

**OPTIMASI PARAMETER BUKAAN DAN
PENGAKU DIAGONAL PADA BALOK BAJA
KASTELA YANG TERTUMPU LATERAL**

TESIS



Oleh:

**Erwin Sanjaya
NPM : 2017831033**

PEMBIMBING:

Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JULI 2019**

HALAMAN PENGESAHAN

**OPTIMASI PARAMETER BUKAAN DAN
PENGAKU DIAGONAL PADA BALOK BAJA
KASTELA YANG TERTUMPU LATERAL**



Oleh:

**Erwin Sanjaya
2017831033**

Disetujui Untuk Diajukan Ujian Sidang Pada Hari/Tanggal:

Selasa, 23 Juli 2019

Pembimbing:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'B. Suryoatmono', written over a light blue horizontal line.

Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JULI 2019**

PERNYATAAN

Yang bertandatangan di bawah ini, saya dengan data diri sebagai berikut:

Nama : Erwin Sanjaya
Nomor Pokok Mahasiswa : 2017831033
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa Tesis dengan judul:

Optimasi Parameter Bukaan dengan Pengaku Diagonal pada Balok Baja
Kastela yang Tertumpu Lateral

adalah benar-benar karya saya sendiri di bawah bimbingan Pembimbing, dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan.

Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika ada tuntutan formal atau non formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini, saya siap menanggung segala resiko, akibat, dan/atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya, termasuk pembatalan gelar akademik yang saya peroleh dari Universitas Katolik Parahyangan.

Dinyatakan : di Bandung

Tanggal : 23 Juli 2019



Erwin Sanjaya

OPTIMASI PARAMETER BUKAAN DAN PENGAKU DIAGONAL PADA BALOK BAJA KASTELA YANG TERTUMPU LATERAL

Erwin Sanjaya
NPM: 2017831033

Pembimbing: Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

Magister Teknik Sipil
Bandung
Juli 2019

ABSTRAK

Gaya geser pada umumnya berkontribusi besar dalam menyebabkan kegagalan balok kastela sehingga dibutuhkan pengaku diagonal pada bukaan. Optimisasi dilakukan dengan bervariasi dimensi bukaan dan pengaku diagonal. Metode elemen hingga digunakan untuk analisis nonlinear. Tujuan studi ini adalah membandingkan hasil analisis numerik balok kastela tanpa pengaku diagonal dengan prosedur desain yang terdapat pada *Steel Design Guide 31, AISC 2016*. Selain itu, perilaku nonlinear yang meliputi beban kritis dan distribusi tegangan Von Mises balok kastela dengan dan tanpa pengaku diagonal dipelajari untuk mendapatkan dimensi bukaan dan pengaku diagonal yang optimum. Nilai optimum pada studi ini meliputi kekakuan awal (K_i), kekuatan (w_{max}), dan daktilitas (μ) struktur. Hasil studi menunjukkan prosedur desain AISC dapat memprediksi lokasi tegangan maksimum dengan akurat dan menghasilkan kekuatan ultimit balok yang lebih konservatif dibandingkan dengan hasil numerik. Pada balok kastela tanpa pengaku diagonal, model yang optimum adalah model CB60-1 ($w_{maxst} = 56.16$ kN/m) dan CB45-1 ($\mu_{st} = 3.06$) dengan rata-rata kekakuan awal 5.78 kN/m. Sedangkan model yang optimum pada balok kastela dengan pengaku diagonal adalah CB45-33 ($K_{ist} = 6.99$ kN/m/m), CB60-11 ($w_{maxst} = 67.53$ kN/m), dan CB60-24 ($\mu_{st} = 2.79$). Jadi, penggunaan pengaku diagonal efektif dalam meningkatkan kekakuan awal dan kekuatan struktur, tetapi mengurangi daktilitas struktur.

Kata Kunci: Balok Kastela, Pengaku Diagonal, Optimum, Metode Elemen Hingga, Distribusi Tegangan Von Mises.

OPTIMIZATION OF OPENING AND DIAGONAL STIFFENER PARAMETERS ON LATERALLY BRACED CASTELLATED STEEL BEAM

Erwin Sanjaya
NPM: 2017831033

Advisor: Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

Magister of Civil Engineering
Bandung
Juli 2019

ABSTRACT

Shear force in general greatly contributes to cause failure of castellated beams so diagonal stiffeners on the openings are required. Optimization was done by vary dimension of openings and diagonal stiffeners. Finite element method is utilized to perform nonlinear analysis. The objective of this research is to compare the numerical results of castellated beams without diagonal stiffeners with AISC design procedures that provided in Steel Design Guide 31, AISC 2016. Furthermore, nonlinear behaviour that involves critical load and Von Mises stress distribution of castellated beams with and without diagonal stiffeners were studied to obtain optimum dimension of openings and diagonal stiffeners. Optimum value in this research involves the greatest initial stiffness (K_i), strength (w_{max}), and ductility (μ) of structure. The results showed that AISC design procedures could predict the location of maximum stress accurately and yield more conservative ultimate strength of beam compared to numerical result. The optimum models on castellated steel beams without diagonal stiffeners are CB60-1 ($w_{maxst} = 56.16$ kN/m) and CB45-1 ($\mu_{st} = 3.06$) with average initial stiffener 5.78 kN/m. While, the optimum models on castellated steel beams with diagonal stiffeners are CB45-33 ($K_{ist} = 6.99$ kN/m/m), CB60-11 ($w_{maxst} = 67.53$ kN/m), and CB60-24 ($\mu_{st} = 2.79$). Thus, utilization of diagonal stiffeners is effective to increase initial stiffness and strength of structure, but reduce the structure's ductility.

Keywords: Castellated Beams, Diagonal Stiffeners, Optimum, Finite Element Method, Von Mises Stress Distribution.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena dengan rahmat dan kasih-Nya penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul *Studi Parameter Bukaian dan Pengaku Diagonal pada Balok Baja Kastela yang Tertumpu Lateral*. Tesis ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat S-2 di Jurusan Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan.

