

TESIS

**ANALISIS NONLINIER TEKUK TORSI
LATERAL PADA BALOK BAJA CELLULAR**



Oleh :

Benny Gunawan Hung

NPM : 2017831034

Pembimbing:

Prof. Bambang Suryoatmono. Ph.D

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JULI 2019**

TESIS

**ANALISIS NONLINIER TEKUK TORSI
LATERAL PADA BALOK BAJA *CELLULAR***



BENNY GUNAWAN HUNG

NPM : 2017831034

PEMBIMBING: Prof. Bambang Suryoatmono. Ph.D

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL**

(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 227/SK/BAN-PT/Ak-XVI/S/XI/2013)

BANDUNG

JULI 2019

TESIS
ANALISIS NONLINIER TEKUK TORSI
LATERAL PADA BALOK BAJA *CELLULAR*



BENNY GUNAWAN HUNG

NPM : 2017831034

BANDUNG, 2 JULI 2019

PEMBIMBING:

Prof. Bambang Suryoatmono. Ph.D

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN

FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 227/SK/BAN-PT/Ak-XVI/S/XI/2013)

BANDUNG

JULI 2019

**ANALISIS NONLINIER TEKUK TORSI
LATERAL PADA BALOK BAJA CELLULAR**



Benny Gunawan Hung

2017831034

**PERSETUJUAN SIDANG TESIS
BANDUNG, 27 AGUSTUS 2019**

PEMBIMBING:

Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D.

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT Nomor: 227/SK/BAN-PT/Ak-XVI/S/XI/2013)
BANDUNG
2019**

PERNYATAAN

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

Nama Lengkap : Benny Gunawan Hung
NPM : 2017831034
Program Studi : Teknik Struktur
Sekolah Pascasarjana
Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa Tesis dengan judul:

ANALISIS NONLINIER TEKUK TORSI LATERAL PADA BALOK BAJA
CELLULAR

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 : 2 September 2019



BENNY GUNAWAN HUNG

ANALISIS NONLINIER TEKUK TORSI LATERAL PADA BALOK BAJA *CELLULAR*

Benny Gunawan Hung (NPM: 2017831034)
Pembimbing: Prof. Bambang Suryoatmono. Ph.D
Magister Teknik
Bandung
JULI 2018

ABSTRAK

Salah satu ragam tekuk yang terjadi pada balok adalah tekuk torsi lateral. Tekuk torsi lateral pada balok mengakibatkan terjadinya peralihan penampang secara lateral disertai torsi pada penampang. Pada spesifikasi desain AISC 360-16, disediakan persamaan untuk menghitung momen kritis tekuk torsi lateral pada balok berpenampang I prismatis. Untuk balok *cellular* (balok berpenampang I dengan bukaan berbentuk lingkaran), AISC Design Guide 31 menyatakan bahwa momen kritis tekuk torsi lateral harus dihitung sesuai dengan persamaan spesifikasi desain AISC 360-16, yaitu dengan asumsi data penampang I prismatis. Dengan asumsi demikian, berarti AISC Design Guide 31 mengabaikan adanya bukaan pada bagian web yang dapat menyebabkan berkurangnya momen kritis tekuk torsi lateral. Pada studi ini, dilakukan analisis tekuk torsi lateral balok *cellular* di atas tumpuan sederhana yang mengalami beban terbagi rata dengan berbagai panjang bentang dan ukuran penampang. Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak berbasis elemen hingga. Dari analisis tersebut, diperoleh momen kritis yang lebih rendah dibandingkan dengan momen kritis yang dihitung dengan AISC 360-16 dengan asumsi balok berpenampang I prismatis, dengan persentase perbedaan maksimum 43,58%. Berdasarkan studi ini, diperoleh faktor koreksi yang dapat digunakan untuk mengestimasi momen kritis balok *cellular* menggunakan persamaan yang terdapat pada spesifikasi desain AISC 360-16.

