

# **TUGAS AKHIR**

## **STUDI PERILAKU KEKAKUAN KOLOM DENGAN SISTEM SAMBUNGAN RBS BALOK KASTELA AKIBAT BEBAN SIKLIK LATERAL**

**FIKY DESKA PRATAMA**

**D111 15 312**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**2021**



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS HASANUDDIN  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL**

Jl. Poros Malino km. 6 Bontomarannu, 92172, Kab. Gowa, Sulawesi Selatan  
☒ <http://civil.unhas.ac.id> ☒ [civil@eng.unhas.ac.id](mailto:civil@eng.unhas.ac.id)

**LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR**

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Judul Tugas Akhir

**STUDI PERILAKU KEKAKUAN KOLOM DENGAN SISTEM SAMBUNGAN  
RBS BALOK KASTELLA AKIBAT BEBAN SIKLIK LATERAL**

Disusun oleh

**FIKY DESKA PRATAMA**

**D111 15 312**

Telah diperiksa dan disetujui oleh dosen pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

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

NIP: 196207291987031001

Dr.Eng. A. Arwin Amiruddin, ST, MT

NIP: 197912262005011001

Mengetahui,  
Ketua Departemen Teknik Sipil



Prof. Dr. H. M. Wiharaji Waronge, ST, MEng

NIP: 196802292001121002

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Fiky Deska Pratama, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul " **Studi Kekakuan Kolom Dengan Sistem Sambungan *Reduced Beam Section* Balok Kastella Akibat Beban Siklik Lateral** ", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Gowa, 22 Januari 2021



at pernyataan,

Fiky Deska Pratama  
D111 15 312

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkat rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Tugas Akhir yang berjudul “**Studi Kekakuan Kolom Dengan Sistem Sambungan *Reduced Beam Section* Balok Kastella Akibat Beban Siklik Lateral**” ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan kepada pembaca dan juga kepada penulis dalam memahami karakteristik beton pracetak secara umum dan khususnya *Balok Kastella*.

Penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bimbingan, petunjuk dan perhatian dari dosen pembimbing :

Pembimbing I : Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng

Pembimbing II : Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST.MT

Dengan segala kerendahan hati, penulis juga ingin menyampaikan terima kasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu Ibunda dan Ayahanda atas doa, kasih sayang, motivasi dan segala dukungannya selama ini, baik moral maupun material yang telah diberikan.
2. Bapak **Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

3. Bapak **Prof. Dr. H. Muh. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, dan Bapak **Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.** selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Bapak **Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST.MT**, dan Ibu **Dr. Eng. Fakhruddin ST, M.Eng.**, selaku Kepala dan Sekretaris Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
5. **Kak Risman Firman, S.T., Naufal Abdul Wahid, S.T.**, sebagai partner tim yang telah berjuang bersama selama proses penelitian berlangsung.
6. **Syahrul satar, harbiansyah, dan nadhilla faraswati, S.T** yang telah banyak membantu selama proses penelitian dilaksanakan.
7. Teman-teman **PATRON 2016**, mahasiswa Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2015** yang telah memberikan warna tersendiri.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini. Semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa ,22 Januari 2021

Fiky Deska Pratama

## ABSTRAK

Pada pembangunan yang menggunakan material baja terutama struktur bentangan panjang, balok kastela sering digunakan karena bahannya lebih ringan dan memiliki inersia yang lebih besar. Dalam penelitian ini balok kastela akan diberikan suatu modifikasi sambungan *Reduced Beam Section*(RBS) untuk memastikan adanya mekanisme kolom kuat balok lemah. Penelitian ini bertujuan untuk melihat perbandingan antara variasi RBS dengan dimensi coakan yang berbeda-beda. Penelitian ini menggunakan 6 buah balok, 2 untuk setiap variasi. Semua balok memiliki dimensi yang sama yaitu IWF kastela 225 75 5 7. Variasi pertama memiliki panjang dan lebar coakan 15x1,5 cm, variasi kedua 15x1 cm, dan variasi ketiga 10x1,5 cm. Dua buah LVDT100 diletakkan 30 cm dari puncak kolom untuk menghitung besarnya defleksi yang terjadi. Beban akan diberikan oleh alat *hidraulic actuator* yang bergerak menekan maupun menarik dengan kecepatan 0,1mm/detik kemudian *load cell* akan mencatat beban yang disalurkan pada puncak kolom. Hasil penelitian menunjukkan variasi dua memiliki kekuatan sebesar 4.02% dan Kekakuan awal 28.3% lebih besar dari rata-rata variasi lain.

**Kata kunci** : Balok Kastela, Beban, Lendutan, *Reduced Beam Section*

## ABSTRACT

In the construction that use steel as its material especially for the long span design, castellated beam frequently be used since it has lighter density dan has greater moment of inertia. This study will give the castellated beam a connection modification called *Reduced Beam Section*(RBS) in order to ensure strong column weak beam mechanism. This study aims to see the comparison of RBS variations with different types of hollow. This study uses 6 beams, 2 each variation. All beam has same dimension that is castellated IWF 225 75 5 7. First variation has hollow length and width 15x1,5 cm, second variation 15x1 cm, and the third is 10x1,5 cm. Two LVDT100 will be placed 30cm from the top of the column to record the magnitude of deflection. Load will be given by hydraulic actuator that can move either push or pull with loading speed 0,1mm/second, then load cell will record the load to be transmitted at top of the column. The experimental result show that the second variation has greater strength by 4.02% and first Stiffness by 28.3 % rather than average of another variations.