Dalam menyusun tesis ini ada hambatan dan rintangan yang penulis alami, maka dalam menyelesaikan tesis ini tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah dengan penuh kesabaran memberikan ilmu, masukan, arahan, dan semangat pada penulis dalam penyusunan tesis ini;
2. Dr. Johannes Adhijoso Tjondro dan Dr. Paulus Karta Wijaya selaku dosen penguji yang telah memberi masukan pada penyusunan tesis ini;
3. Anak Agung Diah Parami Dewi, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Dewan Penyunting Jurnal Ilmiah Teknik Sipil (JITS) Universitas Udayana yang telah memberikan kesempatan publikasi jurnal dengan topik tesis ini;
4. Bapak Sutojo Ngatidjan dan Ibu Diana Maria selaku orang tua penulis yang telah memberikan dukungan, semangat, dan doa bagi penulis dengan penuh kasih sayang;
5. Desy Permata Sari selaku kakak kandung penulis yang selalu mendoakan dan memberi semangat kepada penulis;
6. seluruh dosen-dosen program studi Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan yang telah memberikan ilmu pengetahuan bagi penulis;
7. staf dan karyawan Fakultas Teknik Universitas Katolik Parahyangan yang telah mendukung penulis selama proses perkuliahan;

8. teman-teman seperjuangan tesis yaitu Adrian, Benny, dan Fenita yang telah menjadi rekan seperjuangan, bertukar pikiran, dan informasi dalam penyusunan tesis ini; dan
9. berbagai pihak yang telah banyak membantu penulis, yang tidak dapat disebutkan satu per satu baik secara langsung maupun tidak.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna mengingat keterbatasan waktu dan kemampuan penulis. Penulis menerima saran dan kritik yang sifatnya membangun agar dapat memperbaikinya di masa yang akan datang.

Akhir kata penulis berharap tesis ini tidak hanya bermanfaat bagi penulis tetapi juga bagi mahasiswa lainnya dan dunia pendidikan, khususnya di bidang Teknik Sipil.

Bandung, 23 Juli 2019

Penulis,

Erwin Sanjaya

2017831033

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	
ABSTRACT	
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	vii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1-1
1.1 Latar Belakang	1-1
1.2 Inti Permasalahan	1-3
1.3 Tujuan Penelitian.....	1-3
1.4 Pembatasan Masalah	1-4
1.5 Metode Penelitian.....	1-7
1.6 Sistematika Penulisan.....	1-8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	2-1
2.1 Studi Numerik Perilaku Nonlinear Balok Hexagonal dan Octagonal.....	2-1
.....	2-1
2.2 Studi Pengaruh Penggunaan Pengaku Vertikal dan Diagonal pada Balok Kastela terhadap Kekuatan Geser	2-3
2.3 Studi Numerik Balok Kastela dengan Pembebanan Monotonik.....	2-6
2.4 Studi Optimisasi Dimensi Balok Baja Kastela.....	2-8
2.5 Prosedur Desain Balok Baja Kastela.....	2-10
2.6 Mekanisme Vierendeel pada Balok Non-Komposit.....	2-11
2.6.1 Perhitungan Gaya Aksial dan Momen Vierendeel	2-12
2.6.2 Perhitungan Kapasitas Aksial dan Lentur Penampang T.....	2-14
2.6.3 Interaksi Gaya Aksial dan Momen Vierendeel.....	2-20

2.7 Tekuk Web.....	2-21
2.8 Geser Horizontal dan Vertikal	2-25
2.8.1 Kapasitas Kuat Geser Horizontal	2-25
2.8.2 Kapasitas Kuat Geser Vertikal	2-26
2.9 Tekuk Torsi Lateral	2-27
2.10 Defleksi Balok Kastela	2-30
2.11 Metode Elemen Hingga	2-30
2.12 Analisis Linear dan Nonlinear	2-34
2.12.1 Nonlinearitas Geometri	2-37
2.12.2 Nonlinearitas Topologi	2-38
2.12.3 Nonlinearitas Material	2-38
2.13 Tegangan Von Mises	2-38
2.13.1 Tegangan Hidrostatik dan Tegangan Deviatorik	2-39
2.13.2 Kriteria Tegangan Von Mises	2-40
2.13.3 Energi Deviatorik pada Pengujian Tarik Uniaksial	2-41
2.13.4 Energi Deviatorik pada Kasus 3D.....	2-42
2.13.5 Tegangan Von Mises (Tegangan Ekuivalen).....	2-43
BAB 3 STUDI KASUS	3-1
3.1 Metode Analisis	3-1
3.2 Penamaan Model Balok Baja Kastela.....	3-2
3.3 Pemodelan Balok Kastela	3-3
3.3.1 Mendefinisikan Material Nonlinear	3-8
3.3.2 Memodelkan Geometri Balok Kastela	3-10
3.3.3 Menerapkan Material Nonlinear dan Diskretisasi.....	3-10
3.3.4 Menerapkan Syarat Batas dan Beban.....	3-13
3.3.5 Proses Analisis dan Memunculkan Hasil	3-15
BAB 4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN	4-1
4.1 Verifikasi Model Numerik.....	4-1
4.2 Hasil Analisis dan Perhitungan Balok Kastela Tanpa Pengaku Diagonal	4-1
4.2.1 Hasil Analisis Numerik	4-2