Kata Kunci: Analisis Tekuk, Balok *Celullar*, Momen Kritis, Tekuk Torsi Lateral

NONLINIER LATERAL TORSIONAL BUCKLING ANALYSIS OF CELLULAR BEAMS

Benny Gunawan Hung (NPM: 2017831034)
Adviser : Prof. Bambang Suryatmono. Ph.D
Master of Engineering
Bandung
JULI 2018

ABSTRACT

One of many buckling mode that could occur on beam is lateral torsional buckling. Lateral torsional buckling could result lateral deformation and torsion of section. In the AISC 360-16 Specification, an equation is provided to calculate lateral torsional buckling critical moment of prismatic I section beam. For cellular beams (I section beam with circular openings), AISC Design Guide 31 states that the lateral torsional buckling critical moment should be checked in accordance with AISC Specification using gross section properties. With this assumption, thus the design guide ignore the existence of circular opening on the web which can cause reduction of lateral torsional buckling critical moment. In this study, lateral torsional buckling analysis on cellular beam with simple support loaded by distributed transversal load have been done. The analysis utilized finite element based software. From the analysis, the critical moment is lower than AISC 360-16 critical moment with assumption of prismatic I section beam, with maximum difference percentage of 43,58%. Based on this study, a correction factor has been obtained to estimate the critical moment of cellular beams by using equation on AISC 360-16.

Keywords: Buckling Analysis, Cellular Beam, Critical Moment, Lateral Torsional Buckling

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan perlindungan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “Analisis Nonlinier Tekuk Torsi Lateral Pada Balok Baja Cellular”. Tesis ini disusun dengan tujuan sebagai salah satu syarat kelulusan dalam menyelesaikan studi program pascasarjana Program Studi Magister Teknik konsentrasi bidang Teknik Struktur, Universitas Katolik Parahyangan Bandung.

Selama menjalani proses penulisan tesis, terdapat kendala maupun hambatan baik secara langsung maupun tidak langsung yang dirasakan oleh penulis. Namun berkat kritik, saran serta dukungan dari berbagai pihak, maka penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sebanyak-banyaknya kepada:

1. Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Tesis yang telah membimbing dan memberi masukan kepada penulis dari awal hingga akhir waktu penyusunan tesis.
2. Dr. Paulus Karta Wijaya selaku dosen penguji yang telah memberi kritik dan masukan kepada penulis.
3. Seluruh Dosen Program Studi Magister Teknik konsentrasi bidang Teknik Struktur yang telah memberikan pendidikan dan pengetahuan dalam bidang teknik struktur serta dedikasi mengajar selama masa perkuliahan.
4. Kedua orang tua dan kedua adik penulis yang selalu mendukung, mendoakan dan memberikan banyak motivasi bagi penulis selama masa penulisan tesis.
5. Angel, Beauti, Shienny, Liesly dan Ferra yang telah memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
6. Adrian, Erwin dan Fenita sebagai teman seperjuangan kuliah yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis.
7. Teman-teman EPIC Studio yang telah memberikan doa, dukungan dan bantuan kepada penulis dari awal hingga penulisan tesis ini selesai.
8. Berbagai pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan proses penulisan tesis baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna, sehingga penulis menerima saran maupun kritik yang membangun. Penulis berharap tesis ini dapat berguna sebagai referensi bagi mahasiswa ataupun pihak lain untuk keperluan akademis dan penelitian.

Bandung, Januari 2019

Benny Gunawan Hung

2017831034

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Inti Permasalahan	2
1.3 Tujuan Penulisan	2
1.4 Pembatasan Masalah	2
1.5 Metode Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 STUDI PUSTAKA	7
2.1 Balok Cellular	7
2.2 Momen Lentur dan Momen Plastis	8
2.3 Stabilitas	9
2.4 Stabilitas Balok dengan Bukaan pada Web	9
2.5 Ragam Kegagalan pada Balok dengan Bukaan pada Web	10
2.5.1 Mekanisme Kegagalan Vierendeel	10
2.5.2 Tekuk Pos Web	11
2.5.3 Geser Vertikal dan Horizontal	11
2.5.4 Tekuk Torsi Lateral pada Balok Kastela	12
2.6 Analisis Linier dan Nonlinier	12
2.7 Tekuk Torsi Lateral	13
2.7.1 Torsi	15