**Keywords** : Castellated beam, Deflection, Load, *Reduced Beam Section*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	x
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1.1. Baja.....	5
2.1.2. Jenis-jenis Baja.....	5
2.1.3. Sifat Mekanik Baja .....	6

2.2.	Kekakuan.....	9
2.3.	Balok Kastela.....	11
2.3.1.	Kastelasi .....	11
2.3.2.	Dimensi Balok Baja Kastela.....	12
2.4.	Sambungan <i>End Plate</i> .....	13
2.5.	Modifikasi Sistem Sambungan Balok-Kolom Baja .....	14
2.5.1.	<i>Cover Plate</i> .....	15
2.5.2.	<i>Flange Rib</i> .....	16
2.5.3.	<i>Top &amp; Bottom Haunch</i> .....	16
2.5.4.	<i>Reduced Beam Sectio (RBS)</i> .....	17
2.6.	Penentuan Besaran Dimensi RBS.....	18
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>20</b>
3.1	Diagram Alir Penelitian .....	20
3.2	Waktu dan Lokasi Penelitian.....	21
3.3	Alat dan Bahan Penelitian.....	21
3.4	Desain Benda Uji .....	23
3.5	Pelaksanaan Pengujian .....	25
3.5.1.	Persiapan Pengujian .....	25
3.5.2.	Tahapan Pengujian .....	26
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>28</b>
4.1	Riwayat Pembebanan dan Penentuan Titik Leleh .....	28
4.2	Hasil Pengujian Siklik .....	29



4.2.1.	Hubungan antara Beban dan <i>Displacement</i> .....	29
--------	---	----

4.2.2.	Kurva <i>Backbone</i> .....	33
4.2.3.	Perhitungan Kekakuan.....	34
4.3	Mode Kegagalan Sambungan RBS Balok Baja Kastela .....	38
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>39</b>
5.1	Kesimpulan.....	39
5.2	Saran.....	39

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1.</b> Dimensi variasi bukaan balok kastella dan RBS.....	24
<b>Tabel 4.1.</b> Nilai Hubungan antara Beban dan <i>Displacement</i> RBSC-1 ...	30
<b>Tabel 4.2.</b> Nilai Hubungan antara Beban dan <i>Displacement</i> RBSC-2 ...	31
<b>Tabel 4.3.</b> Nilai Hubungan antara Beban dan <i>Displacement</i> RBSC-3 ....	32

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Grafik hubungan tegangan-regangan pada hasil uji kuat tarik baja.....	8
<b>Gambar 2.2.</b> Kriteria Kekakuan .....	10
<b>Gambar 2.3</b> Skema pembuatan balok kastela.....	12
<b>Gambar 2.4</b> Proses pembuatan balok kastela.....	12
<b>Gambar 2.5</b> Hasil pembuatan balok kastella .....	13
<b>Gambar 2.6</b> Sambungan <i>End Plate</i> bangunan Tahan Gempa .....	14
<b>Gambar 2.7</b> Modifikasi sambungan <i>Cover Plate</i> .....	15
<b>Gambar 2.8</b> Modifikasi Sambungan <i>Flange Rib</i> .....	16
<b>Gambar 2.9</b> Modifikasi sambungan <i>Top &amp; Bottom Haunch</i> .....	17
<b>Gambar 2.10</b> Modifikasi sambungan <i>Reduced Beam Section(RBS)</i> .....	18
<b>Gambar 2.11</b> Geometri RBS .....	18
<b>Gambar 3.1.</b> Diagram Alir penelitian .....	20
<b>Gambar 3.2.</b> <i>Hydraulic Actuator</i> .....	21
<b>Gambar 3.3.</b> <i>Personal Computer dan Data Logger</i> .....	22
<b>Gambar 3.4.</b> <i>Load Cell</i> .....	22
<b>Gambar 3.5.</b> <i>Strain Gauge Baja</i> .....	23
<b>Gambar 3.6.</b> LVDT( <i>Linear Variable Differential Transformer</i> .....	23
<b>Gambar 3.7.</b> Jarak Bukaan Balok Kastella dan jarak coakan dari muka kolom.....	25
<b>Gambar 3.8.</b> <i>Set up</i> pengujian.....	27
<b>Gambar 4.1</b> Riwayat pembebanan setiap pengujian ( <i>Displacement Control</i> ) .....	28
<b>Gambar 4.2</b> Contoh plot regangan-beban (RBSC-3) .....	29
<b>Gambar 4.3</b> Grafik beban-lendutan RBSC-1 .....	30
<b>Gambar 4.4</b> Grafik beban-lendutan RBSC-2 .....	31
<b>Gambar 4.5</b> Grafik beban-lendutan RBSC-3.....	32

**Gambar 4.6.** Kurva Backbone untuk Setiap Variasi RBS ..... 33

## BAB I PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Konstruksi baja merupakan salah satu jenis konstruksi yang mendominasi infrastruktur modern karena bahannya yang kuat, ulet, lentur, dan relatif ringan. Para perencana sipil memikirkan bagaimana cara meningkatkan kekuatan dari sebuah elemen balok pada baja, tanpa peningkatan berat sendiri baja sehingga diperoleh sebuah metode baru yaitu balok kastella (*Honeycomb Beam*).