4.2.2 Hasil Perhitungan Berdasarkan <i>Steel Design Guide 31</i>	4-8
4.2.3 Perbandingan Analisis Numerik dengan <i>Steel Design Guide 31</i>	4-10
4.3 Hasil Analisis Numerik Balok Kastela Dengan Pengaku Diagonal	4-12
4.3.1 Balok Kastela CB45-1 – CB45-11 (Set 1).....	4-13
4.3.2 Balok Kastela CB45-12 – CB45-22 (Set 2).....	4-16
4.3.3 Balok Kastela CB45-23 – CB45-33 (Set 3).....	4-19
4.3.4 Balok Kastela CB60-1 – CB60-11 (Set 4).....	4-22
4.3.5 Balok Kastela CB60-12 – CB60-22 (Set 5).....	4-25
4.3.6 Balok Kastela CB60-23 – CB60-33 (Set 6).....	4-28
4.3.7 Rangkuman Hasil Analisis	4-31
4.3.8 Distribusi Tegangan Efektif (Von Mises).....	4-35
4.3.9 Penggunaan Pengaku Diagonal terhadap Lendutan Balok Kastela	4-41
BAB 5 PENUTUP	5-1
5.1 Simpulan.....	5-1
5.2 Saran.....	5-2
DAFTAR PUSTAKA	xxi
LAMPIRAN 1	L1-1
LAMPIRAN 2	L2-1

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A_g	= luas penampang bruto
$AISC$	= <i>American Institute of Steel Construction</i>
A_{net}	= luas total penampang T
ASD	= <i>Allowable Stress Design</i>
A_{tee}	= luas penampang T
A_w	= luas web utuh
b_f	= lebar flens balok
b_s	= lebar pengaku diagonal
C_b	= faktor modifikasi tekuk torsi lateral untuk momen tidak seragam
C_w	= konstanta pilin
d	= tinggi penampang T
d_{effec}	= jarak antara titik pusat penampang T atas dan bawah
d_g	= tinggi balok baja kastela
d_t	= tinggi penampang T
d_w	= tinggi web dari balok kastela
$\{D\}$	= vektor respon struktur
e	= jarak antar tepi lubang
e_1	= jarak tepi dari bukaan pertama ke ujung tumpuan
E	= modulus elastisitas baja
$\{F\}$	= vektor beban nodal
F_{cr}	= tegangan kritis
F_e	= tegangan kritis elastis
F_y	= tegangan leleh baja
G	= modulus geser
h	= setengah tinggi bukaan pada web
h_o	= tinggi bukaan pada web atau jarak antara titik pusat flens

I_{neto}	= momen inersia penampang neto
I_x	= momen inersia terhadap sumbu x
I_y	= momen inersia terhadap sumbu y
J	= konstanta torsi
k_x	= faktor panjang efektif untuk tekuk lentur pada sumbu x
k_y	= faktor panjang efektif untuk tekuk lentur pada sumbu y
k_z	= faktor panjang efektif untuk tekuk lentur terhadap sumbu longitudinal
$[K]$	= matriks kekakuan global struktur
K_{inst}	= kekakuan awal balok kastela tanpa pengaku diagonal (numerik)
K_{ist}	= kekakuan awal balok kastela dengan pengaku diagonal (numerik)
L	= panjang bentang
L_c	= panjang efektif
L_{cx}	= panjang efektif untuk tekuk terhadap sumbu x
L_{cy}	= panjang efektif untuk tekuk terhadap sumbu y
L_{cz}	= panjang efektif untuk tekuk terhadap sumbu longitudinal
L_p	= batasan panjang tak tertumpu lateral terhadap syarat batas kelelahan
L_r	= batasan panjang tak tertumpu lateral terhadap syarat batas tekuk inelastis
$LRFD$	= <i>Load Resistance Factor Design</i>
m	= meter
mm	= milimeter
MPa	= megapascal
M_A	= nilai absolut momen pada $\frac{1}{4}$ bentang segmen tak tertumpu lateral
M_B	= nilai absolut momen pada $\frac{1}{2}$ bentang segmen tak tertumpu lateral
M_c	= kapasitas kekuatan lentur
M_C	= nilai absolut momen pada $\frac{3}{4}$ bentang segmen tak tertumpu lateral
M_{cr}	= momen kritis penampang T
M_{max}	= nilai absolut maksimum momen pada segmen tak tertumpu lateral
M_n	= momen nominal penampang T

M_{ocr}	= momen kritis untuk tekuk lateral web
M_p	= momen plastis penampang
M_{rh}	= momen akibat V_{rh}
M_r	= momen akibat beban luar
M_y	= momen leleh terhadap sumbu lentur
p	= tegangan hidrostatik
P_c	= kapasitas kekuatan aksial
P_n	= gaya aksial nominal penampang T
P_r	= gaya aksial tekan akibat momen M_r
r	= nilai minimum dari r_x dan r_y penampang T
r_o^2	= radius girasi polar terhadap pusat geser
r_x	= radius girasi pada sumbu x penampang T
r_y	= radius girasi pada sumbu y penampang T
S	= jarak antar as bukaan
S_x	= modulus penampang terhadap sumbu x
S_{x-tee}	= statis momen penampang T terhadap sumbu x
S_{xc}	= statis momen penampang terhadap flens yang mengalami tekan
t_f	= tebal flens balok
t_s	= tebal pengaku diagonal
t_w	= tebal web balok
V_c	= kapasitas kuat geser horizontal
V_n	= kuat geser nominal
V_r	= gaya geser akibat beban luar
V_{rh}	= gaya geser horizontal di web
w	= densitas energi regangan total
w^d	= energi yang disebabkan oleh tegangan deviatorik
w^p	= energi yang disebabkan oleh tegangan hidrostatik
w^{yd}	= energi deviatorik ketika material leleh pada pengujian tarik uniaksial

