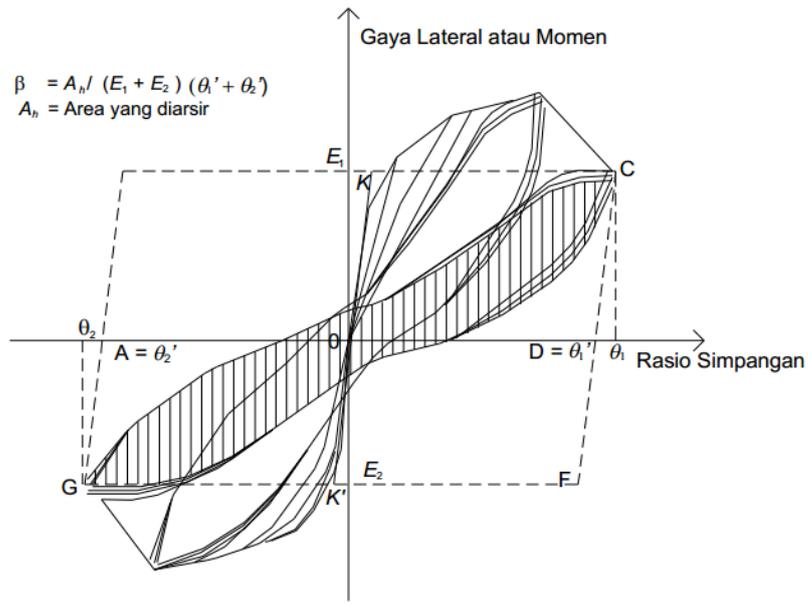
*Envelope loops curve* terdiri dari beban puncak siklus pertama dari masing-masing siklus pembebanan lateral bolak-balik. *Displacement* (lendutan) pada arah positif menghasilkan *envelope curve* positif, sedangkan *displacement* arah negatif menghasilkan *envelope curve* negatif.



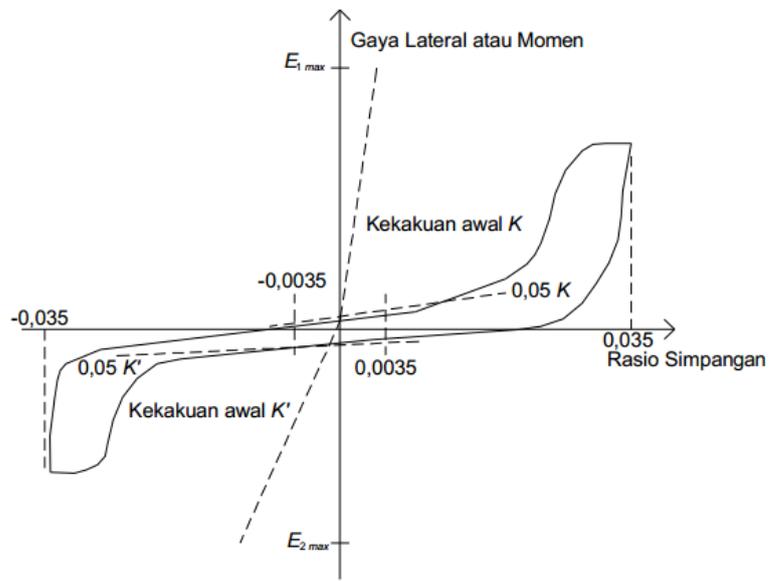
**Gambar 10.** Hysteretic Curve dan Envelope Curve (Aswad, 2017)

#### d. Kurva Hysteresis

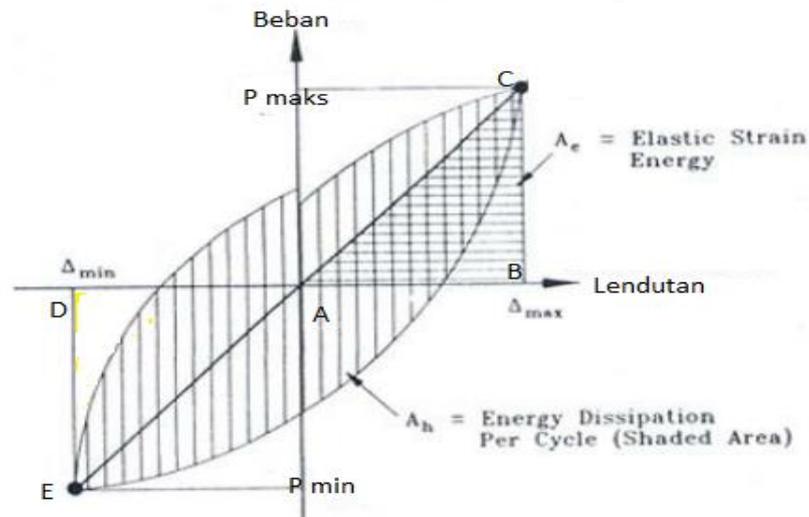
Kurva *hysteresis* yang dihasilkan dari pengujian dengan pembebanan bolak-balik merupakan hubungan antara beban dan simpangan, hubungan ini menunjukkan kapasitas dan perilaku struktur dalam menerima dan menahan beban pada tiap siklusnya. Semakin datar *hysteretic loops* yang terjadi pada tiap siklus, hal ini menunjukkan bahwa pada drif 3,5 % beban maksimum terjadi 75 % kekuatan sisa yang terjadi akibat beban luar dan seterusnya tersajikan pada Gambar 10 (a). Selain itu juga, dari kurva *hysteresis* ( $A_h$ ) dapat diketahui kandungan energi yang diserap maupun yang dilepas oleh masing-masing struktur.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 11.** (a). Disipasi energi relative  
 (b). Prilaku histeresis yang tidak dapat diterima  
 (c). Disipasi Energi

#### e. *Potential Energy (PE)* dan Kekakuan Siklus ( $K_c$ )

*Potential Energy (PE)* pada setiap siklus merupakan luasan total segitiga ACB dan AED pada Gambar 9 (b) energi potensial merupakan energi maksimum yang dimiliki atau disimpan oleh benda uji untuk melakukan usaha (gaya kali jarak atau simpangan) pada beban dan simpangan yang maksimum.

Kekakuan siklus ( $K_c$ ) merupakan kekakuan struktur akibat beban luar yang bekerja pada setiap siklus. Kekakuan merupakan besarnya gaya yang mampu ditahan atau diserap oleh struktur, seperti yang ditunjukkan oleh garis AC dan AE pada Gambar 9. *Hysteretic loops* antara beban-simpangan siklus positif dan negatifnya seimbang, maka garis AC dan AE

melintasi titik tengah koordinat (0,0), sehingga kekakuan siklusnya dapat diperoleh dari rata-rata kekakuan siklus positif dan negatif serta dihitung dengan persamaan:

$$k_c = \frac{P_{Kc}}{\Delta_{Kc}} \quad (15)$$

Dimana :

$k_c$  : Kekakuan siklus (kN/mm)

$P_{Kc}$  : Rata-rata beban siklus positif dan negatif (kN)

$\Delta_{Kc}$  : Rata-rata simpangan siklus positif dan negatif (mm)

Apabila kondisi *Hysteretic loops* antara beban-simpangan siklus positif dan negatif tidak seimbang, maka kekakuan siklus positif dan negatifnya dihitung tersendiri, seperti pada persamaan berikut:

$$k_{c(+)} = \frac{P_{(+)}}{\Delta_{(+)}} \quad \text{dan} \quad k_{c(-)} = \frac{P_{(-)}}{\Delta_{(-)}} \quad (16)$$

Dimana :

$k_{c(+)}$  dan  $k_{c(-)}$  : Kekakuan siklus positif dan negatif (kN/mm)

$P_{(+)}$  dan  $P_{(-)}$  : Beban siklus positif dan negatif (kN)

$\Delta_{(+)}$  dan  $\Delta_{(-)}$  : Simpangan siklus positif dan negatif (mm)

Kekakuan struktur akan mengalami penurunan setiap siklusnya yang disebut degradasi kekakuan siklus, hal ini disebabkan pembebanan siklik menyebabkan efek kelelahan atau *fatigue* pada struktur. Besarnya kekakuan struktur tiap siklus dapat dinyatakan dalam persentase terhadap kekakuan awal struktur pada masing-masing benda uji.

### C. Penelitian Terdahulu

Vetr dkk (2012) dengan judul Perilaku Seismik dari Sambungan Balok RBS Menggunakan Drilled Holes Arrangement (RBS-DHA) pada Flens Balok melalui Studi Eksperimental yang bertujuan membandingkan kemampuan model *radius cut* dengan model menggunakan lubang bor. Berdasarkan hasil eksperimental yang telah dilakukan menemukan hasil bahwa koneksi momen dengan bagian tereduksi dalam flens balok melalui lubang bor dengan variable diameter dan tata letak (RBS-DHA) mampu mencapai rotasi 0,05 rad. Oleh karena itu, koneksi ini dapat digunakan dalam kerangka momen baja khusus. Juga, pada saat koneksi dengan bagian tereduksi dalam flens balok melalui lubang bor dengan variable diameter dan tata letak (RBS-DHA), dibandingkan dengan koneksi RBS dengan model *radius cut*, panjang efektif sendi plastis telah meningkat, dan masalah ini mengarah pada pengurangan dalam lekuk torsi lateral pada balok dan akibatnya menunda ketidakstabilan pada balok selama perilaku siklik. Dengan demikian itu dapat menyebabkan penyerapan energy dalam jangkauan lebih lanjut dari web balok dan mengarah dibandingkan dengan koneksi RBS model *radius cut*.

Ajay (2013) dengan judul penelitian Studi Balok *Reduced Beam Section* Menggunakan Analisis Elemen Hingga yang bertujuan membandingkan kinerja dan beberapa model RBS dengan metode analisis elemen hingga. Pada penelitian ini kontur tegangan bersifat seragam untuk RBS model *radius cut*, sedangkan untuk model trapesium dan sambungan

lurus konsentrasi tegangan diamati di sudut-sudut yang dapat menyebabkan retakan pada bagian flens.

Mara (2014) dengan judul Perilaku Kolom Balok Kastella akibat Beban Siklik yang bertujuan untuk mengetahui perilaku sub-kumpulan balok kolom kastella akibat pembebanan siklik. Dari penelitian ini balok kastella memiliki keunggulan untuk meningkatkan kapasitas lentur dan penyerapan energy masing-masing 100,5% dan 74,3%. Disamping meningkatkan kapasitas lentur balok kastella menurunkan daktalitas parsial dan daktalitas penuh masing-masing 12,6% dan 18,1%, menurunkan rasio resistensi 29,5% dan mempercepat laju degradasi rasio kekakuan 31,4%. Dengan pengisi beton antara balok flange untuk meningkatkan kemampuan balok kastella, maka balok kastella memiliki kemampuan untuk meningkatkan kapasitas lentur sebesar 184,78%, peningkatan penyerapan energy 217,1%, peningkatan daktalitas parsial dan daktalitas penuh masing-masing 27,9% dan 26%, meningkatkan rasio resistensi 52,5% dan memperlambat laju degradasi rasio kekakuan 55,1%.