Balok kastella merupakan balok dengan bukaan badan yang dibentuk dengan cara memotong bagian web dengan pola tertentu lalu disambungkan kembali dengan las. Balok baja ini mempunyai beberapa kelebihan, di antaranya adalah mempunyai momen inersia dan modulus penampang yang lebih besar sehingga lebih kuat dan kaku, bahannya ringan dan cocok untuk bentangan panjang. 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.

Salah satu modifikasi yang dapat dipilih sebagai perkuatan sambungan dengan menggunakan balok kastella adalah *Reduced Beam Section* (RBS). *Reduced Beam Section* (RBS) merupakan suatu teknik modifikasi pada bagian flens balok dengan memberikan pengurangan luasan sejarak tertentu dari tumpuan sehingga kapasitas momen tumpuan yang terjadi pada bagian balok dapat berkurang.

Dalam sambungan *reduced beam section* (RBS) atau bagian balok yang dipotong (coakan) pada daerah flens balok, bagian-bagian dari balok flens dipotong untuk memastikan terjadinya sendi plastis di daerah RBS. Jenis sambungan RBS ini menggunakan strategi pengendalian mekanisme letak lentur dilokasi yang diinginkan yakni pada balok.

Melanjutkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka perlu diteruskan dengan mengkaji metode RBS (coakan) pada flens balok dengan menggunakan balok kastella, untuk mengetahui perilaku struktur balok kolom eksterior dengan beban bolak balik.

Berdasarkan uraian di atas maka disusunlah tugas akhir dengan judul : **“Studi Perilaku Kekakuan Kolom dengan Sistem Sambungan RBS Balok Kastela Akibat Beban Siklik Lateral”**

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan paparan diatas, maka dapat dijabarkan rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh beban siklik pada sistem sambungan RBS *dogbone* balok kastella?
2. Bagaimana perilaku kekakuan kolom dari setiap variasi RBS *dogbone* pada balok kastella?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan prinsip kolom kuat balok lemah dan akan diuji dengan beban siklik. Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menjelaskan pengaruh beban siklik pada sistem sambungan RBS *dogbone* balok kastella
2. Menjelaskan perilaku kekakuan dari sambungan RBS *dogbone* pada balok kastella akibat beban siklik.

## **1.4. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat penelitian dapat dijelaskan yaitu :

1. Dengan penggunaan balok kastella dengan RBS pada flens dapat menambah sebuah metode redaman struktur khusus desain gedung bangunan tahan gempa.
2. Acuan dan masukan kepada para praktisi teknik tentang *Reduce Beam Section* pada desain balok kastella pada struktur sebagai

salah satu cara pendekatan penempatan terbentuknya daerah momen plastis.

### **1.5. Batasan masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Sambungan balok kastella kolom dengan menggunakan RBS material baja dengan asumsi bahwa sambungan dianggap semi rigid dengan menggunakan sambungan *end plate*.
2. Balok kastella yang digunakan dalam eksperimen ini adalah ukuran penampang IWF kastella 225 75 5 7.
3. Pembahasan hanya pada sambungan balok kastella dengan RBS, tidak membahas tentang kekuatan las sambungan pada balok baja kastella, tidak membahas tentang pelat sambung *end plate* pada bagian sambungan eksterior balok-kolom dan kolom serta faktor-faktor yang mempengaruhi karakteristik baja seperti pengaruh suhu, kelembaban, kelelahan, radiasi ultraviolet, serta pengaruh asam, basa dan garam.

### **1.6. Sistematika Penulisan**

Gambaran umum mengenai keseluruhan isi tulisan ini, dapat diuraikan secara singkat pada tiap bab yang akan dibahas sebagai berikut:

#### **Bab I     Pendahuluan**

Bab ini memberikan penjelasan mengenai latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

#### **Bab II    Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisikan tinjauan terhadap studi teoritis mengenai beton bertulang, beton pracetak, sambungan beton pracetak, konsep desain sambungan kolom, mode kegagalan sepatu kolom, dan



kerangka pikir penelitian.

### **Bab III Metodologi Penelitian**

Bab ini berisikan metode penelitian yang meliputi: tinjauan umum penelitian, lokasi dan waktu penelitian, pengumpulan data, pengujian eksperimental, dan variabel penelitian.

### **Bab IV Hasil Penelitian dan Pembahasan**

Bab ini berisikan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengujian bahan, dan pengujian kekuatan sepatu kolom.

### **Bab V Kesimpulan dan Saran**

Bab ini merupakan bab terakhir dari tulisan ini yang memberikan kesimpulan dan saran saran yang penulis kemukakan sesuai dengan pembahasan dalam bab ini.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Baja

Baja adalah logam paduan dengan besi (Fe) sebagai unsur dasar dan karbon (C) sebagai unsur paduan utamanya. Kandungan karbon dalam baja berkisar antara 0,2 % hingga 2,1 % berat sesuai *grade*-nya, fungsi karbon sendiri adalah sebagai unsur penguat. Di samping itu baja juga mengandung unsur-unsur lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn), dan sebagainya yang jumlahnya dibatasi. Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsure paduan lainnya, berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tariknya (*tensile strength*), namun di sisi lain membuatnya menjadi getas (*brittle*) serta menurunkan keuletannya (*ductility*).

#### 2.1.1. Jenis-jenis Baja

Berdasarkan kandungan karbon, baja dibagi menjadi tiga macam, yaitu :

1. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah (low carbon steel) mengandung karbon dalam campuran baja karbon kurang dari 0,3%. Baja ini bukan baja yang keras karena kandungan karbonnya yang rendah kurang dari 0,3%C. Baja karbon rendah tidak dapat dikeraskan karena kandungan karbonnya tidak cukup untuk membentuk struktur martensit (Amanto, 1999).

