

**SKRIPSI**

**UJI NUMERIK ANALISIS BEBAN DORONG SIKLIK  
PADA MODEL HUBUNGAN BALOK-KOLOM BETON  
BERTULANG EKSTERIOR CHALIORIS ET AL.  
(2008) MENGGUNAKAN PERFORM-3D**



**HANS TJAHHADI**

**NPM : 6101801014**

**PEMBIMBING : Dr. Djoni Simanta, Ir., M.T.**

**KO-PEMBIMBING : Liyanto Eddy, Ph.D.**

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

**FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL**

**(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT No. 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)**

**BANDUNG**

**JANUARI 2022**

**SKRIPSI**

**UJI NUMERIK ANALISIS BEBAN DORONG SIKLIK PADA MODEL  
HUBUNGAN BALOK-KOLOM BETON BERTULANG EKSTERIOR  
CHALIORIS ET AL. (2008) MENGGUNAKAN PERFORM-3D**



**HANS TJAHHADI**

**NPM : 6101801014**

**BANDUNG, 26 JANUARI 2022**

**PEMBIMBING**

**Dr. Djoni Simanta, Ir., M.T.**

**KO-PEMBIMBING**

**Liyanto Eddy, Ph.D.**

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

**FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL**

**(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT No. 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)**

**BANDUNG**

**JANUARI 2022**

**SKRIPSI**  
**UJI NUMERIK ANALISIS BEBAN DORONG SIKLIK**  
**PADA MODEL HUBUNGAN BALOK-KOLOM BETON**  
**BERTULANG EKSTERIOR CHALIORIS ET AL.**  
**(2008) MENGGUNAKAN PERFORM-3D**



**NAMA: HANS TJAHJADI**  
**NPM: 6101801014**

**PEMBIMBING:** Dr. Djoni Simanta, Ir., M.T.

**KO-PEMBIMBING:** Liyanto Eddy, Ph.D.

**PENGUJI 1:** Dr. Johannes Adhijoso Tjondro

**PENGUJI 2:** Helmy Hermawan Tjahjanto, Ph.D.

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**  
**FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL**  
**(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT No. 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)**  
**BANDUNG**  
**JANUARI 2022**

## PERNYATAAN

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

Nama : Hans Tjahjadi  
NPM : 6101801014  
Program Studi : Teknik Sipil  
Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa skripsi / tesis / disertasi<sup>\*)</sup> dengan judul:

**UJI NUMERIK ANALISIS BEBAN DORONG SIKLIK PADA MODEL HUBUNGAN BALOK-KOLOM BETON BERTULANG EKSTERIOR CHALIORIS ET AL. (2008) MENGGUNAKAN PERFORM-3D**

adalah benar-benar karya saya sendiri di bawah bimbingan dosen pembimbing. 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: 12 Januari 2022



Hans Tjahjadi  
6101801014

<sup>\*)</sup> coret yang tidak perlu

**UJI NUMERIK ANALISIS BEBAN DORONG SIKLIK PADA MODEL  
HUBUNGAN BALOK-KOLOM BETON BERTULANG EKSTERIOR  
CHALIORIS ET AL. (2008) MENGGUNAKAN PERFORM-3D**

Hans Tjahjadi

NPM : 6101801014

Pembimbing : Dr. Djoni Simanta, Ir., M.T.

Ko-Pembimbing : Liyanto Eddy, Ph.D.

**UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

**FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL**

**(Terakreditasi Berdasarkan SK BAN-PT No. 11370/SK/BAN-PT/AK-  
ISK/S/X/2021)**

**BANDUNG**

**JANUARI 2022**

**ABSTRAK**

Struktur bangunan yang berada di permukaan bumi suatu saat akan terdampak oleh beban seismik akibat gelombang gempa bumi. Hubungan balok-kolom menjadi kritis ketika beban seismik bekerja, menurut Chalioris *et al.* (2008) penulangan hubungan balok-kolom yang tidak memadai akan mengakibatkan keruntuhan yang bersifat rapuh. Beban seismik dapat dimodelkan sebagai beban dorong siklik (*cyclic pushover*) yang dapat digunakan untuk memperkirakan performa struktur. Berdasarkan data hasil uji eksperimental oleh Chalioris *et al.* (2008), disimpulkan adanya peningkatan performa hubungan balok-kolom yang dipasang tulangan transversal berbentuk silang (*x-bars*) ketika beban dorong siklik bekerja. Hasil uji eksperimental tersebut disimulasikan kembali melalui pengujian numerik pada *software* PERFORM-3D. Dilakukan proses pemodelan material, konfigurasi hubungan balok-kolom, model hubungan balok-kolom, hingga urutan pembebanan pada PERFORM-3D yang disesuaikan dengan data uji eksperimental milik Chalioris *et al.* (2008). Berdasarkan hasil pengujian numerik, disimpulkan bahwa *software* PERFORM-3D dapat memodelkan perilaku hubungan balok-kolom tanpa memodelkan geometri tulangan pada area hubungan balok-kolom, melalui pemodelan elemen *connection panel zone*. Dihasilkan kurva histerisis yang menyerupai data hasil uji eksperimental, namun perilaku *pinching* pada kurva histerisis tidak dapat dimodelkan.

Kata kunci : beban seismik, beban dorong siklik, eksperimental, numerik, PERFORM-3D, kurva histerisis.

**NUMERICAL TEST CYCLIC PUSHOVER ANALYSIS ON EXTERIOR  
REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMN CONNECTION MODEL  
BY CHALIORIS ET AL. (2008) USING PERFORM-3D**

Hans Tjahjadi

NPM : 6101801014

Advisor : Dr. Djoni Simanta, Ir., M.T.

Co-Advisor : Liyanto Eddy, Ph.D.

**PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY**

**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**(Accredited by SK BAN-PT No. 11370/SK/BAN-PT/AK-ISK/S/X/2021)**

**BANDUNG**

**JANUARI 2022**

**ABSTRACT**

Seismic loads from earthquake waves will affect building structures on the earth's surface at some point in the future. According to Chalioris et al. (2008), when seismic loads are applied, the beam-column connection becomes critical. Brittle failure will occur if beam-column connections are not adequately reinforced. Seismic loads can be modeled as cyclic pushover loads which can be used to estimate the performance of structures. Based on the experimental test data of Chalioris et al. (2008), it was concluded that when cyclic pushover loads were applied, the performance of beam-column joints fitted with cross-shaped transverse reinforcement (x-bars) improved. The experimental test results are re-simulated using the PERFORM-3D software. According to the experimental test data of Chalioris et al. (2008), the modeling process of material, beam-column connection configuration, beam-column connection model, and loading sequence on PERFORM-3D were carried out. Based on the results of numerical testing, it is concluded that the PERFORM-3D software can model the behavior of beam-column connections by modeling the *connection panel zone* element instead of the reinforcement geometry in the beam-column connection area. Although the resulting hysteresis curve resembles the experimental test data, the pinching behavior on the hysteresis curve cannot be modeled.

Keywords : seismic load, cyclic pushover load, experimental, numerical, PERFORM-3D, hysteresis curve.

# PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan penyertaan-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul UJI NUMERIK ANALISIS BEBAN DORONG SIKLIK PADA MODEL HUBUNGAN BALOK-KOLOM BETON BERTULANG EKSTERIOR CHALIORIS ET AL. (2008) MENGGUNAKAN PERFORM-3D. Skripsi ini disusun untuk memenuhi syarat akademik untuk menuntaskan studi di tingkat S1 Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan.

Selama penyusunan skripsi ini, penulis menghadapi beragam kesulitan dan hambatan. Berkat dukungan, kritik, dan saran yang membangun dari berbagai pihak, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Terimakasih penulis sampaikan kepada :

1. Bapak Dr. Djoni Simanta, Ir., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah mengarahkan serta membimbing penulis selama menyelesaikan skripsi ini
2. Bapak Liyanto Eddy, Ph.D. selaku ko-pembimbing yang telah membimbing dan memberikan saran selama proses pengerjaan skripsi
3. Kedua orang tua dan adik penulis yang telah memberikan semangat, dukungan, dan doa bagi penulis selama penyusunan skripsi ini
4. Tim PACIVIC PIEZOCONE yang sudah menginspirasi dan mewarnai proses pengerjaan skripsi
5. Seluruh dosen Program Studi Teknik Sipil UNPAR yang telah menyampaikan materi pembelajaran selama masa perkuliahan
6. Teman-teman angkatan teknik sipil 2018 UNPAR yang senantiasa bersama-sama menjalani masa perkuliahan

Penulis sadar bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Sebagai akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat menjadi manfaat bagi pembaca.

Bandung, 26 Januari 2022



Hans Tjahjadi

6101801014





# DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	ii
PRAKATA .....	iii
DAFTAR ISI .....	v
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xviii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1-1
1.1 Latar Belakang .....	1-1
1.2 Inti Permasalahan .....	1-3
1.3 Tujuan Penulisan .....	1-3
1.4 Pembatasan Masalah .....	1-3
1.5 Metode Penelitian .....	1-4
1.6 Sistematika Penulisan .....	1-4
1.7 Diagram Alir Penelitian .....	1-5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	2-1
2.1 Pengujian Eksperimental Hubungan Balok-Kolom Beton Bertulang Eksterior oleh Chalioris <i>et al.</i> (2008) .....	2-1
2.1.1 Benda Uji Hubungan Balok-Kolom Beton Bertulang Eksterior oleh Chalioris <i>et al.</i> (2008) .....	2-1
2.1.2 Instrumentasi dan <i>Test Setup</i> .....	2-6
2.1.2.1 Beban Aksial Kolom .....	2-7
2.1.2.2 Beban Dorong Siklik .....	2-8

2.1.3 Hasil Eksperimen .....	2-9
2.1.3.1 Kurva Histerisis.....	2-9
2.1.3.2 Energi Disipasi.....	2-11
2.1.3.3 Kapasitas Beban Ultimit Per Siklus Beban.....	2-12
2.1.3.4 Tegangan Tarik Nominal (Nominal Principal Tensile Stress)...	2-12
2.1.3.5 Mode Kerusakan dan Pola Retakan .....	2-13
2.2 <i>Fiber Cross Section</i> .....	2-15
2.3 Hubungan Konstitutif Material.....	2-15
2.3.1 Hubungan Tegangan-Regangan Material Tulangan Baja.....	2-15
2.3.2 Hubungan Tegangan-Regangan Kondisi Pembebanan Siklik Material Tulangan Baja .....	2-16
2.3.3 Tegangan Beton Terkekang pada Kondisi Tertekan.....	2-16
2.3.4 Tegangan Material Beton Kondisi Tertarik .....	2-20
2.3.5 Hubungan Tegangan-Regangan Material Beton Tidak Terkekang dan Material Beton Terkekang.....	2-20
2.4 Pemodelan Material pada PERFORM-3D .....	2-21
2.4.1 Kurva Hubungan Gaya-Peralihan pada PERFORM-3D.....	2-21
2.4.2 Faktor Penurunan Kekuatan ( <i>Strength Loss</i> ) .....	2-23
2.4.3 Faktor Degradasi Siklik ( <i>Cyclic Degradation Factor</i> ) .....	2-23
2.5 Model Hubungan Balok-Kolom pada PERFORM-3D.....	2-25
2.5.1 Model Hubungan Balok-Kolom pada PERFORM-3D .....	2-25
2.5.2 Hubungan Momen-Regangan pada Hubungan Balok-Kolom .....	2-26
2.6 Daktilitas Perpindahan Struktur .....	2-27
2.7 Energi Terdisipasi.....	2-28
2.8 <i>Hysterical Damping</i> .....	2-28
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	3-1