2.7.2 Tekuk Lateral Akibat Beban Momen.....	18
2.7.3 Persamaan Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral.....	20
2.7.4 Tekuk Torsi Lateral pada Balok Kastela	29
2.7.5 Tekuk Torsi Lateral pada Balok <i>Cellular</i>	30
2.8 Metode Elemen Hingga (Cook 2002)	33
BAB 3 PEMODELAN.....	37
3.1 Geometri Struktur.....	37
3.2 Elemen Diskret.....	40
3.3 Analisis Tekuk Linier.....	40
3.4 Analisis Tekuk Nonlinier.....	41
BAB 4 STUDI KASUS.....	43
4.1 Verifikasi ANSYS terhadap AISC.....	43
4.2 Analisis Tekuk Linier.....	44
4.3 Peralihan Lateral Struktur Analisis Tekuk Nonlinier.....	47
4.4 Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral Analisis Tekuk Nonlinier	51
4.5 Persamaan Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral Balok Cellular	59
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	62
5.1 Kesimpulan	62
5.2 Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA	63

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

β	=	putaran sudut terhadap sumbu memanjang balok
C_b	=	faktor koreksi momen tak seragam
C_w	=	konstanta pilin
D	=	respon struktur
Δ_β	=	perpindahan serat bawah balok
Δ_τ	=	perpindahan serat atas balok
E	=	modulus elastisitas
F	=	beban
F_{cr}	=	tegangan kritis
G	=	modulus geser
h	=	tinggi penampang balok
h_o	=	jarak antara garis tengah flens
I_y	=	momen inersia terhadap sumbu y
J	=	konstanta torsi
K	=	kekakuan struktur
L_b	=	panjang balok tak tertumpu lateral
M	=	momen lentur
M_1	=	momen lentur mutlak pada seperempat panjang balok
M_2	=	momen lentur mutlak pada tengah bentang balok
M_3	=	momen lentur mutlak pada tiga per empat panjang balok
M_{cr}	=	momen kritis balok
M_f	=	momen lentur flens

M_{max}	=	momen lentur maksimum mutlak pada balok
M_n	=	momen kritis tekuk torsi lateral aisc 360-10
M_p	=	momen plastis
M_x	=	momen lentur terhadap sumbu x
M_y	=	momen lentur terhadap sumbu y
S_x	=	modulus penampang dalam arah sumbu x
σ_y	=	tegangan leleh
T	=	torsi
T_{sv}	=	torsi st. venant
T_w	=	torsi pilin
u_b	=	peralihan serat bawah balok
U_{sv}	=	energi regangan akibat torsi st. venant
u_t	=	peralihan serat atas balok
U_w	=	energi regangan akibat torsi pilin
V	=	energi potensial
V_f	=	gaya geser flens
Ψ	=	sudut dalam arah tegak lurus balok
Z_x	=	modulus penampang elastis