w_I = beban maksimum balok *IWF* 300x100x5.5x8 berdasarkan *AISC*
 w_{AISC} = beban maksimum balok kastela tanpa pengaku diagonal (*AISC*)
 w_{maxst} = beban maksimum balok kastela tanpa pengaku diagonal (numerik)
 w_{maxst} = beban maksimum balok kastela dengan pengaku diagonal (numerik)
 $w_{numerik}$ = beban maksimum balok *IWF* 300x100x5.5x8 berdasarkan hasil numerik
 w_y = beban leleh balok kastela tanpa pengaku diagonal
 x_o = jarak dari pusat geser ke titik pusat pada sumbu x
 y_o = jarak dari pusat geser ke titik pusat pada sumbu y
 Z_x = modulus plastis penampang terhadap sumbu x
 Δ_u = peralihan ultimit (numerik)
 Δ_y = peralihan pada saat leleh pertama
 Δ_{AISC} = peralihan ultimit (*AISC*)
 $\Delta_{numerik}$ = peralihan berdasarkan hasil analisis numerik
 $\{\varepsilon\}$ = matriks regangan total
 $\{\varepsilon^p\}$ = matriks regangan hidrostatik
 ϕ = sudut bukaan
 ϕ_b = faktor ketahanan untuk lentur (*LRFD*)
 ϕ_c = faktor ketahanan untuk tekan (*LRFD*)
 ϕ_v = faktor ketahanan untuk geser (*LRFD*)
 λ = kelangsingan penampang
 λ_p = batas kelangsingan untuk penampang flens kompak
 λ_r = batas kelangsingan untuk penampang flens nonkompak
 μ_{nst} = daktilitas struktur balok kastela tanpa pengaku diagonal (numerik)
 μ_{st} = daktilitas struktur balok kastela dengan pengaku diagonal
 Ω_b = faktor keamanan untuk lentur (*ASD*)
 Ω_c = faktor keamanan untuk tekan (*ASD*)
 Ω_v = faktor keamanan untuk geser (*ASD*)

- $\{\sigma\}$ = matriks tegangan total
- $\{\sigma^d\}$ = matriks tegangan deviatorik
- $\{\sigma^p\}$ = matriks tegangan hidrostatik
- σ_e = tegangan Von Mises atau tegangan efektif atau tegangan ekuivalen
- θ = sudut bukaan
- ν = rasio Poisson

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Proses Manufaktur Balok Baja Kastela (<i>Steel Design Guide No.31, AISC 2016</i>).....	1-2
Gambar 1.2 (a) Dimensi Penampang <i>IWF</i> ; (b) Dimensi Penampang Balok Baja Kastela.....	1-4
Gambar 1.3 Model Balok Baja Kastela di Atas Tumpuan Sederhana.....	1-5
Gambar 1.4 Notasi Dimensi Bukaan dan Pengaku Diagonal.....	1-5
Gambar 1.5 Kurva Tegangan-Regangan Material <i>Elastic-Perfectly-Plastic</i>	1-6
Gambar 1.6 Diagram Alir.....	1-8
Gambar 2.1 Diskretisasi, Kondisi Batas, dan Pembebanan.....	2-2
Gambar 2.2 Efek Amplitudo Ketidaktepatan Geometri	2-2
Gambar 2.3 Perbandingan Kasus 1, Kasus 2, dan Kasus 3	2-5
Gambar 2.4 (a) Properti Penampang <i>IWF</i> ; (b) Properti Penampang Balok Kastela	2-7
Gambar 2.5 Kondisi Batas dan Pembebanan pada ABAQUS (Richard Frans, et al, 2017)	2-7
Gambar 2.6 a). Uji Eksperimental; Kurva Beban-Peralihan: b). Sudut Bukaan 60° dan Jarak antar tepi bukaan 6 cm; c). Sudut Bukaan 60° dan Jarak antar tepi bukaan 9 cm; d). Sudut Bukaan 70° dan Jarak antar tepi bukaan 9 cm (Richard Frans, et al, 2017).....	2-8
Gambar 2.7 Pembebanan Terpusat Sepertiga Bentang (Listiyono Budi, et al, 2017)	2-9
Gambar 2.8 Perbandingan Model Numerik dan Pengujian Eksperimental.....	2-9

Gambar 2.9 Terminologi Perhitungan Gaya Aksial (<i>Steel Design Guide No.31, AISC 2016</i>)	2-12
Gambar 2.10 Terminologi Perhitungan Momen Vierendeel	2-17
Gambar 2.11 Terminologi Perhitungan Tekuk Web (<i>Steel Design Guide No.31, AISC 2016</i>)	2-22
Gambar 2.12 Terminologi Perhitungan Tekuk Web (<i>Steel Design Guide No.31, AISC 2016</i>)	2-22
Gambar 2.13 Faktor Ketahanan (<i>Steel Design Guide No.31, AISC 2016</i>)	2-24
Gambar 2.14 Geometri <i>SHELL281</i> (<i>ANSYS Documentation</i>)	2-33
Gambar 2.15 Simulasi Linear dan Nonlinear (Huei-Huang Lee, 2014)	2-35
Gambar 2.16 Kurva Tegangan Regangan Material Linear dan Nonlinear	2-36
Gambar 3.1 Model Balok Baja Kastela Tanpa Pengaku Diagonal	3-7
Gambar 3.2 Model Balok Baja Kastela Dengan Pengaku Diagonal.....	3-8
Gambar 3.3 Tampilan Awal dengan Kerangka Modul <i>Static Structural</i>	3-9
Gambar 3.4 Mendefinisikan Material Baja Nonlinear.....	3-9
Gambar 3.5 Pemodelan Geometri Balok Kastela Tanpa Pengaku Diagonal (CB45-1).....	3-11
Gambar 3.6 Pemodelan Geometri Balok Kastela Dengan Pengaku Diagonal (CB45-2).....	3-11
Gambar 3.7 Penerapan Material Nonlinear	3-12
Gambar 3.8 Preferensi dan Ukuran Diskretisasi	3-12
Gambar 3.9 Hasil Diskretisasi Balok Balok Baja Kastela Tanpa Pengaku Diagonal	3-13

