

**ANALISIS PENGANGKURAN *HEADED BAR* PADA
SAMBUNGAN BALOK KOLOM EKSTERIOR
DENGAN *ANALOGI STRUT AND TIE* DAN METODE
ELEMEN HINGGA**

TESIS



Oleh:

**Ria Ananda
2013831010**

Pembimbing :

Prof. Ir. Iswandi Imran, MAS.c., Ph.D.

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JUNI 2017**

HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS PENGANGURAN *HEADED BAR* PADA SAMBUNGAN
BALOK KOLOM EKSTERIOR DENGAN ANALOGI *STRUT AND TIE*
DAN METODE ELEMEN HINGGA**



Oleh:

**Ria Ananda
NPM: 2013831010**

**Disetujui Untuk Diajukan Ujian Sidang pada Hari/Tanggal:
Sabtu, 17 Juni 2017**

Pembimbing :

Prof. Ir. Iswandi Imran, MAS.c., Ph.D.

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JUNI 2017**



PERNYATAAN

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

Nama : RIA ANANDA
Nomor Pokok Mahasiswa : 2013831010
Program Studi : Teknik Sipil
Sekolah Pascasarjana
Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa Tesis dengan judul:

ANALISIS PENGANGKURAN *HEADED BAR* PADA SAMBUNGAN BALOK KOLOM EKSTERIOR DENGAN ANALOGI *STRUT AND TIE* DAN METODE ELEMEN HINGGA

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 : 13 Juni 2017



Ria Ananda

**ANALISIS PENGANGKURAN *HEADED BAR* PADA SAMBUNGAN
BALOK KOLOM EKSTERIOR DENGAN *ANALOGI STRUT AND TIE*
DAN METODE ELEMEN HINGGA**

Ria Ananda (NPM: 2013831010)

Pembimbing : Prof. Ir. Iswandi Imran, MAS.c., Ph.D.

Magister Teknik Sipil

Bandung

April 2017

ABSTRAK

Sambungan balok kolom merupakan salah satu komponen yang penting dalam struktur gedung beton bertulang. SNI 2847-2013 mensyaratkan perencanaan bangunan yang berlokasi di daerah dengan risiko kegempaan tinggi harus didesain dengan sistem struktur yang memenuhi persyaratan *detailing* khusus yaitu Sistem Rangka Pemikul Momen (SRPMK). Desain SRPMK mengakibatkan *detailing* tulangan menjadi padat dan rapat. Kepadatan tulangan khususnya sering terjadi pada sambungan balok kolom, sehingga mengakibatkan sambungan balok kolom tidak dicor beton dengan baik. Beberapa inovasi dilakukan untuk menghindari kemampatan tulangan pada sambungan balok kolom. Salah satunya adalah dengan menggantikan pengangkuran baja tulangan konvensional dengan sistem pengangkuran menggunakan *headed bar*. Banyak studi eksperimental telah dilakukan untuk menguji apakah *headed bar* mampu bekerja secara efektif dalam menahan beban terutama beban gempa.

Dalam tesis ini, analisis dilakukan pada spesimen benda uji sambungan balok kolom yang telah diuji secara eksperimental oleh Irvan MS. Analisis sistem pengangkuran dengan *headed bar* akan dilakukan dengan pendekatan metode elemen hingga dan analogi *strut and tie*. Pendekatan metode elemen hingga akan dilakukan dengan program ATENA 3D. Hasil dari analisis program ATENA 3D memperlihatkan pola retakan yang terjadi pada masing-masing *drift*. Analisis terhadap kekuatan, kekakuan, dan disipasi energi dilakukan untuk membandingkan hasil uji eksperimental dan ATENA 3D. Pendekatan analogi *strut and tie* dilakukan pada model yang dibebani beban monotonik dengan ATENA 3D. Pendekatan analogi *strut and tie* dilakukan untuk menguraikan tiga komponen *strut and tie* yang menjadi acuan mekanisme penyebaran gaya pada sistem pengangkuran dengan *headed bar*, yaitu *concrete compression struts*, *steel tension ties*, dan *nodal zone*. Pengembangan model *strut and tie* dalam nodal C-C-T dapat digambarkan melalui hasil *compression* dan *tension field* hasil analisis ATENA 3D.

Kata kunci: *headed bar*, *hooked bar*, sambungan balok kolom, pengangkuran, *strut and tie*, nodal C-C-T

**ANALYSIS OF HEADED BAR ANCHORAGE
IN BEAM-COLUMN JOINT WITH STRUT AND TIE ANALOGY AND
FINITE ELEMENT METHOD**

**Ria Ananda (NPM: 2013831010)
Adviser : Prof. Ir. Iswandi Imran, MAS.c., Ph.D.
Magister of Civil Engineering
Bandung
April 2017**

ABSTRACT

Beam-column joint is one of important component in reinforced concrete building structures. SNI 2847-2013 requires planning of buildings located in areas with high seismic risk must be designed with Special Moment Resisting Frame. SMRF design have a tight detailing requirements that make congestion in beam-column joint. This kind of reinforcement congestion make poor concrete placement in beam-column joint. Some of the innovations made to avoid reinforcement congestion in beam-column joint. One of them is Headed anchorage bar (Headed Bar). Headed bar is used to replace conventional anchorage reinforcement. Many experimental studies have been conducted to test whether headed bar is able to work effectively in resisting earthquake load.

In this thesis, an analysis is performed on a specimen test object beam-column joint have been tested experimentally by Irvan MS. Analysis system with a headed bar anchorage will be carried out by the finite element method approach and strut and tie analogy. Approach to the finite element method will be done with ATENA 3D. The results of the analysis with ATENA 3D show the pattern of cracks that occur on each drift. Analysis of the strength, stiffness, and energy dissipation was done to compare the experimental and ATENA 3D test results. The strut and tie analogy approach is performed on models loaded with monotonic loads with ATENA 3D. The strut and tie analogy approach is performed to describe the three strut and tie components which serve as the reference of force dispersion mechanisms in the headed bar system, namely the concrete compression struts, the steel tension ties, and the nodal zone. The development of strut and tie model in C-C-T nodes can be described through compression and tension field result of ATENA 3D analysis.

Keywords: headed bar, hooked bar, beam-column joint, anchorage, strut and tie, C-C-T nodes

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan penyertaan-Nya, tesis yang berjudul “Analisis Pengangkuran *Headed Bar* Pada Sambungan Balok Kolom Eksterior dengan Analogi *Strut and Tie* dan Metode Elemen Hingga” dapat dibuat dan diselesaikan tepat pada waktunya. Tesis ini merupakan salah satu persyaratan akademik untuk menyelesaikan program pendidikan Pasca Sarjana di Magister Teknik Sipil Program Studi Teknik Struktur Universitas Katolik Parahyangan.