2. Baja karbon menengah

Baja karbon sedang mengandung karbon 0,3%C – 0,6%C (medium carbon steel) dan dengan kandungan karbonnya memungkinkan baja untuk dikeraskan sebagian dengan perlakuan panas (heat treatment) yang sesuai. Baja karbon sedang lebih keras serta lebih kuat dibandingkan dengan baja karbon rendah (Amanto, 1999).

### 3. Baja karbon tinggi

Baja karbon tinggi mengandung 0,6%C – 1,5%C dan memiliki kekerasan tinggi namun keuletannya lebih rendah, hampir tidak dapat diketahui jarak tegangan lumernya terhadap tegangan proporsional pada grafik tegangan regangan. Berkebalikan dengan baja karbon rendah, pengerasan dengan perlakuan panas pada baja karbon tinggi tidak memberikan hasil yang optimal dikarenakan terlalu banyaknya martensit sehingga membuat baja menjadi getas. Sedangkan jika berdasarkan komposisi unsur paduan selain karbon,

baja dibagi menjadi 3 macam, yaitu:

#### 1. Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steel*)

Baja paduan rendah merupakan baja paduan yang elemen paduannya kurang dari 2,5% wt, misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lainlain. Biasanya digunakan untuk membuat perkakas potong, gergaji, cetakan penarikan, pahat kayu, mata pisau, pemotong kikir, gurdi batu.

#### 2. Baja Paduan Menengah (*Medium Alloy Steel*)

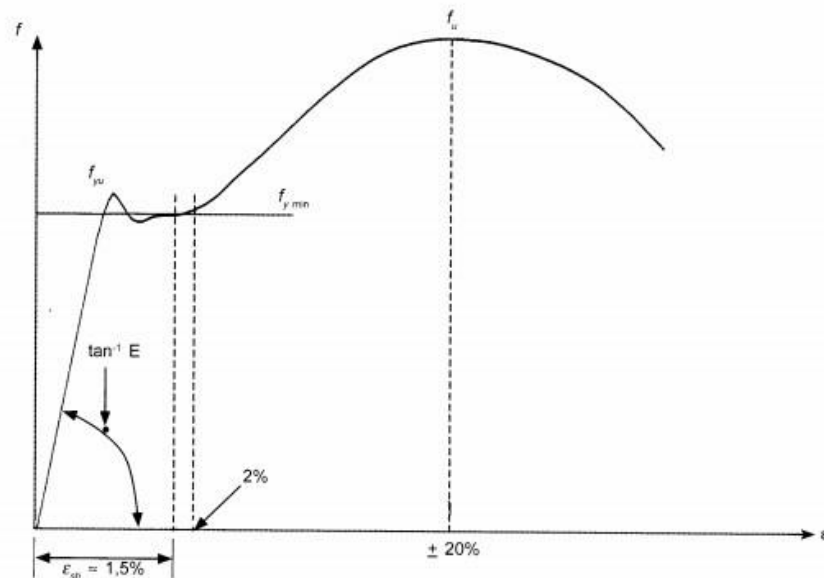
Baja paduan menengah merupakan baja paduan yang elemen paduannya 2,5% - 10% wt, misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain. Biasanya digunakan untuk membuat alat pengukur, cetakan penarikan, rol derat, mata gunting untuk plat tebal.

#### 3. Baja Paduan Tinggi (*High Alloy Steel*)

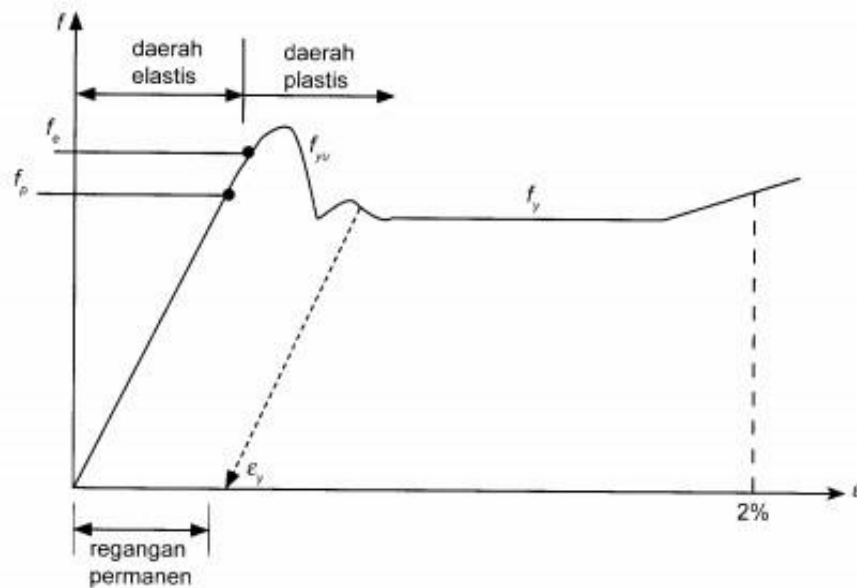
Baja paduan tinggi merupakan baja paduan yang elemen paduannya lebih dari 10% wt, misalnnnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain (Amanto, 1999). Banyak digunakan untuk cetakan penarikan kawat, cetakan pengetrim, pengukur, rol derat.