Gambar 3.10 Hasil Diskretisasi Balok Balok Baja Kastela Dengan Pengaku Diagonal	3-14
Gambar 3.11 Syarat Batas dan Pembebanan Balok Kastela	3-15
Gambar 3.12 Pengaktifan Beban Inkremental dan <i>Large Deflection</i>	3-17
Gambar 3.13 Contoh Hasil Analisis CB45-1 ($w_{cr} = 50.4281$ kN/m).....	3-18
Gambar 3.14 Contoh Rekaman Peralihan Setiap <i>Step</i> CB45-1	3-18
Gambar 4.1 Grafik Beban-Peralihan Balok Kastela Tanpa Pengaku Diagonal .	4-3
Gambar 4.2 Distribusi Tegangan Von Mises Model CB45-1 ($w = 50.4281$ kN/m)	4-7
Gambar 4.3 Distribusi Tegangan Von Mises Model CB45-3 ($w = 46.0810$ kN/m)	4-8
Gambar 4.4 Tegangan Normal Arah Z Model CB45-1	4-11
Gambar 4.5 Grafik Beban-Peralihan CB45-1 – CB45-11	4-14
Gambar 4.6 Grafik Beban-Peralihan CB45-12 – CB45-22	4-17
Gambar 4.7 Grafik Beban-Peralihan CB45-23 – CB45-33	4-20
Gambar 4.8 Grafik Beban-Peralihan CB60-1 – CB60-11	4-23
Gambar 4.9 Grafik Beban-Peralihan CB60-12 – CB60-22	4-26
Gambar 4.10 Grafik Beban-Peralihan CB60-23 – CB60-33	4-29
Gambar 4.11 Peningkatan Kekakuan Awal Struktur Akibat Perubahan Lebar Pengaku Diagonal dengan Tebal Pengaku Diagonal Tetap	4-33
Gambar 4.12 Distribusi Tegangan Von Mises Model CB45-11 ($w = 66.7190$ kN/m)	4-40

Gambar 4.13 Distribusi Tegangan Von Mises Model CB45-33 ($w = 66.8560$
kN/m).....4-41

Gambar 4.14 Penurunan Lendutan Struktur Akibat Perubahan Lebar Pengaku
Diagonal dengan Tebal Pengaku Diagonal Tetap4-43

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesimen I (Balok Kastela 225) (B. Anupriya dan K. Jagadeesan, 2014)	2-4
Tabel 2.2 Spesimen II (Balok Kastela 300) (B. Anupriya dan K. Jagadeesan, 2014)	2-4
Tabel 2.3 Properti Penampang (Richard Frans, et al, 2017)	2-6
Tabel 3.1 Dimensi Bukaan Model Balok Baja Kastela (<i>Castellated Beam</i>) Tanpa Pengaku Diagonal	3-3
Tabel 3.2 Penamaan Model Berdasarkan Dimensi Bukaan dan Pengaku Diagonal.	3-4
Tabel 3.3 Penamaan Model Berdasarkan Dimensi Bukaan dan Pengaku Diagonal (Lanjutan).....	3-5
Tabel 4.1 Hasil Analisis Balok Kastela Tanpa Pengaku Diagonal	4-2
Tabel 4.2 Titik Leleh Balok Tanpa Pengaku Diagonal.....	4-5
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Berdasarkan <i>Steel Design Guide 31</i>	4-9
Tabel 4.4 Perbandingan Lendutan Balok Kastela Berdasarkan <i>AISC</i> dengan Analisis Numerik	4-13
Tabel 4.5 Perubahan K_{ist} , w_{maxst} , dan μ_{st} pada CB45-1 dengan Adanya Pengaku Diagonal	4-15
Tabel 4.6 Perubahan K_{ist} , w_{maxst} , dan μ_{st} pada CB45-12 dengan Adanya Pengaku Diagonal	4-18
Tabel 4.7 Perubahan K_{ist} , w_{maxst} , dan μ_{st} pada CB45-23 dengan Adanya Pengaku Diagonal	4-21

Tabel 4.8 Perubahan K_{ist} , w_{maxst} , dan μ_{st} pada CB60-1 dengan Adanya Pengaku Diagonal	4-24
Tabel 4.9 Perubahan K_{ist} , w_{maxst} , dan μ_{st} pada CB60-12 dengan Adanya Pengaku Diagonal	4-27
Tabel 4.10 Perubahan K_{ist} , w_{maxst} , dan μ_{st} pada CB60-23 dengan Adanya Pengaku Diagonal	4-30
Tabel 4.11 Tabel Variasi untuk Mempelajari Kecenderungan K_{ist} , w_{maxst} , dan μ	4-32
Tabel 4.12 Rangkuman Analisis Balok Kastela dengan Pengaku Diagonal	4-34
Tabel 4.13 Pengaruh Perubahan Dimensi Pengaku Diagonal Terhadap Lendutan Balok Kastela.....	4-42

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Verifikasi Model Numerik	L1-1
Lampiran 2 Perhitungan Balok Kastela Tanpa Pengaku Diagonal Berdasarkan <i>Steel Design Guide 31</i>	L2-1

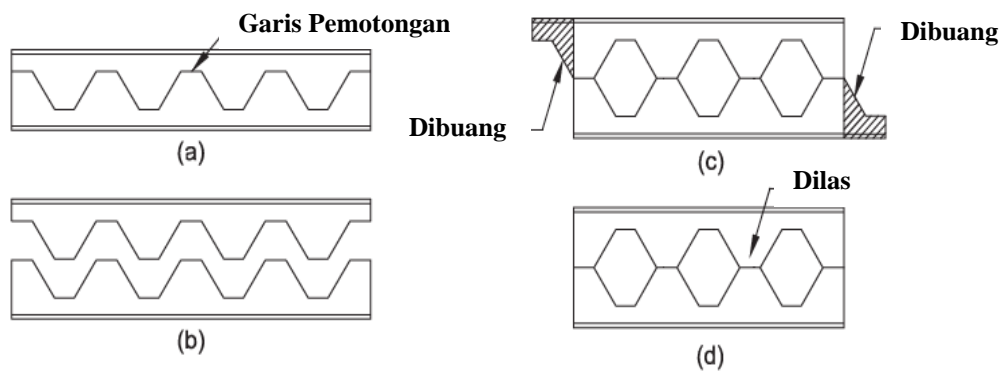
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Balok baja kastela adalah profil baja yang dimodifikasi dari profil I yang dipotong dengan pola zig-zag disepanjang *web* penampang. Kemudian setengah bagian atas diberikan pergeseran sehingga membentuk bukaan yang dikehendaki dan disambung kembali dengan menggunakan las (Gambar 1.1). Adapun beberapa bentuk bukaan yang umum dimodifikasi, yaitu heksagonal, lingkaran, *diamond*, bahkan sinusoidal. Di Indonesia, balok baja kastela yang populer adalah bentuk heksagonal karena fabrikasinya mudah.