Selama pengerjaan tesis ini, banyak hambatan dan masalah yang dihadapi oleh penulis. Namun berkat bimbingan, saran, kritik, dan semangat dari banyak pihak, tesis ini akhirnya dapat diselesaikan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada pihak-pihak yang telah membantu kelancaran pengerjaan tesis ini.

Penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Prof. Ir. Iswandi Imran, MAS.c, Ph.D., selaku dosen pembimbing.
2. Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D., selaku dosen penguji.
3. Dr. Paulus Karta Wijaya, selaku dosen penguji.
4. Dr. Djoni Simanta yang telah memberikan masukan dalam pemodelan program *finite element*.
5. Irvan Maruli Simamora yang telah membantu penulis dalam mengumpulkan data eksperimen.
6. Papa, Mama, Vita, dan Budi, yang selalu memberikan dorongan, semangat, dan doa dalam proses pengerjaan tesis ini.

7. Teman-teman seperjuangan pasca sarjana: Anita, Adi, Ariella, Thavera, dan Nessa, yang selalu memberikan semangat kepada penulis.
8. Teman-teman PT. Penta Rekayasa khususnya Penta Structure.
9. Dan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan bagi penulis.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih dari jauh dari sempurna, tapi penulis berharap tesis ini dapat bermanfaat bagi orang-orang yang membacanya.

Bandung, Juni 2017

Ria Ananda

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN TESIS	
ABSTRAK	
ABSTRACT	
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	viii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xx
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Inti Permasalahan	6
1.3 Tujuan Penulisan	8
1.4 Pembatasan Masalah	8
1.5 Metodologi Penelitian	10
1.6 Sistematika Penulisan	11
BAB 2 KAJIAN LITERATUR	13
2.1 Prinsip Dasar Perencanaan Gedung Tahan Gempa	13
2.1.1 Konsep Desain Terhadap Beban Gempa	13
2.1.2 Persyaratan Material Konstruksi	14

2.2	Material Beton	16
2.2.1	Kuat Tekan Material Beton	16
2.2.2	Kuat Tarik Material Beton	22
2.3	Material Baja Tulangan	23
2.3.1	Karakteristik Baja Tulangan	24
2.4	Prinsip Dasar Struktur Beton Bertulang	27
2.5	Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus	30
2.5.1	Pendetailan SRPMK pada Sambungan Balok Kolom	31
2.6	<i>Standard Hooked Bar</i> (Tulangan Kait Standar)	34
2.6.1	Mekanisme Lekatan antara Baja Tulangan dan Beton (<i>Mechanism of Bond</i>)	36
2.7	Sejarah Penggunaan <i>Headed Bar</i>	41
2.7.1	Penggunaan <i>Headed Bar</i> Sebagai Pengganti <i>Hooked Bar</i> (Kait Standar 90°)	43
2.7.2	Distribusi Beban antara <i>Bond</i> dan <i>End Bearing</i> pada <i>Hooked Bar</i> dan <i>Headed Bar</i>	46
2.7.3	Perbandingan Performa <i>Hooked Bar</i> dan <i>Headed Bar</i> pada Sambungan Balok Kolom Eksterior	51
2.8	Metode <i>Strut and Tie</i>	57

2.8.1	Analogi <i>Strut and Tie</i> Sebagai Pendekatan Sistem Pengangkuran <i>Headed Bar</i> pada Sambungan Balok Kolom Eksterior	64
2.8.2	Studi dan Pengembangan <i>Strut and Tie Model</i> pada <i>CCT Nodes</i>	67
BAB 3 METODOLOGI PEMODELAN STRUKTUR		71
3.1	Analisis Numerik	71
3.2	Model Numerik Beton	72
3.3	Model Material Beton pada ATENA 3D	75
3.3.1	<i>Constitutive Model Sbeta (CCSbeta Material)</i>	75
3.3.2	<i>Fracture Plastic Constitutive Model</i>	84
3.4	Model Material Baja Tulangan pada ATENA 3D	85
3.4.1	Hubungan Tegangan-Regangan Multilinear	85
3.5	Pemodelan Sambungan Balok Kolom pada ATENA 3D	86
3.6	<i>Finite Element Mesh</i>	87
3.7	Solusi Permasalahan Non-Linear pada ATENA 3D	89
3.7.1	Metode <i>Newton-Raphson</i> Penuh	89
3.7.2	Metode <i>Newton-Raphson</i> Modifikasi	92
BAB 4 STUDI KASUS		95
4.1	Model Sambungan Balok Kolom	95
4.2	Pemodelan Benda Uji	95

4.3	Data Pemodelan	97
4.4	Data Material	98
4.4.1	Material Beton	98
4.4.2	Material Baja Tulangan	101
4.5	Data Pembebanan	106
4.5.1	Pembebanan Monotonik	106
4.5.2	Pembebanan Siklik	106
BAB 5 PEMBAHASAN HASIL ANALISIS		109
5.1	Hasil Uji Eksperimental Spesimen HD-D22	109
5.2	Hasil Uji Analisis Spesimen HD-D22 dan HK-22 dengan Pendekatan Metode Elemen Hingga (ATENA 3D)	114
5.2.1	Uji Pembebanan Monotonik dengan ATENA 3D	115
5.2.2	Uji Pembebanan Siklik dengan ATENA 3D	122
5.2.3	Kekuatan	128
5.2.4	Kekakuan	129
5.2.5	Disipasi Energi	130
5.3	Mekanisme Transfer Gaya pada Sambungan Balok Kolom Eksterior dengan Analogi <i>Strut and Tie</i>	131
5.3.1	Pengembangan <i>Strut and Tie Model</i> dalam Nodal C-C-T	132
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN		137
6.1	Kesimpulan	137

6.2	Saran	138
	DAFTAR PUSTAKA	141

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	=	Luas penampang
A_b	=	Luas penampang baja tulangan
A_{cs}	=	Daerah efektif pada arah melintang dari <i>strut</i>
A_{gh}	=	Luas penampang bruto kepala <i>headed bar</i>
A_{nh}	=	Luas penampang <i>netto</i> kepala <i>headed bar</i> ($A_{gh} - A_b$)
A_{nn}	=	Luas titik nodal
A_{st}	=	Luas baja tulangan
b_w	=	Lebar balok
c	=	Tebal minimum selimut beton (Persamaan 2.7)
c_2	=	Tebal minimum selimut beton yang diukur tegak lurus dengan nilai selimut beton
d_b	=	Diameter baja tulangan
E_c	=	Modulus elastisitas beton
E_{ci}	=	Modulus elastisitas beton pada arah i
E_{cs}	=	Modulus sekan beton
E_{ct}	=	Modulus tangensial beton
E_{min}^t	=	Modulus tangensial beton minimum
E_o	=	Modulus elastisitas awal
E_s	=	Modulus elastisitas tulangan baja
F_u	=	Gaya ultimit
$f(p)$	=	Vektor gaya dalam titik
f_c'	=	Kuat tekan beton silinder