### 2.1.2 Sifat Mekanik Baja

Model pengujian yang paling tepat untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik dari material baja adalah dengan melakukan uji tarik terhadap suatu benda uji baja. Uji tekan tidak dapat memberikan data yang akurat terhadap sifat-sifat mekanik baja, karena disebabkan beberapa hal antara lain adanya potensi tekuk pada benda uji yang menyebabkan ketidakstabilan dari benda uji tersebut, selain itu perhitungan tegangan yang terjadi di dalam benda uji lebih mudah untuk dilakukan uji tarik daripada uji tekan. Gambar 2.1 menunjukkan suatu hasil uji tarik material baja yang dilakukan pada suhu kamar serta dengan memberikan laju regangan yang normal. Tegangan nominal ( $f$ ) yang terjadi dalam benda uji diplot pada sumbu vertical, sedangkan regangan ( $\epsilon$ ) diplot pada sumbu horizontal.



(a) Kurva Tegangan-Regangan



(b) Bagian kurva tegangan-regangan yang diperbesar

**Gambar 2.1** Grafik hubungan tegangan-regangan pada hasil uji kuat tarik baja

(Sumber : Agus Setiawan, 2008)

Dimana:

$f_p$  : batas proporsional

$f_e$  : batas elastis

$f_{yu}, f_y$  : tegangan leleh atas dan bawah

$f_u$  : tegangan putus

$\epsilon_{sh}$  : regangan saat terjadi efek *strain-hardening* (penguatan regangan)

$\epsilon_u$  : regangan saat tercapainya tegangan putus

titik-titik penting ini membagi kurva tegangan regangan menjadi beberapa daerah sebagai berikut:

1. Daerah linear antara 0 dan  $f_p$ , dalam daerah ini berlaku hukum hooke, kemiringan dari bagian kurva yang lurus ini disebut sebagai Modulus Elastisitas atau Modulus Young,  $E (= f/\epsilon)$

2. Daerah elastis antara 0 dan  $f_e$ , pada daerah ini jika beban dihilangkan maka benda uji akan kembali ke bentuk semula atau dikatakan bahwa benda uji tersebut masih bersifat elastic.
3. Daerah plastis yang dibatasi regangan antara 2% hingga 1,2-1,5%, pada bagian ini regangan mengalami kenaikan akibat tegangan konstan sebesar  $f_y$ . Daerah ini dapat menunjukkan pula tingkat daktilitas dari material baja tersebut. Pada baja mutu tinggi terdapat pula daerah plastis, namun pada daerah ini tegangan masih mengalami kenaikan. Karena baja jenis ini tidak mempunyai daerah plastis yang benar-benar datar sehingga tidak dapat dipakai dalam analisa plastis.
4. Daerah penguatan regangan (*strain-hardening*) antara  $\epsilon_{sh}$  dan  $\epsilon_u$ . untuk regangan lebih besar dari 15 hingga 20 kali regangan elastic maksimum, tegangan kembali mengalami kenaikan namun dengan kemiringan yang lebih kecil daripada kemiringan daerah elastic. Daerah ini dinamakan daerah penguatan regangan (*strain-hardening*), yang berlanjut hingga mencapai tegangan putus. Kemiringan daerah ini dinamakan modulus penguatan regangan ( $E_{st}$ )

## 2.2. 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 :

$$k = \frac{P}{\Delta}$$

$$k = \frac{P}{\Delta}$$

Dengan :

$k$  : Kekakuan (kN/mm)

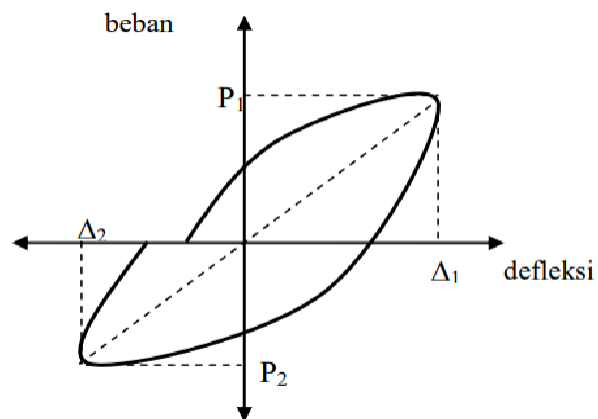
$P$  : Gaya batang (kN)

$\Delta$  : 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 12 dan dengan persamaan berikut :

$$k = \frac{P_1 + P_2}{\Delta_1 + \Delta_2}$$

(29)



**Gambar 2.2.** Kriteria Kekakuan

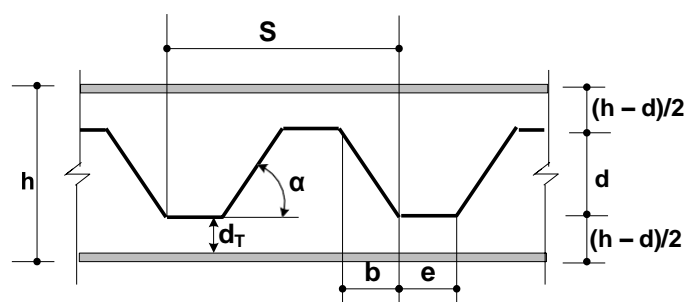
### 2.3. Balok Kastela

Balok Kastella (castellated beam) merupakan balok yang dipakai untuk konstruksi bentang panjang (lebih dari 8 meter), yang berupa 2 profil baja yang disatukan menjadi 1 untuk mendapatkan tinggi profil yang sesuai. Balok kastella 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 las nya dapat lebih efektif dan efisien.