Aswad dkk (2017) dalam penelitian yang berjudul Kajian Letak *Reduced Beam Section* Balok Kastella terhadap Daktilitas yang bertujuan untuk menguji kekuatan struktur model join eksterior kolom-balok kastella, mengetahui kinerja RBS pada balok kastella, apakah RBS dapat memberikan kekuatan pada sambungan di pertemuan. Penelitian ini menghasilkan eksperimen yang menunjukkan bahwa kerusakan terjadi berada pada muka kolom akibat lentur murni balok dan tidak menunjukkan kegagalan

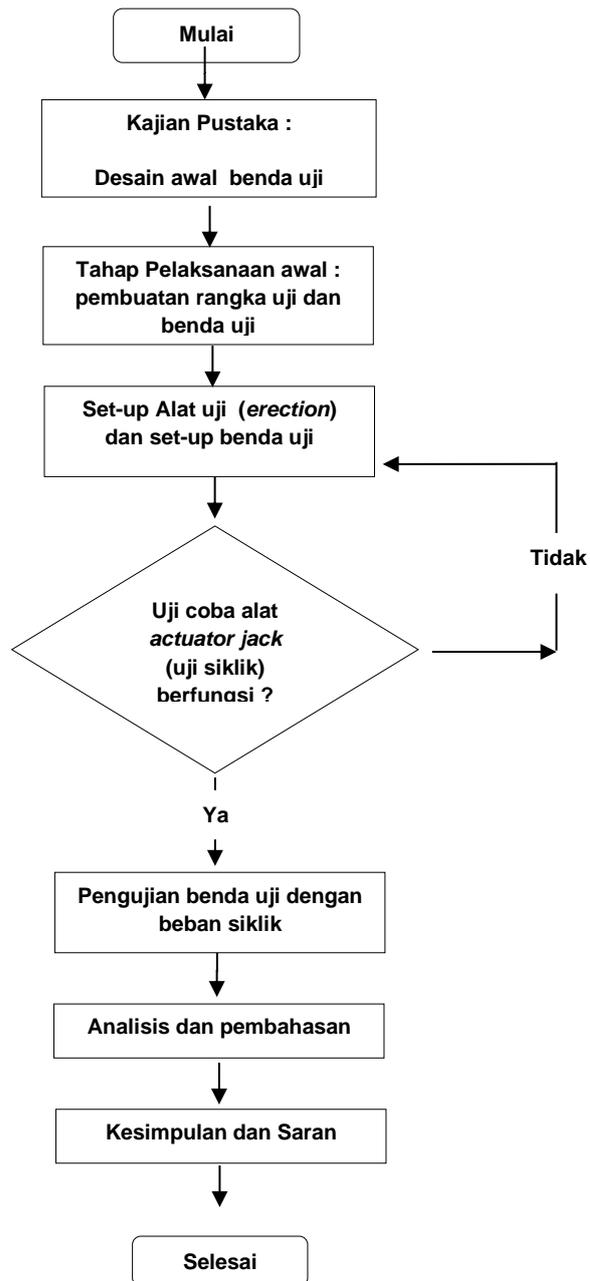
pada sambungan balok dan kolom. Hal ini menunjukkan bahwa perilaku yang ditunjukkan oleh balok kastella dengan jarak bukaan 150 mm dari muka kolom cukup kuat dan dapat berdeformasi sampai pada lendutan 100 mm dan dapat menahan beban hingga 12,5 kN. Jika terus dibebani akan mengalami penurunan kekuatan sebesar 12,8% dengan nilai lendutan mencapai 136,5 mm dengan beban sebesar 10,9 kN.

Aswad dkk (2017) dengan judul Evaluasi Posisi Jarak Bukaan Balok Kastella terhadap Daktalitas dengan tujuan untuk memperoleh analisa dan perilaku balok kastella dengan jarak bukaan dari muka kolom. Serta menyelidiki kinerja balok kastella apakah pengaruh bukaan dapat memberikan perkuatan pada kolom, dan menganalisis hasil eksperimen tentang beban dan lendutan, kekuatan dan daktalitas struktur yang dapat mengkonfirmasi kekuatan kolom-balok kastella. Hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa kerusakan terjadi pada muka kolom akibat lentur murni balok dan tidak menunjukkan kegagalan pada sambungan balok dan kolom. Perilaku yang ditunjukkan oleh balok kastella dengan jarak bukaan 150 mm dari muka kolom cukup kuat dan dapat berdeformasi sampai pada lendutan 100 mm dan dapat menahan beban hingga 12,5 kN. Jika terus dibebani akan mengalami penurunan kekuatan sebesar 12,8% dengan nilai lendutan mencapai 136,5 mm dengan beban sebesar 10,9 kN.

### BAB III

## METODE PENELITIAN

### A. Diagram Alir Penelitian



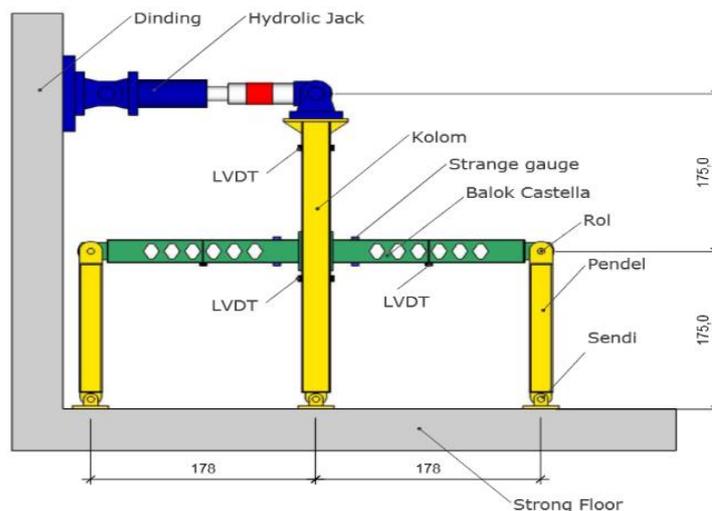
Gambar 12. Diagram Alir penelitian

## B. Waktu dan Lokasi Penelitian

Pabrikasi balok kastella dilaksanakan pada bengkel yang beralamatkan di jalan AP. Pettarani II Kota Makassar. Proses pengujian dilaksanakan pada Kampus II Fakultas Teknik, Laboratorium Bahan dan Struktur Program Studi Teknik Sipil Universitas Hasanuddin pada tanggal 16 Juli – 28 September 2018.

## C. Kerangka Pengujian

Kerangka pengujian dirancang berdasarkan prinsip pengujian gambar 13. Dalam pereancangan kerangka pengujian, faktor kapasitas dari peralatan uji (kapasitas 1500 KN dengan jarak dorong dan tarik maksimum 200 mm). Panjang benda uji dan struktu kerangka pendukung diperhitungkan.



**Gambar 13.** Kerangka Pengujian Balok Kolom

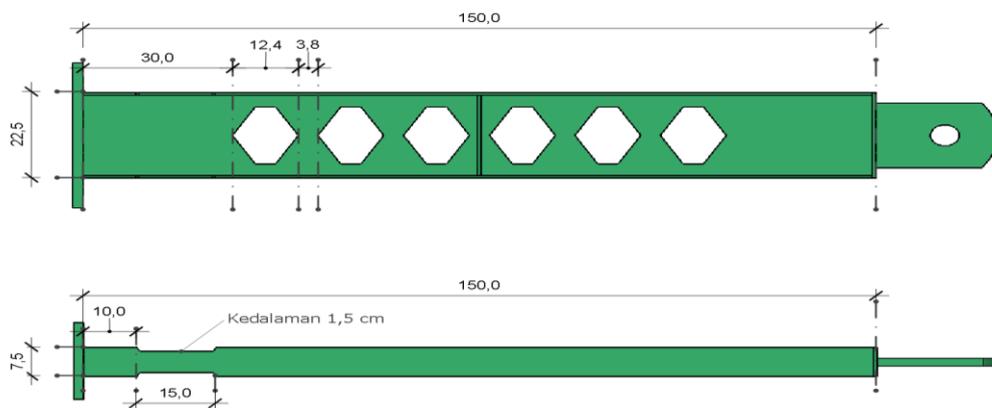
#### D. Benda Uji

Balok solid yang dipabrikasi menjadi balok kastella adalah profil IWF 150 x 75 x 7 x 5 menjadi 225 x 75 x 7 x 5 dengan sudut bukaan berbentuk segi enam (*hexagonal*).

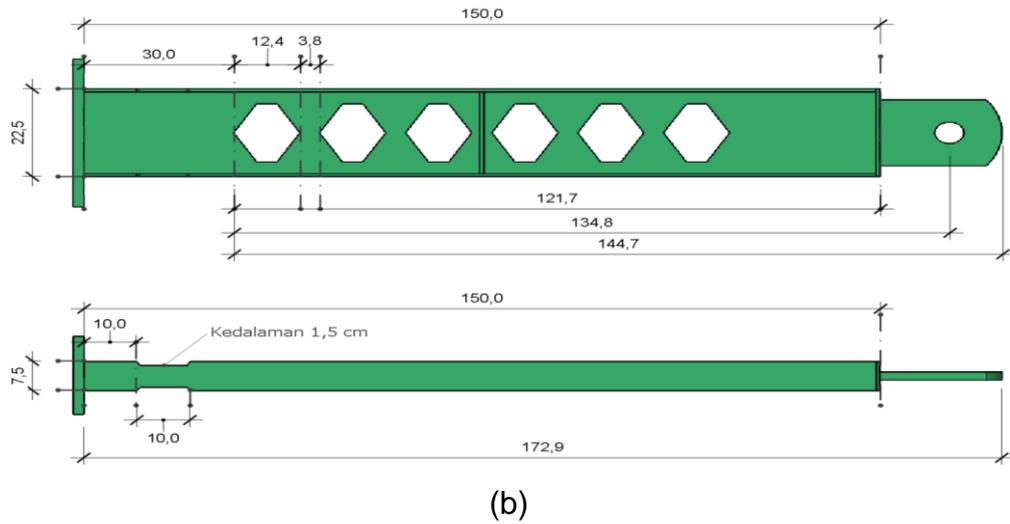
Renca jumlah benda uji setiap variasi dapat di lihat pada table 2 serta panjang potong RBS dari muka kolom dapat dilihat pada gambar 14

**Tabel 2.** Dimensi variasi bukaan balok kastella dan RBS

Balok Uji	RBSC- 1	RBSC- 2
Jarak bukaan kastella dari muka kolom (mm)	300	300
Jarak coakan (RBS) dari muka kolom (mm)	100	100
Variasi lebar RBS (mm)	15	15
Variasi panjang RBS (mm)	150	100



(a)



**Gambar 14.** a). RBS panjang 150 mm b). RBS panjang 100 mm

### E. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

#### 1. *Hydraulic Actuator*

Alat yang digunakan untuk memberikan beban lateral baik satu arah maupun bolak-balik (siklik).