- f_{cc} = Kekuatan tekan aksial specimen yang dikekan
 f_{ce} = Kekuatan tekan efektif pada beton dalam *strut* atau daerah nodal
 $f_{c^{ef}}$ = Tegangan tekan efektif beton
 f_{cu}' = Kekuatan beton kubus
 F_{nn} = Kekuatan titik nodal
 F_{ns} = Kekuatan nominal dari *strut*
 F_{nt} = Kekuatan nominal dari *tie*
 f_r = Modulus keruntuhan (*modulus of rupture*)
 $f_{s, head}$ = Tegangan yang dihasilkan oleh kepala *headed bar*
 f_s = Kuat tarik material baja tulangan
 f_u = Kuat tarik ultimit material baja tulangan
 f_t = Kekuatan tarik beton
 f_t^{ef} = Kekuatan tarik efektif yang berasal dari fungsi kegagalan
 f_y = Tegangan leleh tulangan baja
 G_f = Energi retak yang dibutuhkan untuk membentuk sebuah area dari retak
 tegangan bebas
 K = Konstanta beton dengan nilai sekitar 7-13
 $K(p)$ = Matriks kekakuan yang berkaitan dengan peningkatan deformasi
 l_{dh} = Panjang pembengkokan baja tulangan pada kait standar
 l_s = Panjang sambungan lewatan
 M = Momen kopel
 N = kapasitas kekuatan *bearing*
 $n_{5\%}$ = reduksi sebesar 5% untuk kapasitas tegangan baja tulangan
 p = Deformasi struktur sebelum peningkatan beban (Persamaan 3.14)

P	= Beban atau gaya tekan
q	= Vektor beban titik total
w	= Berat jenis beton (Persamaan 5.1)
w	= Pembukaan retak (Persamaan 3.4)
w_c	= Pembukaan retak pada pelepasan lengkap tegangan
W_s	= Lebar <i>strut</i>
x	= Regangan ternormalisasi
β_s	= Faktor yang digunakan dalam menghitung kuat tekan beton pada <i>strut</i>
β_n	= Faktor yang digunakan dalam menghitung kuat tekan pada titik nodal
Δp	= Peningkatan deformasi karena pembebanan bertingkat
ε	= Regangan
ε_c	= Regangan pada tegangan puncak
ε_s	= Regangan material baja tulangan
ε_{su}	= Regangan ultimit material baja tulangan
ε_{sh}	= Regangan 1%
ε^{eq}	= Regangan uniaksial setara
σ	= Tegangan normal pada retak (kohesi retak)
σ_{c1}, σ_{c2}	= Tegangan principal beton
σ_c^{ef}	= Tegangan tekan efektif beton
σ_{ci}	= tegangan normal pada arah i
γ_{ec}	= Faktor reduksi kekuatan tekan pada arah principal 2 akibat tegangan tarik pada arah principal 1
γ_{et}	= Faktor reduksi kekuatan tekan pada arah principal 2 akibat tegangan tarik pada arah principal 2

- ν = Ratio Poisson
- ψ = faktor keseragaman pada jari-jari baja tulangan
- χ = faktor reduksi ukuran *head*
- ACI = *American Concrete Institute*
- ASTM = *American Society for Testing and Material*
- CCT = *Compression Compression Tension*
- TTT = *Tension Tensio Tension*
- SBK = Sambungan Balok Kolom
- SNI = Standar Nasional Indonesia
- STM = *Strut and Tie Model*

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Tipe Sambungan Balok Kolom (<i>ACI Comitte 352</i>).....	2
Gambar 1.2 Kemampatan Tulangan pada SBK (H J Lee & S Y Yuu, 2009).....	4
Gambar 1.3 Kegagalan pada SBK eksterior (Gempa Padang, 2009)	4
Gambar 1.4 Detail Standar <i>Hooked Bars</i> (ACI 318-11).....	5
Gambar 1.5 Perbandingan Bentuk Antara <i>Hooked</i> dan <i>Headed Bars</i> (<i>Anchorage Behaviour of Headed Performance</i> , M. K. Thompson, dkk)	6
Gambar 1.6 Diagram Alir Tesis.....	10
Gambar 2.1 Uji Tekan Beton Silinder (T. Wihardja, 2013)	18
Gambar 2.2 Grafik Tegangan-Regangan Beton (strukturbeton.web.id).....	19
Gambar 2.3 Kurva Tegangan-Regangan Beton Ideal Kondisi Tekan Uniaksial (Park dan Paulay)	20
Gambar 2.4 Regangan pada Beton dengan Pembebanan Tekan Uniaksial (Park dan Paulay)	21
Gambar 2.5 Uji Tarik Beton (Park dan Paulay).....	22
Gambar 2.6 Grafik <i>Stress – Strain</i> Baja Tulangan dengan 4 (empat) Fase Perilaku Baja Tulangan (kampustekniksipil.blogspot.co.id).....	25
Gambar 2.7 Idealisasi Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan (a) <i>Elastic Perfectly Plastic</i> , (b) <i>Trilinear</i> , (c) <i>Complete Curve</i> (Park dan Paulay, 1974)	26
Gambar 2.8 Grafik Respon Load-Displacement Beton Bertulang (Hyo-Gyoung Kwak dan Filip C. Filippou).....	28

Gambar 2.9 Desain SRPMK mencegah terjadinya mekanisme <i>soft story</i> (a), dengan membuat kolom kuat sehingga <i>drift</i> merata sepanjang lantai (c), atau sebagian besar lantai (b).....	31
Gambar 2.10 Standar Penekukan untuk Kait Standar (ACI Code Section 7.1, 7.2.1, dan 7.1.3).....	35
Gambar 2.11 Mekanisme Transfer Gaya Kait Standar (M. K. Thompson, dkk)	36
Gambar 2.12 Konsep Sederhana Tegangan yang Dihasilkan oleh <i>Bond</i> (M. K. Thompson, dkk)	37
Gambar 2.13 Mekanisme Transfer Gaya pada <i>Bond</i> (Yu-Chen Ou)	38
Gambar 2.14 Penyebaran retakan beton akibat distribusi tegangan (M. K. Thompson, dkk)	39
Gambar 2.15 <i>Bond and Splitting Components of Rib Bearing Stress</i> (M. K. Thompson, dkk)	40
Gambar 2.16 Tipe Retakan pada Beton (M. K. Thompson, dkk).....	41
Gambar 2.17 Beberapa Tie <i>Headed Stud</i> (Dilger dan Ghali).....	42
Gambar 2.18 <i>Anchorage of Headed Bar</i> (M. K. Thompson, <i>et al.</i> , 2002).....	42
Gambar 2.19 Kemampuan Baja Tulangan yang Menggunakan <i>Hooked Bar</i> (<i>Reinforcing Congestion</i> , Robert Risser & Michael Hoofman).....	44
Gambar 2.20 Detail Tulangan dengan Menggunakan <i>Headed Bar</i> (Irvan MS, 2013)	44
Gambar 2.21 Mekanisme <i>Headed Bar</i> Saat Mengalami Gaya Tarik (<i>Behaviour of Reinforced Concrete Members</i> , Yu-Chen Ou).....	45
Gambar 2.22 Perbedaan Mekanisme <i>Hooked Bar</i> dan <i>Headed Bar</i> (R. A. DeVries).....	46