#### 2.3.1. Kastelasi

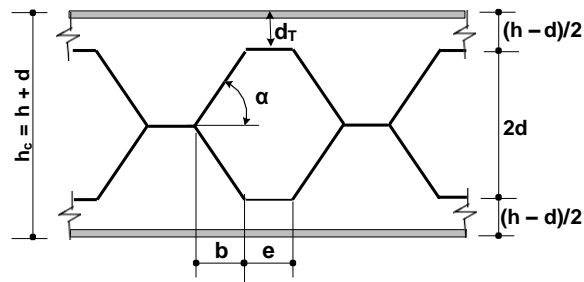
Kastelasi (*Castellation*) adalah proses memotong badan profil dengan pola zig-zag yang dicetak menggunakan *hot-rolled* (cetakan panas) berbentuk H, I, atau U. Setengah bagian profil baja yang telah dipotong disambung dengan cara digeser atau dibalik (ujung kanan di las dengan ujung kiri, dan sebaliknya) sehingga membentuk lubang berbentuk *polygonal*. Hal ini mengakibatkan bertambahnya tinggi ( $h$ ) dan tinggi daerah pemotongan ( $d$ ).

Garis potong zig-zag pada Gambar 1(a) adalah pola pemotongan balok kastella dan bentuk geometri dari potongan badan akan menentukan hasil bentuk penampang seperti terlihat pada Gambar 1 (b) adalah balok kastella setelah pemotongan. Pada Gambar 2, adalah hasil proses pemotongan baja IWF dari pola zig zag.



(a) Potong IWF sepanjang garis zig-zag





(b) Balok bukaan badan (*open-web*)

**Gambar 2.3** Skema pembuatan balok kastela

(Blodgett, Omer W., 1982)



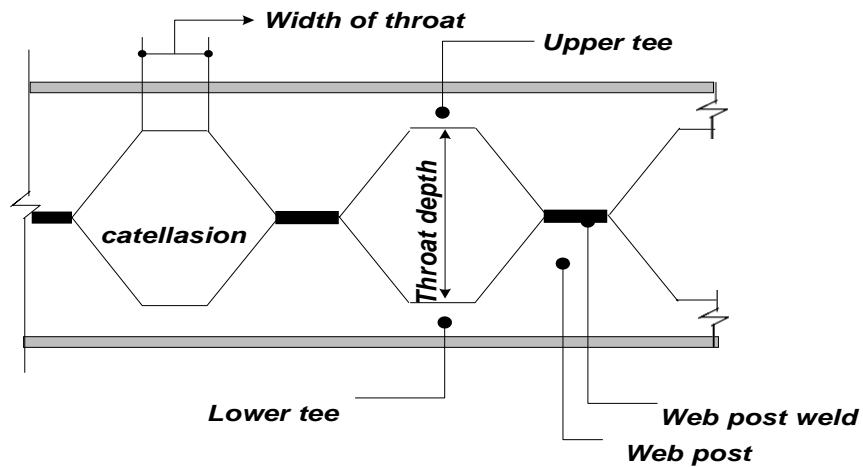
**Gambar 2.4** Proses pembuatan balok kastela

(Sumber : Nini, 2017)

### 2.3.2. Dimensi Balok Baja Kastela

Di bawah ini merupakan bagian-bagian dari balok baja kastela :

- 1 *Web-Post* : Luas solid dari balok baja kastella.
- 2 *Castellation* : Luas yang sudah mengalami pelubangan (hole).
- 3 *Throat Width* : Perpanjangan horisontal dari potongan “gigi” bawah profil
- 4 *Throat Depth* : Tinggi daerah profil potongan “gigi” bawah sampai sayap profil



**Gambar 2.5** Tampak bagian-bagian *hexagonal* balok kastela  
(Patrick Bardley, 2007)



**Gambar 2.5** Hasil pembuatan balok kastela  
(Nini, 2017)

#### **2.4 Sambungan *End Plate***

Jika aspek perencanaan tahan gempa menjadi hal yang penting maka unsur kekuatan tidak menjadi satu satunya pertimbangan tetapi juga kekakuan dan kemampuan berotasi saat inelastis. Tipe sambungan *end plate* menjadi satu yang direkomendasikan sebagai sistem rangka khusus dan menengah bangunan tahan gempa (AISC 2011).

Model *end plate* dengan sistem baut yang dipasang dibagian flens atas dan flens bawah sekaligus sangat berguna untuk menahan gaya

bolak balik, sedangkan gravitasi maka gaya tarik hanya terjadi pada bagian plat flens atas saja, seperti pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Sambungan *End Plate* bangunan Tahan Gempa  
(Nini, 2018)

## 2.5 Modifikasi Sistem Sambungan Balok-Kolom Baja

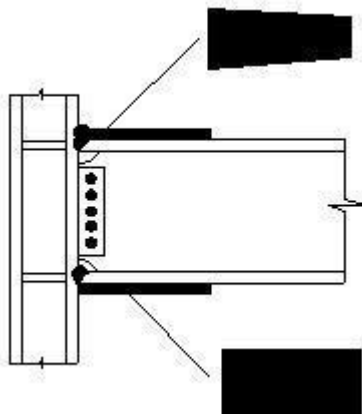
Mekanisme keruntuhan yang diharapkan terjadi pada sebuah struktur adalah mekanisme keruntuhan *Strong Column Weak Beam* (SCWB) atau “Kolom Kuat Balok Lemah”. Pada mekanisme ini, diharapkan baja yang berfungsi sebagai balok akan menunjukkan sifat *ductile*-nya terlebih dahulu sehingga yang keruntuhan yang terjadi terlebih dahulu terjadi saat gedung mencapai tahap *failure* adalah keruntuhan balok.