**Gambar 15.** Hydraulic Actuator

## 2. *Personal Computer dan Data Logger*

*Personal Computer dan Data Logger* untuk merekam secara otomatis data yang diukur oleh *strain gauge* dan LVDT.



**Gambar 16.** Personal Computer dan Data Logger

## 3. *Load Cell*

Alat yang digunakan untuk membaca beban yang terjadi pada benda uji adalah *load cell*.



**Gambar 17.** Load Cell

#### 4. Strain Gauge Baja

Alat ukur regangan baja yang dipakai dalam penelitian ini adalah *strain gauge* tipe FLK 2-11-5LJC dengan *factor gauge*  $2.12 \pm 1$ ,



**Gambar 18.** Strain Gauge

#### 5. LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*)

Alat yang digunakan untuk mengukur besar lendutan yang terjadi pada balok uji selama pembebanan adalah LVDT (*Linear Variable Displacement Transformer*) dengan ketelitian 0.01 kapasitas 50 mm, 100 mm.



**Gambar 19.** LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*)

## F. Pelaksanaan Pengujian

### a. Persiapan Pengujian



(a)



(b)

**Gambar 20.** Kerangka pengujian (a) RBSC- 1, (b) RBSC- 2

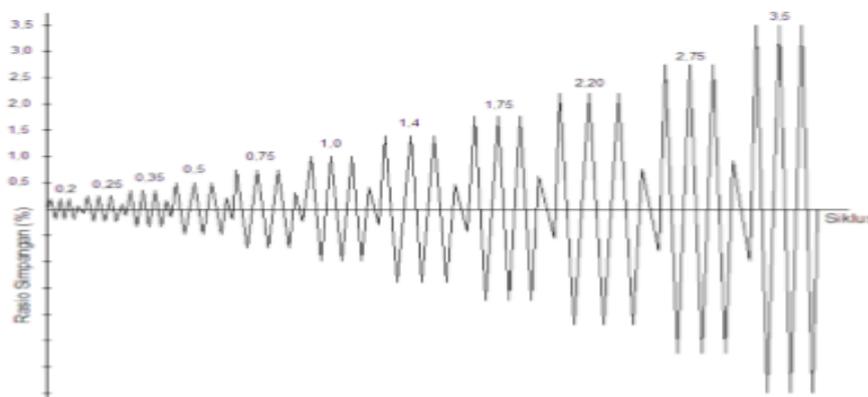
Persiapan pengujian yang dilakukan adalah mendirikan portal uji pada tempat pengujian. Ketiga portal uji balok uji dengan pengujian masing-masing yaitu RBSC-15, RBSC-10 yang sudah dirakit pada kolom, diangkat dengan *crane* ke tempat pengujian, kemudian dipasang pada konstruksi tumpuan yang sudah dipasang terlebih dahulu. Setelah benda uji balok kolom portal uji terpasang, selanjutnya dengan pemasangan *hydraulic jack (actuator)* pada puncak kolom uji setting posisi portal uji. Kolom di topang dan meletakkan *actuator* secara bersamaan pada posisi portal uji sudah berdiri tegak dan datar agar kolom tidak bergoyang ke samping pada saat pengujian dan arah beban pada balok uji hanya pada dua arah saja yaitu ke depan dan ke belakang. Posisi sendi-sendi terhadap kolom dan pendel dipastikan agar rapat sehingga tidak bergeser, hal ini bertujuan agar memperoleh hasil pengujian yang maksimal.

#### **b. Tahapan Penelitian**

Tahapan pada pengujian sambungan sepatu kolom adalah sebagai berikut:

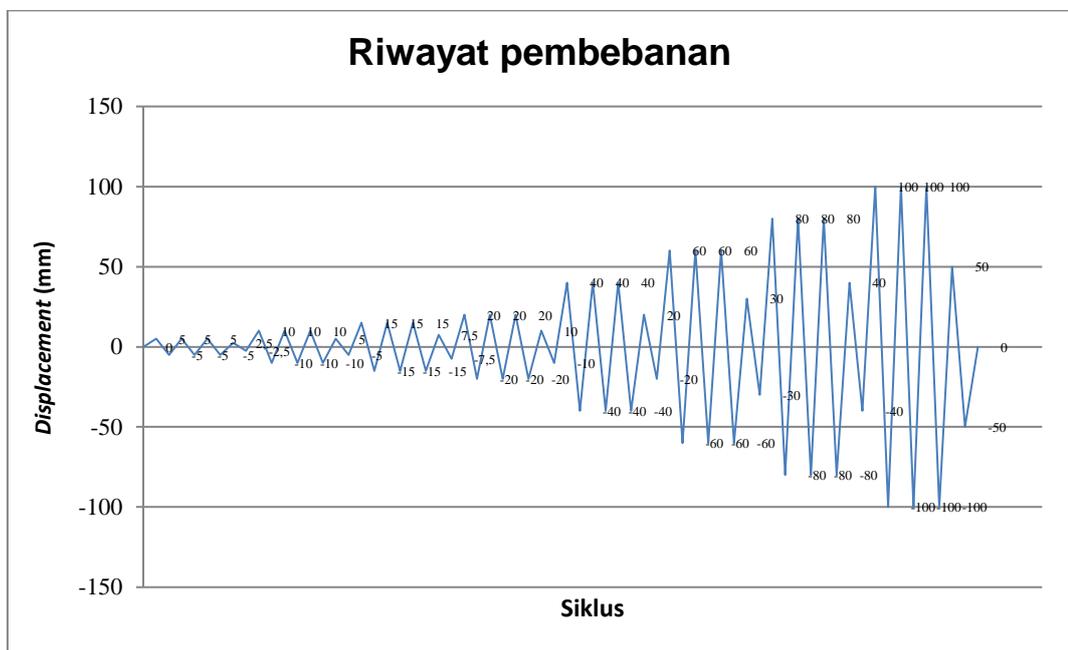
1. Benda uji terdiri dari 2 variasi dimensi RBS dengan masing-masing 2 sampel.
2. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban lateral siklik pada ujung kolom yang disimulasikan dengan alat yang terdiri dari *hydraulic actuator* dan dilengkapi oleh *load cell*.

3. Pengujian ini menggunakan 6 LVDT. LVDT 1 dan 2 terletak pada 30 cm dari ujung atas sisi kiri-kanan kolom dengan kapasitas 100 mm, diletakkan searah dengan arah pembebanan. LVDT 4 dan 5 dengan kapasitas 50 mm diletakkan dibawah *end plate* juga dipasang di sisi kiri-kanan searah dengan pembebanan. LVDT 3 dan 6 terletak pada tengah bentang balok yang ditinjau untuk menghitung lendutan vertikal.
4. *Strain gauge* baja dipasang pada bagian tengah RBS yang ditinjau, flens atas dan bawah pada tiap balok.
5. Pemberian beban bolak-balik diberikan dalam bentuk *displacement-controlled* pada ujung atas kolom tengah dengan kecepatan ram 0.1mm/detik. Penentuan besar *displacement* untuk tiap siklus yaitu  $0.25\Delta y$ ,  $0.5\Delta y$ ,  $0.75\Delta y$ ,  $\Delta y$ , dan  $2\Delta y$ ,  $3\Delta y$  dan seterusnya sampai pada penghentian pembebanan apabila terjadi penurunan nilai beban dari puncak sebelumnya (*collapse*), ATC 24 AISC.



**Gambar 21.** Pola Pembebanan

6. Pembebanan siklik yang dilakukan pada saat pengujian terdiri dari 8 siklus, dimana setiap siklus memiliki 3 sub-siklus. Setiap siklus diberikan *displacement* sebesar 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm, dan 100mm.
7. Perilaku yang diperoleh dari hasil pengujian beban, lendutan, dan regangan yang kemudian akan divalidasi dengan hasil analisa awal, kajian dan pembahasan terhadap hasil-hasil tersebut, selanjutnya akan ditarik kesimpulan serta saran-saran yang berguna untuk diterapkan, atau merekomendasikan hal-hal yang mungkin akan penting untuk diteliti kedepannya.



**Gambar 19.** Pola riwayat pembebanan

Besarnya lendutan maksimal, tergantung kepada besarnya pengurangan kekuatan benda uji, tetapi secara umum biasanya pembebanan akan dihentikan jika sudah mencapai batas leleh atau benda uji telah mengalami penurunan kekuatan terhadap beban yang bekerja. Pengambilan data selama pengujian selain data yang terekam pada data *logger* dan *swithing box*, pengambilan data juga dilakukan pengamatan secara visual seperti sambungan di kolom terhadap balok akibat pembebanan siklik yakni kerusakan las, penekukan flens, penekukan badan dan keruntuhan (*crack*), dan model kegagalan pada balok.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian eksperimental untuk mengetahui kinerja RBS (*reduced beam section*) pada struktur sambungan interior-ekterior balok kastella dilaksanakan dengan metode pembebanan siklik (bolak balik) yang dari 2 (dua) buah benda uji antara lain balok baja kastella dengan model RBS 1 (RBSC-1) dan balok baja kastella dengan model RBS 2 (RBSC-2). Pengujian diasumsikan kolom kuat balok lemah dan beberapa asumsi lain yang berdasarkan peraturan kegempaan sebagai syarat dalam perencanaan gedung tahan gempa.