Umumnya, profil baja mampu memenuhi syarat kekuatan (*strength*) tapi tidak untuk syarat layan (*serviceability*). Penggunaan balok baja kastela adalah solusi yang baik untuk menghadapi permasalahan batasan defleksi izin. Penambahan tinggi balok dengan memanfaatkan modifikasi tersebut dapat meningkatkan efisiensi struktur karena meningkatkan rasio kedalaman terhadap berat, modulus penampang (S_x), dan momen inersia penampang terhadap sumbu kuat (I_x). Peningkatan sifat penampang tersebut memungkinkan untuk menciptakan efisiensi dan menekan biaya konstruksi secara signifikan pada konstruksi bentang panjang. Selain memiliki banyak manfaat untuk elemen struktural, balok baja kastela juga fleksibel dalam melewati pipa dan kabel untuk keperluan mekanikal, elektrikal, dan pemipaan.



Gambar 1.1 Proses Manufaktur Balok Baja Kastela (*Steel Design Guide No.31, AISC 2016*)

Meskipun memiliki banyak manfaat, balok baja kastela memerlukan analisis yang lebih kompleks. Dengan adanya bukaan pada bagian badan, maka terjadi perubahan yang signifikan terhadap ketahanan geser dan tekuk pada balok. Selain itu, memungkinkan balok mengalami kegagalan yang berbeda dibandingkan dengan balok solid (Kerdal dan Nethercot, 1984). Hasil eksperimental menunjukkan ragam kegagalan balok baja kastela disebabkan oleh kelangsingan balok yang menyangkut dimensi penampang modifikasi, parameter bukaan meliputi sudut bukaan, jarak antar tepi bukaan, dan tinggi bukaan, serta jenis pembebanan yang diterapkan. Pada kondisi lentur murni, geser, dan tekuk torsi lateral, ragam tersebut dapat diasumsikan sama dengan balok solid apabila properti struktur balok kastela diperoleh dari penampang reduksi (Soltani et al, 2012).

Beberapa penelitian mengenai optimasi dengan variasi geometri bukaan telah dilakukan. Metode elemen hingga menghasilkan beban leleh maksimum yang terjadi pada jarak antar tepi bukaan 60 mm dan sudut bukaan 60° (Richard Frans et al, 2017). Penelitian lain menunjukkan bahwa balok kastela pada sudut bukaan 60° dengan jarak antar tepi bukaan pada rentang 0,186-0,266 dari tinggi bukaan

menghasilkan kekuatan optimum (Listiyono Budi et al, 2017). Selain itu, balok kastela pada jarak antar tepi bukaan 90 mm dan sudut bukaan 60° menghasilkan kekuatan lentur optimum (Desi Sandy et al, 2014).

AISC pada *Steel Design Guide 31* (2016) menyatakan kekuatan geser menjadi kritis pada web dengan bukaan. Untuk mengatasi hal tersebut, pengaku diagonal digunakan pada bukaan (B. Anupriya dan K. Jagadeesan, 2014). Penggunaan pengaku diagonal pada balok kastela dengan jumlah dan dimensi yang optimum pada posisi yang tepat dapat meningkatkan kekuatan geser hingga mencapai kekuatan balok solid (Gopika S.N. dan P.R. Sreemahadevan Pillai, 2018). Selain itu, penggunaan pengaku diagonal juga mengurangi defleksi balok kastela (K. Girija et al, 2018). Oleh sebab itu, perlu dilakukan kajian mengenai “Optimasi Parameter Bukaan dan Pengaku Diagonal pada Balok Baja Kastela yang Tertumpu Lateral”.

1.2 Inti Permasalahan

Penggunaan pengaku diagonal mampu meningkatkan kapasitas geser balok kastela. Dengan menjadikan parameter bukaan dan dimensi pengaku diagonal sebagai variabel, maka didapatkan perilaku setiap model hingga mengalami kegagalan untuk mendapatkan dimensi bukaan dan pengaku diagonal yang optimum.

1.3 Tujuan Penelitian

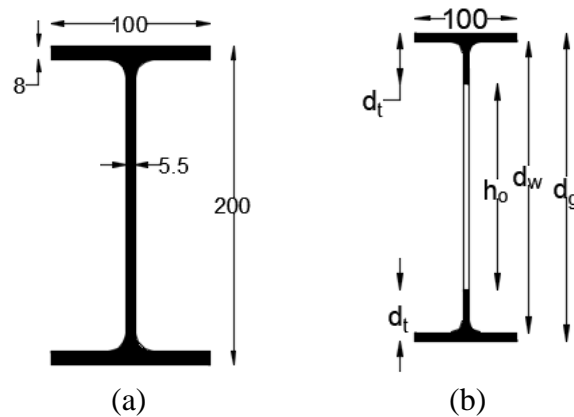
Tujuan penulisan tesis adalah sebagai berikut.

1. Membandingkan hasil analisis numerik dengan petunjuk desain balok kastela tanpa pengaku diagonal yang terdapat pada *Steel Design Guide 31, Castellated and Cellular Beam Design* yang disediakan oleh *AISC 2016*.
2. Mempelajari perilaku nonlinear yang meliputi beban kritis dan distribusi tegangan Von Mises balok baja kastela dengan dan tanpa pengaku diagonal dengan pembebanan terbagi rata di atas tumpuan sederhana untuk mendapatkan dimensi bukaan dan pengaku diagonal yang optimum.