Di lapangan, konsep SCWB biasanya didapat dengan memfokuskan pada bagian sambungan antara kolom dan balok karena plastis pada struktur gedung biasanya terjadi di area tersebut. Perlakuan detail pada sambungan biasanya dilakukan untuk mencapai kondisi yang dapat memenuhi mekanisme SCWB. Salah satu cara yang digunakan adalah dengan membuat bagian sambungan untuk memiliki tahanan momen yang lebih besar dari pada bagian bentang sehingga sendi plastis terjadi pada bagian bentang balok (jauh dari sambungan).

Ada beberapa detail sambungan yang mulai umum digunakan dewasa ini. Setiap detail memiliki karakteristik yang berbeda – beda dengan keunggulan yang berbeda pula. Modifikasi sambungan tersebut adalah : modifikasi sambungan *Cover Plate*, modifikasi sambungan *Flange Rib*, modifikasi sambungan *Top & Bottom Haunch*, dan modifikasi sambungan *Reduced Beam Section*.

### 2.5.1. *Cover Plate*

Modifikasi sambungan *Cover Plate* adalah modifikasi sambungan yang dibuat dengan menambahkan lempengan kecil pada bagian atas dan bawah bagian sayap balok dengan pengelasan yang memadai untuk mentransfer gaya – gaya yang bekerja pada cover ke balok. Lempengan pada flange bagian bawah di las pabrik ke flens bagian kolom sementara bagian flens balok dilas lapangan ke kolom. Flens bagian atas dan bagian cover atas keduanya dilas lapangan ke flens kolom dengan pengelasan yang umum Sambungan bagian web bisa dilas ataupun diberikan perlakuan *high strength bolted*. Berikut ilustrasi modifikasi sambuungan *Cover Plate*:



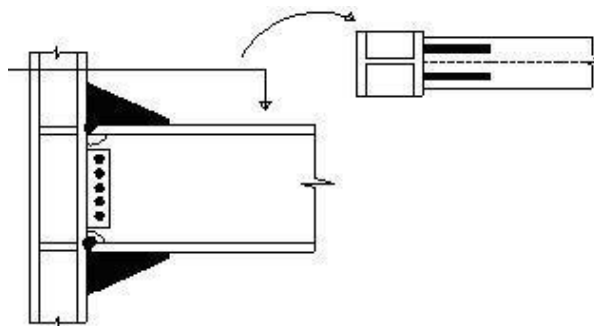
**Gambar 2.7** Modifikasi sambungan *Cover Plate*

### 2.5.2. *Flange Rib*

Modifikasi sambungan *Flange Rib* adalah modifikasi yang dibuat dengan tujuan untuk mengurangi kebutuhan pengelasan pada flens kolom dan untuk menggeser sendi plastis dari daerah muka kolom.

Kemampuan dari kombinasi ini tergantung pada pengelasan flens di ujung bentang. Sambungan bisa mengalami kegagalan pada bagian flens kolom, walaupun seharusnya tahanan terhadap kegagalan semacam itu lebih baik daripada yang dimiliki oleh *cover plate* dengan berkurangnya bagian yang di las.

Pada saat pengetesan, ukuran dari benda uji membutuhkan dua *ribs* yang dipasang berdiri pada masing – masing bagian flens. Hal ini tentu saja menambah kebutuhan biaya. Namun, sejumlah tes desain terhadap benda uji yang hanya menggunakan satu buah *ribs* mengindikasikan terjadinya kegagalan yang lebih cepat pada bagian las *rib* di ujung. Berikut ilustrasi dari modifikasi sambungan *Flange Rib*:



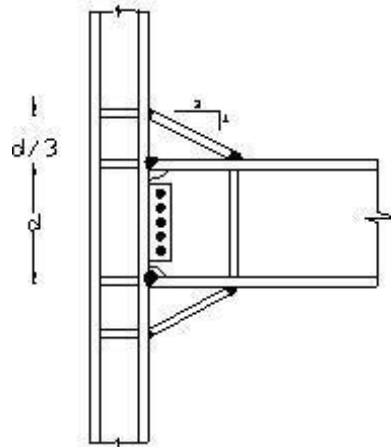
**Gambar 2.8** Modifikasi Sambungan *Flange Rib*

### 2.5.3. *Top & Bottom Haunch*

Modifikasi sambungan *Top & Bottom Haunch* dibuat dengan meletakkan *Haunch* pada bagian atas dan bawah flens. Dari hasil tes yang telah dilakukan sebelumnya, diketahui bahwa sambungan ini telah sukses memenuhi tujuan yang diinginkan.