3.1	Model Uji Hubungan Balok-Kolom Beton Bertulang Eksterior.....	3-1
3.2	Pemodelan Menggunakan PERFORM-3D.....	3-1
3.2.1	Pemodelan Elemen Balok-Kolom.....	3-1
3.2.1.1	Koordinat dan Konfigurasi Model.....	3-1
3.2.1.2	<i>Fiber</i> Penampang Balok dan Kolom .....	3-2
3.2.1.3	<i>Compound Component</i> Struktur .....	3-5
3.2.2	Pemodelan Material pada PERFORM-3D.....	3-6
3.2.2.1	Pemodelan Material Tulangan Baja .....	3-6
3.2.3	Pemodelan Material Beton Tidak Terkekang dan Material Beton Terkekang.....	3-8
3.2.4	Pemodelan Hubungan Balok-Kolom pada PERFORM-3D.....	3-12
3.3	Fase Analisis pada PERFORM-3D .....	3-17
3.3.1	Tumpuan pada Model Hubungan Balok-Kolom.....	3-17
3.3.2	<i>Nodal Mass</i> .....	3-18
3.3.3	Orientasi Sumbu Elemen Struktur .....	3-19
3.3.4	Beban Aksial Kolom.....	3-20
3.3.5	Arah Simpangan ( <i>Drift</i> ) .....	3-20
3.3.6	<i>Structure Sections</i> .....	3-21
3.3.7	<i>Drift Limit States</i> .....	3-21
3.3.8	<i>Load Case Gravity</i> .....	3-21
3.3.9	<i>Load Case Static Push-Over</i> .....	3-22
BAB 4 ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....		4-1
4.1.	Kurva Histerisis Model Hubungan Balok-Kolom pada PERFORM-3D ..	4-1
4.2.	<i>Deflected Shape</i> .....	4-5
4.3.	Daktilitas .....	4-5
4.4.	Energi Terdisipasi .....	4-6

4.5. <i>Hysterical Damping</i> .....	4-8
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	5-1
5.1 Kesimpulan.....	5-1
5.2 Saran.....	5-2
DAFTAR PUSTAKA .....	xix



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Perbandingan Kurva Gaya dengan Peralihan antara Hasil Uji Eksperimental Tanaka (1990) dengan Uji Numerik PERFORM-3D .....	1-2
<b>Gambar 1.2</b> Diagram Alir Penelitian.....	1-5
<b>Gambar 2.1</b> Konfigurasi Tulangan Hubungan Balok-Kolom Eksterior Kelompok Spesimen A (Chalioris <i>et al.</i> , 2008).....	2-5
<b>Gambar 2.2</b> Konfigurasi Tulangan Hubungan Balok-Kolom Eksterior Kelompok Spesimen B (Chalioris <i>et al.</i> , 2008) .....	2-5
<b>Gambar 2.3</b> Konfigurasi Tulangan Hubungan Balok-Kolom Eksterior Kelompok Spesimen Ca dan Cb (Chalioris <i>et al.</i> , 2008).....	2-6
<b>Gambar 2.4</b> Konfigurasi Eksperimental Model Hubungan Balok-Kolom (Chalioris <i>et al.</i> , 2008) .....	2-6
<b>Gambar 2.5</b> Protokol Beban Dorong Siklik Kelompok Spesimen A (Chalioris <i>et al.</i> ,2008) .....	2-8
<b>Gambar 2.6</b> Protokol Beban Dorong Siklik Kelompok Spesimen B (Chalioris <i>et al.</i> ,2008) .....	2-9
<b>Gambar 2.7</b> Protokol Beban Dorong Siklik Kelompok Spesimen Ca dan Cb (Chalioris <i>et al.</i> ,2008) .....	2-9
<b>Gambar 2.8</b> Kurva Histerisis Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Kelompok Spesimen A .....	2-10
<b>Gambar 2.9</b> Kurva Histerisis Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Kelompok Spesimen B.....	2-10
<b>Gambar 2.10</b> Kurva Histerisis Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Kelompok Spesimen Ca.....	2-10
<b>Gambar 2.11</b> Kurva Histerisis Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Kelompok Spesimen Cb.....	2-10
<b>Gambar 2.12</b> Kurva Energi Disipasi Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Kelompok Spesimen A.....	2-11
<b>Gambar 2.13</b> Kurva Energi Disipasi Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Kelompok Spesimen B.....	2-11