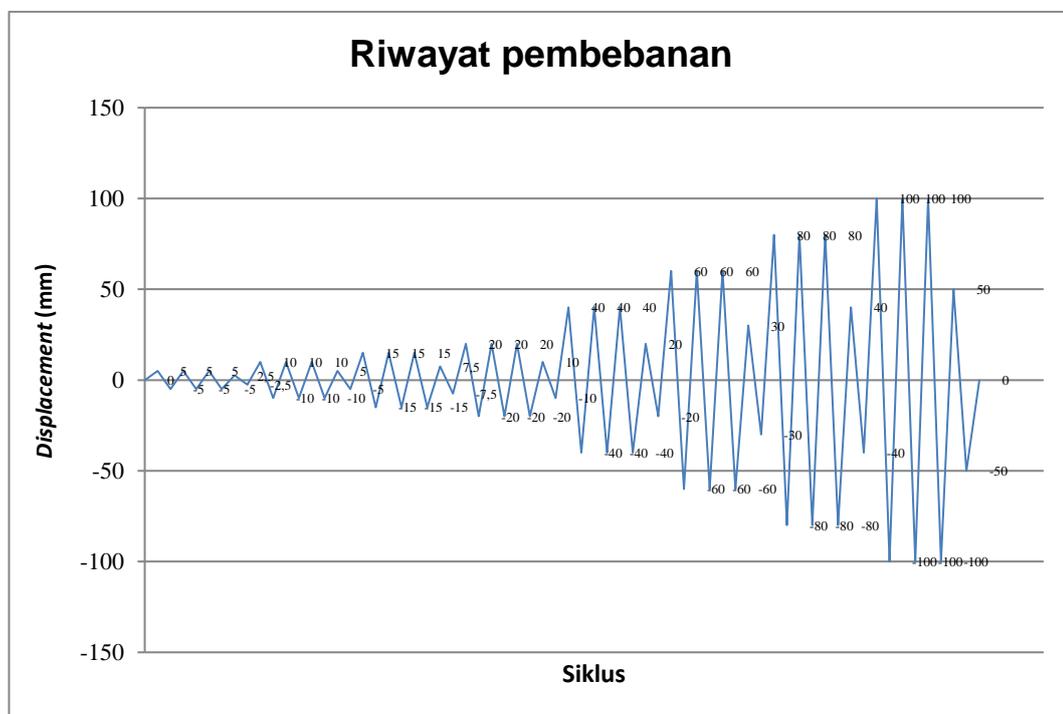
Hasil eksperimen memberikan gambaran hasil pengujian secara rinci dimulai dari gaya aksial lateral. Gaya lateral diasumsikan sebagai gaya yang paling dominan bekerja dalam uji eksperimen ini, sedangkan gaya gravitasi dianggap tidak signifikan sehingga pengujian ini hanya memperoleh kinerja struktur akibat gaya lateral bolak balik (uji siklik) pada struktur rangka balok baja kastella dan kolom.

Pada hasil kajian eksperimental dengan menggunakan balok kastella ini, digambarkan dengan table dan grafik/kurva yang memberikan penjelasan akibat kegagalan dan penyebab kegagalan yang diklasifikasikan sesuai yang terjadi pada masing -masing benda uji.

Nilai hasil pengujian pada balok uji RBSC-1 dan RBSC-2 masing - masing diperoleh beban maksimum adalah 26.893 kN dan 26.763 kN untuk gaya dorong.

## 1. Beban Hasil Pengujian

Pembebanan siklik yang dilakukan pada saat pengujian terdiri dari 8 siklus, dimana setiap siklus memiliki 3 sub-siklus. Setiap siklus diberikan *displacement* sebesar 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 40mm, 60mm, 80mm, dan 100mm. Gambar 1 menunjukkan riwayat pembebanan yang diberikan terhadap benda uji.



**Gambar 13.** Riwayat pembebanan setiap pengujian (*Displacement Control*)

Pada hasil pengujian eksperimen menampilkan beban leleh pertama dan lendutan baik kondisi tarik maupun dorong, beban maksimum pada kondisi tarik dan dorong pada masing-masing benda uji yang terjadi terlihat bahwa pada balok RBSC- 2 menghasilkan kekuatan terbesar dibandingkan

dengan benda uji lainnya dan beban dalam kondisi leleh pertama sebesar 17.621 kN pada kondisi tarik.

**Tabel 3.** Lendutan dan beban pada masing-masing benda uji

<b>Hasil tes</b>	<b>RBSC-1</b>	<b>RBSC-2</b>
<b>Beban dorong leleh pertama (<math>P_y^+</math>), kN</b>	15.103	17.621
<b>Lendutan akibat beban dorong leleh pertama, <math>\Delta_y^+</math> (mm)</b>	31.091	29.988
<b>Beban tarik leleh pertama (<math>P_y^-</math>), kN</b>	14.651	18.689
<b>Lendutan akibat beban tarik leleh pertama, <math>\Delta_y^-</math> (mm)</b>	32.738	31.453
<b>Beban dorong maksimum (<math>P_u^+</math>), kN</b>	26.893	26.763
<b>Lendutan akibat beban dorong maksimum, <math>\Delta_u^+</math> (mm)</b>	101.191	98.547
<b>Beban tarik maksimum (<math>P_u^-</math>), kN</b>	25.0665	26.891
<b>Lendutan akibat beban tarik maksimum, <math>\Delta_u^-</math> (mm)</b>	98.632	95.673

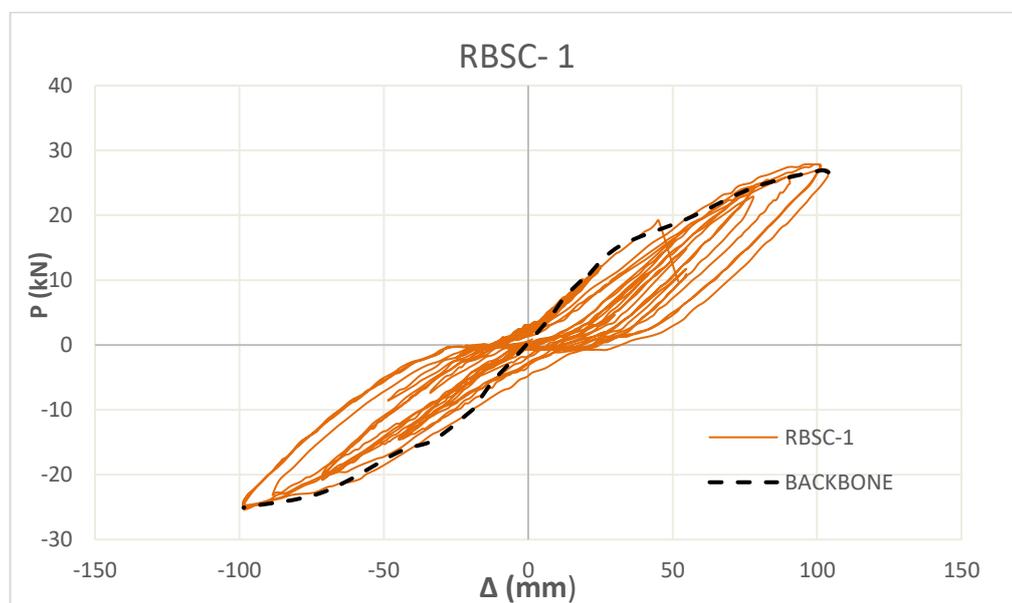
## 2. Penentuan titik leleh

Berdasarkan data beban dan regangan yang ditampilkan pada grafik masing-masing benda uji, maka dasar untuk mencari titik leleh pertama pada regangan mencapai leleh, diperoleh dari hasil material baja

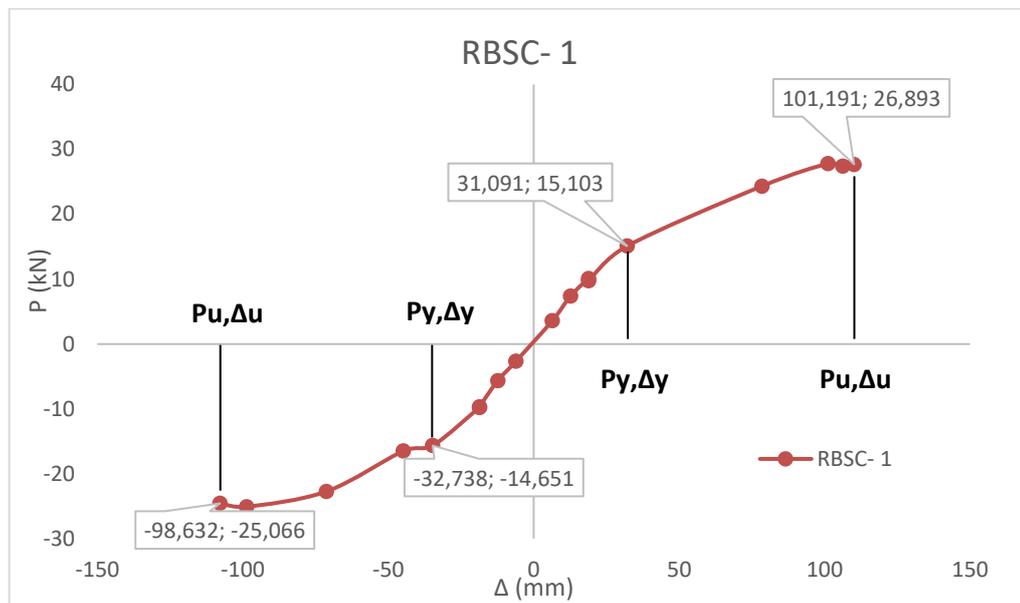
( $f_y$ ) 350 MPa dibagi 200.000 adalah 0,00175. Penentuan titik leleh pertama adalah telah mencapai regangan sebesar 0,00175 (1750  $\mu$ ) kemudian tegak lurus garis yang ditarik dari beban P tersaji sebagai berikut:

**a. Balok uji RBSC- 1**

Penentuan titik leleh diperoleh dari hasil regangan yang telah mendekati titik leleh baja sebagai berikut :



(a)



(b)

**Gambar 24.** (a) Grafik beban-lendutan RBSC-1

(b) Kurva *back bone* titik leleh pertama dan titik maksimum daerah tarik dan dorong.

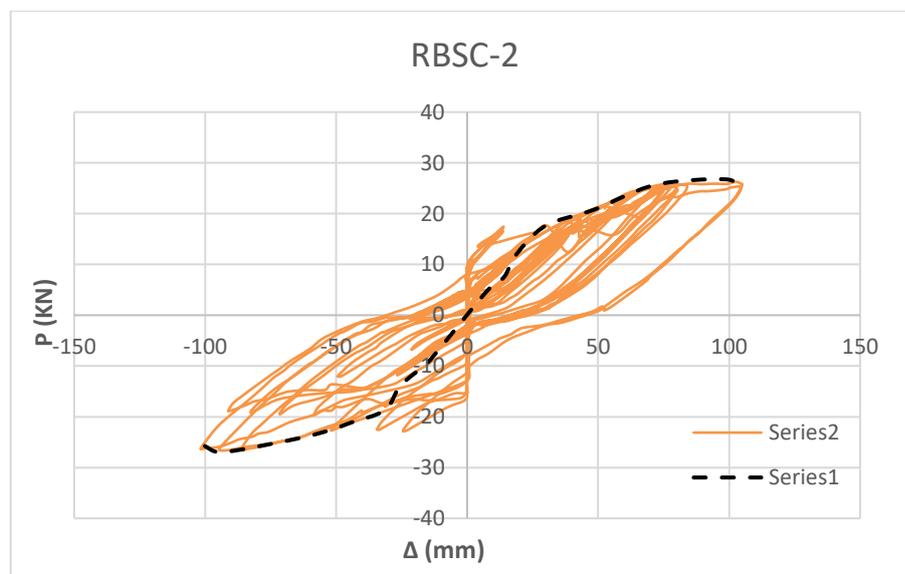
Berdasarkan Gambar 30. (a). menunjukkan hubungan antara beban dan lendutan (*displacement*) pada RBSC- 1. Sedangkan pada gambar 30 (b) menunjukkan bahwa hubungan garis kurva *back bone* pada kondisi titik saat leleh (*yield*) dan kondisi titik saat mencapai beban maximum (*ultimate*). Nilai hubungan antara beban dan lendutan (*displacement*) dapat dilihat pada tabel 5 dibawah ini.