1.4 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada tesis akan dibatasi pada:

1. balok baja kastela yang digunakan adalah 300x100x5.5x8 yang dimodifikasi dari profil *IWF* 200x100x5.5x8 (Gambar 1.2) dan dimensi penampang baja kastela diberikan pada Tabel 1.1;

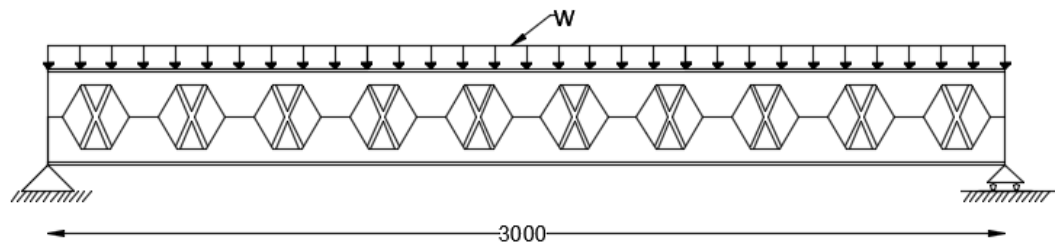


Gambar 1.2 (a) Dimensi Penampang *IWF*; (b) Dimensi Penampang Balok Baja Kastela

Tabel 1.1 Dimensi Penampang Balok Baja Kastela

Dimensi Penampang (mm)	
d_g	300
h_o	205
d_t	47.5

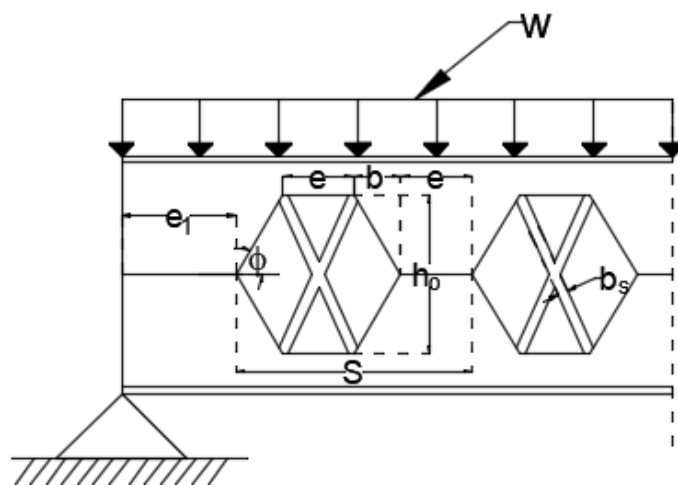
2. panjang balok 3 m dianalisis di atas tumpuan sederhana dengan pembebanan terbagi rata yang bekerja di flens atas (Gambar 1.3);



Gambar 1.3 Model Balok Baja Kastela di Atas Tumpuan Sederhana dengan Pembebanan Terbagi rata

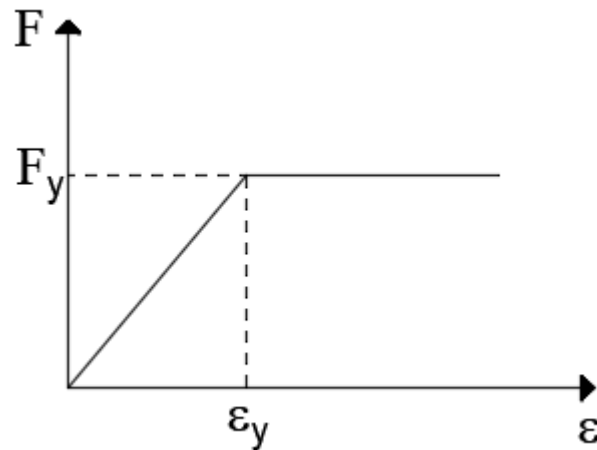
3. variabel yang digunakan pada analisis ini adalah:
- dimensi bukaan yang meliputi 2 jenis sudut bukaan (ϕ) yaitu 45° dan 60° dan 3 jenis jarak antar tepi bukaan (e) yaitu 60 mm, 90 mm, dan 120 mm;
 - dimensi pengaku diagonal dengan 5 jenis lebar (b_s) yaitu 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, dan 30 mm serta 2 jenis tebal (t_s) yaitu 5.5 mm dan 8 mm;

Variabel ϕ , e , b_s , dan t_s dapat dilihat pada Gambar 1.4.



Gambar 1.4 Notasi Dimensi Bukaan dan Pengaku Diagonal

4. pengaku diagonal dipasang pada semua bukaan (Gambar 1.3);
5. material baja dimodelkan dengan tegangan leleh 250 MPa dengan modulus elastisitas 200 GPa dan rasio Poisson 0.3;
6. kurva tegangan-regangan yang digunakan adalah *elastic-perfectly-plastic* (Gambar 1.5);