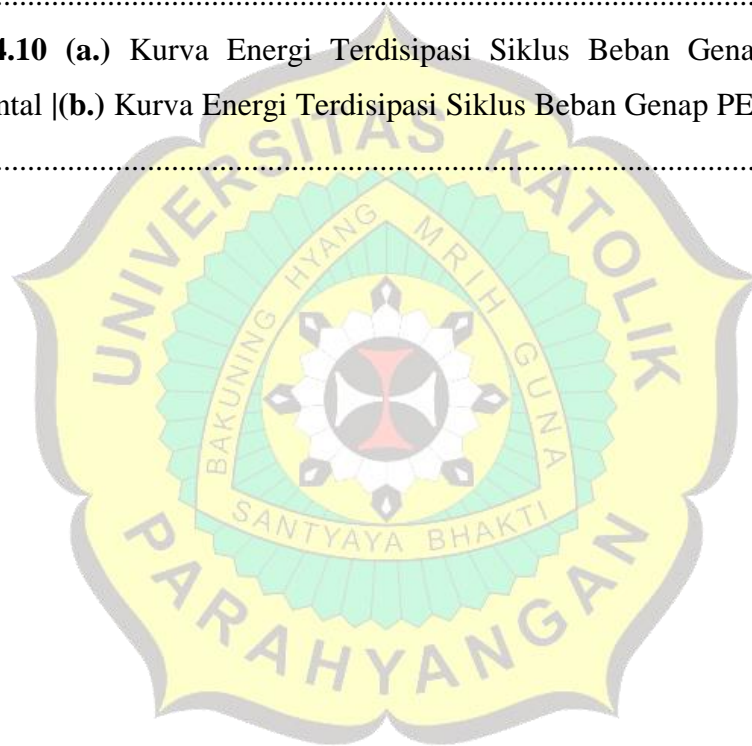
<b>Gambar 2.14</b> Kurva Kapasitas Beban Ultimit Per Siklus Beban untuk Kelompok Spesimen Ca dan Cb (Chalioris <i>et al.</i> , 2008).....	2-12
<b>Gambar 2.15</b> Kurva Gaya Tegangan Tarik Nominal untuk Kelompok Spesimen A (Chalioris <i>et al.</i> , 2008) .....	2-13
<b>Gambar 2.16</b> Bentuk Kerusakan pada Kelompok Spesimen A (Chalioris <i>et al.</i> (2008).....	2-14
<b>Gambar 2.17</b> Bentuk Kerusakan pada Kelompok Spesimen B (Chalioris <i>et al.</i> (2008).....	2-14
<b>Gambar 2.18</b> Bentuk Kerusakan pada Kelompok Spesimen Ca (Chalioris <i>et al.</i> (2008).....	2-14
<b>Gambar 2.19</b> Bentuk Kerusakan pada Kelompok Spesimen Ca (Chalioris <i>et al.</i> (2008).....	2-14
<b>Gambar 2.20</b> Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Material Tulangan Baja A615 Grade 40 pada <i>Software</i> XTRACT .....	2-15
<b>Gambar 2.21</b> Penampang Inti Beton Bertulang yang Tekekang Secara Efektif oleh Tulang Transversal Segi Empat (Mander, 1988).....	2-17
<b>Gambar 2.22</b> Penentuan Kekuatan Tekan Beton Terkekang Berdasarkan Tegangan Lateral Akibat Kekangan Tulangan Transversal untuk Penampang Beton Bertulang Segi Empat (Mander, 1988).....	2-19
<b>Gambar 2.23</b> Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Model Material Beton Terkekang dan Tidak Terkekang (Mander, 1988) .....	2-21
<b>Gambar 2.24</b> Kurva Hubungan Gaya-Deformasi pada PERFORM-3D.....	2-22
<b>Gambar 2.25</b> Hubungan Tegangan-regangan Berbentuk Bilinear (E-P-P) pada PERFORM-3D.....	2-23
<b>Gambar 2.26</b> Opsi <i>Strength Loss</i> pada Hubungan Gaya-Deformasi pada PERFORM-3D.....	2-23
<b>Gambar 2.27</b> Kurva Histeresis dengan Degradasi Kekakuan.....	2-24
<b>Gambar 2.28</b> Model Krawinkler sebagai Model Hubungan Balok-Kolom pada PERFORM-3D.....	2-25
<b>Gambar 2.29</b> Model Hubungan Balok-Kolom pada Titik Nodal <i>Panel Zone</i> ..	2-26
<b>Gambar 2.30</b> Sumbu Utama <i>Panel Zone Element</i> .....	2-26

<b>Gambar 2.31</b> Ilustrasi Perhitungan Luas Daerah Tertutup Kurva Histerisis untuk Satu Siklus Beban .....	2-28
<b>Gambar 3.1</b> Ilustrasi <i>Fiber</i> pada Penampang Elemen Struktur .....	3-2
<b>Gambar 3.2</b> Ilustrasi Perhitungan Selimut Beton Kelompok Spesimen B.....	3-3
<b>Gambar 3.3 (a)</b> Penampang Balok Kelompok Spesimen B <b>(b)</b> <i>Fiber</i> Balok Kelompok Spesimen B.....	3-4
<b>Gambar 3.4 (a)</b> Penampang Kolom Spesimen JB-0 dan JB-s1 <b>(b)</b> <i>Fiber</i> Kolom Spesimen JB-0 dan JB-s1 .....	3-4
<b>Gambar 3.5 (a)</b> Penampang Kolom Spesimen JB-X10 <b>(b)</b> <i>Fiber</i> Kolom Spesimen JB-X10 .....	3-5
<b>Gambar 3.6 (a)</b> Penampang Kolom Spesimen JB-X12 <b>(b)</b> <i>Fiber</i> Kolom Spesimen JB-X12 .....	3-5
<b>Gambar 3.7 (a)</b> Tampak Potongan Melintang Penampang <i>Fiber</i> Balok Kelompok Spesimen B <b>(b)</b> Tampak Memanjang Penampang Balok Kelompok Spesimen B dengan Proporsi Panjang Sebesar 1 .....	3-5
<b>Gambar 3.8</b> Kurva Hubungan Gaya-Deformasi Tipe <i>Trilinear</i> disertai <i>Strength Loss</i> .....	3-6
<b>Gambar 3.9</b> Kurva <i>Backbone</i> Model Material Tulangan Baja .....	3-7
<b>Gambar 3.10</b> Kurva Histerisis Model Material Tulangan Baja Tanpa <i>Cyclic Degradation</i> .....	3-7
<b>Gambar 3.11</b> Kurva Hubungan Gaya-Deformasi <i>Bilinear/E-P-P</i> T disertai <i>Strength Loss</i> .....	3-8
<b>Gambar 3.12</b> Kurva <i>Backbone</i> Model Material Beton Tidak Terkekang.....	3-10
<b>Gambar 3.13</b> Kurva <i>Backbone</i> Model Material Beton Terkekang Balok .....	3-10
<b>Gambar 3.14</b> Kurva <i>Backbone</i> Model Material Beton Terkekang Kolom.....	3-10
<b>Gambar 3.15</b> Kurva Histerisis Model Material Beton Terkekang (Balok) Tanpa <i>Cyclic Degradation</i> .....	3-11
<b>Gambar 3.16</b> Kurva Histerisis Model Material Beton Terkekang (Balok) Tanpa <i>Cyclic Degradation</i> .....	3-11
<b>Gambar 3.17</b> Kurva Histerisis Model Material Beton Terkekang (Kolom) Tanpa <i>Cyclic Degradation</i> .....	3-12