**Tabel 4.** Nilai Hubungan Beban dan *Displacement* pada RBSC - 1

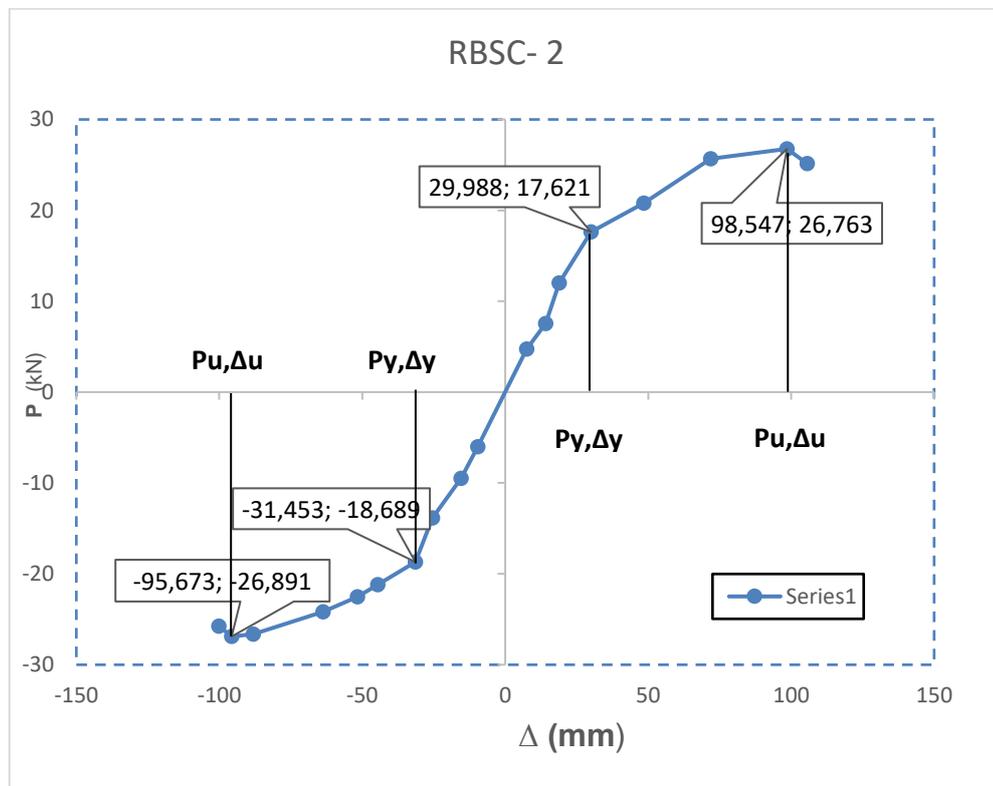
Kondisi	Tekan (+)		Tarik (-)	
	Beban (kN)	<i>Displacement</i> (mm)	Beban (kN)	<i>Displacement</i> (mm)
<b>Yield</b>	15.103	31.091	14.651	32.738
<b>Ultimate</b>	26.893	101.191	25.066	98.632

Berdasarkan tabel 5 di atas, dapat dilihat bahwa nilai beban leleh (*yield*) dan beban maximum (*ultimate*) yang didapatkan saat kondisi dorong adalah 15.103 kN dan 26.893 kN dengan *displacement* sebesar 31.091 mm dan 101.191 mm. Nilai beban leleh (*yield*) dan beban maximum (*ultimate*) yang didapatkan saat kondisi tarik adalah -14.651 kN dan -25.066 kN dengan *displacement* sebesar -32.738 mm dan -98.632 mm.

#### b. Balok uji RBSC-2



(a)



(b)

**Gambar 25.** (a) Grafik beban-lendutan RBSC- 2

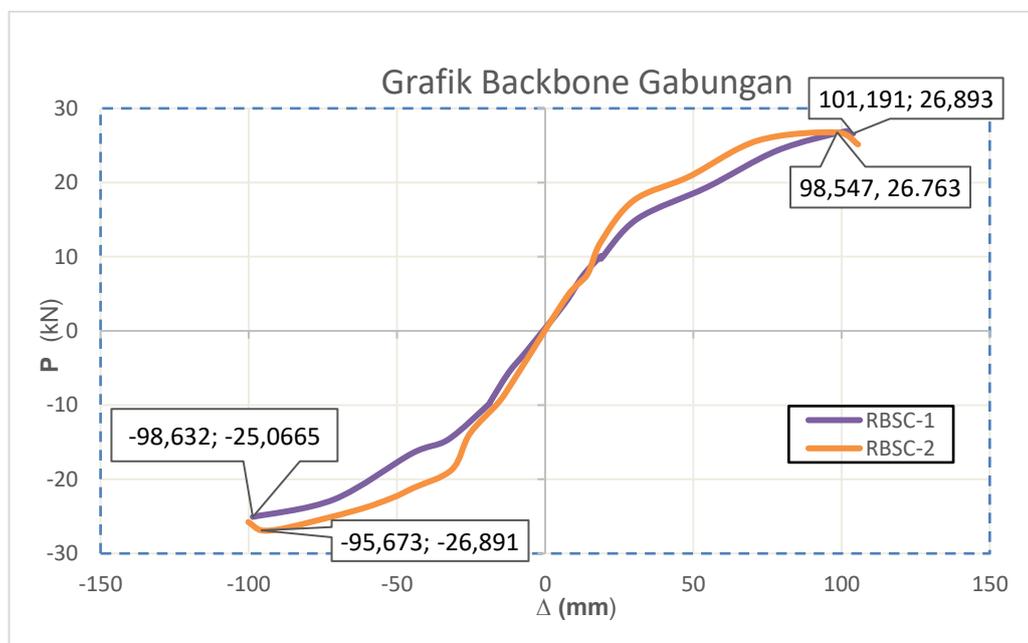
(b) Kurva *back bone* titik leleh pertama dan maksimum daerah tarik dan dorong

Berdasarkan Gambar 31. (a). menunjukkan hubungan antara beban dan lendutan (*displacement*) pada RBSC- 2. Sedangkan pada gambar 31 (b) menunjukkan bahwa hubungan garis kurva *back bone* pada kondisi titik saat leleh (*yield*) dan kondisi titik saat mencapai beban maximum (*ultimate*). Nilai hubungan antara beban dan lendutan (*displacement*) dapat dilihat pada tabel 6 dibawah ini.

**Tabel 5.** Nilai Hubungan Beban dan Displacement pada RBSC – 2

Kondisi	Dorong (+)		Tarik (-)	
	Beban (kN)	Displacement (mm)	Beban (kN)	Displacement (mm)
<b>Yield</b>	17.621	29.988	18.689	31.453
<b>Ultimate</b>	26.763	98.547	26.891	95.673

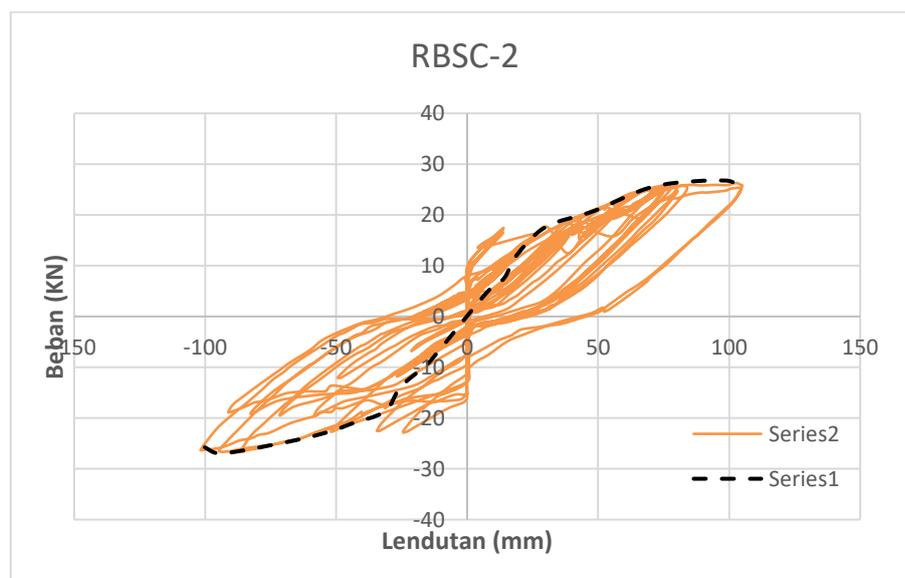
Berdasarkan tabel 6 di atas, dapat dilihat bahwa nilai beban leleh (*yield*) dan beban maximum (*ultimate*) yang didapatkan saat kondisi dorong adalah 17.621 kN dan 26.763 kN dengan *displacement* sebesar 29.988 mm dan 98.547 mm. Nilai beban leleh (*yield*) dan beban maximum (*ultimate*) yang didapatkan saat kondisi tarik adalah -18.689 kN dan -26.891 kN dengan *displacement* sebesar -31.453 mm dan -95.673 mm.

**Gambar 26.** Grafik beban maksimum terhadap perpindahan pada masing-masing benda uji.

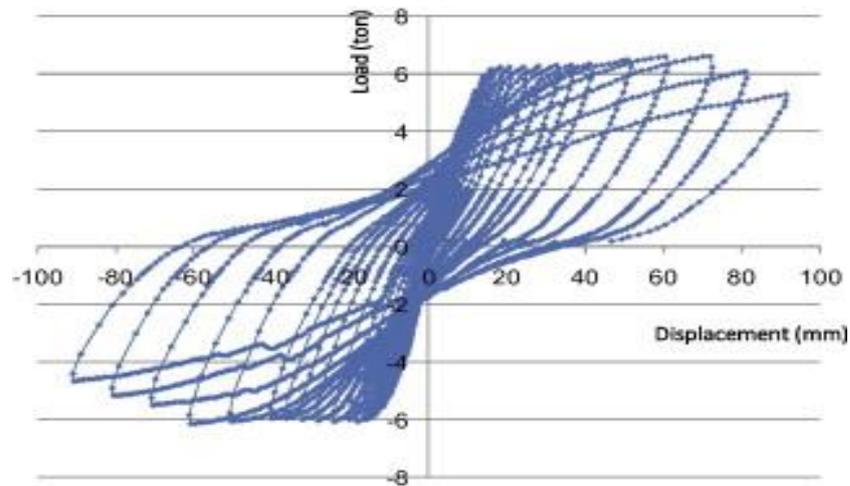
Dari hasil lebih spesifik untuk pembahasan secara umum mengenai kinerja semua benda uji di bahas tentang respon beban lateral siklik. Pada gambar 32 adalah perbandingan titik puncak pembebanan pada masing – masing siklus. Model kurva yang ditunjukkan dari kedua benda uji adalah dalam hal kapasitas beban lateral dengan selisih 0,483 % pada beban dorong (+) dan 6.784 % pada beban Tarik (-). Kolom baja menggunakan sambungan RBSC-1, menghasilkan beban maksimum sebesar 26.893 kN untuk siklus positif dan 25.0665 kN untuk siklus negatif. Untuk RBSC-2, menghasilkan beban maksimum sebesar 26.763 kN untuk siklus positif dan 26.891 kN untuk siklus negatif.

