

**SKRIPSI**

**STUDI PERBANDINGAN HASIL UJI NUMERIK  
MODEL HUBUNGAN BALOK KOLOM DENGAN  
HASIL UJI EKSPERIMENTAL**



**SONATHA CHRISTIANTO  
NPM : 2013410088**

**PEMBIMBING : Dr. Djoni Simanta**

**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  
JANUARI 2017**

**SKRIPSI**

**STUDI PERBANDINGAN HASIL UJI NUMERIK  
MODEL HUBUNGAN BALOK KOLOM DENGAN  
HASIL UJI EKSPERIMENTAL**



**SONATHA CHRISTIANTO  
NPM : 2013410088**

**BANDUNG, 11 JANUARI 2017**

**PEMBIMBING**

**Dr. Djoni Simanta**

**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  
JANUARI 2017**

## PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Lengkap : Sonatha Christianto

NPM : 2013410088

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “**STUDI PERBANDINGAN HASIL UJI NUMERIK MODEL HUBUNGAN BALOK KOLOM DENGAN HASIL UJI EKSPERIMENTAL**” adalah karya ilmiah yang bebas plagiat. Jika dikemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Bandung, 11 Januari 2017



Sonatha Christianto

2013410088

# **STUDI PERBANDINGAN HASIL UJI NUMERIK MODEL HUBUNGAN BALOK KOLOM DENGAN HASIL UJI EKSPERIMENTAL**

Sonatha Christianto  
NPM : 2013410088

Pembimbing : Dr. Djoni Simanta

**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  
JANUARI 2017**

## **ABSTRAK**

Hubungan balok kolom merupakan salah satu bagian penting dalam menjamin stabilitas struktur rangka pemikul momen. Seiring dengan perkembangan teknologi program komputer berbasis metode elemen hingga, perilaku hubungan balok kolom dapat dianalisis secara numerik. Uji numerik memiliki biaya dan waktu yang lebih rendah dibandingkan uji eksperimental. Dalam skripsi ini, uji numerik dilakukan terhadap dua hubungan balok kolom interior satu arah berdasarkan uji eksperimental oleh Saddam M. Ahmed. Uji dilakukan dengan menggunakan Program Atena 3D yang terbagi menjadi tiga fungsi utama, yaitu pre-processing, analisis, dan post-processing. Beton dimodelkan sebagai elemen solid, sedangkan tulangan baja sebagai elemen batang diskret. Hubungan antara tulangan baja dengan beton dimodelkan melekat sempurna. Pelat memiliki pengaruh yang signifikan pada hasil uji numerik maupun uji eksperimental. Hasil analisis dari pembebanan siklik menunjukkan adanya perbedaan perilaku yang signifikan antara hasil uji eksperimental dengan numerik. Namun, hasil uji numerik mampu menghasilkan nilai moment puncak dan rotasi puncak yang terjadi pada uji eksperimental. Pada Spesimen J perbedaan terbesar moment puncaknya hanya 3,7 kNm (9,56%), sedangkan pada Spesimen JS sebesar -0,7 kNm (-1,87%).

Kata Kunci : Hubungan Balok Kolom Beton Bertulang, Metode Elemen Hingga, Analisis Non-Linier Atena 3D

# **COMPARATIVE STUDY BETWEEN NUMERICAL TEST RESULTS BEAM-COLUMN JOINT MODEL WITH EXPERIMENTAL TEST RESULTS**

Sonatha Christianto  
NPM : 2013410088

Advisor : Dr. Djoni Simanta

**PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY  
DEPARTEMENT OF CIVIL ENGINEERING**  
(Accredited SK BAN-PT Nomor: 227/SK/BAN-PT/Ak-XVI/S/XI/2013)  
**BANDUNG  
JANUARY 2017**

## **ABSTRACT**

Beam Column Joint is one of important element to ensure stability of moment resisting frame. Along with the developments in program technology based on finite element method, behaviour of beam column joint can be analysis numerically. Numerical test needs lower cost and money, than experimental test. In this study, numerical test is conducted on two interior one way beam column joint that have been tested experimentally by Saddam M. Ahmed. Numerical test is conducted using Atena 3D program which has three main functions: pre-processing, analysis and post-processing. Concrete is modeled as solid element, while steel reinforcement as discrete truss element. Connection between steel reinforcement and concrete is modeled with perfect connection. The slab has significant effect on the result of numerical test and experimental test. The result from cyclic loading analysis shows significant differences on behaviour with experimental test results. On J Secimen peak moment maksimum different is just 3,7 kNm (9,56%), but on JS Specimen is - 0,7 kNm (-1,87%).

Keywords : Reinforced Concrete Beam Column Joint, Finite Element Method, Non-Linear Analysis, Atena 3D

## PRAKATA

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas kasih karunia, berkat, rahmat, dan pimpinan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *Studi Perbandingan Hasil Uji Numerik Model Hubungan Balok Kolom dengan Hasil Uji Experimental*. Skripsi ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat S-1 Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan.

Dalam penyusunan skripsi ini tidak sedikit hambatan yang dihadapi, akan tetapi berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berberbagai pihak, skripsi ini dapat diselesaikan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Bapak Dr. Djoni Simanta selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu dan dengan sabar memberikan pengarahan, bimbingan, ilmu, serta dorongan selama penyusunan skripsi ini. Selama penyusunan skripsi ini, wawasan dan keilmuan penulis menjadi bertambah dan memahami banyak hal baru.
2. Ibu Lidya Fransisca Tjong, Ir. M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Dr. Johannes Adhijoso Tjondro selaku dosen penguji yang memberikan bimbingan, ilmu, dan pengarahan selama masa perkuliahan dan penulisan skripsi ini.
4. Seluruh staf dosen Jurusan Teknik Sipil yang telah memberikan ilmu kepada penulis. Pada kesempatan ini juga penulis mengucapkan terimakasih kepada staf tata usaha dan karyawan Jurusan Teknik Sipil.
5. Papi, Mami, Vina, dan Nia yang selalu memberikan kasih sayang, dukungan, doa, dan semangat kepada penulis.
6. Alvianti, kekasih tersayang yang selalu menasihati, memberikan saran, menyayangi, dan memberikan dorongan semangat kepada penulis.
7. Teman-teman seperjuangan, yaitu Andreas Gunawan dan Jeremy Budiono yang menjadi tempat bertukar pikiran selama semester terakhir. Selain itu

Willy, Bobby, Ken, Alvan, Jansen, Danielson, Aldrich, Rianky, dan Dennis Buddy Saputra yang selalu menghibur penulis dengan tawa dan canda.