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Ilustrasi Pemodelan Struktur Balok <i>Cellular</i>	3
Gambar 1.2 Kurva Tegangan-Regangan Material <i>Elastic – Perfectly Plastic</i>	3
Gambar 1.3 Diagram Alir Metode Penelitian.....	4
Gambar 2.1 Proses Pabrikasi Balok <i>Cellular</i> (Krzysztof KUCHTA, 2016).....	7
Gambar 2.2 Diagram Tegangan Akibat Momen Lentur Pada Balok.....	9
Gambar 2.3 Gaya yang bekerja pada balok dengan bukaan (<i>AISC Design Guide</i> nomor 31, 2016)	11
Gambar 2.4 Kurva Gaya – Peralihan Analisis Linier (Huei-Huang Lee, 2014)..	13
Gambar 2.5 Kurva Gaya – Peralihan Analisis Nonlinier (Huei-Huang Lee, 2014)	13
Gambar 2.6 Tekuk torsi lateral pada struktur balok tumpuan sederhana dengan beban momen seragam (Chajes, 1974)	14
Gambar 2.7 Puntir pada penampang lingkaran (Chajes, 1974)	15
Gambar 2.8 Puntir penampang yang ditahan terhadap pilin (Chajes, 1974).....	16
Gambar 2.9 Tekuk torsi lateral pada balok akibat beban momen (Chajes, 1974)	18
Gambar 2.10 Komponen momen M_x pada sumbu x' , y' , dan z' (Chajes, 1974)..	19
Gambar 2.11 Rotasi yang terjadi pada tekuk torsi lateral (Chajes, 1974).....	23
Gambar 2.12 Peralihan lateral penampang akibat puntir (Chajes, 1974).....	24
Gambar 2.13 Distribusi Tegangan Sisa pada Profil IWF (Galambos, 2008)	30
Gambar 2.14 Elemen <i>SHELL281</i> pada perangkat lunak <i>ANSYS</i>	35
Gambar 3.1 Sketsa Geometri Struktur Balok <i>Cellular</i>	37
Gambar 3.2 Pemodelan Struktur Balok <i>Cellular</i>	39
Gambar 3.3 Diskretisasi pada struktur	40
Gambar 4.1 Ragam Tekuk Torsi Lateral Struktur Balok WF 225x75x6,5x9	43
Gambar 4.2 Ragam Tekuk Torsi Lateral Analisis Tekuk Linier	45
Gambar 4.3 Ragam Tekuk Dengan Tekuk Web di Bagian Ujung Bentang.....	47
Gambar 4.4 Hubungan Resultan Beban dan Peralihan Lateral untuk Profil CF 225x75x5x7	48
Gambar 4.5 Hubungan Resultan Beban dan Peralihan Lateral untuk Profil CF 375x125x6x9	48

Gambar 4.6 Hubungan Resultan Beban dan Peralihan Lateral untuk Profil CF 525x175x7x11	49
Gambar 4.7 Hubungan Resultan Beban dan Peralihan Lateral untuk Profil CF 600x200x8x13	49
Gambar 4.8 Perbandingan Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral dengan Momen Plastis Penampang CF 225x75x5x7	52
Gambar 4.9 Perbandingan Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral dengan Momen Plastis Penampang CF 375x125x6x9.....	52
Gambar 4.10 Perbandingan Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral dengan Momen Plastis Penampang CF 525x175x7x11.....	53
Gambar 4.11 Perbandingan Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral dengan Momen Plastis Penampang CF 600x200x8x13.....	53
Gambar 4.12 Plot Perbandingan Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral Dengan Momen Plastis Terhadap L_b/r_{ts}	55
Gambar 4.13 Plot Rasio Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral Terhadap L_b/r_{ts}	56
Gambar 4.14 Faktor Koreksi Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral Balok <i>Celullar</i>	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Dimensi Penampang Standar Eropa	31
Tabel 3.1 Variasi Ukuran Penampang dan Panjang Bentang	38
Tabel 4.1 Perbandingan Momen Kritis AISC dan Metode Elemen Hingga	44
Tabel 4.2 Momen Kritis MEH dan AISC Tekuk Linier Balok <i>Cellular</i>	46
Tabel 4.3 Hubungan Resultan Beban dengan Peralihan Lateral Maksimum Analisis Tekuk Nonlinier.....	50
Tabel 4.4 Perbandingan Antara Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral dengan Momen Plastis	54
Tabel 4.5 Momen Kritis Tekuk Torsi Lateral Nonlinier Metode Elemen Hingga dan Persamaan AISC	58
Tabel 4.6 Hubungan antara Variabel Kelangsingan dan Variabel Penampang dengan Rasio Momen Kritis.....	60

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan material baja pada bidang konstruksi sering diminati karena material baja memiliki rasio antara kekuatan dan volume yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan material lainnya. Selain itu komponen struktur dengan material baja memiliki keunggulan dalam hal modifikasi geometri sesuai dengan kebutuhan perancangan, salah satu modifikasi geometri pada balok baja adalah balok baja kastela. Balok baja kastela dan *cellular* sering diminati dalam bidang konstruksi karena memiliki momen inersia sumbu kuat dan menghasilkan struktur yang lebih ringan dibandingkan balok berpenampang I prismatis.