Dari kurva *backbone* di atas diperoleh nilai beban rata-rata RBSC-1 dan RBSC-2 adalah 25.979 kN dan 26.872 kN. Hal ini menunjukkan bahwa variasi RBSC – 2 memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada RBSC – 1.

### c. Perbandingan P-Δ



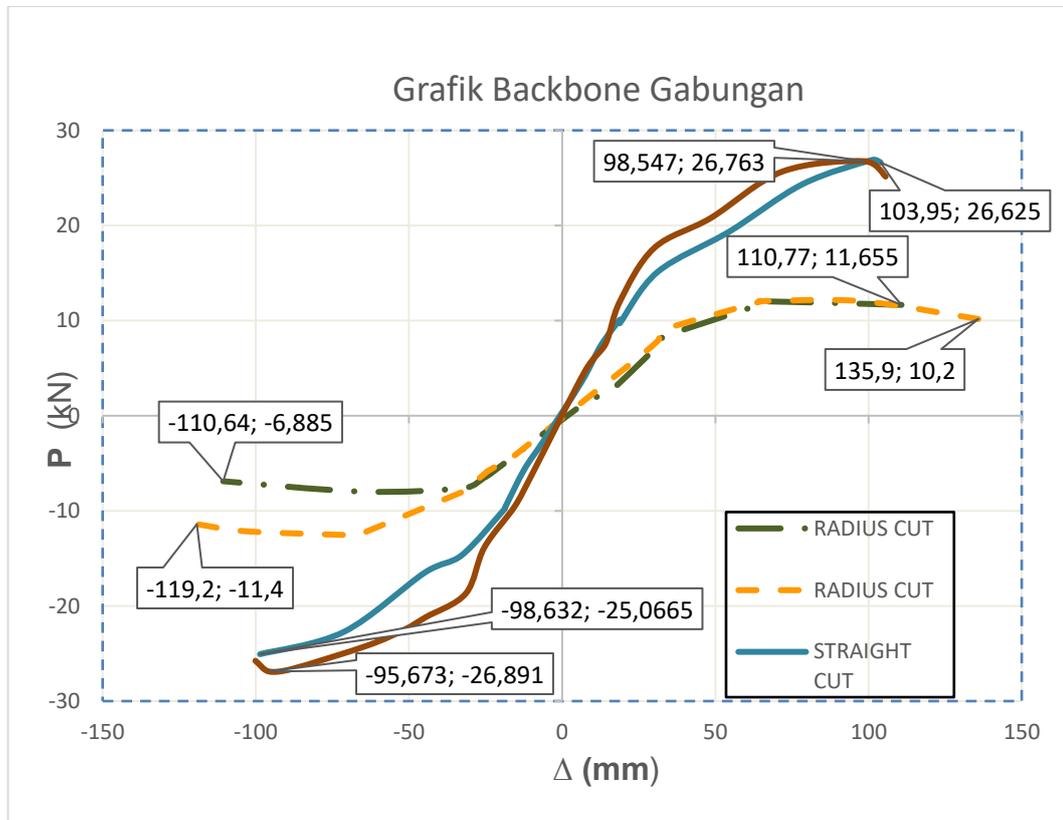
**Gambar 27.** Pengujian eksperimental



**Gambar 2.** Teori Kurva P –  $\Delta$

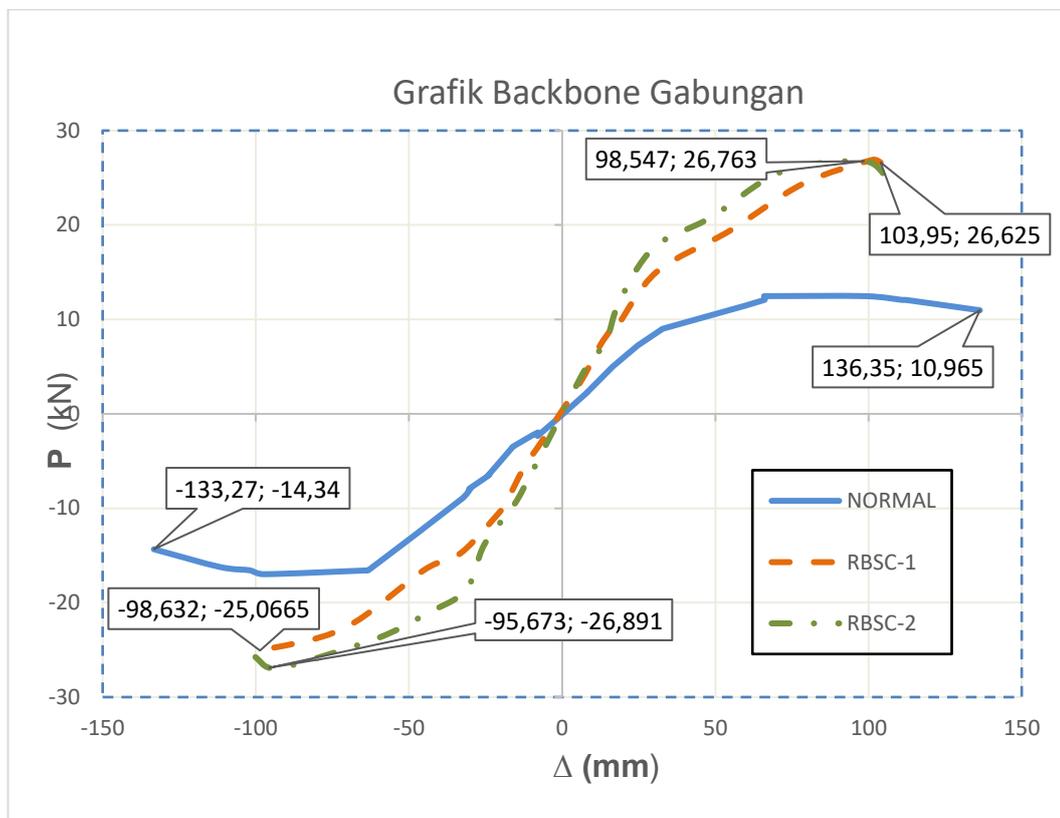
Berdasarkan perbandingan pada gambar 33 dan gambar 34 dapat dilihat bahwa perbedaan yang sangat jauh bila dibandingkan menurut eksperimental dan secara teoritis, hal ini dikarenakan kondisi LVDT yang digunakan sudah mencapai batas ukurannya, serta pada saat proses pengujian sering terjadi loncatan pembacaan secara tiba-tiba dikarenakan kerangka pengujian sering terjadi perbaikan posisi benda uji.

#### d. Perbandingan Terhadap Kontrol Penelitian Sebelumnya



**Gambar 29.** Kurva perbandingan model *Reduced Beam Section* ( RBS )

Dari perbandingan dua model bukaan atau potongan *reduced beam section* ( RBS ) yang di kutip dari penelitian sebelumnya oleh Aswad, dkk (2017) dapat dilihat bahwa pengaruh luasan model potongan memberikan kontribusi kekuatan yang signifikan, dimana luasan model *straight cut* memberikan kekuatan lebih besar dari model *radius cut*. Hal ini di karenakan model bukaan *radius cut* jenis ukuran kedalamannya terpusat sedangkan model *straight cut* jenis ukuran kedalamannya merata sehingga model *radius cut* lebih mudah terjadi tekukan pada bagian pusat kedalamannya.



**Gambar 30.** Kurva Kontrol Terhadap Benda Uji Normal

Berdasarkan gambar 36 diatas, dapat dilihat bahwa kontrol terhadap benda uji normal menampilkan perbedaan beban yang lebih besar dari benda uji normal hal ini dikarenakan pada pengujian sebelumnya yang dilakukan oleh Aswad, dkk (2017) menggunakan model benda uji eksterior sedangkan pada pengujian eksperimental yang dilakukan menggunakan model interios-eksterior.

### 3. Daktilitas

Ketika menghitung faktor daktilitas penentuan deformasi (lendutan) saat leleh sering menyebabkan kesulitan karena hubungan gaya-deformasi mungkin tidak memiliki titik leleh yang jelas. Alternatif yang diambil untuk

mendapatkan regangan saat leleh diperoleh dari hasil material baja ( $f_y$ ) 350 MPa dibagi 200.000 adalah 0,00175 (1750  $\mu$ ).

Daktalitas sendiri didapatkan dari lendutan disaat *ultimate* dibagi lendutan pada saat *yield*. Nilai daktalitas kolom bisa dilihat pada tabel 4.

**Tabel 6.** Daktalitas Kolom

Sampel		Pyield	Pult	$\Delta$ yield	$\Delta$ ult	$\mu$	$\mu$ rata- rata	Ket.
		kN	kN	mm	mm			
RBSC - 1	Tekan (+)	15.103	26.893	31.091	101.191	3.254	3.133	Parsial
	Tarik (-)	14.651	25.066	32.738	98.632	3.012		
RBSC - 2	Tekan (+)	17.621	26.763	29.988	98.547	3.286	3.163	Parsial
	Tarik (-)	18.689	26.891	31.453	95.673	3.041		

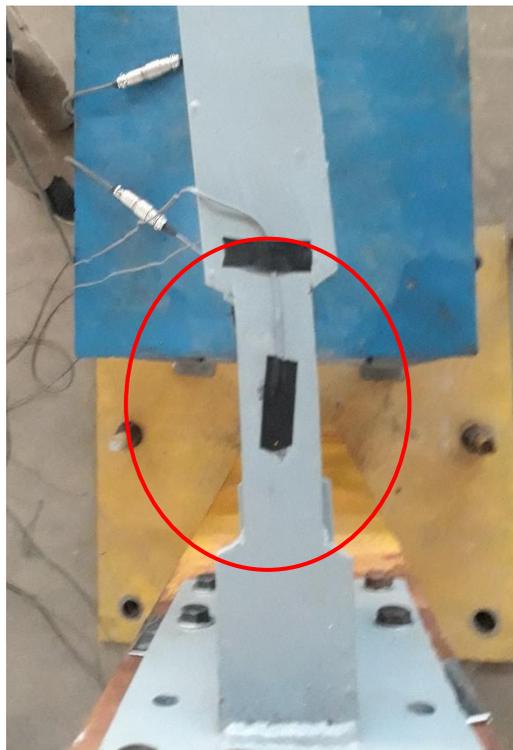
Berdasarkan Tabel 5 didapatkan nilai daktalitas untuk RBSC – 1 rata-rata sebesar 3.133 dan untuk RBSC – 2 sebesar 3.391. Berdasarkan SNI 03-1726-2002 pasal 3.163, mengklasifikasikan daktalitas menjadi daktalitas penuh, parsial, dan elastik penuh sehingga kolom pada RBSC – 1 dan RBSC – 2 termasuk dalam daktalitas parsial. Dari tabel diatas dapat disimpulkan dalam perihal daktalitas, RBSC – 2 lebih efektif dibanding RBSC – 1.