8. Sipil Unpar 2013 yang telah menjadi teman, sahabat, dan keluarga bagi penulis selama menempuh pendidikan S-1 di Jurusan Teknik Sipil ini selalu memberikan dukungan, motivasi, dan semangat kepada penulis dalam menghadapi masalah dalam penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan masih jauh dari sempurna. Maka dari itu, penulis mengharapkan adanya saran dan kritik yang membangun dari pembaca. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan menambah wawasan bagi orang-orang yang membacanya.

Bandung, Januari 2017

Sonatha Christianto



NPM 2013410088

# DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	ii
PRAKATA .....	iii
DAFTAR ISI .....	v
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Inti Permasalahan .....	5
1.3. Tujuan Penulisan .....	6
1.4. Pembatasan Masalah .....	6
1.5. Metode Penulisan .....	9
1.6. Sistematika Penulisan .....	11
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	12
2.1 Uji Eksperimental oleh Saddam M. Ahmed, MSc .CE Dari Makalah yang Berjudul <i>Testing and Evaluation of Reinforced Concrete Beam-Column-Slab     joint.</i> 12	
2.1.1. Pendahuluan Makalah .....	12
2.1.2. Pembatasan Masalah Makalah .....	12
2.1.3. Tujuan Penelitian Makalah .....	13
2.1.4. Model Benda Uji .....	13
2.2 Material Beton .....	13



2.2.1.	Kekuatan Tekan Beton .....	14
2.2.2.	Kekuatan Tarik Beton .....	15
2.2.3.	Rasio Poisson .....	16
2.2.4.	Modulus Elastis .....	17
2.2.5.	Perilaku Tegangan Biaksial.....	19
2.2.6.	Perilaku Tegangan Triaksial .....	20
2.3	Material Tulangan Baja .....	20
2.3.1.	Perilaku Tegangan Monotonik.....	21
2.3.2.	Perilaku Tegangan Berulang.....	22
2.3.3.	Perilaku Tegangan Berputar.....	23
2.4	Metode Elemen Hingga.....	24
2.5	Finite Element Mesh .....	25
2.6	Non-linieritas.....	27
2.7	Atena 3D v.3.3.2.....	27
<b>BAB 3 PEMODELAN BETON BERTULANG PADA ATENA 3D V.3.3.2 .....</b>		<b>29</b>
3.1.	Analisis Nonlinier pada Program Atena 3D.....	29
3.2.	Pemodelan Material Beton pada Atena 3D .....	29
3.2.1.	Constitutive Model SBETA (CCSBeta Material) .....	29
3.2.2.	Fracture-Plastic Constitutive Model .....	40
3.3.	Pemodelan Material Tulangan Baja pada Atena 3D .....	41
3.3.1.	Hubungan Tegangan-Regangan Bilinier.....	42
3.3.2.	Hubungan Tegangan-Regangan Multilinier.....	42
3.4.	Pemodelan Elemen Beton pada Atena 3D .....	43
3.5.	Pemodelan Tulangan Baja pada Atena 3D .....	44
3.6.	<i>Finite Element Mesh</i> pada Atena 3D.....	45
3.7.	Parameter Solusi Nonlinier pada Atena 3D.....	46

3.7.1.	Metode Newton-Raphson Penuh.....	46
3.7.2.	Metode Newton-Raphson Modifikasi .....	48
BAB 4	STUDI KASUS.....	50
4.1.	Model J-Atena dan Model JS-Atena .....	50
4.2.	Pemodelan Benda Uji.....	50
4.3.	Data Pemodelan Uji Eksperimental .....	51
4.4.	Data Pembebanan .....	54
4.5.	Data Material Uji Numerik.....	55
4.6.	Langkah Pengujian Numerik.....	58
4.6.1.	<i>Pre-Processing</i> .....	58
4.6.2.	<i>Analysis Progress</i> .....	65
4.6.3.	<i>Post-Processing</i> .....	66
BAB 5	PEMBAHASAN HASIL ANALISIS NON-LINIER HUBUNGAN BALOK KOLOM .....	67
5.1.	Hasil Uji Eksperimental Hubungan Balok Kolom .....	67
5.2.	Hasil Uji Numerik Hubungan Balok Kolom.....	70
5.3.	Perbandingan Kekuatan Hasil Uji Eksperimental dengan Hasil Uji Numerik.....	77
5.3.1.	Perbandingan Kurva Moment-Rotasi Spesimen J dengan Model J- Atena	77
5.3.2.	Perbandingan Kurva Moment-Rotasi Spesimen JS dengan Model JS- Atena	79
5.4.	Perbandingan Degradasi Kekakuan.....	82
5.5.	Perbandingan Daktilitas Rotasi .....	84
5.6.	Perbandingan Disipasi Energi .....	85
5.7.	Perbandingan Retakan Hasil Uji Eksperimental dengan Hasil Uji Numerik	87

5.7.1.	Retak pada Sambungan .....	87
5.7.2.	Retak pada Balok .....	89
5.7.3.	Retak pada Pelat .....	91
5.8.	Perbandingan Hasil Uji Siklik Beban Eksperimental dengan Hasil Uji Siklik Beban ACI 374 .....	92
5.8.1.	Perbedaan Pola Pembebanan.....	92
5.8.2.	Perbedaan Hasil Uji Siklik ACI 374 dengan Hasil Uji Numerik Model J-Atena	93
5.8.3.	Perbedaan Hasil Uji Siklik ACI 374 dengan Hasil Uji Numerik Model JS-Atena .....	95
5.9.	Perbandingan Hasil Uji Siklik dengan Uji Monotonik Numerik .....	97
5.9.1.	Perbandingan Hasil Uji Siklik dengan Uji Monotonik Numerik....	97
5.9.2.	Perbandingan Hasil Uji Siklik dengan Uji Monotonik Numerik dengan Pelepasan Beban .....	98
5.9.3.	Perbandingan Hasil Uji Siklik dengan Hasil Pengujian Beban Drift 2,5%	101
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN .....		103
6.1	Kesimpulan.....	103
6.2	Saran .....	104
DAFTAR PUSTAKA .....		106
LAMPIRAN.....		108