Salah satu kriteria dalam desain sebuah struktur adalah permasalahan tekuk. Fenomena tekuk mengakibatkan struktur dapat runtuh sebelum mencapai leleh. Tekuk pada komponen struktur dapat dibagi menjadi tekuk lokal dan tekuk global. Salah satu jenis tekuk global yang dapat terjadi pada balok berpenampang I adalah tekuk torsi lateral. Tekuk torsi lateral adalah peralihan penampang secara lateral disertai dengan torsi penampang yang diakibatkan oleh momen lentur.

Kekuatan balok berpenampang I prismatis terhadap tekuk torsi lateral sangat dipengaruhi oleh kekakuan lentur, kekakuan torsi St. Venant dan kekakuan torsi pilin penampang. Pada balok *cellular*, ketiga komponen kekakuan tersebut lebih kecil dibandingkan dengan balok berpenampang I prismatis dengan ukuran

yang sama. Dengan demikian, momen kritis tekuk torsi lateral balok *cellular* lebih kecil dari pada balok prismatis dengan ukuran yang sama.

1.2 Inti Permasalahan

Persamaan untuk menghitung momen kritis tekuk torsi lateral pada *AISC Specification* 360-16 dapat digunakan pada balok berpenampang prismatis. Persamaan tersebut juga digunakan sebagai acuan desain untuk balok *cellular*. Diperlukan suatu faktor koreksi untuk menghitung momen kritis balok *cellular* terhadap tekuk torsi lateral spesifikasi *AISC* 360-16.

1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan tesis ini adalah :

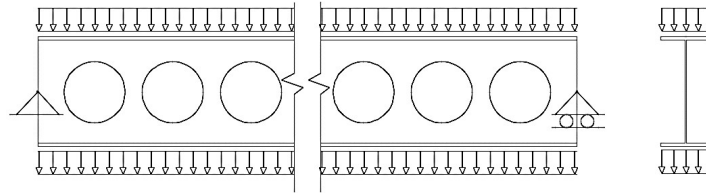
1. Mempelajari pengaruh bukaan lingkaran pada balok berpenampang I terhadap momen kritis tekuk torsi lateral
2. Memperoleh suatu faktor koreksi yang dapat digunakan untuk mengestimasi momen kritis balok *cellular* menggunakan persamaan yang terdapat pada spesifikasi desain *AISC* 360-16

1.4 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah dalam tesis ini adalah sebagai berikut :

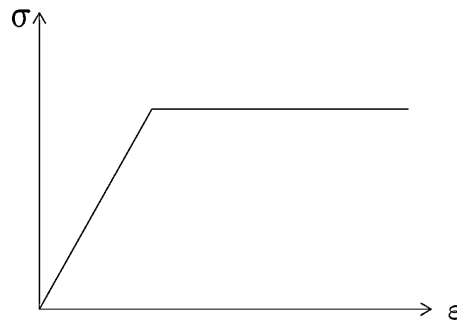
1. Profil yang digunakan adalah balok *cellular* dengan ukuran penampang CF 225x75x5x7, CF 375x125x6x9, CF 525x175x7x11 dan CF 600x200x8x13
2. Penampang balok baja yang dianalisis adalah penampang kompak
3. Beban terbagi rata dikerjakan pada seluruh permukaan bagian atas flens atas dan bagian bawah flens bawah (Gambar 1.1)