Gambar 2.23 Dimensi Spesimen Benda Uji (R. A. DeVries).....	47
Gambar 2.24 Grafik Distribusi Gaya Pada <i>Headed Bar</i> dengan <i>Bearing Ratio</i> 3.5 (R. A. DeVries).....	48
Gambar 2.25 Grafik Distribusi Gaya Pada <i>Headed Bar</i> dengan <i>Bearing Ratio</i> 9.0 (R. A. DeVries).....	49
Gambar 2.26 Grafik Distribusi Gaya Pada <i>Headed Bar</i> dengan Panjang Pengangkuran 400 mm (R. A. DeVries).....	50
Gambar 2.27 Grafik Distribusi Gaya pada <i>Hooked Bar</i> dengan Panjang Pengangkuran 200 mm (R. A. DeVries).....	50
Gambar 2.28 Grafik Distribusi Gaya pada <i>Hooked Bar</i> dengan Panjang Pengangkuran 400 mm (R. A. DeVries).....	50
Gambar 2.29 Reaksi <i>Head</i> Terhadap Panjang Pengangkuran (M. K. Thompson, dkk).....	53
Gambar 2.30 Spesimen Benda Uji (Irvan MS, dkk. 2013).....	54
Gambar 2.31 Pola Pembebanan Siklik (Irvan MS, dkk).....	54
Gambar 2.32 Kurva Histersis Hasil Uji Eksperimental (Irvan MS, dkk. 2013) ..	56
Gambar 2.33 Berbagai Tipe Kegagalan <i>Headed Bar</i> pada Sambungan Balok Kolom (ACI <i>Structural Journal</i> , Sung-Chul Chun, dkk).....	57
Gambar 2.34 Pembagian <i>B-regions</i> dan <i>D-regions</i> pada struktur (MacGregor) .	58
Gambar 2.35 Pola Retak pada Balok Akibat Beban F (Harijanto Hardjasaptra & Steffie Tumilar)	59
Gambar 2.36 Analogi Rangka Batang sesuai Morsch (Harijanto Hardjasaptra & Steffie Tumilar)	59

Gambar 2.37 Contoh Aplikasi Pemodelan STM (<i>Anchorage Behaviour of Headed Reinforcement</i> , M. K. Thompson, dkk).....	60
Gambar 2.38 Titik Pertemuan <i>Strut-Tie</i> (Harijanto Hardjasaptra & Steffie Tumilar)	63
Gambar 2.39 <i>Plastic Truss Model</i> Balok Tinggi (Harijanto Hardjasaptra & Steffie Tumilar).....	63
Gambar 2.40 <i>Plastic Truss Model</i> Balok dengan Sengkok (Harijanto Hardjasaptra dan Steffie Tumilar).....	64
Gambar 2.41 Pengembang <i>CCT nodes</i> dan STM pada Sambungan Balok Kolom (<i>ACI Structural Journal</i> , Sung-Chul Cun, dkk)	66
Gambar 2.42 Tipe <i>Head</i> yang Digunakan oleh TxDOT (<i>ACI Structural Journal</i> , M. K. Thompson et al., 2006).....	67
Gambar 2.43 Pengujian yang Dilakukan pada Nodal CCT (<i>ACI Structural Journal</i> , M. K. Thompson et al., 2006)	69
Gambar 2.44 Detail <i>CCT Nodal Zone</i> (<i>ACI Structural Journal</i> , M. K. Thompson et al., 2006).....	69
Gambar 2.45 Perbandingan Kapasitas <i>Head Bearing</i> dengan <i>Bond</i> (<i>ACI Structural Journal</i> , M. K. Thompson et al., 2006)	70
Gambar 3.1 Hubungan Tegangan Regangan Uniaksial Beton ATENA 3D (Cervenka).....	77
Gambar 3.2 Pembukaan Retak Eksponensial ATENA 3D (Cervenka).....	79
Gambar 3.3 Pembukaan Retak Linear pada ATENA 3D (Cervenka, 2007).....	79
Gambar 3.4 Penghalusan Linear Berdasarkan Regangan Lokal (Cervenka)	80

Gambar 3.5 Diagram Tegangan-Regangan CEB-FIP Model Code 90 (Cervenka)	80
.....	
Gambar 3.6 Fungsi Kegagalan Biaksial Beton (Cervenka)	82
Gambar 3.7 Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan pada ATENA 3D (Cervenka)	86
Gambar 3.8 Metode <i>New-Raphson</i> Penuh (Cervenka)	91
Gambar 3.9 Metode <i>New-Raphson</i> Modifikasi (Cervenka)	93
Gambar 4.1 Spesimen Benda Uji (Irvan MS., 2013)	96
Gambar 4.2 Model Sambungan Balok Kolom	96
Gambar 4.3 Dimensi Balok dan Kolom	97
Gambar 4.4 Detail Tulangan Sambungan Balok Kolom Spesimen HD-D22	98
Gambar 4.5 Detail Tulangan Sambungan Balok Kolom Spesimen HK-22	98
Gambar 4.6 Model Sambungan Balok Kolom pada ATENA 3D	100
Gambar 4.7 (a) Pemodelan <i>Support</i> ; (b) Lokasi Beban Peralihan; (c) Model <i>Meshing</i>	101
Gambar 4.8 Grafik <i>Stress-Strain</i> Tulangan Utama Kolom	103
Gambar 4.9 Grafik <i>Stress-Strain Headed Bar D22</i>	104
Gambar 4.10 Grafik <i>Stress-Strain Hooked Bar D22</i>	104
Gambar 4.11 Material <i>Headed Bar</i> (Irvan MS, dkk)	105
Gambar 4.12 Spesifikasi Dimensi <i>Segmen Headed Bar D22</i> (satuan mm)	106
Gambar 4.13 Model Penulangan	106
Gambar 5.1 Kondisi Akhir Benda Uji HD-D22 (Irvan MS, dkk)	110
Gambar 5.2 Kondisi Akhir Benda Uji HK-22 (Irvan MS, dkk)	110
Gambar 5.3 Grafik Histeritik Spesimen HD-D22 (Irvan MS, dkk)	112