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

ACI	= American Concrete Institute
$b$	= Lebar balok
$c$	= Kekuatan tekan beton pada beton retak
$D$	= Diameter silinder
$E_c$	= Modulus elastisitas
EN	= Eurocode
$E_{ci}$	= Modulus diasosiasikan dengan arah $i$
$E_c^s$	= Modulus sekan beton
$E_{tan}$	= Modulus tangen
$E_0$	= Modulus awal
$f_c'$	= Kuat tekan beton
$f_{cc}$	= Kekuatan tekan aksial specimen terkekang ' <i>confined</i> '
$f_c^{ef}$	= Tegangan tekan efektif beton
$f_{c_{cu}}$	= Kekuatan beton kubus
$f_t$	= Kuat tarik beton
$f_{l1}$	= Tekanan lateral pembatas
$f_t^{ef}$	= Tegangan tarik efektif beton
$f_r$	= Modulus keruntuhan
$f_u$	= Kuat ultimate baja
$f_y$	= Kuat leleh baja
$f(p)$	= Vektor gaya dalam titik
$G_f$	= Energi retak yang dibutuhkan untuk membentuk sebuah area dari retak tegangan bebas
$h$	= Tinggi balok
$J$	= <i>Joint</i>
$JS$	= <i>Joint with Slab</i>
$k$	= Parameter bentuk
$K(p)$	= Matriks kekakuan, berkaitan kenaikan beban untuk peningkatan deformasi
$L$	= Panjang
$M$	= Momen maksimum
NZS	= New Zealand Standards
$q$	= Vektor beban titik total

$P$	= Gaya tekan maksimum
$p$	= Deformasi struktur sebelum peningkatan beban
$r_{ec}$	= Faktor reduksi kekuatan tekan pada arah prinsipal 2 akibat tegangan tarik pada arah prinsipal 1
$w$	= Pembukaan retak
$w_c$	= Pembukaan retak pada pelepasan lengkap tegangan
$w_{conc}$	= Berat jenis beton
$w_d$	= Deformasi plastis
$x$	= Regangan ternormalisasi
$\phi_u$	= Rotasi ultimit
$\phi_y$	= Rotasi leleh
$\gamma_{ec}$	= Faktor reduksi kekuatan tekan pada arah principal 2 akibat tegangan tarik pada arah prinsipal 1
$\gamma_{et}$	= Faktor reduksi kekuatan tekan pada arah principal 2 akibat tegangan tarik pada arah prinsipal 2
$\varepsilon$	= Regangan
$\varepsilon^{eq}$	= Regangan uniaxial ekuivalen
$\varepsilon_c$	= Regangan pada tegangan puncak
$\varepsilon_d$	= Regangan tekan pada tegangan nol
$\varepsilon_{lim}$	= Regangan ultimit
$\varepsilon_u$	= Regangan ultimit baja
$\varepsilon_y$	= Regangan leleh baja
$\mu$	= Daktilitas rotasi
$\nu$	= Ratio Poisson
$\sigma$	= Tegangan normal pada retak
$\sigma_{ci}$	= Tegangan
$\sigma_{c1}, \sigma_{c2}$	= Tegangan principal beton
$\sigma_c^{ef}$	= Tegangan uniaksil beton
$\sigma_c^{ef}$	= Tegangan efektif beton
$\sigma_c^{ef}$	= Tegangan efektif beton
$\sigma_{st}$	= Tegangan tarik
$\sigma_y$	= Tegangan leleh
$\sigma_u$	= Tegangan ultimit
$\sigma_{ij}^n, \sigma_{ij}^{n-1}$	= Tegangan pada kondisi ke-n
$\Delta\varepsilon_{kl}$	= Regangan plastis inkremental

$\Delta\varepsilon_{kl}$  = Regangan peretakan berdasarkan material yang digunakan  
 $\Delta p$  = Peningkatan deformasi karena pembebanan bertingkat

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 (a) Keruntuhan struktur akibat kegagalan hubungan balok kolom, Bangunan Kaiser Permanente, Gempa Norridge, 1994. Foto oleh G. Edstrom. (b) Perbesaran gambar lantai 2.	2
Gambar 1. 2 (a) Keruntuhan sebagian bangunan akibat kegagalan hubungan balok kolom di Izmit, Turki, 17 Agustus 1999. (b) Perbesaran hubungan balok kolom lantai 3. (c) Perbesaran hubungan balok kolom lantai.	3
Gambar 1. 3 Geometri hubungan balok kolom (ACI 352)	5
Gambar 1. 4 (a) dan (b) Geometri hubungan balok kolom	7
Gambar 1. 5 (a) dan (b) Detail penulangan hubungan balok kolom	8
Gambar 1. 6 Pola pembebanan siklik	9
Gambar 1. 7 Diagram alir penelitian	10
Gambar 2. 1 Kurva tegangan-regangan silinder beton hasil pembebanan tekan uniaksial (Park dan Paulay, 1974)	14
Gambar 2. 2 Uji silinder belah (a) Konfigurasi pengujian, (b) Distribusi tegangan horizontal, (c) hasil pengujian (Hassoun, 2012)	16
Gambar 2. 3 Hubungan regangan arah horizontal, longitudinal, dan volume	17
Gambar 2. 4 Modulus elastis beton (Park dan Paulay, 1974)	17
Gambar 2. 5 Idealisasi tekan beton Hognestad (Park dan Paulay, 1974)	19
Gambar 2. 6 Tegangan biaxial beton	19
Gambar 2. 7 Tegangan triaxial beton	20
Gambar 2. 8 Kurva tegangan-regangan baja	21
Gambar 2. 9 Kurva tegangan-regangan baja titik kelelahan atas dan bawah (Park dan Paulay, 1974)	22
Gambar 2. 10 Kurva tegangan-regangan berulang material baja (Park dan Paulay, 1974)	23
Gambar 2. 11 (a) Efek Bauschinger pada Baja dengan pembebanan berputar (b) idealisasi elastis-plastis sempurna pada baja dengan pembebanan berputar	23