4. Tegangan sisa dianggap tidak ada



Gambar 1.1 Ilustrasi Pemodelan Struktur Balok *Cellular*

5. Dilakukan variasi panjang bentang untuk setiap profil
6. Kurva tegangan – regangan baja yang digunakan bersifat *elastic – perfectly plastic* seperti pada Gambar 1.2 Kurva Tegangan-Regangan Material *Elastic – Perfectly Plastic*
7. Material yang digunakan adalah baja dengan tegangan leleh 250 MPa
8. Ragam kegagalan yang dianalisis adalah tekuk torsi lateral
9. Ragam tekuk pertama pada analisis tekuk linier akan digunakan sebagai bentuk ketidaksempurnaan awal pada analisis tekuk nonlinier



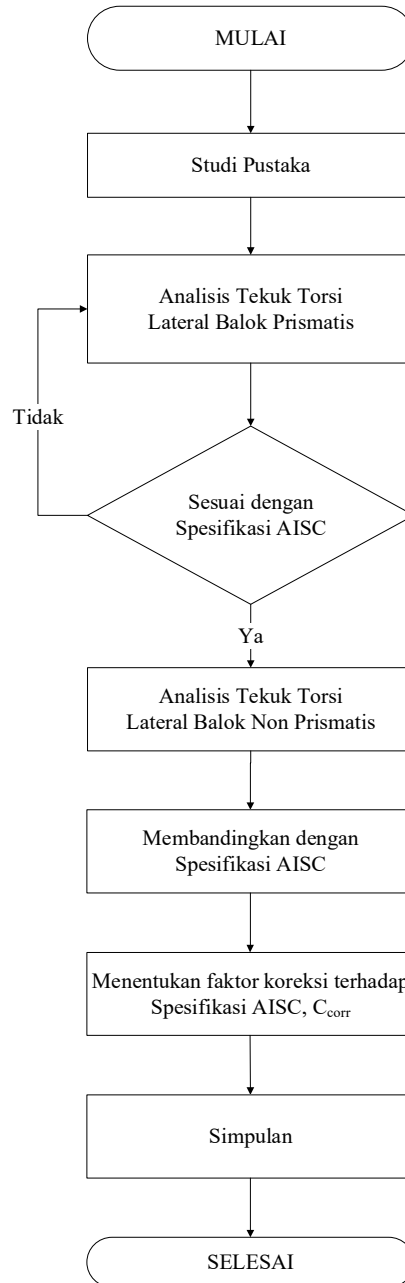
Gambar 1.2 Kurva Tegangan-Regangan Material *Elastic – Perfectly Plastic*

1.5 Metode Penelitian

Pada studi ini, dilakukan metode penelitian yang meliputi studi pustaka dan analisis numerik. Diagram alir pada studi ini ditampilkan pada Gambar 1.3

1. Studi Pustaka

Pustaka yang digunakan sebagai referensi berupa buku, tesis, *paper* dan spesifikasi desain mengenai tekuk torsi lateral balok *cellular* dan analisis nonlinier.



Gambar 1.3 Diagram Alir Metode Penelitian

2. Analisis Numerik

Analisis linier dan nonlinier menggunakan bantuan perangkat lunak *ANSYS* dengan memodelkan struktur balok prismatis dan non prismatis dengan perletakan sendi-rol yang mengalami tekuk torsi lateral. Digunakan juga perangkat lunak *Mathcad* sebagai alat bantu hitung.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada penelitian ini, sistematika penulisan penelitian yang digunakan pada penulisan tesis ini, antara lain:

1) BAB 1 PENDAHULUAN

Membahas latar belakang, inti permasalahan, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penelitian, serta sistematika penulisan tesis

2) BAB 2 STUDI PUSTAKA

Membahas tentang studi terdahulu, teori-teori dan persamaan yang digunakan dalam analisis tesis ini.

3) BAB 3 STUDI KASUS

Membahas tentang pemodelan analisis linier dan nonlinier yang dibantu dengan perangkat lunak *ANSYS Workbench*.

4) BAB 4 ANALISIS HASIL UJI

Mencakup hasil analisis dan pengolahan data yang dihasilkan pemodelan dan perhitungan yang dilakukan.

5) BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Membahas tentang simpulan hasil analisis dan saran untuk menunjang penelitian berikutnya.