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa kontribusi dari lebar dogbone yang direncanakan memberikan selisih daktalitas antara RBSC – 1 dan RBSC – 2 sebesar 0.948 %.

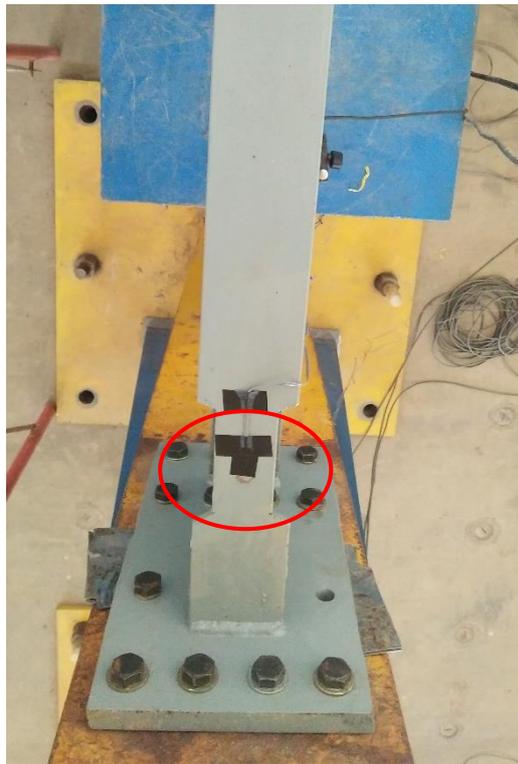
#### 4. Perilaku Sambungan Balok – Kolom

Dari hasil analisa kapasitas balok yang diberi RBS kemudian didesain sambungannya menggunakan jenis sambungan *end plate connection*.

Pada gambar 30 dan 31 dapat dilihat bahwa konsep *reduced beam section* ( RBS ) yang diinginkan terbukti terjadi yaitu terjadinya sendi plastis pada area *reduced beam section* ( RBS ) yang telah direncanakan sebelumnya atau dapat dilihat pada gambar 37 dan 38.



**Gambar 313.** Tekuk Lateral pada Area RBS 1



**Gambar 42.** Tekuk Lateral pada Area RBS 2

Berdasarkan gambar 21 dan gambar 22, dapat di lihat bahwa pada lokasi sambungan yang berada 100 mm dari muka kolom tidak terjadi kekelehan / kegagalan pada area las, hal ini tentunya sangat baik dan menunjukkan kekakuan dari sambungan. Hal ini juga telah ditegaskan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Aswad Dkk ( 2018 ) bahwa model sambungan end plate tidak mengalami kegagalan pada area las muka kolom dan model sambungan end plate juga merupakan rekomendasi dari *AISC* 2016 sebagai sistem momen rangka khusus dan menengah bangunan tahan gempa.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **A. Kesimpulan**

Dari analisa data dan pembahasilan hasil diatas, dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut :

1. Dari hasil pengujian siklik, daktilitas balok menggunakan sambungan RBSC-1 sebesar 3.133. Untuk RBSC-2, daktilitas balok yang didapatkan sebesar 3.163. Dapat disimpulkan bahwa RBSC-2 memiliki daktilitas yang lebih tinggi dari pada RBSC-1 dengan selisih 0.948 %. Hal tersebut di karenakan lebar / kedalaman dogbone memberikan kontribusi selisih terhadap daktilitas balok kastella.
2. Dari hasil pengujian siklik, diperoleh nilai beban rata-rata RBSC-1 dan RBSC-2 adalah 25.979 kN dan 26.872 kN. Hal ini menunjukkan bahwa variasi RBSC – 2 memiliki kekuatan yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan RBSC- 1, hal ini dikarenakan kecil permukaan flans maka semakin lemah pula kekuatan balok.

#### **B. Saran**

Berdasarkan hasil eksprerimen yang telah dilakukan maka dapat disarankan beberapa hal, yaitu:

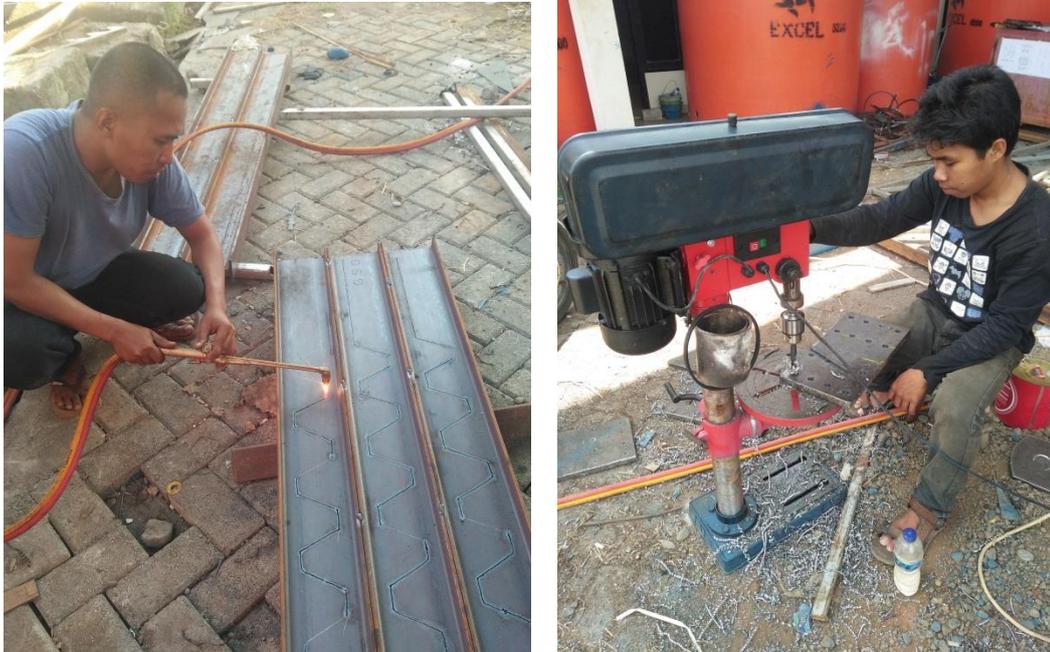
1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi kedalaman yang berbeda dengan sambungan *Reduced Beam Section* pada balok kastela.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai sistem sambungan *Reduced Beam Section* balok kastela dengan model lain.
3. Pada penelitian ini lendutan yang terjadi bukan termasuk lendutan maksimum, oleh karena itu diharapkan pada penelitian selanjutnya diharapkan memaksimalkan penggunaan alat yang digunakan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Ajay, K. S., & Gaurang, V. (2013). *A Study of Reduced Beam Section Profiles USING Finite Element Analysis. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 6(4), PP 01-06.
2. Amayreh, L. and Saka, M.P. (2005) “*Failure load Prediction of Castellated Beams Using Artificial Neural Networks*”. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing) Volume. 6*, pp 35-34.
3. American Institute of Syeel Construction (2016). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications (ANSI/AISC 358-16) aisc, Inc Chicago, IL*.
4. Aswad, N. H., Parung, H., Irmawaty. I., & Amiruddin, A. A. (2017). Evaluasi Posisi Jarak Bukan Balok Kastella terhadap Dakalitas. Konferensi Nasional Teknik Sipil 11., Universitas Tarumanegara, Oktober.
5. Aswad, N. H., Parung, H., Irmawaty. I., & Amiruddin, A. A. (2018). *Performance of Reduced Beam Section in Castellated Beam Subjected to Cyclic Loading. Joirnal of Engineering Science and Technology*, 13(9). 2872-2882.
6. Badan Standarisasi Nasional. (2002). “Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (SNI 1729:2002)”. Jakarta.
7. Badan Standarisasi Nasional. (2015). “Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (SNI 1729:2015)”. Jakarta.

8. Dewobroto, W. (2016). "Struktur baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010". Penerbit: Jurusan Teknik Sipil UPH, Tangerang.
9. Jamadar, A.M., and Kumbhar, P.D. (2015). "*Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaped openings*". *International Research Journal of Engineering and Technology*, India, 2015, Volume 2, pp 715-722.
10. Megharief, J.D. (1997). "*Behaviour of Coposite Castellated Beams*". *Departement of Civil Engineering and Applied Mechanics. Thesis McGill University, Montreal, Canada.*
11. Miller, D. K. (1998). "*Lessons learned from the Northridge earthquake*". *Engineering Structures*, 20(4-6), 249-260.
12. Parung H, et, a; (2013). "*Eksperimental Study on Castellated Beam Under Monotonic Loading*". Konferensi Nasional Pasca Sarjan Teknik Sipil, ITB, November.
13. Soltani, M.R., Bouchair, A. and Mimoune, M (2012). "*Nonlinear FE Analysis of The Ultimate Behaviour of Steel Castellated Beams*". *Journal of Constraction Steel Research*, 2012, Volume 70, pp 101-114..