Gambar 2. 12 Kurva tegangan-regangan baja dengan pembebanan berputar (a) kurva pembebanan berputar (b) kurva yang dipisahkan (c) amplop kurva monotonik (Park dan Paulay, 1974)	24
Gambar 2. 13 Mesh elemen hingga (Dill, 2011)	25
Gambar 2. 14 Jenis mesh tulangan baja (Kurniawan. 2015)	26
Gambar 3. 1 Hubungan tegangan-regangan uniaxial beton (Cervenka, 2007)	31
Gambar 3. 2 Dalil pembukaan retak eksponensial (Cervenka, 2007)	32
Gambar 3. 3 Dalil pembukaan retak linier (Cervenka, 2007)	33
Gambar 3. 4 Penghalusan Linier Berdasarkan Regangan Lokal (Cervenka, 2007)	34
Gambar 3. 5 Diagram tegangan-regangan tekan beton (Cervenka, 2007).	35
Gambar 3. 6 Dalil perpindahan pelunakan tekan (Cervenka, 2007).	37
Gambar 3. 7 Kegagalan kondisi tegangan biaxial (Cervenka 2007).	37
Gambar 3. 8 Kegagalan tegangan biaxial tarik-tekan (Cervenka, 2007).	39
Gambar 3. 9 Hubungan tegangan-regangan bilinear tulangan (Cervenka, 2007)	42
Gambar 3. 10 Hubungan tegangan-regangan multilinear tulangan (Cervenka, 2007).	43
Gambar 3. 11 Sudut arah tulangan tersebar (Cervenka, 2007).	43
Gambar 3. 12 Model elemen hingga elemen solid (Cervenka, 2007).	44
Gambar 3. 13 Model elemen hingga elemen batang (Cervenka, 2007)	45
Gambar 3. 14 <i>Mesh</i> tulangan diskret (Cervenka, 2007)	46
Gambar 3. 15 Metoda Newton-Raphson Penuh (Cervenka, 2007)	48
Gambar 3. 16 Metoda Newton-Raphson Modifikasi (Cervenka, 2007)	49
Gambar 4. 1 Pemodelan struktur	51
Gambar 4. 2 Model sambungan tampak samping	52
Gambar 4. 3 Model sambungan tampak atas	52
Gambar 4. 4 Penulangan sambungan balok kolom	53
Gambar 4. 5 Penulangan pelat Spesimen JS	53
Gambar 4. 6 (a) dan (b) detail penulangan balok dan kolom	54
Gambar 4. 7 Pola beban siklik	54
Gambar 4. 8 (a) dan (b) Material beton	55
Gambar 4. 9 Material pelat baja	56



Gambar 4. 10 Input material <i>Reinforcement</i>	57
Gambar 4. 11 Input parameter Menengotto-Pinto <i>Cycling Reinforcement</i>	57
Gambar 4. 12 Material yang digunakan	58
Gambar 4. 13 (a) dan (b) Macroelement hubungan balok kolom	59
Gambar 4. 14 (a) dan (b) Layout tulangan	59
Gambar 4. 15 Input <i>Load Cases</i> reaksi perletakkan	60
Gambar 4. 16 Hasil input reaksi perletakkan Model J-Atena	60
Gambar 4. 17 (a) dan (b) Input beban axial	61
Gambar 4. 18 (a) dan (b) Beban perpindahan 1mm	61
Gambar 4. 19 (a) dan (b) Hasil mesh model	62
Gambar 4. 20 Parameter solusi Newton-Raphson	63
Gambar 4. 21 Perbedaan input Parameter solusi Newton-Raphson Modifikasi	63
Gambar 4. 22 Penambahan analisis step	64
Gambar 4. 23 Penentuan titik pantau	65
Gambar 4. 24 Pengaturan grafik hasil analisis	66
Gambar 4. 25 Post-processing	66
Gambar 5. 1 Kurva histeresis hasil uji eksperimental	68
Gambar 5. 2 Retak pada sambungan	69
Gambar 5. 3 Sendi plastis pada balok utara	70
Gambar 5. 4 Retak pada pelat diakhir pengujian	70
Gambar 5. 5 Kurva histeresis hasil uji numeric	71
Gambar 5. 6 (a) dan (b) Tegangan normal tulangan	72
Gambar 5. 7 (a) dan (b) Posisi dan lebar retak	74
Gambar 5. 8 (a) dan (b) Retak pada sambungan hasil uji numerik	75
Gambar 5. 9 Pola retak pada pelat	77
Gambar 5. 10 Kurva histeresis hubungan balok kolom tanpa pelat	78
Gambar 5. 11 Kurva histeresis hubungan balok kolom dengan pelat	80
Gambar 5. 12 Kekakuan <i>peak to peak</i> (Kurniawan, 2015)	82
Gambar 5. 13 Degradasi kekakuan setiap siklus pembebanan	83
Gambar 5. 14 Hubungan daktilitas dengan kekakuan	85
Gambar 5. 15 Energi disipasi kumulatif setiap siklus	86
Gambar 5. 16 Pola pembebanan siklik uji eksperimental oleh Saddam	92

Gambar 5. 17 Pola pembebanan siklik ACI 374	92
Gambar 5. 18 Hasil uji siklik <i>loading protocol</i> ACI 374 Model J-Atena	93
Gambar 5. 19 Waktu kegagalan Model J-Atena	94
Gambar 5. 20 Hasil uji siklik <i>loading protocol</i> ACI 374 Model JS-Atena	95
Gambar 5. 21 Waktu kegagalan Model JS-Atena	96
Gambar 5. 22 Perbandingan pembebanan siklik dengan monotonik hubungan balok kolom tanpa pelat (a) dengan numerik dan (b) dengan eksperimental	97
Gambar 5. 23 Perbandingan pembebanan siklik dengan monotonik hubungan balok kolom dengan pelat (a) dengan numerik dan (b) dengan eksperimental	98
Gambar 5. 24 Perbandingan hasil uji monotonik dengan ' <i>unloading</i> ' dengan hasil uji numerik Model J-Atena	99
Gambar 5. 25 Perbandingan hasil uji monotonik dengan ' <i>unloading</i> ' dengan hasil uji numerik Model JS-Atena	100
Gambar 5. 26 Pembebanan siklus drift 2,5% dan 5% pada Model J-Atena dibandingkan dengan (a) uji numerik dan (b) uji eksperimental	101
Gambar 5. 27 Pembebanan siklus drift 2,5% dan 5% pada Model JS-Atena dibandingkan dengan (a) uji numerik dan (b) uji eksperimental	102