Gambar 1.5 Kurva Tegangan-Regangan Material *Elastic-Perfectly-Plastic*

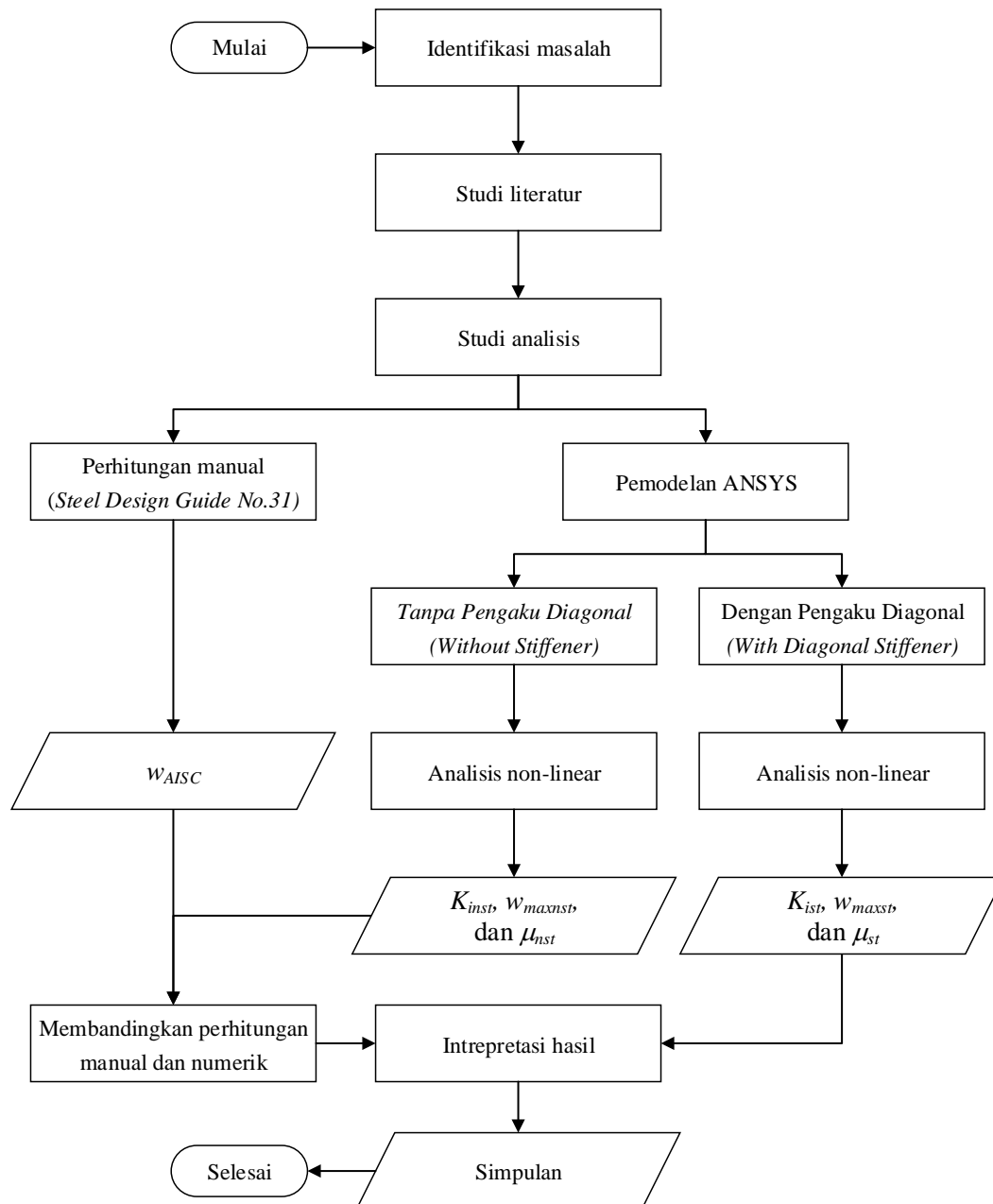
7. kriteria kegagalan menggunakan Von-Mises;
8. seluruh bagian balok baja kastela dianggap *perfectly bonded* sehingga las tidak dimodelkan;
9. berat sendiri balok diabaikan;
10. tegangan sisa tidak diperhitungkan;
11. permasalahan stabilitas (tekuk torsi lateral dan tekuk web) tidak ditinjau;
12. optimum pada penelitian ini meliputi kekakuan awal, kekuatan, dan daktilitas struktur yang terbesar; dan
13. model dianalisis menggunakan program ANSYS versi 19 berlisensi Universitas Katolik Parahyangan.

1.5 Metode Penelitian

Konsentrasi tegangan pada sudut bukaan mempengaruhi perilaku nonlinear balok kastela. Penggunaan pengaku diagonal pada bukaan dapat meningkatkan kekuatan geser pada balok kastela (Anupriya dan K. Jagadeesan, 2014). Berdasarkan hasil penelitian tersebut maka dilakukan studi optimisasi parameter bukaan dan pengaku diagonal untuk mendapatkan balok kastela yang optimum. Optimum pada penelitian ini meliputi kekakuan awal, kekuatan, dan daktilitas struktur yang terbesar.

Sebelumnya dilakukan perhitungan manual pada 6 model tanpa pengaku diagonal berdasarkan *Steel Design Guide 31, Castellated and Cellular Beam Design* yang disediakan oleh *AISC 2016*. Hasil perhitungan tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil analisis numerik. Proses membandingkan hasil perhitungan manual dengan analisis numerik dilakukan untuk mempelajari perbedaan dan asumsi yang diterapkan pada *AISC 2016*. Pemodelan numerik pada balok kastela tanpa dan dengan pengaku diagonal dilakukan dengan bantuan piranti lunak ANSYS *Workbench*.

Setelah melakukan analisis pada semua variabel, maka dapat disimpulkan pengaruh penggunaan pengaku diagonal terhadap perilaku nonlinear dan dimensi bukaan serta pengaku diagonal yang optimum baik dari sisi kekakuan, kekuatan, dan daktilitas struktur balok baja kastela. Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.6.



Gambar 1.6 Diagram Alir

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis yang digunakan adalah sebagai berikut.

Bab 1 Pendahuluan mencakup latar belakang, inti permasalahan, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 Tinjauan Pustaka mencakup dstudi terdahulu terkait penelitian pada tesis, prosedur desain balok baja kastela, mekanisme Vierendeel, tekuk web, geser horizontal dan vertikal, tekuk torsi lateral, defleksi balok kastela, metode elemen hingga, analisis linear dan nonlinear, dan kriteria kelelahan Von Mises.

Bab 3 Studi Kasus mencakup metode analisis, penamaan model balok kastela, dan pemodelan balok kastela dengan perangkat lunak ANSYS *Workbench*.

Bab 4 Analisis dan Pembahasan mencakup verifikasi model numerik dan hasil analisis dan perhitungan balok kastela tanpa dan dengan pengaku diagonal.

Bab 5 Penutup berisi simpulan dan saran dari hasil analisis untuk penelitian berikutnya.