<b>Gambar 3.18</b> Titik-titik Kritis Model Hubungan Balok-Kolom pada Kurva Hubungan Tegangan-Regangan di Hubungan (Unal <i>et al.</i> , 2013).....	3-13
<b>Gambar 3.19</b> Nilai JT berdasarkan Jenis Hubungan Balok-Kolom untuk Kalkulasi dalam Satuan SI (ACI-ASCE <i>Committee 352</i> ) .....	3-14
<b>Gambar 3.20</b> Contoh Plot Manual Titik-titik Kritis untuk Kurva <i>Backbone</i> pada Kurva Histerisis Hasil Uji Eksperimental .....	3-15
<b>Gambar 3.21</b> Kurva <i>Backbone</i> Model Hubungan Balok-Kolom JB-0 pada PERFORM-3D.....	3-16
<b>Gambar 3.22</b> Kurva <i>Backbone</i> Model Hubungan Balok-Kolom JB-s1 pada PERFORM-3D.....	3-16
<b>Gambar 3.23</b> Kurva <i>Backbone</i> Model Hubungan Balok-Kolom JB-X10 pada PERFORM-3D.....	3-17
<b>Gambar 3.24</b> Kurva <i>Backbone</i> Model Hubungan Balok-Kolom JB-X12 pada PERFORM-3D.....	3-17
<b>Gambar 3.25</b> Konfigurasi Model dan Jenis Tumpuan pada PERFORM-3D ...	3-18
<b>Gambar 3.26</b> <i>Nodal Mass</i> pada PERFORM-3D.....	3-18
<b>Gambar 3.27</b> Orientasi Balok dan Kolom pada PERFORM-3D.....	3-19
<b>Gambar 3.28</b> Orientasi Hubungan Balok-Kolom pada PERFORM-3D.....	3-19
Gambar 3.29 Besar dan Arah Beban Aksial Kolom .....	3-20
<b>Gambar 3.30</b> Arah Simpangan pada PERFORM-3D.....	3-20
<b>Gambar 3.31</b> <i>Structure Sections</i> pada PERFORM-3D.....	3-21
<b>Gambar 3.32</b> Ilustrasi Input Parameter Beban Siklik pada PERFORM-3D.....	3-22
<b>Gambar 4.1</b> Perbandingan Kurva Histerisis Hasil Pemodelan pada PERFORM-3D terhadap Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Spesimen JB-0. 4-1	
<b>Gambar 4.2</b> Perbandingan Kurva Histerisis Hasil Pemodelan pada PERFORM-3D terhadap Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Spesimen JB-s1 4-2	
<b>Gambar 4.3</b> Perbandingan Kurva Histerisis Hasil Pemodelan pada PERFORM-3D terhadap Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Spesimen JB-X10 .....	4-2
<b>Gambar 4.4</b> Perbandingan Kurva Histerisis Hasil Pemodelan pada PERFORM-3D terhadap Hasil Uji Eksperimental Chalioris <i>et al.</i> (2008) untuk Spesimen JB-X12 .....	4-3



<b>Gambar 4.5</b> Kurva Histerisis Spesimen JB Kondisi <i>Rigid</i> .....	4-4
<b>Gambar 4.6</b> Kurva Histerisis Spesimen JB Kondisi <i>Rigid</i> dengan Regangan pada Model Material Tulangan Baja yang Kurang Sesuai .....	4-4
<b>Gambar 4.7 (a.)</b> <i>Deflected Shape</i> Spesimen JB-0 (-60 mm) <b>(b.)</b> <i>Deflected Shape</i> Spesimen JB-0 (+60 mm) .....	4-5
<b>Gambar 4.8 (a.)</b> Siklus Beban dengan Urutan Ganjil <b>(b.)</b> Siklus Beban dengan Urutan Genap .....	4-6
<b>Gambar 4.9 (a.)</b> Kurva Energi Terdisipasi Siklus Beban Ganjil Hasil Uji Eksperimental  (b.) Kurva Energi Terdisipasi Siklus Beban Ganjil PERFORM-3D .....	4-7
<b>Gambar 4.10 (a.)</b> Kurva Energi Terdisipasi Siklus Beban Genap Hasil Uji Eksperimental  (b.) Kurva Energi Terdisipasi Siklus Beban Genap PERFORM-3D .....	4-7



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Variabel Pembeda Spesimen Pengujian Hubungan Balok-Kolom (Chalioris <i>et al.</i> , 2008) .....	2-1
<b>Tabel 2.2</b> Variabel Pembeda Spesimen Pengujian Hubungan Balok-Kolom (Chalioris <i>et al.</i> , 2008) (Lanjutan).....	2-2
<b>Tabel 2.3</b> Konfigurasi Tulangan Balok dan Kolom (Chalioris <i>et al.</i> , 2008).....	2-2
<b>Tabel 2.4</b> Konfigurasi Tulangan Balok dan Kolom (Chalioris <i>et al.</i> , 2008) (Lanjutan).....	2-3
<b>Tabel 2.5</b> Konfigurasi Tulangan Area Hubungan Balok-Kolom (Chalioris <i>et al.</i> , 2008) .....	2-4
<b>Tabel 2.6</b> Beban Aksial Kolom berdasarkan Kelompok Spesimen .....	2-8
<b>Tabel 2.7</b> Parameter Material Tulangan Baja ASTM A615 <i>Grade</i> 40.....	2-16
<b>Tabel 2.8</b> Titik-titik Penyusun Grafik Hubungan Gaya-Deformasi pada PERFORM-3D.....	2-22
<b>Tabel 3.1</b> Koordinat Model pada PERFORM-3D.....	3-2
<b>Tabel 3.2</b> Parameter Model Material Tulangan Baja pada PERFORM-3D.....	3-6
<b>Tabel 3.3</b> Parameter Model Material Beton Tidak Tekekang pada PERFORM-3D .....	3-8
<b>Tabel 3.4</b> Parameter Model Material Beton Tekekang Balok pada PERFORM-3D .....	3-9
<b>Tabel 3.5</b> Parameter Model Material Beton Tekekang Kolom pada PERFORM-3D .....	3-9
<b>Tabel 3.6</b> Parameter Kekuatan Tarik Model Material Beton Terkekang dan Material Beton Tidak Terkekang pada PERFORM-3D.....	3-9
<b>Tabel 3.7</b> Input Parameter Beban Siklik pada PERFORM-3D .....	3-23
<b>Tabel 4.1</b> Perhitungan Daktilitas Kelompok Spesimen B .....	4-6
<b>Tabel 4.2</b> Persentase Perbedaan Nilai Disipasi Energi antara Hasil Uji Eksperimental terhadap Hasil Analisis PERFORM-3D untuk Siklus Beban Dorong Ganjil.....	4-8