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Nilai penentu kurva hiperbolik	39
Tabel 3. 2 Parameter <i>default</i> SBETA Constitutive Model (Cervenka, 2007).	39
Tabel 4. 1 Properti tulangan	51
Tabel 4. 2 Input pembebanan siklik	64
Tabel 5. 1 Rangkuman koordinat histeresis hubungan balok kolom tanpa pelat	79
Tabel 5. 2 Rangkuman koordinat histeresis hubungan balok kolom tanpa pelat	81
Tabel 5. 3 Kekakuan setiap siklus pembebanan	82
Tabel 5. 4 Daktilitas terpakai benda uji hingga drift 5%	84
Tabel 5. 5 Energi disipasi benda uji setiap siklus	86
Tabel 5. 6 Perbandingan pola retak hubungan balok kolom Spesimen J	88
Tabel 5. 7 Perbandingan pola retak hubungan balok kolom Spesimen JS	88
Tabel 5. 8 Perbandingan pola retak balok Spesimen JS	90
Tabel 5. 9 Perbandingan pola retak balok Spesimen JS	90
Tabel 5. 10 Perbandingan pola retak pelat Spesimen JS	91

## **DAFTAR LAMPIRAN**

LAMPIRAN 1	Tabel Beban – Perpindahan Model J-Atena.....	109
LAMPIRAN 2	Tabel Beban – Perpindahan Model JS-Atena .....	119

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Di zaman modern ini, pertumbuhan jumlah penduduk yang pesat di area perkotaan meningkatkan kebutuhan akan lahan yang pesat pula. Akan tetapi, ketersediaan lahan untuk tempat tinggal di daerah perkotaan sangatlah terbatas. Bangunan bertingkat adalah solusi yang tepat untuk menyediakan tempat tinggal di daerah perkotaan yang lahannya terbatas.

Di Indonesia bangunan bertingkat biasanya terdapat di kota-kota metropolis seperti Jakarta, Depok, Tangerang, Bekasi, Bandung, Medan, dan Surabaya. Biasanya struktur bangunan bertingkat ini menggunakan struktur beton bertulang. Struktur beton bertulang disusun oleh beberapa komponen struktur, diantaranya pondasi, balok, kolom, dan pelat. Setiap komponen tersebut harus dirancang untuk memikul gaya dalam yang diakibatkan adanya beban luar yang bekerja pada bangunan. Salah satu bagian yang penting pada struktur bangunan beton bertulang adalah hubungan balok kolom.

Hubungan balok kolom merupakan bagian yang penting, karena pada hubungan balok kolom terjadi transfer beban yang bekerja pada balok ke kolom. Kemudian beban tersebut ditransferkan melalui kolom ke pondasi. Oleh karena itu, hubungan balok kolom haruslah dipastikan dapat memikul beban yang direncanakan, sehingga proses transfer beban dapat terjadi dengan sempurna.

Pada awalnya, peraturan struktur bangunan beton bertulang hanya didesain untuk menahan beban gravitasi saja. Akan tetapi, kerap kali terjadi keruntuhan bangunan yang disebabkan oleh kegagalan hubungan pada hubungan balok kolom akibat adanya beban gempa. Gempa-gempa yang menyebabkan kegagalan hubungan balok kolom diantaranya El-Ansam, Algeria, 1980; Northridge, California, 1994; Tehuacan, Mexico, 1999; Izmit, Turkey, 1999; Athens, Greece, 1999; Chi-Chi, Taiwan, 1999; dan Haiti, 2010. Kegagalan hubungan balok kolom biasanya terjadi, karena gaya geser akibat gempa yang terjadi melebihi gaya geser kapasitas hubungan balok dan kolom. Salah satu contoh dari keruntuhan gedung sebagian

yang diakibatkan kegagalan hubungan balok kolom adalah Bangunan Kaiser Permanente. Bangunan rangka pemikul momen dengan penjangkaran ke dinding pengisi era pra-1970 ini, runtuh akibat gempa Northridge 1994. Gambar 1. 1 menunjukkan bangunan Kaiser Permanente yang runtuh akibat gempa. **Gambar 1.2** menunjukkan beberapa kegagalan hubungan balok kolom dengan elemen lain rangka pemikul momentnya masih utuh, menunjukkan kegagalan hubungan balok kolom dapat dapat memicu keruntuhan bangunan (Hassan 2011).



(a)



(b)

**Gambar 1. 1** (a) Keruntuhan struktur akibat kegagalan hubungan balok kolom, Bangunan Kaiser Permanente, Gempa Northridge, 1994. Foto oleh G. Edstrom. (b) Perbesaran gambar lantai 2.



(a)

(b)



(c)

**Gambar 1. 2** (a) Keruntuhan sebagian bangunan akibat kegagalan hubungan balok kolom di Izmit, Turki, 17 Agustus 1999. (b) Perbesaran hubungan balok kolom lantai 3. (c) Perbesaran hubungan balok kolom lantai.

Untuk menghindari peristiwa kegagalan hubungan balok kolom akibat gaya gempa, disusunlah peraturan-peraturan baru untuk perencanaan bangunan tahan gempa. Pada peraturan-peraturan tersebut, disusun pula peraturan untuk

perencanaan hubungan balok kolom yang memiliki kapasitas geser. Peraturan tersebut mengatur diantaranya pemberian tulangan transversal pada daerah hubungan balok kolom dan penjangkaran tulangan longitudinal balok ke hubungan balok kolom. Peraturan yang membahas mengenai perancangan struktur beton bertulang tahan gempa diantaranya American Concrete Institute (ACI 318-08), New Zealand Standards (NZS 3101:2006), dan Eurocode 8 (EN 1998-1:2003).

Desain bangunan tahan gempa berdasarkan prinsip desain *strong column weak beam*. Berdasarkan prinsip ini, diharapkan kolom tidak mengalami kerusakan sedikit pun, namun balok diizinkan mengalami kerusakan. Setelah menerima beban gempa, sendi plastis diharapkan terjadi di balok. Hal ini bertujuan agar bangunan tidak runtuh dan dapat berdiri hingga proses evakuasi selesai. Apabila terjadi kerusakan pada hubungan balok kolom ataupun pada kolom, maka dapat terjadi keruntuhan seketika pada bangunan.