Namun, sambungan ini termasuk salah satu sambungan yang paling banyak memakan biaya. Biaya dapat dikurangi dengan

menghilangkan bagian las antara flens balok dengan kolom. Namun, kemampuan dari jenis sambungan tersebut masih belum pernah diujikan. Salah satu kelemahan dari sistem ini adalah bahwa keberadaan haunch diatas girder dapat menimbulkan masalah kearsitekturan. Gambar 2.9 menunjukkan sketsa dari modifikasi *Top & Bottom Haunch* :



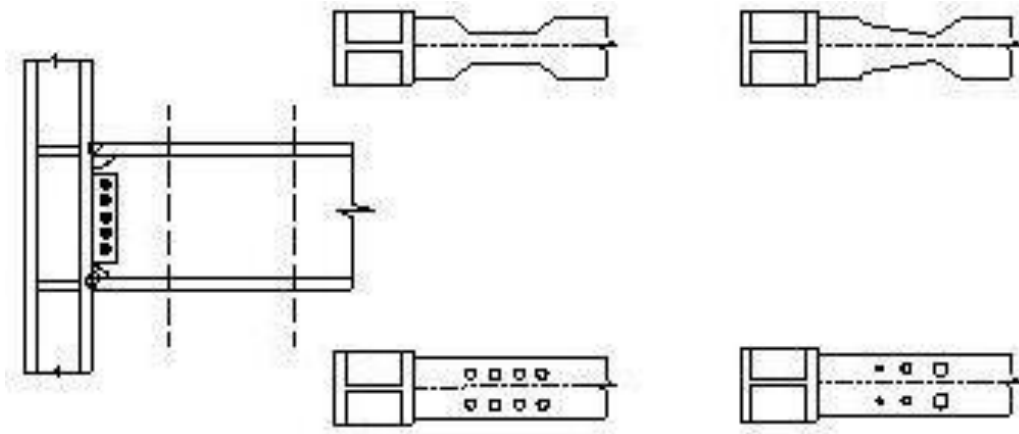
**Gambar 2.9** Modifikasi sambungan *Top & Bottom Haunch*

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

Pada modifikasi sambungan *Reduced Beam Section*, bagian balok dengan sengaja diberikan pengurangan luasan pada bagian tertentu untuk menciptakan zona plastis yang berlokasi pada bagian bentang balok, jauh dari muka kolom. Beberapa cara pengurangan bagian balok telah dilakukan. Salah satu metoda yang dilakukan adalah dengan mengurangi bagian flens balok secara simetris dari garis tengah balok ke dalam bentuk yang biasa disebut sebagai profil *dog bone*. Perlu diperhatikan bahwa dalam pelaksanaannya, pengurangan luasan harus dilakukan sehalus mungkin untuk mengurangi adanya coakan yang memungkinkan terjadinya keretakan. Cara lain yang biasa dilakukan juga adalah mengurangi luasan dengan memberikan serangkaian lubang pada bagian flens balok.

Modifikasi jenis ini banyak dipilih untuk struktur yang menggunakan sistem plat lantai pra cetak. Dibandingkan dengan modifikasi perkuatan sambungan, modifikasi jenis ini memudahkan perletakan pelat lantai di

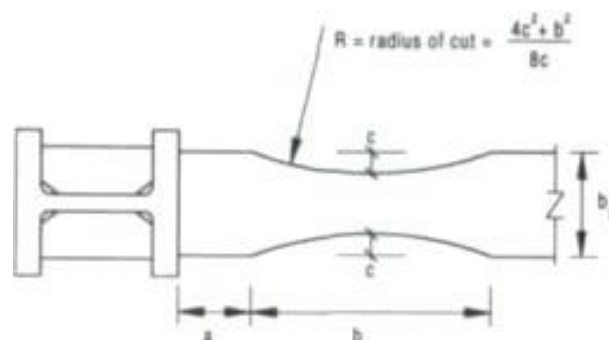
lapangan karena penyediaan ruang yang tidak terganggu oleh adanya tambahan bentuk yang menonjol diatas flens. Namun, keutungan ini harus dikompensasikan dengan berkurangnya tahanan tekan dari balok karena pada modifikasi tipe ini dilakukan pengurangan luasan pada daerah flens balok. Berikut adalah ilustrasi dari modifikasi sambungan *Reduced Beam Section* :



**Gambar 2.10** Modifikasi sambungan *Reduced Beam Section*(RBS)

## 2.6 Penentuan Besaran Dimensi RBS

Gambar 2.11 menunjukkan dimensi dari coakan RBS, dimana  $a$  merupakan jarak dari muka kolom ke coakan,  $b$  adalah panjang coakan dan  $c$  menunjukkan kedalaman coakan RBS.



**Gambar 2.11** Geometri RBS

Dalam desain, besarnya coakan harus sekecil mungkin untuk meminimalisir pertumbuhan momen di daerah RBS kembali ke muka kolom. Namun dimensi a harus cukup besar sedemikian sehingga tegangan pada RBS bisa menyebar secara seragam menyeberangi lebar flens hingga muka kolom. Demikian pula dimensi b harus cukup besar untuk mencegah regangan inelastic yang terlalu besar pada RBS. Besarnya a dan b direkomendasikan memenuhi persamaan :

$$a = (0.5 \text{ sampai } 0.75)b_f$$

$$b = (0.65 \text{ sampai } 0.85)d$$

dimana  $b_f$  dan  $d$  adalah lebar sayap dan tinggi balok

salah satu dimensi ketika mendesain RBS adalah  $c$ , kedalaman coakan. Nilai dari  $c$  akan mengontrol momen maksimum yang berkembang di daerah RBS yang akan berdampak langsung pada momen maksimum yang dihasilkan di muka kolom. Untuk dimensi  $c$  sendiri, harus lebih kecil atau sama dengan  $0.25b_f$