**Tabel 4.3** Persentase Perbedaan Nilai Disipasi Energi antara Hasil Uji Eksperimental terhadap Hasil Analisis PERFORM-3D untuk Siklus Beban Dorong Genap ..... 4-8

**Tabel 4.4** Perhitungan *Hysterical Damping* Spesimen JB-0 dan JB-s1 ..... 4-8

**Tabel 4.5** Perhitungan *Hysterical Damping* Spesimen JB-X10 dan JB-X12..... 4-9



## DAFTAR LAMPIRAN

- LAMPIRAN 1** PERHITUNGAN KEKUATAN TEKAN BETON TERKEKANG BALOK JB
- LAMPIRAN 2** PERHITUNGAN KEKUATAN TEKAN BETON TERKEKANG KOLOM JB
- LAMPIRAN 3** KOORDINAT FIBER PENAMPANG BALOK DAN KOLOM KELOMPOK SPESIMEN B
- LAMPIRAN 4** PARAMETER INPUT PADA MODEL HUBUNGAN BALOK-KOLOM PERFORM-3D (CONNECTION PANEL ZONE)



## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

$A_c$	=	Luas total inti beton yang terkekang
$A_e$	=	Luas total inti beton yang terkekang secara efektif
$A_g$	=	Luas penampang kolom
$A_i$	=	Luas total area inti beton terkekang secara tidak efektif
$A_{sx}$	=	Luas total tulangan transversal arah x
$A_{sy}$	=	Luas total tulangan transversal arah y
$b_c$	=	Dimensi inti beton sebesar jarak as tulangan transversal yang berseberangan
$b_{col}$	=	Dimensi lebar kolom
$b_j$	=	Lebar efektif hubungan balok-kolom
$C_c$	=	Selimut beton
$CI$	=	<i>Column index</i> , berdasarkan rasio dimensi lebar terhadap panjang kolom
$d''$	=	Jarak dari tulangan longitudinal teratas hingga terbawah balok
$d_c$	=	Dimensi inti beton sebesar jarak as tulangan transversal yang berseberangan
$d_l$	=	Diameter tulangan longitudinal
$DL$	=	Regangan pada titik L kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D
$DR$	=	Regangan pada titik R kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D
$d_s$	=	Diameter tulangan transversal
$DU$	=	Regangan pada titik U kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D
$DX$	=	Regangan pada titik X kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D
$DY$	=	Regangan pada titik Y kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D
$d_{X-bars}$	=	Diameter tulangan <i>X-bars</i> kolom
$E_c$	=	Modulus elastisitas material beton
$EE$	=	Efek eksentrisitas
$FY$	=	(Material Tulangan Baja) Tegangan tarik pada titik Y kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D
$FY$	=	( <i>Connection Panel Zone</i> ) Momen hubungan pada titik Y kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D
$f_y$	=	Tegangan leleh tulangan baja
$FU$	=	(Material Tulangan Baja) Tegangan tarik pada titik U kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D
$FU$	=	(Material Beton) Tegangan tekan pada titik U kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D

FU	=	( <i>Connection Panel Zone</i> ) Momen hubungan pada titik U kurva hubungan gaya-deformasi PERFORM-3D
FR/FU	=	(Material Tulangan Baja) Rasio tegangan tarik di titik U terhadap tegangan tarik di titik R
FR/FU	=	(Material Beton) Rasio tegangan tekan di titik U terhadap tegangan tekan di titik R
FR/FU	=	( <i>Connection Panel Zone</i> ) Rasio momen hubungan di titik R terhadap momen hubungan di titik U
$f'_c$	=	Kekuatan tekan beton tidak terkekang
$f'_{cc}$	=	Kekuatan tekan beton terkekang
$f'_{cr}$	=	kekuatan tarik beton
$f'_{co}$	=	Kekuatan tekan beton tidak terkekang
$f'_{lx}$	=	Tegangan lateral terkekang efektif arah sumbu x
$f'_{ly}$	=	Tegangan lateral terkekang efektif arah sumbu y
$f_{yh}$	=	Tegangan leleh tulangan transversal
$h_c$	=	Dimensi tinggi kolom
JT	=	<i>Joint Types</i> , berdasarkan klasifikasi hubungan balok-kolom pada ACI-ASCE <i>Committee 352</i>
$K_0$	=	Kekakuan hubungan dalam kondisi elastis
$K_H$	=	Kekakuan hubungan dalam kondisi <i>strain hardening</i>
$L_{X-bars}$	=	Lebar <i>X-bars</i> di area hubungan balok-kolom
$n$	=	Jumlah tulangan longitudinal dalam penampang beton bertulang
$N_c$	=	Beban aksial kolom
NE	=	Efek beban aksial
$M_j$	=	Momen pada hubungan balok-kolom
$s'$	=	Spasi bersih antara tulang transversal
SI	=	<i>Slab index</i>
$V_j$	=	Tegangan pada hubungan balok-kolom
$V_{j,i}$	=	tegangan di akhir fase elastis hubungan
$V_{j,u}$	=	tegangan ultimit hubungan
WB	=	Efek adanya <i>wide beams</i>
$w_i'$	=	Jarak bersih antar tulangan longitudinal
$\epsilon_{cu}$	=	Regangan ultimit material beton terkekang
$\epsilon_{sp}$	=	Regangan ultimit material beton tidak terkekang
$\epsilon_{su}$	=	Regangan ultimit material tulangan baja
$\rho_{cc}$	=	Rasio luas tulangan longitudinal terhadap luas inti beton terkekang
$\rho_{joint}$	=	Rasio tulangan di area hubungan balok-kolom berdasarkan rasio volume efektif satu lapis tulangan transversal di area hubungan balok-kolom
$\rho_s$	=	Rasio tulangan transversal
$\rho_x$	=	Rasio tulangan transversal arah sumbu x
$\rho_y$	=	Rasio tulangan transversal arah sumbu y
$\nu$	=	Koefisien beban aksial berdasarkan kelompok spesimen data uji Chalioris <i>et al.</i> (2008)