Gambar 5.4 Grafik Histeritik Spesimen HK-22 (Irvan MS, dkk)	112
Gambar 5.5 Grafik Perbandingan Load Spesimen Benda Uji Eksperimental (Irvan MS, dkk).....	113
Gambar 5.6 Grafik Perbandingan Spesimen HD-D22	115
Gambar 5.7 Grafik Perbandingan Spesimen HK-D22	115
Gambar 5.8 Arah Deformasi (a) <i>Headed Bar</i> ; (b) <i>Hooked Bar</i>	116
Gambar 5.9 <i>Principal Stress Max</i> (a) <i>Headed Bar</i> ; (b) <i>Hooked Bar</i>	116
Gambar 5.10 <i>Principal Stress Vmax X</i> (a) <i>Headed Bar</i> ; (b) <i>Hooked Bar</i>	116
Gambar 5.11 <i>Principal Stress Vmax Y</i> (a) <i>Headed Bar</i> ; (b) <i>Hooked Bar</i>	117
Gambar 5.12 Grafik Hasil Uji Monotonik ATENA 3D.....	117
Gambar 5.13 Tegangan Tarik Sig T(1) (a) <i>Headed Bar</i> ; (b) <i>Hooked Bar</i>	118
Gambar 5.14 Tegangan Tarik Sig T(2) (a) <i>Headed Bar</i> ; (b) <i>Hooked Bar</i>	118
Gambar 5.15 Tegangan Tarik Sig T(3) (a) <i>Headed Bar</i> ; (b) <i>Hooked Bar</i>	119
Gambar 5.16 Tegangan Tarik Sig xx pada Baja Tulangan (a) <i>Headed Bar</i> ; (b) <i>Hooked Bar</i>	119
Gambar 5.17 Daerah Tegangan TarikSig T(1) dan Retakan Beton Spesimen HD-D22.....	119
Gambar 5.18 Daerah Tegangan TarikSig T(1) dan Retakan Beton Spesimen HK-D22.....	120
Gambar 5.19 Mekanisme Peralihan Tegangan Tarik pada Headed Bar.....	120
Gambar 5.20 Tensor Tegangan Arah Utama HK-D22.....	121
Gambar 5.21 Mekanisme Tahanan <i>Hooked Bar</i> dan <i>Headed Bar</i> (R. A. DeVries)	121
Gambar 5.22 Grafik Histerisis Spesimen HD-D22	123

Gambar 5.23 Grafik Histerisis Spesimen HK-D22.....	123
Gambar 5.24 Gabungan Grafik Histerisis Spesimen HD-D22 dan HK-D22	123
Gambar 5.25 Retakan <i>Drift</i> 0.1%	124
Gambar 5.26 Retakan <i>Drift</i> 0.15%	124
Gambar 5.27 Retakan <i>Drift</i> 0.2%	125
Gambar 5.28 Retakan <i>Drift</i> 0.3%	125
Gambar 5.29 Retakan <i>Drift</i> 0.45%	125
Gambar 5.30 Retakan <i>Drift</i> 0.675%	126
Gambar 5.31 Retakan <i>Drift</i> 1%	126
Gambar 5.32 Retakan <i>Drift</i> 1.4%	126
Gambar 5.33 Retakan <i>Drift</i> 2%	127
Gambar 5.34 Retakan <i>Drift</i> 2.75%	127
Gambar 5.35 Retakan <i>Drift</i> 3.5%	127
Gambar 5.36 Retakan <i>Drift</i> 5%	128
Gambar 5.37 Grafik Perbandingan Gaya Lateral Maksimum	128
Gambar 5.38 Grafik Perbandingan Degradasi Kekakuan	129
Gambar 5.39 Disipasi Energi Relatif (ACI Comitte 374, 2005).....	130
Gambar 5.40 Pengembangan STM dalam Nodal C-C-T	132
Gambar 5.41 Daerah <i>Concrete Push-Out</i>	133
Gambar 5.42 <i>Load Path of C-C-T Nodes</i>	134
Gambar 5.43 Penggambaran Model <i>Strut-Tie</i> dan Pola Retak (<i>ACI Structural Journal</i>)	134
Gambar 5.33 <i>Joint Shear and Flexural Crack</i> (<i>ACI Structural Journal</i> , M. K. Thompson et. al).....	135

Gambar 5.34 (a) <i>cone-shaped concrete breakout failure of 0.5L specimen</i> , (b) <i>joint shear failure of 0.7L specimen</i> , dan (c) <i>joint shear failure of 0.9L specimen</i> (ACI structural Journal, Sung-Chul Chun, etl al.)	135
Gambar 5.35 Panjang Pengangkuran HD-D22	136

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Dimensi Spesimen Benda Uji dan Nilai F_u	48
Tabel 3.1 Fungsi Kegagalan Tarik Tekan Beton (Cervenka, 2007)	83
Tabel 3.2 Formula <i>Default</i> Parameter Material Model Konstituitif (Cervenka) ..	84
Tabel 4.1 Hasil Uji Tekan Uniaksial (Irvan MS, dkk).....	99
Tabel 4.2 Hasil Uji Tarik Baja Tulangan (Irvan MS, dkk).....	102
Tabel 4.3 Spesifikasi Dimensi <i>Headed Bar</i> D22	105
Tabel 4.4 Nilai Peralihan Masing-Masing <i>Drift</i>	107
Tabel 5.1 Kapasitas Beban Lateral Benda Uji Eksperimental (Irvan MS, dkk) .	113
Tabel 5.2 Kapaitas Beban Lateral Hasil Analisis ATENA 3D.....	129
Tabel 5.3 Kekakuan Awal-Akhir dan Degradasi Kekakuan.....	130
Tabel 5.4 Disipasi Energi Relatif <i>Drift</i> 3.5%.....	131