Perilaku hubungan balok kolom perlu dipelajari lebih lanjut. Cara untuk mempelajari hubungan balok kolom diantaranya dengan uji eksperimental ataupun dengan uji numerik dengan program. Uji eksperimental adalah pengujian yang menggunakan model fisik yang dibuat dilaboratorium. Uji eksperimental laboratorium terbilang lebih rumit dan mahal dibandingkan uji numerik, dikarenakan pembuatan model fisik hubungan balok kolom memerlukan waktu dan biaya yang lebih. Selain itu, pemasangan alat ukur gaya dan regangan yang rumit pada hubungan balok kolom kerap kali menjadi kendala dalam pengujian eksperimental.

Perkembangan teknologi mendorong jauh kemajuan program. Maka dari itu, uji numerik dengan program semakin dimungkinkan untuk melakukan kalkulasi yang tidak dapat diselesaikan dengan tangan. Sekarang untuk menganalisis suatu perilaku struktur dapat dilakukan menggunakan program berbasis metoda elemen hingga '*finite element method*'. Dalam ilmu teknik sipil, pengaplikasian metoda elemen hingga digunakan dalam beberapa program, diantaranya ABAQUS, ADINA, Atena, ANSYS, dll.

Analisis menggunakan program dapat menghemat waktu dan biaya untuk pembuatan model fisik. Hal ini dikarenakan, tidak perlu merakit specimen, tidak

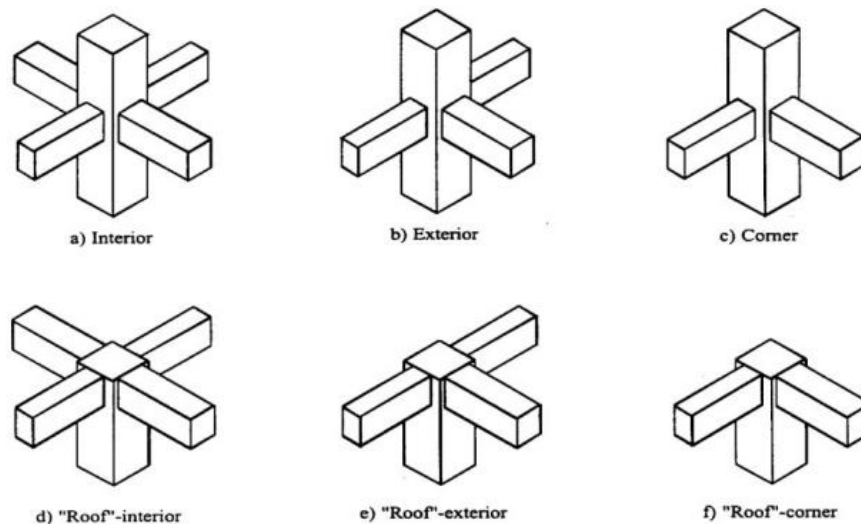


perlu menunggu umur beton siap uji, tidak perlu memasang *strain gauge*, dan tidak perlu melakukan instalasi mesin. Selain itu uji numerik dapat menghasilkan hasil yang tidak didapatkan dari uji eksperimental, diantaranya tegangan dan regangan pada setiap langkah analisis.

## 1.2. Inti Permasalahan

Hubungan balok kolom merupakan bagian terpenting dalam rangka pemikul momen untuk memastikan ketegaran struktur dalam memikul beban gempa. Keruntuhan bangunan biasanya dimulai dari bagian yang paling rawan, yakni sendi plastis pada hubungan balok kolom.

Mengacu pada ACI 352, hubungan balok kolom dikelompokkan menjadi enam jenis berdasarkan geometrinya, yaitu hubungan balok kolom interior, hubungan balok kolom eksterior, hubungan balok kolom sudut '*corner*', hubungan balok kolom interior atap '*roof-interior*', hubungan balok kolom exterior atap '*roof-exterior*', dan hubungan balok kolom sudut atap '*roof-corner*'. **Gambar 1. 3** menunjukkan pengelompokkan hubungan balok kolom berdasarkan geometri.



**Gambar 1. 3** Geometri hubungan balok kolom (ACI 352)

Sedangkan, ACI 374 mengajurkan hubungan balok kolom untuk pengujian dibagi menjadi 3, yaitu *interior one-way joint*, *exterior one-way joint*, dan *corner joint*.

Pada saat pengujian hubungan balok kolom, biasanya keberadaan pelat diabaikan. Berdasarkan ACI 374, penggunaan pelat pada model pengujian dapat diabaikan, namun pada kali ini dipelajari seberapa besar pengaruh pelat pada model pengujian hubungan balok kolom.

### 1.3. Tujuan Penulisan

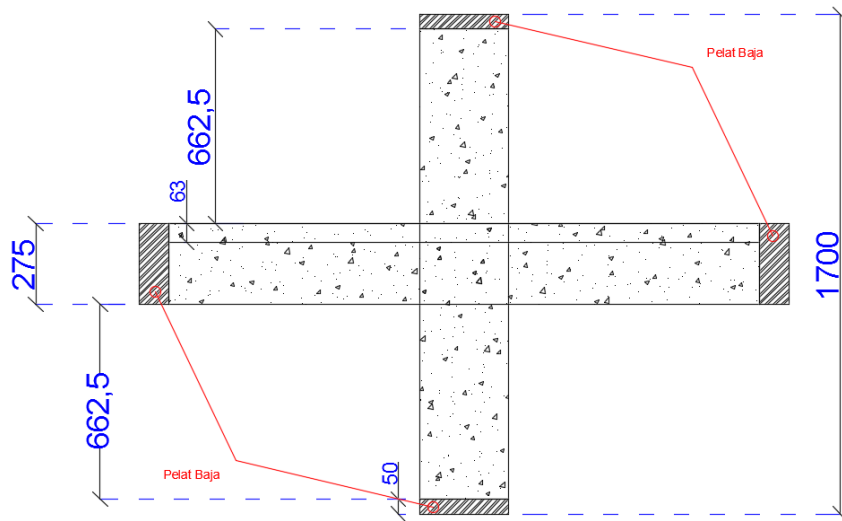
Tujuan penulisan skripsi berjudul Studi Perbandingan Hasil Uji Numerik Model Hubungan Balok Kolom dengan Hasil Uji Eksperimental adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan hubungan balok kolom tanpa pelat dan hubungan balok kolom dengan pelat menggunakan Program Atena 3D v.3.3.2.
2. Membandingkan hasil uji numerik dari program dengan hasil uji eksperimental yang disadur dari makalah yang berjudul *Testing and Evaluation Reinforced Concrete Beam-Column-Slab Joints*. Selain itu menganalisis hal-hal yang menyebabkan terjadinya perbedaan.