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

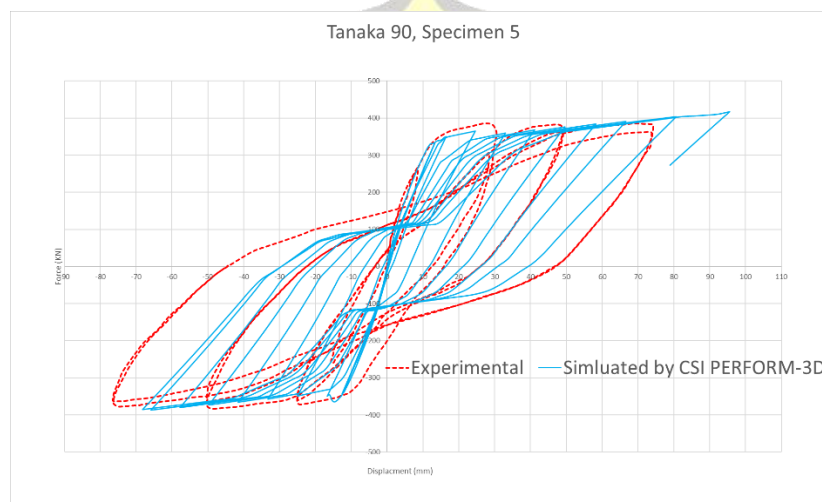
Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) mendefinisikan gempa bumi sebagai fenomena pelepasan energi secara tiba-tiba yang dihasilkan dari dalam bumi, ditandai dengan lapisan bebatuan kerak bumi yang mengalami patahan, hingga menyebabkan getaran bumi. Pergerakan lempeng-lempeng tektonik mengakibatkan terjadinya akumulasi energi dari dalam bumi, energi tersebut kemudian berubah menjadi gelombang gempa bumi yang dipancarkan ke segala arah. Gelombang gempa bumi dapat menyebar dan dirasakan hingga ke permukaan bumi.

Hubungan balok-kolom merupakan elemen kritis bagi struktur beton bertulang ketika struktur dikenai gaya gempa. Penulangan hubungan balok-kolom diperlukan untuk dapat memastikan struktur bangunan mampu menerima beban seismik akibat gelombang gempa bumi tanpa mengalami keruntuhan. Chalioris, *et al.* (2008) mengutarakan bahwa penulangan geser pada area hubungan balok-kolom yang tidak memadai dapat menyebabkan kegagalan yang bersifat rapuh (*brittle*) dan keruntuhan bangunan pada saat terjadinya gempa. Studi eksperimental berperan penting untuk menginvestigasi performa hubungan balok-kolom.

Pengujian numerik dan eksperimental memodelkan beban seismik sebagai beban dorong siklik (*cyclic pushover*) untuk menguji performa hubungan balok-kolom. Karakteristik penting yang terjadi pada komponen struktural beton bertulang ketika diberikan beban dorong siklik adalah terjadinya degradasi kekakuan dan kekuatan, sehingga mengakibatkan penurunan kapasitas deformasi. Pengujian menggunakan beban dorong siklik bertujuan untuk memperkirakan kapasitas desain seismik komponen struktur yang mempertimbangkan kerusakan kumulatif ketika gempa terjadi (Panyakapo, 2014).

Pada studi ini, metode pengujian numerik hubungan balok-kolom mengandalkan kemampuan komputasi komputer pada program PERFORM-3D.

Pada pemodelan menggunakan PERFORM-3D, elemen balok dan kolom dimodelkan sebagai elemen garis, sedangkan penampang balok dan kolom pada studi ini dimodelkan sebagai serat-serat *fiber*. Setiap serat *fiber* terdiri atas material dengan input parameter tegangan-regangan mulai dari kondisi elastis hingga kondisi inelastis. Hasil analisis yang didapatkan adalah hubungan gaya-peralihan, namun kontur kerusakannya tidak dapat diketahui. Contoh pengaplikasian program PERFORM-3D adalah memperoleh kurva hubungan gaya-peralihan pada hubungan kolom-fondasi yang diberi beban dorong siklik, menggunakan model uji eksperimental Tanaka (1990). Hasil uji numerik menggunakan program PERFORM-3D cukup mendekati dengan hasil uji eksperimental Tanaka (1990).



**Gambar 1.1** Perbandingan Kurva Gaya dengan Peralihan antara Hasil Uji Eksperimental Tanaka (1990) dengan Uji Numerik PERFORM-3D



## 1.2 Inti Permasalahan

Program PERFORM-3D memodelkan komponen struktur seperti balok dan kolom menjadi elemen garis, sedangkan penampang elemen struktur dimodelkan menjadi *fiber* yang terbagi menjadi beberapa segmen. Pada setiap segmen serat *fiber*, material didefinisikan dengan memasukkan parameter tegangan-regangan dari kondisi elastis hingga kondisi inelastis. Program PERFORM-3D hanya dapat menghasilkan kurva hubungan gaya-peralihan tanpa mengetahui kontur deformasi kerusakan akibat pembebanan siklik. Pada hubungan kolom-fondasi, program PERFORM-3D dapat menghasilkan kurva gaya-peralihan yang cukup mirip terhadap hasil uji eksperimental, namun studi lanjutan diperlukan untuk mengetahui kemampuan program PERFORM-3D untuk menganalisis hubungan balok-kolom dengan variasi *detailing* penulangan.