BAB 1

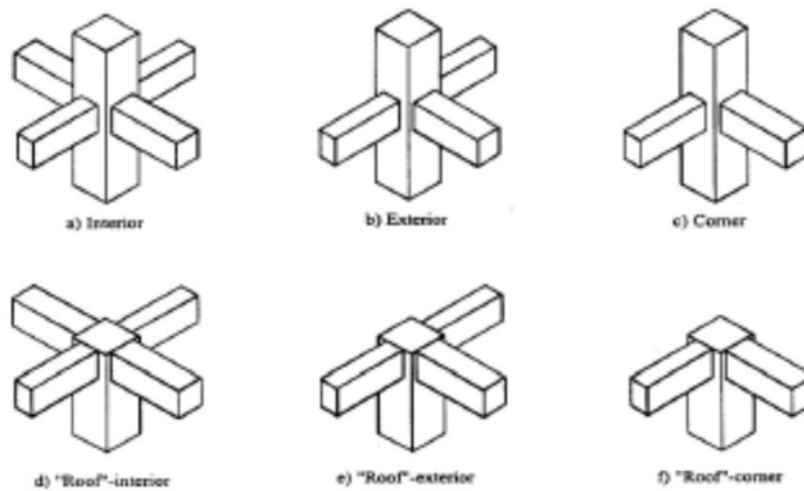
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton bertulang merupakan material yang sangat umum digunakan dalam konstruksi bangunan di Indonesia. Material ini merupakan gabungan material beton dan baja tulangan. Penggabungan ini bertujuan untuk mengatasi kelemahan material beton dalam menahan tarik, untuk mengatasi kelemahan tersebut maka digunakanlah baja tulangan yang mengatasi tegangan tarik tersebut.

Struktur beton bertulang terdiri dari berbagai macam komponen struktural. Komponen-komponen tersebut meliputi pondasi sebagai struktur bawah, pelat, balok, dan kolom sebagai struktur atas. Setiap komponen struktur tersebut akan memikul gaya-gaya dalam sebagai akibat adanya beban luar yang bekerja pada bangunan. Maka dari itu, setiap komponen struktur perlu didesain agar mampu menahan gaya-gaya dalam tersebut. Salah satu bagian yang penting dalam struktur bangunan adalah sambungan balok kolom, hal ini disebabkan karena sambungan tersebut merupakan daerah untuk mentransfer beban yang diterima balok ke kolom.

Berdasarkan letak penempatannya, sambungan balok kolom yang terdapat pada suatu struktur bangunan terdiri dari tiga jenis, yaitu sambungan balok kolom interior, sambungan balok kolom eksterior, dan sambungan balok kolom sudut.



Gambar 1.1 Tipe Sambungan Balok Kolom (*ACI Comittee 352*)

Struktur bangunan didesain bukan hanya untuk menahan beban gravitasi, tetapi juga beban lateral yang dapat berasal dari angin dan gempa. Indonesia merupakan negara yang memiliki tingkat kerawanan tinggi terhadap gempa. Oleh karena itu, untuk menghindari kerusakan berbagai sarana dan prasarana akibat gempa, maka diperlukan adanya pemenuhan terhadap kaidah perencanaan/pelaksanaan sistem struktur tahan gempa pada setiap struktur bangunan yang didirikan di wilayah Indonesia, terutama pada bangunan yang akan didirikan pada wilayah dengan tingkat kerawanan (risiko) gempa menengah hingga tinggi. Hal ini bertujuan agar pada saat terjadi gempa, struktur bangunan tetap berdiri dan bila terjadi kerusakan pun diharapkan bukan kerusakan struktural yang terjadi, sehingga penghuni bangunan aman dari risiko bahaya gempa.

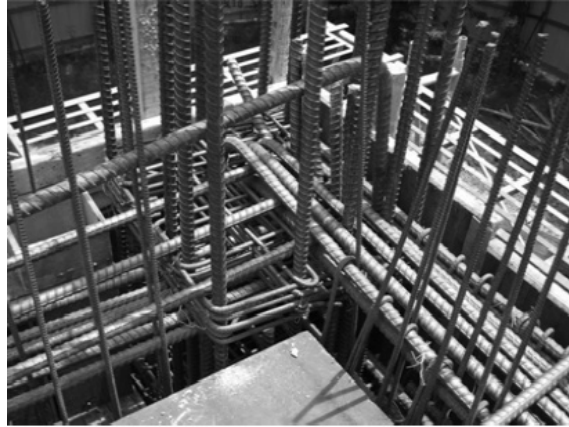
Struktur yang didesain tahan gempa diharapkan dapat memenuhi 4 kriteria utama, yaitu *strength*, *stiffness*, *ductility*, dan *stability*. Dalam memenuhi kriteria-kriteria tersebut, maka perencanaan struktur bangunan tahan gempa harus mengikuti peraturan yang memberikan syarat-syarat dalam perihal perencanaan

bangunan tahan gempa. ACI 318-11 dan SNI 2847-2013 mensyaratkan untuk perencanaan bangunan yang berlokasi di daerah dengan risiko kegempaan tinggi maka harus direncanakan dengan sistem struktur penahan beban lateral yang memenuhi persyaratan *detailing* yang khusus atau Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK).

Struktur bangunan yang didesain secara SRPMK diharapkan memiliki tingkat daktilitas yang tinggi, yaitu mampu menerima siklus respon inelastis pada saat menerima beban gempa. Prinsip ini terdiri dari tiga hal yang harus dipenuhi, yaitu:

1. *Strong Colum – Weak Beam*, balok menjadi elemen struktur yang akan mendisipasi energi gempa, sehingga kegagalan tidak terjadi terlebih dahulu pada kolom struktur.
2. Tidak terjadi kegagalan geser pada sambungan balok dan kolom.
3. Menyediakan *detailing* tulangan yang memungkinkan terpenuhinya tingkat daktilitas yang tinggi.

Desain SRPMK harus menghasilkan perilaku daktilitas yang tinggi, sehingga akan menciptakan kebutuhan *detailing* baja tulangan menjadi sangat ketat dan rapat. Hal tersebut mengakibatkan pelaksanaan pemasangan baja tulangan di lapangan cenderung lebih sulit dan rumit, sehingga sering terjadi kepadatan atau kemampatan baja tulangan terutama pada sambungan balok kolom eksterior. Kemampatan baja tulangan yang terjadi pada bagian sambungan balok kolom akan mengakibatkan bagian sambungan tidak terisi beton secara baik.



Gambar 1.2 Kemampuan Tulangan pada SBK (H J Lee & S Y Yuu, 2009)

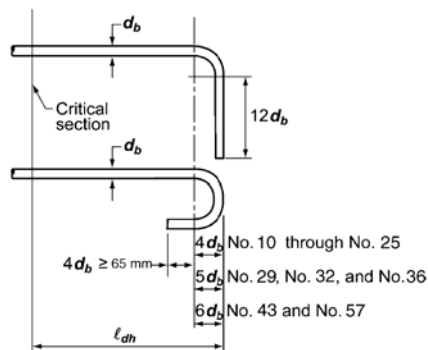
Saat memikul beban gempa struktur sambungan balok kolom akan memikul gaya horisontal dan vertikal yang berkali-kali lipat lebih besar dibandingkan elemen struktur lainnya. Jika sambungan tidak terisi beton dengan baik akibat kemampuan baja tulangan, maka sambungan balok kolom justru akan menjadi bagian yang paling lemah yang akan mengakibatkan kegagalan pada bangunan (Bing Li, dkk).