Lampiran 1. Foto – Foto Pabrikasi Dan Pelaksanaan Penelitian



**Gambar 1.** Proses pabrikasi balok baja kastela (pembuatan *honeycomb* dan *end plate*)



**Gambar 2.** Balok normal yang telah dipotong



**Gambar 3.** Hasil penggabungan las balok kastela



**Gambar 4.** Pemandangan *base plate* dan pemasangan *pen*



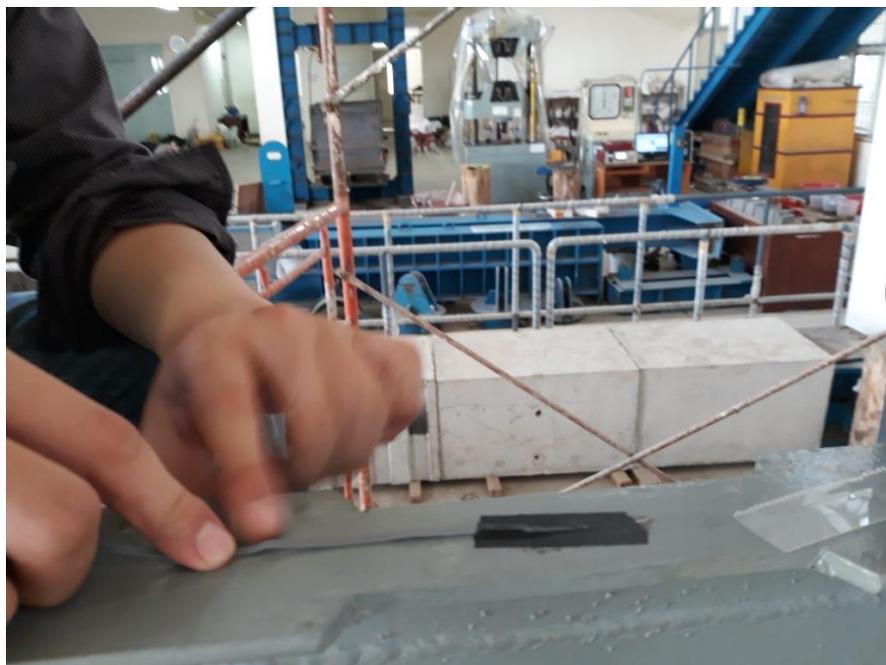
**Gambar 5.** Pemasangan Benda Uji



**Gambar 6.** Pemasangan aktuator



**Gambar 7.** *Strain Gauge* yang digunakan



**Gambar 8.** Pemasangan *strain gauge* pada daerah RBS



**Gambar 9. Pemasangan LVDT**





**Gambar 10.** *Set up* pengujian



**Gambar 11.** Proses pengujian

## LAMPIRAN 2. Analisis Dogbone

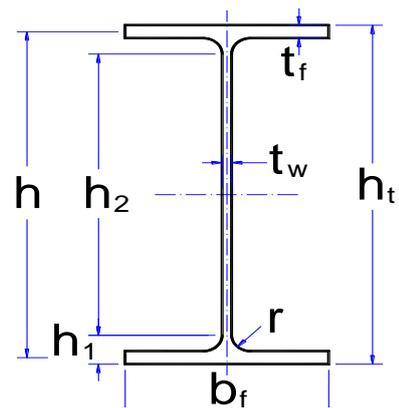
### A. DATA BAHAN

Tegangan leleh baja (yield stress)	$f_y$	= 240 Mpa
Modulus elastik baja (modulus of elasticity)	$E$	= 200000 Mpa
Angka Poisson (poisso's ratio)	$\nu$	= 0.3

### B. DATA PROFIL BAJA KASTELELA TANPA RBS

Profil : WF 225.75.5.7

$h_t$	=	225	mm
$b_f$	=	75	mm
$t_w$	=	5	mm
$t_f$	=	7	mm
$r$	=	0	mm
$h_o$	=	$2h$	= 150 mm
$h_1$	=	$t_f + r$	= 7 mm
$h_2$	=	$h_t - 2 * h_1$	= 211 mm
$h$	=	$h_t - t_f$	= 218
Berat : $w$	=	14	Kg/m



Mencari Inersia arah x ( $I_x$ ) dan Modulus plastis profil honeycomb

$$\begin{aligned} A &= b \cdot h - (b - t_w) (h - 2t_f) \\ &= 75 \cdot 225 - (75 - 5) (225 - 2 \cdot 7) \\ &= 21.05 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_x &= \left( \frac{1}{12} b_f \cdot h^3 \right) - \left( \frac{1}{12} (b_f - t_w) (h - 2t_f)^3 \right) \\ &= \left( \frac{1}{12} 75 \cdot 225^3 \right) - \left( \frac{1}{12} (75 - 5) (225 - 2 \cdot 7)^3 \right) \\ &= 16393475.42 \text{ mm}^4 \\ &= 1639 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_x &= \left( \frac{1}{4} t_w \cdot h^2 \right) + (b - t_w) (h - t_f) t_f \\ &= \left( \frac{1}{4} 5 \cdot 225^2 \right) + (75 - 5) (225 - 7) 7 \\ &= 170101.25 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_y &= \left( \frac{1}{2} t_f \cdot b_f^2 \right) + (h - 2 \cdot t_f) \cdot \left( \frac{1}{4} t_w^2 \right) \\ &= \left( \frac{1}{2} \cdot 7 \cdot 75^2 \right) + (225 - 2 \cdot 7) \cdot \left( \frac{1}{4} 5^2 \right) \\ &= 19687.5 + 211 \cdot 6.25 \\ &= 21006.25 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y$$

$$= 170101.25 \times 240$$

$$= 40824300 \quad \text{N.mm}$$

C. DATA PROFIL BAJA KASTELA DENGAN RBS 1 ( L = 15 mm, P = 15 mm )

$$h = 225 \quad \text{mm}$$

$$b_f = 75 - 15 \text{ mm} = 60 \quad \text{mm}$$

$$t_w = 5 \quad \text{mm}$$

$$t_f = 7 \quad \text{mm}$$

$$r = 0 \quad \text{mm}$$

$$h_o = 2h = 150 \text{ mm}$$

$$h_1 = t_f + r = 7 \text{ mm}$$

$$h_2 = h_t - 2 * h_1 = 211 \text{ mm}$$

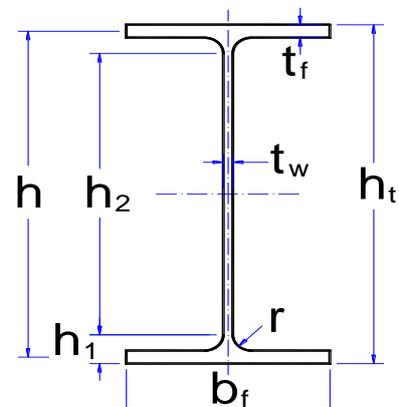
$$h = h_t - t_f = 218$$

$$\text{Berat : } w = 14 \quad \text{Kg/m}$$

Mencari Inersia arah x ( $I_x$ ) dan Modulus plastis profil honeycomb

$$A = b \cdot h - (b - t_w) (h - 2t_f)$$

$$= 60 \cdot 225 - (60 - 5) (225 - 2 \cdot 7)$$



$$= 1896 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} I_x &= \left( \frac{1}{12} b_f \cdot h^3 \right) - \left( \frac{1}{12} (b_f - t_w) (h - 2t_f)^3 \right) \\ &= \left( \frac{1}{12} 60 \cdot 225^3 \right) - \left( \frac{1}{12} (60 - 5) (225 - 2 \cdot 7)^3 \right) \\ &= 13897607.92 \text{ mm}^4 \\ &= 1390 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

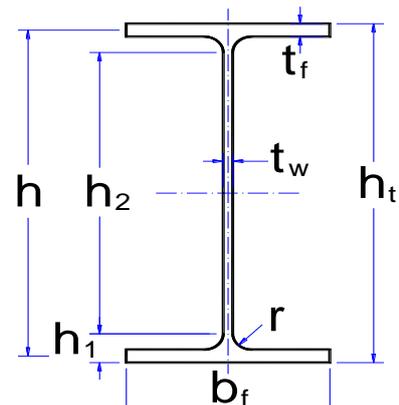
$$\begin{aligned} Z_x &= \left( \frac{1}{4} t_w \cdot h^2 \right) + (b - t_w) (h - t_f) t_f \\ &= \left( \frac{1}{4} 5 \cdot 225^2 \right) + (60 - 5) (225 - 7) 7 \\ &= 147211.25 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_y &= \left( \frac{1}{2} t_f \cdot b_f^2 \right) + (h - 2 \cdot t_f) \cdot \left( \frac{1}{4} t_w^2 \right) \\ &= \left( \frac{1}{2} \cdot 7 \cdot 60^2 \right) + (225 - 2 \cdot 7) \cdot \left( \frac{1}{4} 5^2 \right) \\ &= 12600 + 211 \cdot 6.25 \\ &= 13918.75 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_p &= Z_x \cdot f_y \\ &= 147211.25 \times 240 \\ &= 35330700 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

D. DATA PROFIL BAJA KASTELELA DENGAN RBS 2 ( L = 15 mm, P = 10 mm )

$$\begin{aligned}
 h &= 225 \text{ mm} \\
 b_f &= 75 - 15 \text{ mm} = 60 \text{ mm} \\
 t_w &= 5 \text{ mm} \\
 t_f &= 7 \text{ mm} \\
 r &= 0 \text{ mm} \\
 h_o &= 2h = 150 \text{ mm} \\
 h_1 &= t_f + r = 7 \text{ mm} \\
 h_2 &= h_t - 2 * h_1 = 211 \text{ mm} \\
 h &= h_t - t_f = 218
 \end{aligned}$$



$$\text{Berat : } w = 14 \text{ Kg/m}$$

Mencari Inersia arah x ( $I_x$ ) dan Modulus plastis profil honeycomb

$$\begin{aligned}
 A &= b \cdot h - (b - t_w) (h - 2t_f) \\
 &= 60 \cdot 225 - (60 - 5) (225 - 2 \cdot 7) \\
 &= 1896 \text{ mm}^2 \\
 I_x &= \left( \frac{1}{12} b_f \cdot h^3 \right) - \left( \frac{1}{12} (b_f - t_w) (h - 2t_f)^3 \right)
 \end{aligned}$$

$$= \left(\frac{1}{12} 60 \cdot 225^3\right) - \left(\frac{1}{12} (60 - 5) (225 - 2.7)^3\right)$$

$$= 13897607.92 \text{ mm}^4$$

$$= 1390 \text{ cm}^4$$

$$Z_x = \left(\frac{1}{4} tw \cdot h^2\right) + (b - tw) (h - tf) tf$$

$$= \left(\frac{1}{4} 5 \cdot 225^2\right) + (60 - 5) (225 - 7) 7$$

$$= 147211.25 \text{ mm}^3$$

$$Z_y = \left(\frac{1}{2} tf \cdot bf^2\right) + (h - 2 \cdot tf) \cdot \left(\frac{1}{4} tw^2\right)$$

$$= \left(\frac{1}{2} \cdot 7 \cdot 60^2\right) + (225 - 2 \cdot 7) \cdot \left(\frac{1}{4} 5^2\right)$$

$$= 12600 + 211 \cdot 6.25$$

$$= 13918.75 \text{ mm}^3$$

$$M_p = Z_x \cdot f_y$$

$$= 147211.25 \times 240$$

$$= 35330700 \text{ Nmm}$$