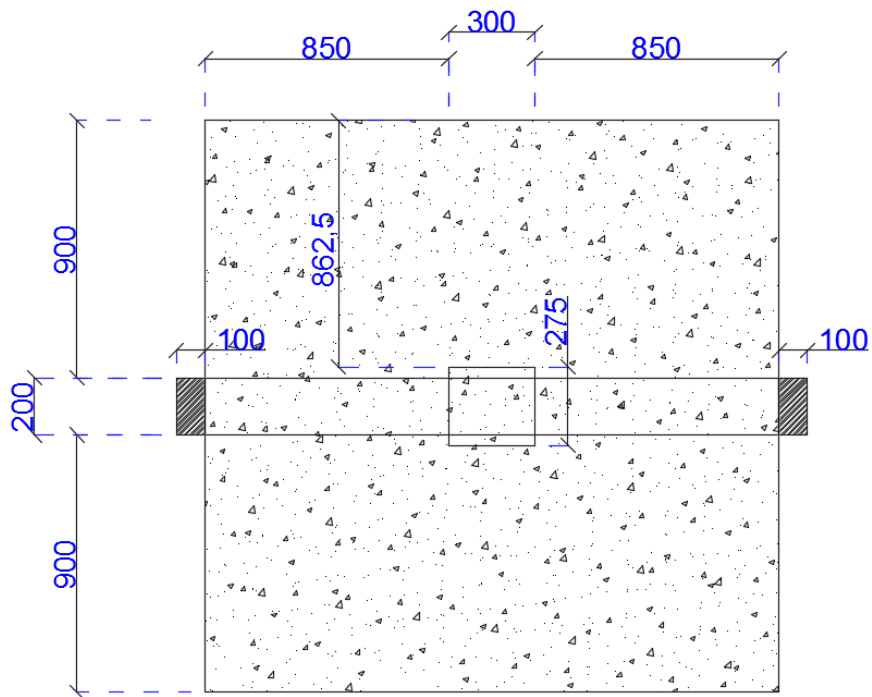
### 1.4. Pembatasan Masalah

Untuk membatasi pembahasan masalah pada skripsi ini agar tidak terlalu luas, maka uji numerik dan analisis non-linear yang dilakukan terbatas pada hal-hal sebagai berikut:

1. Pemodelan hubungan balok kolom yang dianalisis menggunakan model uji eksperimental berdasarkan makalah dari Saddam M. Ahmed yang berjudul *Testing and Evaluation of Reinforced Concrete Beam-Column-Slab Joint*.
2. Data geometri hubungan balok kolom yang digunakan ditunjukkan oleh **Gambar 1. 4**. Detail penulangan specimen hubungan balok kolom ditunjukkan oleh **Gambar 1. 5**.