Gambar 1.3 Kegagalan pada SBK eksterior (Gempa Padang, 2009)

Dalam beberapa kasus seperti pada daerah sambungan balok kolom khususnya sambungan balok kolom eksterior, panjang penyaluran terbatas oleh dimensi balok kolom. Maka dari itu, untuk memenuhi kebutuhan panjang

penyaluran pada daerah sambungan balok kolom, baja tulangan dibengkokkan 90° atau 135° kemudian diangkurkan saat baja tulangan berlabuh di sambungan balok kolom eksterior. Mekanisme pengankuran tersebut (*hooked bars*) bertujuan untuk meningkatkan panjang penyaluran tulangan khususnya pada saat penghentian baja tulangan di sambungan balok kolom eksterior (M. K. Thompson, dkk).



Gambar 1.4 Detail Standar *Hooked Bars* (ACI 318-11)

Seiring dengan perkembangan teknologi di bidang teknik sipil, maka ditemukan salah satu alternatif yang bisa menggantikan sistem pengankuran konvensional *hooked bar* tanpa mengurangi performa dari struktur. *Headed bar* merupakan tulangan yang memiliki *bearing plate* pada ujung tulangan, *bearing plate* tersebut untuk menggantikan kait tulangan 90° atau 135° yang biasa digunakan. Tujuan dari penggunaan *headed bar* ini adalah untuk mengurangi kepadatan atau kemampatan tulangan yang terjadi pada sambungan balok kolom khususnya sambungan balok kolom eksterior dan untuk memberikan kemudahan dalam pelaksanaan pemasangan tulangan di lapangan.

Bearing plate yang menggantikan kait standar berperan untuk menahan gaya tarik yang terjadi pada pengankuran tulangan, gaya tarik yang terjadi dapat

diantisipasi dengan mengkombinasikan tahanan yang dihasilkan oleh ikatan/lekatan antara baja tulangan dengan beton dan juga area *bearing plate*.



Gambar 1.5 Perbandingan Bentuk Antara *Hooked* dan *Headed Bars* (*Anchorage Behaviour of Headed Performance*, M. K. Thompson, dkk)

Pengurain gaya yang terjadi akibat penggunaan *headed bar* dapat dilakukan dengan pendekatan analogi *strut-tie* dimana *bar heads* diklasifikasikan sebagai Nodal C-C-T. Model *strut-tie* sendiri terdiri dari *concrete compression struts, steel tension ties, and joint/nodal zone*. Model *struts* mewakili komponen daerah tekan dan model *tie* mewakili daerah tarik. Hal ini sama seperti *headed bar* karena *bar heads* berfungsi sebagai tahanan untuk mengurangi gaya tarik yang akan menghasilkan *compression field* dan *bearing plate* yang nantinya akan menjadi *nodal zone*.

1.2 Inti Permasalahan

Desain bangunan SRPMK memiliki persyaratan *detailing* yang lebih ketat, rapat, dan padat sehingga menimbulkan kesulitan pada saat konstruksi khususnya pada daerah sambungan balok kolom. Pendetailan tulangan merupakan salah satu prinsip dasar yang perlu diperhatikan dalam perencanaan dan pelaksanaannya di

lapangan, hal ini dikarenakan *detailing* memiliki peran penting agar struktur bangunan dapat memberikan performa yang baik saat memikul beban gempa.

Transfer gaya yang terjadi pada beton bertulang hanya mengandalkan friksi dan adhesi yang dihasilkan oleh interaksi permukaan baja tulangan dan beton. Maka dari itu, agar dapat memenuhi kekuatan untuk memikul gaya yang terjadi pengankuran baja tulangan juga harus memiliki panjang penyaluran yang cukup.

Sambungan balok kolom merupakan bagian penting dalam suatu struktur bangunan beton bertulang sehingga desain pada daerah tersebut perlu diatur sedemikian rupa agar dapat memberikan kinerja yang baik. Daerah tersebut tidak boleh gagal terlebih dahulu terutama pada saat beban gempa bekerja, karena bagian tersebutlah yang akan menerima gaya gempa lebih besar dibandingkan yang lain.

Beberapa penelitian telah dilakukan, sebagian besar dilakukan untuk mempelajari mekanisme pengankuran dengan menggunakan *headed bar*. Salah satu uji eksperimental dilakukan oleh Irvan MS, dalam tesisnya yang berjudul *Experimental Study on The Performance of Headed Anchorage Bar in Beam Column Joints*. Pengujian yang dilakukan dengan membuat spesimen benda uji sambungan balok kolom yang menyerupai huruf "T", dimana posisi sambungan berada di sambungan eksterior. Dimensi benda uji balok dan kolom berasal dari prototipe struktur, yang mewakili bangunan khas di daerah dengan resiko gempa yang tinggi. Spesimen diposisikan dengan kolom dalam posisi horizontal dan balok dalam posisi vertikal. Penelitian difokuskan pada kegagalan balok lentur.

Analisis tegangan tarik dan tekan yang terjadi dalam sambungan balok kolom pada spesimen benda uji tersebut akan dipelajari dengan melakukan

pemodelan dan analisis nonlinear menggunakan program berbasis metode elemen hingga, ATENA 3D. Hasil dari analisis program kemudian akan dibandingkan dengan hasil uji eksperimental yang sudah dilakukan oleh Irvan MS. Mekanisme penguraian gaya tekan tarik pada sambungan balok kolom juga akan dipelajari dengan pendekatan analogi *strut-tie*.

1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan tesis ini adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan sambungan balok kolom eksterior yang merupakan spesimen benda uji dari uji eksperimental yang telah dilakukan oleh Irvan MS dengan menggunakan program ATENA 3D dan membandingkan hasil analisis program dan uji eksperimental.
2. Mempelajari mekanisme penguraian gaya tekan tarik akibat penggunaan sistem pengankuran *headed bar* pada sambungan balok kolom eksterior yang dibebani pembebanan monotonik dengan analogi *strut and tie*.