## 1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan penelitian skripsi ini adalah untuk membandingkan hasil uji eksperimental hubungan balok-kolom beton bertulang eksterior yang dilakukan oleh Chalioris *et al.* (2008) dengan hasil uji numerik menggunakan program PERFORM-3D. Hasil eksperimental oleh Chalioris *et al.* (2008) menunjukkan bahwa *detailing* penulangan yang berbeda pada hubungan balok-kolom menghasilkan hubungan gaya-peralihan yang berbeda.

## 1.4 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah dalam penulisan skripsi ini antara lain :

1. *Software* yang digunakan adalah CSI PERFORM-3D *Version* 8
2. Hasil uji eksperimen yang digunakan sebagai pembanding hasil uji numerik adalah eksperimen yang dilakukan oleh Chalioris *et al.* (2008) yaitu benda uji kelompok spesimen B
3. Kekuatan tekan material beton adalah 31,6 MPa dan kekuatan leleh tulangan baja adalah 580 MPa berdasarkan data eksperimental Chalioris *et al.* (2008)
4. Model material beton terkekang dan tidak terkekang yang digunakan mengacu pada model material beton Mander (1988)
5. Model material baja tulangan yang digunakan adalah ASTM A615 *grade* 40.

6. Beban yang diinputkan adalah beban siklik *quasi-static* dengan kontrol pembebanan berupa kontrol peralihan

### 1.5 Metode Penelitian

Metode penelitian dalam penulisan skripsi ini dilakukan dengan :

1. Studi literatur

Literatur yang digunakan sebagai landasan teori antara lain mengacu pada tulisan karya ilmiah serta manual program PERFORM-3D.

2. Studi analisis

Analisis numerik dilakukan dengan program PERFORM-3D.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari 5 bab diantaranya :

#### Bab 1 Pendahuluan

Bab ini terdiri dari beberapa subbab yang membahas latar belakang, inti permasalahan, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penelitian, sistematika penulisan, dan diagram alir

#### Bab 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini memaparkan dasar-dasar teori serta tinjauan pustaka yang dijadikan referensi pada studi penelitian ini

#### Bab 3 Metode Penelitian

Bab ini menguraikan model spesimen hubungan balok-kolom yang akan dimodelkan, asumsi-asumsi yang digunakan dalam pemodelan material hingga model hubungan balok-kolom pada program PERFORM-3D

#### Bab 4 Analisis Hasil dan Pembahasan

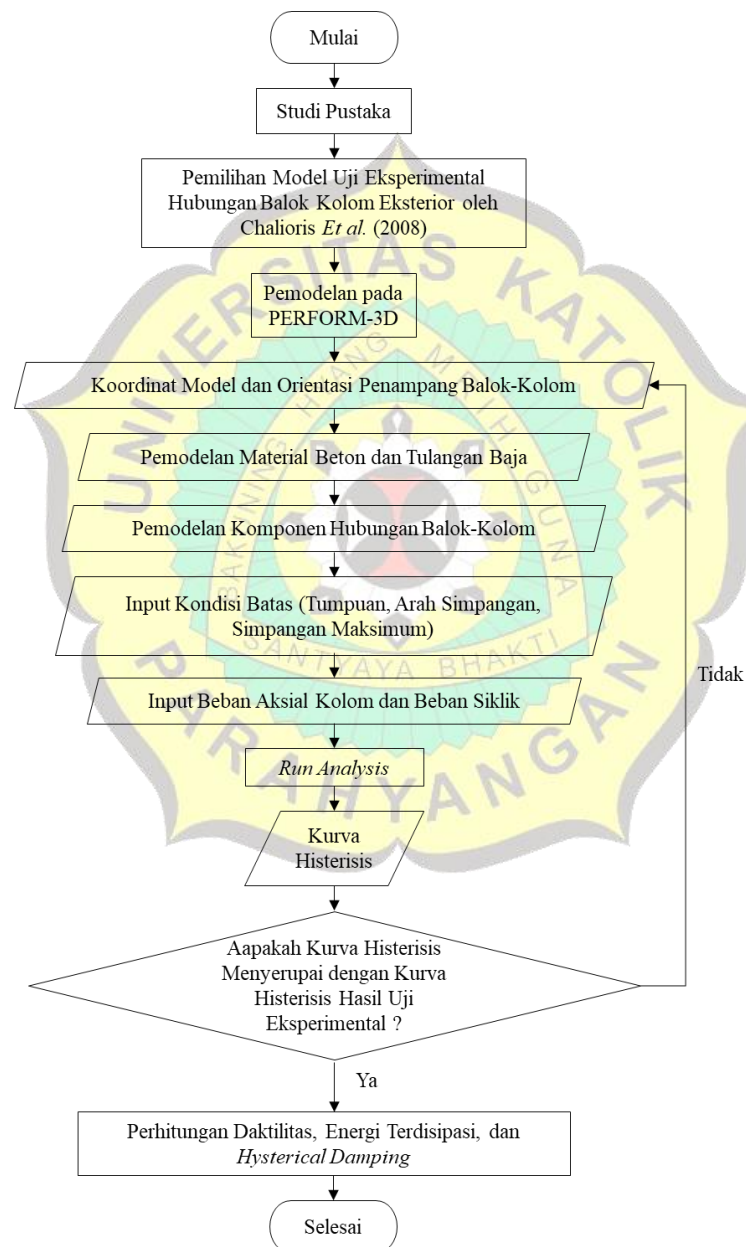
Bab ini membahas hasil akhir dari proses analisis yang dihasilkan oleh PERFORM-3D, yaitu membandingkan kurva histerisis hasil uji eksperimental Chalioris *et al.* (2008) terhadap hasil pemodelan metode uji numerik pada PERFORM-3D. Selain itu, dilakukan perhitungan daktilitas, energi disipasi, dan *hysterical damping*.

## Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dan saran yang didapatkan dari hasil studi dan analisis pada bab-bab sebelumnya.

### 1.7 Diagram Alir Penelitian

Penyusunan diagram alir mengikuti **Gambar 1.2** untuk memaparkan proses penelitian dalam skripsi ini.



**Gambar 1.2** Diagram Alir Penelitian