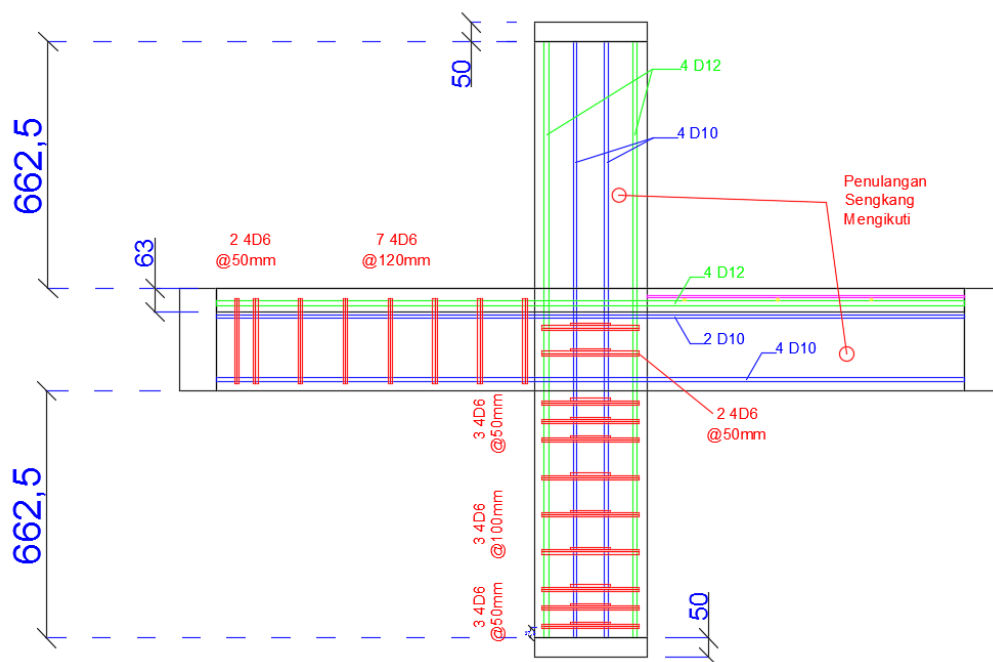


(a) Tampak samping

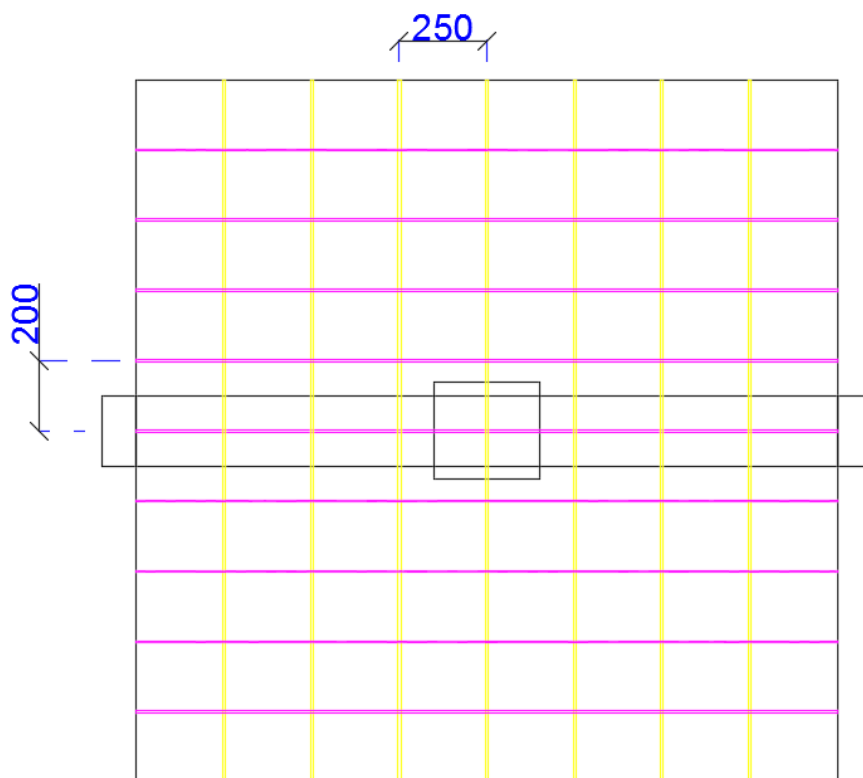


(b) Tampak atas

**Gambar 1. 4** (a) dan (b) Geometri hubungan balok kolom



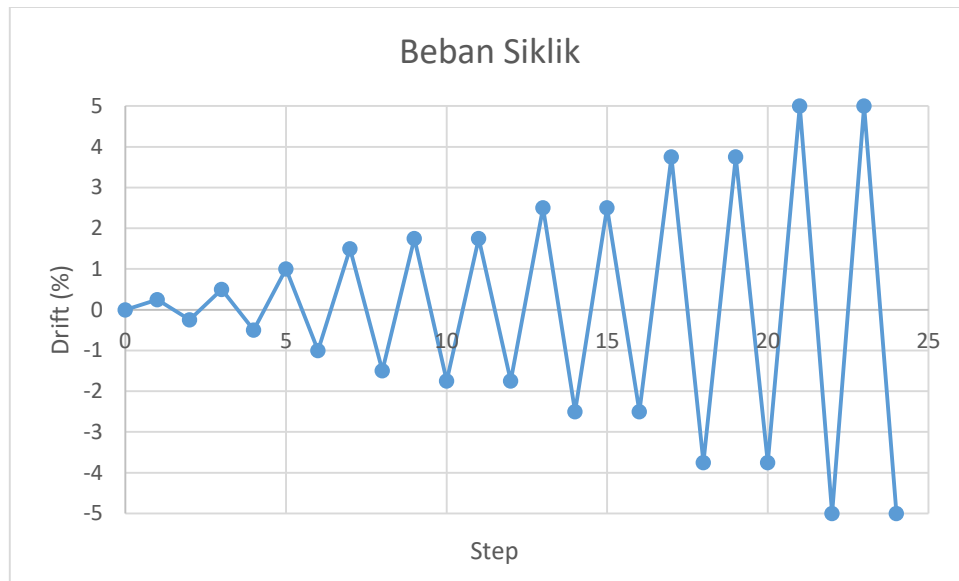
(a) Penulangan balok dan kolom



(b) Penulangan pelat

**Gambar 1. 5** (a) dan (b) Detail penulangan hubungan balok kolom

3. Pola pembebanan siklik yang digunakan ditunjukkan oleh **Gambar 1. 1**



**Gambar 1. 6** Pola pembebanan siklik

4. Pemodelan menggunakan program Atena 3D v.3.3.2.

### 1.5. Metode Penulisan

Penelitian ini dilakukan dengan 2 metode, yakni:

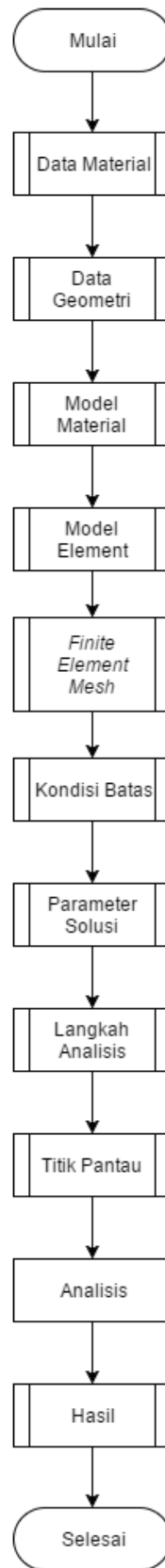
#### 1. Studi pustaka

Studi pustaka sebagai landasan teori mengacu pada buku-buku pustaka, manual dan panduan penggunaan Program Atena, makalah yang membahas mengenai hubungan balok kolom, makalah yang membahas mengenai penggunaan Program Atena pada masalah struktur beton bertulang, serta skripsi, tesis, dan disertasi yang membahas mengenai hubungan balok kolom dan juga yang membahas mengenai penggunaan program metode elemen hingga pada masalah struktur beton bertulang.

#### 2. Studi analisis

Uji numerik dilakukan dengan menggunakan bantuan Program Atena 3D.

Metodologi penelitian yang dilakukan dalam studi ini ditampilkan dalam diagram alir penelitian pada **Gambar 1. 7**.



**Gambar 1.7** Diagram alir penelitian

## **1.6. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan diperlukan agar terlaksananya penulisan skripsi yang terbagi ke dalam enam bab, yakni:

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Dalam Bab 1 dibahas latar belakang, inti permasalahan, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metoda penelitian, dan sistematika penulisan.

### **BAB 2 LANDASAN TEORI**

Dalam Bab 2 dibahas landasan teori, diantaranya mengenai tujuan penelitian disertasi, model benda uji, material beton, material tulangan baja, metoda elemen hingga, ANSYS 17.0, dan Atena 3D.

### **BAB 3 PEMODELAN BETON BERTULANG PADA ATENA 3D**

Dalam Bab 3 dibahas mengenai analisis nonlinier pada Program Atena 3D asumsi pemodelan beton, asumsi pemodelan tulangan baja, finite element mesh, dan solusi permasalahan.

### **BAB 4 STUDI KASUS**

Dalam Bab 4 dibahas mengenai geometri model hubungan balok kolom, pemodelan benda uji, data pemodelan, dan data pembebanan.

### **BAB 5 PEMBAHASAN HASIL ANALISIS HUBUNGAN BALOK KOLOM**

Dalam Bab 5 dibahas mengenai hasil uji eksperimental dan hasil uji numerik.

### **BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN**

Dalam Bab 6 dibahas simpulan dan saran dari hasil pengujian yang telah dilakukan.