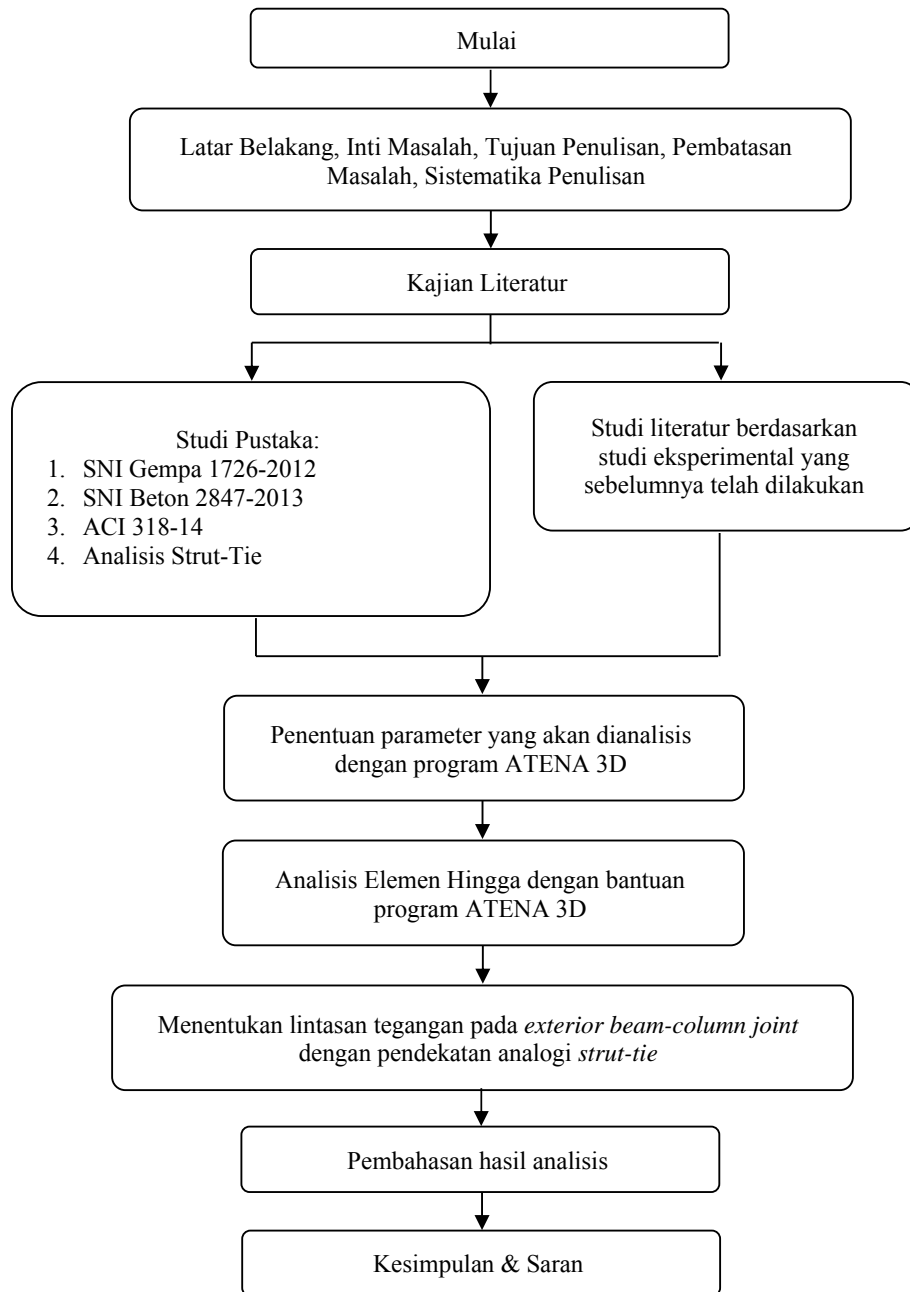
1.4 Pembatasan Masalah

Untuk membatasi pembahasan pada tesis ini agar tidak terlalu luas, maka pemodelan dan analisis elemen hingga yang akan dilakukan terbatas pada hal-hal sebagai berikut:

1. Pemodelan sambungan balok kolom yang dianalisis adalah sambungan balok kolom eksterior. Dimensi model balok kolom menggunakan data dari tesis dengan judul *Experimental Study on The Performance of Headed Anchorage Bar in Beam-Column Joints*, oleh Irvan MS.

2. Data pemodelan sambungan balok kolom adalah sebagai berikut:
 - a. Mutu beton (f_c') yang digunakan adalah 31.12 MPa.
 - b. Mutu baja tulangan yang digunakan adalah hasil uji tarik tulangan, yaitu tulangan longitudinal kolom D25 f_y : 460 MPa dan F_u : 620 MPa, *Headed Bar* D22 f_y : 446 MPa dan F_u : 651 MPa, dan *Hooked Bar* D22 f_y : 445 MPa dan F_u : 632 MPa.
 - c. Ukuran penampang kolom = 400 mm x 450 mm dengan panjang 2300 mm dan penampang balok = 250 mm x 350 mm dengan panjang 2000 mm.
 - d. Diameter tulangan lentur yang dipakai untuk kolom adalah 25 mm, diameter *headed bar* yang dipakai adalah 22 mm. *Headed bar* diaplikasikan pada elemen balok.
3. Ikatan antara tulangan dan beton (*bond*) diasumsikan melekat sempurna (*fully bonded*).
4. Pembebanan yang diberikan pada balok ada 2 (dua), yaitu pembebanan monotonik dan siklik, sedangkan kolom diberikan beban aksial sebesar 40 ton.
5. Pemodelan dan analisis spesimen balok kolom akan dilakukan dengan bantuan program ATENA 3D.
6. Ada dua Spesimen sambungan balok kolom yang akan dimodelkan, yaitu model sambungan balok kolom dengan pengankuran *headed bar* yang diberi nama HD-D22 dan spesimen model yang menggunakan pengankuran konvensional atau *hooked bar* yang selanjutnya akan disebut HK-D22.

1.5 Metodologi Penelitian



Gambar 1.6 Diagram Alir Tesis

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan terdiri atas beberapa bab yaitu:

1. BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang tesis ini secara umum yang berisis: latar belakang, inti permasalahan, rumusan masalah, tujuan penulisan, dan pembatasan masalah.

2. BAB 2 KAJIAN LITERATUR

Bab ini berisi kajian literatur yang berkaitan dengan pokok permasalahan. Kajian literatur dilakukan untuk mempelajari berbagai macam penelitian dan studi eksperimental mengenai perilaku dan performa dari *headed anchorage bar*. Kajian literatur berupa buku dan jurnal penelitian yang telah dipublikasikan.

3. BAB 3 METODOLOGI PEMODELAN STRUKTUR

Bab ini berisikan tentang parameter yang digunakan untuk memodelkan struktur dalam program ATENA 3D

4. BAB 4 STUDI KASUS

Bab ini berisikan input yang digunakan untuk analisis dalam program ATENA 3D.

5. BAB 5 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan hasil analisis dari program ATENA 3D dan menguraikan gaya tekan dan tarik dengan pendekatan analogi *strut and tie*.

6. BAB 6 PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran.