

**EVALUASI RELIABILITAS DAN APLIKASI  
METODE *PERFORMANCE-BASED PLASTIC DESIGN*  
PADA SISTEM GANDA DINDING-PORTAL BETON  
BERTULANG**

**TESIS**



**Oleh:**

**Dai Gratia Raflesia Christian Pardede  
8102101012**

**Pembimbing:**

**Wisena Perceka, S.T., M.T., Ph.D.**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
BANDUNG  
JULI 2024**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**EVALUASI RELIABILITAS DAN APLIKASI METODE *PERFORMANCE-BASED PLASTIC DESIGN* PADA SISTEM GANDA DINDING-PORTAL BETON BERTULANG**

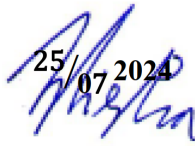


**Oleh:**

**Dai Gratia Raflesia Christian Pardede  
8102101012**

**Disetujui untuk Diajukan Ujian Sidang pada Hari/Tanggal:  
Kamis / 1 Agustus 2024**

**Pembimbing:**

  
25/07/2024

**Wisena Perceka, S.T., M.T., Ph.D.**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN  
BANDUNG  
JULI 2024**

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

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

Nama : Dai Gratia Raflesia Christian Pardede

NPM : 8102101012

Program Studi : Magister Teknik Sipil,

Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa tesis dengan judul:

Evaluasi Reliabilitas dan Aplikasi Metode *Performance-Based Plastic Design* pada Sistem Ganda Dinding-Portal Beton Bertulang

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 nonformal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini, saya siap menanggung segala risiko, akibat, dan/atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya, termasuk pembatalan gelar akademik yang saya peroleh dari Universitas Katolik Parahyangan.

Dinyatakan: di Bandung

Tanggal: 25 Juli 2024



Dai Gratia Raflesia Christian Pardede

# EVALUASI RELIABILITAS DAN APLIKASI METODE *PERFORMANCE-BASED PLASTIC DESIGN* PADA SISTEM GANDA DINDING-PORTAL BETON BERTULANG

**Dai Gratia Raflesia Christian Pardede (NPM: 8102101012)**

**Pembimbing: Wisena Perceka, S.T., M.T., Ph.D.**

**Magister Teknik Sipil**

**Bandung**

**Juli 2024**

## ABSTRAK

Perencanaan struktur gedung beton bertulang tahan gempa berdasarkan standar dan peraturan di Indonesia yang mengacu pada *ASCE 7* adalah berdasarkan analisis elastis linear. Pendekatan tersebut menyebabkan perilaku inelastis struktur diperhitungkan secara tidak langsung. Akibatnya, ketika evaluasi menggunakan analisis statik beban dorong dan riwayat waktu nonlinear dilakukan, struktur menunjukkan hasil deformasi inelastis yang tidak sesuai dengan mekanisme yang seharusnya terjadi saat struktur menerima beban gempa. Oleh karena itu, struktur harus direncanakan ulang. Metodologi perencanaan dengan tata cara yang lebih sistematis dan tidak atau sedikit membutuhkan proses iterasi pada awal perencanaan diperlukan. Metode *performance-based plastic design (PBPD)* telah terbukti sebagai metode terkini yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja struktur beton bertulang dan baja tahan gempa. Dalam metode *PBPD*, mekanisme kelelahan dan target rasio simpangan dipilih sebagai kriteria kinerja dan digunakan pada tahap *preliminary design*. Gaya geser dasar desain untuk level kegempaan yang digunakan diperoleh berdasarkan konsep kerja luar yang diperlukan untuk mendorong struktur secara monotonik sampai mencapai target rasio simpangan yang nilainya sama dengan kebutuhan energi dari sistem berderajat kebebasan tunggal ekuivalen (*equivalent single-degree-of-freedom (SDOF) system*) yang mengalami osilasi. Pada struktur beton bertulang dengan sistem ganda dinding-portal yang dirancang dengan menggunakan metode *PBPD*, penyelidikan lebih lanjut perlu diperlukan. Tesis ini mempresentasikan aplikasi metode *PBPD* dalam perencanaan bangunan sistem ganda dinding-portal beton bertulang. Dua gedung sepuluh lantai dengan sistem ganda dinding-portal beton bertulang digunakan dalam penelitian ini. Struktur yang menjadi acuan adalah struktur yang direncanakan berdasarkan peraturan gempa dan beton Indonesia saat ini, yaitu SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Struktur acuan kemudian dimodifikasi melalui perencanaan kapasitas geser dinding struktural yang mengacu pada peraturan beton Amerika Serikat terbaru, yaitu *ACI 318-19*. Dua bangunan sepuluh lantai tersebut kemudian direncanakan ulang dengan menggunakan metode *PBPD*. Seluruh bangunan yang ada di dalam penelitian ini diasumsikan dibangun di Jakarta, Indonesia. Analisis nonlinear statik beban dorong dan riwayat waktu nonlinear dilakukan untuk mendapatkan perilaku nonlinear seluruh bangunan dan melakukan penilaian berdasarkan metodologi yang terdapat di dalam *FEMA P695*. Analisis nonlinear statik beban dorong dan riwayat waktu nonlinear membuktikan bahwa metode *PBPD* dapat digunakan pada sistem ganda dinding-portal beton bertulang 10 lantai. Selain itu, analisis nonlinear statik dan dinamik membuktikan bahwa struktur *PBPD* memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan struktur acuan (termasuk struktur acuan dengan dinding geser yang direncanakan berdasarkan *ACI 318-19*). Terkait evaluasi keandalan, struktur bangunan *PBPD* dapat memenuhi target probabilitas keruntuhan 1% dalam 50 tahun dan probabilitas keruntuhan 10% untuk gempa *MCE* yang digunakan di dalam tata cara perencanaan gempa Indonesia. Akan tetapi, struktur acuan yang direncanakan dengan menggunakan metode konvensional menunjukkan hasil yang berlawanan.

**Kata Kunci:** *PBPD*, Dinding-Portal, Reliabilitas, Analisis Risiko Seismik, *FEMA P695*



# **RELIABILITY EVALUATION AND APPLICATION OF PERFORMANCE-BASED PLASTIC DESIGN METHOD FOR REINFORCED CONCRETE WALL-FRAME DUAL SYSTEM**

**Dai Gratia Raflesia Christian Pardede (NPM: 8102101012)**

**Advisor: Wisena Perceka, S.T., M.T., Ph.D.**

**Master of Civil Engineering**

**Bandung**

**July 2024**

## **ABSTRACT**

Design of RC building structure in accordance with the current Indonesian seismic code, which adopts ASCE 7, utilizes linear elastic analysis. This approximation somewhat leads the inelastic behavior of the structure to be taken into account indirectly. As a result, the structure exhibits inelastic deformations in an uncontrolled manner when the evaluation by using nonlinear static (pushover) and dynamic analyses is performed. Accordingly, the structure needs to be redesigned. A design methodology with systematic procedures that requires little to no iteration on the original design is required to satisfy the design objectives. The performance-based plastic design (PBPD) method was proved to be an established method for improving the performance of earthquake-resistant reinforced concrete and steel structures. In the PBPD method, the pre-selected target drift and yield mechanism as performance criteria are utilized in the design concept. The design base shear for selected hazard level is obtained by equating the work required to push the structure monotonically up to the target drift to the corresponding energy demand of an equivalent SDOF oscillator. In terms of an RC structure with a dual frame-wall system designed by using the PBPD method, further investigation is required. This thesis presents the application of the PBPD method for designing the RC building with a dual RC frame-wall system. Dual RC frame-wall system found in two ten-story archetype buildings are used in this study. The baseline structures are designed by conforming to the current Indonesian seismic and concrete codes; which are SNI 1726:2019 and SNI 2847:2019. The baseline structures undergo a slight modification, where the shear strength of structural walls is based on the latest American concrete code, that is ACI 318-19. These two ten-story archetype buildings are redesigned by using the PBPD method. The buildings are assumed to be built in Jakarta, Indonesia. The structures are subjected to extensive applications of nonlinear static (pushover) and dynamic (incremental dynamic) analyses. All designed building structures are evaluated by using the methodology outlined in FEMA P695. Both nonlinear static (pushover) and incremental dynamic analyses prove the PBPD method is appropriate for designing 10-story dual RC frame-structural wall systems. In addition, these two nonlinear analyses show that the PBPD structures present better performance compared to the baseline structures (including the modified baseline structures with shear strength of wall conforming to ACI 318-19). In terms of reliability evaluation, the PBPD buildings satisfy the 1% in 50 years collapse risk and the 10% probability of collapse for MCE earthquake targets used by the Indonesian seismic code, while the baseline building structures that are designed by the conventional method present the opposite results.

**Keywords:** *PBPD, Frame-Wall, Reliability, Seismic Risk Analysis, FEMA P695*



## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan yang Maha Esa karena hanya oleh rahmat dan kehendak-Nya tesis yang berjudul “Evaluasi Reliabilitas dan Aplikasi Metode *Performance-Based Plastic Design* pada Sistem Ganda Dinding-Portal Beton Bertulang” ini dapat diselesaikan. Tesis ini merupakan salah satu syarat akademik untuk menyelesaikan studi pada tingkat Strata-2 atau magister di Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan.

Tesis ini hanya dapat diselesaikan oleh penulis karena kritik, saran, bantuan, dan dorongan yang diberikan oleh banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis hendak mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Wisena Perceka, Ph.D. selaku dosen pembimbing yang dengan sabar telah bersedia meluangkan banyak waktu untuk berdiskusi, serta membantu dan mendorong penulis untuk menyelesaikan tesis ini.
2. Bapak Dr. Johannes Adhijoso Tjondro selaku anggota komite tesis dan dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan kritik dan saran di dalam seminar proposal, seminar hasil, dan sidang tesis.
3. Bapak Erwin Lim, Ph.D. selaku anggota komite tesis dan dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan kritik dan saran di dalam seminar proposal, seminar hasil, dan sidang tesis.
4. Bapak Aswin Lim, Ph.D. selaku Ketua Program Studi Magister dan Doktor Teknik Sipil dan Ibu Lusiana, A.Md. selaku Staf Sekretariat Program Studi Magister dan Doktor Teknik Sipil yang telah banyak membantu di dalam proses administrasi tesis ini.



5. Adik penulis, Debra Christin Pardede, S.Sn., yang telah membantu di dalam pembuatan dan penyuntingan beberapa gambar/ilustrasi yang digunakan di dalam tesis ini.
6. Orang tua penulis yang dengan penuh kasih terus memberikan dukungan morel dan materiel agar tesis ini dapat diselesaikan.
7. Teman kuliah, kolega, dosen, dan seluruh pihak lain yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna karena keterbatasan pengetahuan dan pengalaman yang dimiliki oleh penulis. Oleh sebab itu, penulis memohon kritik dan saran dari para pembaca. Penulis berharap tesis ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu dan praktik teknik struktur, khususnya terkait desain gedung tahan gempa. Atas perhatian dari para pembaca, penulis mengucapkan terima kasih.

Bandung, 25 Juli 2024



Dai Gratia Raflesia Christian Pardede

## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>xxvii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Inti Permasalahan	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Pembatasan Masalah	6
1.5 Metode Penelitian	8
1.6 Diagram Alir Penelitian	9
<b>BAB 2 STUDI PUSTAKA</b>	<b>13</b>
2.1 Latar Belakang dan Perkembangan Metode <i>Performance-Based Plastic Design (PBPD)</i>	13
2.2 Konsep Dasar Metode <i>PBPD</i> (Goel, dkk., 2010)	16
2.2.1 Konsep <i>Modified Energy Balance</i>	16
2.2.2 Target Simpangan dan Mekanisme Plastis Rangka Pemikul Momen	22
2.2.3 Gaya Geser Dasar Rangka Pemikul Momen	25
2.2.4 Distribusi Vertikal Gaya Lateral	26

2.3	Metode <i>PBPD</i> untuk Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang (Liao, 2010; Goel, dkk., 2010; Liao dan Goel, 2014)	28
2.3.1	Pengaruh Degradasi Kekakuan, Kekuatan, dan Efek <i>Pinching</i>	30
2.3.2	Gaya Lateral Tambahan Akibat Efek <i>P-Delta</i>	32
2.3.3	Desain Balok Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang	34
2.3.4	Desain Kolom Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang	37
2.3.5	Perbandingan dengan Metode Desain Konvensional	39
2.4	Pengembangan Lebih Lanjut Metode <i>PBPD</i> untuk Rangka Pemikul Momen Baja (Banihashemi, Mirzagoltabar, dan Tavakoli, 2015)	41
2.4.1	Pengaruh Perbedaan Panjang Bentang	42
2.4.2	Desain Balok Rangka Pemikul Momen Baja	43
2.4.3	Perbandingan dengan Metode Desain Konvensional	44
2.5	Metode <i>PBPD</i> untuk <i>Hybrid Coupled Walls</i> (Chan-Anan, Leelataviwat, dan Goel, 2016)	45
2.5.1	Pengantar Sistem <i>Hybrid Coupled Wall (HCW)</i>	45
2.5.2	Target Simpangan dan Mekanisme Plastis <i>HCW</i>	46
2.5.3	Distribusi Vertikal Gaya Lateral	48
2.5.4	Desain <i>Hybrid Coupled Walls (HCW)</i>	49
2.5.5	Desain Dinding Geser yang Berada di Luar Daerah Inelastis	50
2.5.6	Studi Kasus untuk <i>HCW</i> 10 dan 20 Lantai	51

2.6	Pengembangan Lebih Lanjut Metode <i>PBPD</i> untuk Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang (Bai, Yang, dan Ou, 2018)	53
2.6.1	Pengaruh Ragam Getar terhadap <i>Input</i> Energi Gempa	54
2.6.2	Pengaruh Degradasi Kekuatan, Kekakuan, dan Efek <i>Pinching</i>	55
2.6.3	Pengaruh Beban Gravitasi terhadap Desain Plastis Balok	57
2.6.4	Perbandingan dengan Metode Desain Konvensional	59
2.7	Rangkuman Studi Pustaka <i>PBPD</i>	61
2.8	Reliabilitas Struktur Akibat Beban Gempa	62
2.8.1	Analisis Risiko Keruntuhan Struktur Akibat Beban Gempa	63
2.8.2	Studi Kasus Evaluasi Reliabilitas Gedung Akibat Beban Gempa (Patrisia, Boediono, dan Sidi, 2017)	65
2.9	Studi <i>FEMA P695</i> Sistem <i>Ductile Reinforced Concrete Coupled Walls</i> (Tauberg, Kolozvari, dan Wallace, 2019)	67

<b>BAB 3</b>	<b>METODE <i>PBPD</i> UNTUK SISTEM GANDA DINDING-PORTAL BETON BERTULANG</b>	<b>71</b>
3.1	Mekanisme Kelelehan (Plastis)	71
3.2	Target Simpangan ( <i>Drift</i> )	72
3.3	Gaya Geser Dasar	74
3.3.1	Berat Seismik Efektif	74
3.3.2	Periode Fundamental	75
3.3.3	Faktor Modifikasi Energi	75
3.3.4	Komponen Inelastis Simpangan	75

3.3.5	Faktor Distribusi Vertikal Gaya Lateral	76
3.3.6	<i>Spectral Acceleration</i>	76
3.4	Gaya Geser Dasar dengan Efek <i>P-Delta</i>	77
3.5	Desain Elemen Sistem Ganda Dinding-Portal Beton Bertulang	78
3.5.1	Desain Rangka Pemikul Momen	79
3.5.2	Desain Dinding Geser	83
<b>BAB 4</b>	<b>PERBANDINGAN ANTARA METODE DESAIN</b>	
	<b>KONVENSIONAL DAN METODE <i>PBPD</i></b>	<b>87</b>
4.1	Metode Desain Konvensional	87
4.1.1	Sistem Struktur	87
4.1.2	Metode Analisis	88
4.1.3	Parameter Percepatan Gempa	88
4.1.4	Material Struktur	89
4.1.5	Pemodelan Elemen Struktur	89
4.1.6	Pemodelan Hubungan Balok-Kolom	90
4.1.7	<i>Stiffness Modifiers</i>	90
4.1.8	Pemodelan Diafragma	91
4.1.9	<i>Gravity Frames</i>	91
4.1.10	Desain Elemen Struktur	92
4.2	Metode <i>PBPD</i>	93
4.3	Perbandingan antara Metode Desain Konvensional dan <i>PBPD</i>	94
4.3.1	Perbandingan Desain Balok dan Kolom Rangka Pemikul Momen	95
4.3.2	Perbandingan Desain Dinding Geser	100

4.3.3	Ringkasan Hasil Desain Penampang dan Tulangan Sistem Ganda Gedung A	106
4.3.4	Ringkasan Hasil Desain Penampang dan Tulangan Sistem Ganda Gedung B	108
4.3.5	Perbandingan Desain <i>Gravity Frames</i>	111
<b>BAB 5 ANALISIS NONLINEAR</b>		<b>113</b>
5.1	Pengantar	113
5.2	Pemodelan Elemen	114
5.2.1	Pemodelan Elemen <i>Frame</i> atau <i>Beam-Column</i>	114
5.2.2	Pemodelan Elemen Balok	115
5.2.3	Pemodelan Elemen Kolom	119
5.2.4	Pemodelan Elemen Dinding Geser	123
5.3	Kriteria Kegagalan	127
5.3.1	Kriteria Kegagalan Balok	127
5.3.2	Kriteria Kegagalan Kolom	127
5.3.3	Kriteria Kegagalan Dinding Geser	128
5.4	Analisis Statik Nonlinear	128
5.4.1	Hasil Analisis Statik Nonlinear Gedung A	129
5.4.2	Hasil Analisis Statik Nonlinear Gedung B	136
5.4.3	Hasil Analisis Statik Nonlinear <i>Gravity Frames</i>	142
5.5	<i>Incremental Dynamic Analysis</i>	144
5.5.1	Analisis Dinamik Nonlinear	144
5.5.2	Metode Integrasi <i>NRHA</i>	145
5.5.3	Skema Iterasi <i>NRHA</i>	145

5.5.4	Efek <i>P-Delta</i>	145
5.5.5	<i>Damping</i>	146
5.5.6	Rekaman Gempa	146
5.5.7	Algoritma <i>IDA</i>	148
5.5.8	Hasil <i>IDA</i> Gedung A	150
5.5.9	Hasil <i>IDA</i> Gedung B	155
5.5.10	Rangkuman Hasil <i>IDA</i>	160
<b>BAB 6 EVALUASI RELIABILITAS STRUKTUR AKIBAT BEBAN</b>		
	<b>GEMPA</b>	<b>163</b>
6.1	Pengantar	163
6.2	Analisis Risiko Seismik	163
6.2.1	Kurva <i>Hazard</i>	164
6.2.2	Kurva <i>Fragility</i>	164
6.2.3	Probabilitas Keruntuhan	172
6.3	<i>Collapse Margin Ratio</i>	174
<b>BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN</b>		<b>177</b>
7.1	Kesimpulan	177
7.2	Saran	179
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		<b>xxix</b>

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

### Daftar Notasi

$A_g$	: luas bruto penampang
$ACMR$	: <i>adjusted collapse margin ratio</i>
$C_d$	: faktor pembesaran defleksi
$C_m$	: faktor massa efektif
$C_s$	: koefisien respons seismik
$C_{vx}$	: faktor distribusi vertikal gaya lateral
$CMR$	: <i>collapse margin ratio</i>
$CR$	: <i>coupling ratio</i> atau <i>degree of coupling</i>
$C_0$	: koefisien yang menghubungkan antara periode fundamental <i>SDOF</i> ekivalen dengan simpangan atap
$C_2$	: koefisien untuk memperhitungkan degradasi kekakuan dan/atau kekuatan
$E$	: total energi gempa
$E_I$	: total energi gempa yang masuk ke struktur ( <i>input energy</i> )
$E_{I,MDOF}$	: <i>input</i> energi gempa <i>MDOF</i> (struktur aktual)
$E_{I,SDOF}$	: <i>input</i> energi gempa <i>SDOF</i> ekivalen
$E_e$	: komponen elastis energi gempa yang masuk ke struktur <i>elastic vibrational energy</i>
$E_p$	: komponen inelastis/plastis energi gempa yang masuk ke struktur energi yang didisipasi oleh mekanisme kelelahan (plastis)
$e$	: panjang balok perangkai



$F$	: gaya lateral
$F_{PD}$	: tambahan gaya lateral akibat efek <i>P-Delta</i>
$f_c'$	: kuat tekan beton
$f_{capacity}(C)$	: fungsi distribusi peluang terjadinya kegagalan struktur akibat berbagai nilai percepatan gempa
$f_y$	: tegangan leleh mutu tulangan
$f_{yl}$	: tegangan leleh tulangan longitudinal
$f_{yt}$	: tegangan leleh tulangan transversal
$g$	: percepatan gravitasi
$h$	: tinggi struktur elevasi lantai tinggi penampang balok
$h_1$	: tinggi lantai dasar
$I$	: faktor keutamaan struktur
$im_i$	: nilai <i>IM</i> rekaman gempa ke- <i>i</i> yang menyebabkan keruntuhan
$k$	: eksponen untuk penentuan distribusi vertikal gaya lateral menurut SNI 1726:2019
$L$	: panjang balok panjang bentang
$L'$	: jarak antar sendi plastis balok
$L_p$	: panjang sendi plastis balok
$M$	: total massa seismik struktur momen lentur

	magnitudo
$M_{max}$	: momen (positif) maksimum pada balok
$M_n$	: momen negatif balok hasil desain dengan metode <i>PBPD</i>
$M_p$	: momen positif balok hasil desain dengan metode <i>PBPD</i>
$M_{pb}$	: momen plastis balok
$M_{pb-neg}$	: momen plastis negatif balok
$M_{pb-pos}$	: momen plastis positif balok
$M_{pc}$	: momen plastis kolom
$M_{pr}$	: momen <i>probable</i> balok
$M_{pdesign}$	: $M_{preq}$ yang diperbesar menurut Persamaan 2.49
$M_{preq}$	: momen plastis kolom hasil desain dengan metode <i>PBPD</i>
$M_{pw}$	: total kapasitas momen dinding geser
$M_{pwc}$	: kapasitas dinding tekan
$M_{pwt}$	: kapasitas dinding tarik
$m$	: jumlah bentang
$N$	: gaya aksial tekan
$P$	: beban gravitasi pada kolom beban aksial tekan probabilitas, peluang, kemungkinan
$PGA$	: <i>peak ground acceleration</i>
$PGA_{collapse}$	: <i>PGA</i> saat terjadinya keruntuhan
$PGA_m$	: <i>PGA</i> yang sudah disesuaikan dengan kelas situs
$P[Collapse]$	: <i>probability of collapse</i> tahunan
$P(F)$	: probabilitas keruntuhan

- $P(F/IM = x)$  : probabilitas keruntuhan akibat  $IM$  dengan nilai  $x$   
kurva *fragility*
- $P[SA > c]$  : peluang/kemungkinan tahunan terjadinya *spectral acceleration*  
lebih besar dari  $c$
- $Q$  : gaya dalam
- $Q_{Design}$  : gaya dalam yang digunakan untuk desain
- $Q_y$  : gaya dalam akibat gaya geser dasar metode *PBPD*
- $Q_z$  : gaya dalam akibat gaya lateral berdasarkan ragam getar kedua
- $q$  : beban gravitasi merata balok.
- $R$  : faktor modifikasi respons  
jarak ke sumber gempa
- $R_\mu$  : faktor reduksi gaya akibat daktilitas struktur *EP-SDOF* ekuivalen
- $S_a$  : *spectral acceleration*
- $S_{CT}$  : *median collapse intensity*
- $S_{ds}$  : parameter percepatan respons spektral pada periode pendek,  
redaman 5%
- $S_{d1}$  : parameter percepatan respons spektral pada periode 1 detik,  
redaman 5%
- $S_{ms}$  : parameter percepatan respons spektral *MCE* pada periode pendek,  
redaman 5%
- $S_{MT}$  : intensitas percepatan pada kondisi gempa *MCE*
- $S_{m1}$  : parameter percepatan respons spektral *MCE* pada periode 1 detik,  
redaman 5%

$S_v$	: <i>spectral velocity</i>
$SA$	: <i>spectral acceleration</i>
$SSF$	: <i>spectral shape function</i>
$s$	: jarak <i>center-to-center</i> dinding tarik dan tekan
$T$	: periode fundamental struktur
$T_1$	: periode fundamental dari analisis ragam
$V$	: gaya geser gaya geser dasar
$V^*$	: gaya geser dasar yang sudah ditambahkan dengan $V_{PD}$
$V_e$	: gaya geser dasar <i>SDOF</i> ekivalen akibat gempa
$V_{max}$	: gaya geser dasar maksimum pada kurva <i>pushover</i>
$V_{one-bay}$	: gaya geser dasar untuk satu bentang
$V_{pb}$	: gaya geser plastis balok perangkai
$V_{PD}$	: tambahan gaya geser dasar akibat efek <i>P-Delta</i>
$V_y$	: gaya geser dasar saat leleh gaya geser dasar desain struktur
$V_{pw}$	: gaya geser dinding geser pada saat mekanisme plastis terjadi
$V_w$	: gaya geser pada dinding geser
$W$	: berat seismik struktur
$w$	: berat seismik lantai
$W_{tributary}$	: beban gravitasi <i>tributary</i> pada balok
$x$	: rasio antara momen plastis negatif dan positif balok lokasi momen plastis maksimum balok akibat beban gravitasi
$Y$	: periode ulang dalam satuan tahun

$\alpha$	: parameter distribusi gaya lateral inelastis
$\beta$	: faktor distribusi gaya geser deviasi standar
$\beta_{DR}$	: ketidakpastian akibat ketidaksesuaian dengan asumsi yang digunakan oleh standar atau peraturan desain ( <i>design requirements-related collapse uncertainty</i> )
$\beta_{MDL}$	: ketidakpastian akibat akurasi pemodelan ( <i>model-related collapse uncertainty</i> )
$\beta_{RTR}$	: ketidakpastian akibat variasi rekaman gempa ( <i>record-to-record collapse uncertainty</i> )
$\beta_{TD}$	: ketidakpastian akibat variasi data antar-pengujian atau antar-analisis ( <i>test-data related collapse uncertainty</i> )
$\beta_{TOT}$	: total ketidakpastian sistem
$\Gamma$	: faktor partisipasi ragam
$\gamma$	: faktor modifikasi energi
$\gamma_p$	: rotasi plastis balok
$\Delta$	: peralihan atap
$\Delta_{eu}$	: peralihan maksimum <i>SDOF</i> ekuivalen akibat gempa
$\Delta_p$	: komponen inelastic/plastis peralihan
$\Delta_u$	: peralihan <i>EP-SDOF</i> ekuivalen akibat gempa target peralihan struktur
$\Delta_y$	: peralihan saat leleh
$\delta_u$	: simpangan atap pada titik terakhir kurva <i>pushover</i>

$\delta_{y,eff}$	: simpangan leleh atap efektif
$\epsilon_{sh}$	: regangan saat dimulainya <i>strain-hardening</i>
$\epsilon_u$	: regangan <i>ultimate</i> atau putus tulangan
$\zeta_{eq,F}$	: <i>equivalent viscous damping</i> untuk <i>EP-SDOF</i>
$\zeta_{eq,P}$	: <i>equivalent viscous damping SDOF</i> yang mengalami degradasi kekakuan, kekuatan dan/atau <i>pinching</i>
$\eta$	: faktor reduksi energi histeresis
$\theta$	: rasio simpangan atap ( <i>roof drift ratio</i> ) median kurva <i>fragility</i>
$\theta_p$	: komponen inelastis/plastis rasio simpangan rotasi plastis dinding geser
$\theta_u$	: target rasio simpangan
$\theta_u^*$	: target rasio simpangan yang sudah dimodifikasi dengan faktor/koeffisien $C_2$
$\theta_y$	: rasio simpangan saat leleh
$\lambda$	: faktor distribusi vertikal gaya lateral frekuensi terjadinya suatu kejadian ( <i>event</i> )
$\lambda(IM)$	: kurva <i>hazard</i>
$\rho_l$	: rasio tulangan longitudinal
$\rho_{sh}$	: rasio tulangan geser atau kekangan
$\mu_s$	: <i>displacement ductility</i> struktur <i>EP-SDOF</i> ekuivalen
$\mu_T$	: daktilitas berdasarkan atau berbasis periode
$\mu$	: daktilitas rasio antara panjang lantai dan bentang terpanjang

$\xi$	: faktor kuat lebih balok faktor kuat lebih dinding geser
$\sigma_d$	: rasio simpangan antar-lantai terbesar dibagi dengan rasio simpangan antar lantai rata-rata akibat gaya lateral yang didasarkan pada ragam getar pertama
$\psi$	: faktor kuat lebih untuk desain kolom lantai dasar
$\Phi()$	: <i>standard normal cumulative distribution function</i>
$\Omega_0$	: faktor kuat lebih sistem struktur penahan gaya lateral
$\omega$	: frekuensi natural struktur

### **Daftar Singkatan**

<i>ACI</i>	: <i>American Concrete Institute</i>
<i>AISC</i>	: <i>American Institute of Steel Construction</i>
<i>ASCE</i>	: <i>American Society of Civil Engineers</i>
<i>ATC</i>	: <i>Applied Technology Council</i>
<i>BHRC</i>	: <i>Building and Housing Research Center</i>
BjTS	: Baja Tulangan Beton Sirip/Ulir
BSN	: Badan Standardisasi Nasional
<i>BSSC</i>	: <i>Building Seismic Safety Council</i>
<i>CABR</i>	: <i>China Academy of Building Research</i>
<i>CBF</i>	: <i>Centrically-Braced Frames</i>
<i>CDF</i>	: <i>Cumulative Distribution Function</i>
<i>CP</i>	: <i>Collapse Prevention</i>
<i>CSI</i>	: <i>Computers and Structures, Inc.</i>

<i>DBE</i>	: <i>Design-Basis Earthquake</i>
<i>EBF</i>	: <i>Eccentrically-Braced Frames</i>
<i>EERI</i>	: <i>Earthquake Engineering Research Institute</i>
<i>ELF</i>	: <i>Equivalent Lateral Force</i>
<i>EP-SDOF</i>	: <i>Elastic-Perfectly Plastic Single-Degree-of-Freedom</i>
<i>ETABS</i>	: <i>Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems</i>
<i>FEMA</i>	: <i>Federal Emergency Management Agency</i>
<i>HCW</i>	: <i>Hybrid Coupled Walls</i>
<i>ICC</i>	: <i>International Code Council</i>
<i>IO</i>	: <i>Immediate Occupancy</i>
<i>IDA</i>	: <i>Incremental Dynamic Analysis</i>
<i>IM</i>	: <i>intensity measure</i>
<i>LRHA</i>	: <i>Linear Response History Analysis</i>
<i>LS</i>	: <i>Life Safety</i>
<i>MCE</i>	: <i>Maximum Considered Earthquake</i>
<i>MCE<sub>R</sub></i>	: <i>Risk-Targeted Maximum Considered Earthquake</i>
<i>MDOF</i>	: <i>Multi-Degree-of-Freedom</i>
<i>MF</i>	: <i>Moment-resisting Frames</i>
<i>MRSA</i>	: <i>Modal Response Spectrum Analysis</i>
<i>NCSEA</i>	: <i>National Council of Structural Engineers Association</i>
<i>NEHRP</i>	: <i>National Earthquake Hazards Reduction Program</i>
<i>NGA</i>	: <i>Next Generation Attenuation</i>
<i>NIST</i>	: <i>National Institute of Standards and Technology</i>
<i>NRHA</i>	: <i>Nonlinear Response History Analysis</i>



<i>PBD</i>	: <i>Performance-Based Design</i>
<i>PBPD</i>	: <i>Performance-Based Plastic Design</i>
<i>PDF</i>	: <i>Probability Density Function</i>
<i>PEER</i>	: <i>Pacific Earthquake Engineering Research Center</i>
<i>PGA</i>	: <i>Peak Ground Acceleration</i>
<i>PSHA</i>	: <i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i>
<i>RC</i>	: <i>Reinforced Concrete</i>
<i>RTR</i>	: <i>record-to-record uncertainty</i>
<i>SDOF</i>	: <i>Single-Degree-of-Freedom</i>
<i>SEAOC</i>	: <i>Structural Engineers Association of California</i>
<i>SEI</i>	: <i>Structural Engineering Institute</i>
<i>SMF</i>	: <i>Special Moment-resisting Frames</i>
<i>SNI</i>	: <i>Standar Nasional Indonesia</i>
<i>SSRS</i>	: <i>Square Root of the Sum of the Squares</i>
<i>STMF</i>	: <i>Special Truss Moment Frames</i>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Denah dan Elevasi Gedung A dan B; dalam mm (Dimodifikasi dari Bao dan Kunnath, 2010)	7
Gambar 1.2	Diagram Alir Penelitian Metode Desain Konvensional	10
Gambar 1.3	Diagram Alir Penelitian Metode <i>PBPD</i>	11
Gambar 2.1	Konsep Umum Metode <i>PBPD</i> (Goel, dkk., 2010)	17
Gambar 2.2	Spektrum Desain Inelastis Newmark dan Hall (1982) untuk Sistem <i>EP-SDOF</i> (Goel, dkk., 2010)	20
Gambar 2.3	Faktor Modifikasi Energi berdasarkan Spektrum Inelastis Newmark dan Hall (1982) untuk Sistem <i>EP-SDOF</i> (Goel, dkk., 2010)	21
Gambar 2.4	Target Simpangan dan Mekanisme Kelelehan (Plastis) Rangka Pemikul Momen (Goel, dkk., 2010)	23
Gambar 2.5	Denah Gedung <i>Archetypes</i> Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang (Liao, 2010)	29
Gambar 2.6	Gaya Lateral Tambahan Akibat Efek <i>P-Delta</i> (Liao dan Goel, 2014)	33
Gambar 2.7	Mekanisme Plastis Rangka Pemikul Momen (Dimodifikasi dari Goel, dkk., 2010)	34
Gambar 2.8	Mekanisme <i>Soft Story</i> Rangka Pemikul Momen (Goel, dkk., 2010)	36
Gambar 2.9	“ <i>Column Tree</i> ” Eksterior dan Interior (Dimodifikasi dari Liao, 2010)	37

Gambar 2.10	Profil Simpangan dan Lokasi Kelelahan Hasil Analisis <i>Pushover</i> untuk: (a) Metode Konvensional; (b) Metode <i>PBPD</i> (Liao dan Goel, 2014)	40
Gambar 2.11	Perbandingan antara Mekanisme Kelelahan (Plastis) Metode Konvensional dan <i>PBPD</i> (Banihashemi, Mirzagoltabar, dan Tavakoli, 2015)	44
Gambar 2.12	Target Simpangan dan Mekanisme Plastis <i>HCW</i> (Dimodifikasi dari Chan-Anan, Leelataviwat, dan Goel, 2016)	47
Gambar 2.13	Elevasi dan Denah <i>HCW</i> yang Dijadikan Bahan Studi Kasus (Chan-Anan, Leelataviwat, dan Goel, 2016)	52
Gambar 2.14	Denah dan Elevasi Gedung Rangka Pemikul Momen Bertulang Tujuh Lantai (Bai, Yang, dan Ou, 2018)	54
Gambar 2.15	Desain Balok Akibat Pengaruh Beban Gravitasi (Bai, Yang, dan Ou, 2018)	58
Gambar 2.16	Perbandingan Hasil Analisis <i>Pushover</i> Metode <i>PBPD</i> dan Konvensional (Bai, Yang, dan Ou, 2018)	59
Gambar 2.17	Kurva <i>Fragility Thamrin 9 Tower 1</i> dalam bentuk <i>PDF</i> (Patrisia, Boediono, dan Sidi, 2017)	66
Gambar 2.18	Kurva <i>Fragility Thamrin 9 Tower 1</i> dalam bentuk <i>CDF</i> (Patrisia, Boediono, dan Sidi, 2017)	66
Gambar 2.19	Kurva <i>Hazard</i> Jakarta (Patrisia, Boediono, dan Sidi, 2017)	67
Gambar 3.1	Mekanisme Kelelahan (Plastis) Gedung A	71

Gambar 3.2	Mekanisme Kelelahan (Plastis) Gedung B	72
Gambar 3.3	“ <i>Column Tree</i> ” Dinding Geser	84
Gambar 4.1	Penampang Kolom Gedung A yang Didesain dengan Metode Konvensional: (a) Kolom Tepi dan (b) Kolom Sudut	99
Gambar 4.2	Penampang Kolom Gedung A yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i> : (a) Kolom Tepi dan (b) Kolom Sudut	99
Gambar 4.3	Penampang Kolom Sudut Gedung B yang Didesain dengan Metode Konvensional	100
Gambar 4.4	Penampang Kolom Sudut Gedung B yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	100
Gambar 4.5	Penampang Dinding Geser Gedung A yang Desain Gesernya Mengikuti SNI 2847:2019: (a) Lantai 1-4 dan (b) Lantai 5-10	102
Gambar 4.6	Penampang Dinding Geser Gedung A yang Desain Gesernya Mengikuti <i>ACI 318-19</i> : (a) Lantai 1-5 dan (b) Lantai 6-10	102
Gambar 4.7	Penampang Dinding Geser Gedung A yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i> : (a) Lantai 1-5 dan (b) Lantai 6-10	103
Gambar 4.8	Penampang Dinding Geser Gedung B yang Desain Gesernya Mengikuti SNI 2847:2019: (a) Lantai 1-3 dan (b) Lantai 4-10	103

Gambar 4.9	Penampang Dinding Geser Gedung B yang Desain Gesernya Mengikuti <i>ACI 318-19</i> : (a) Lantai 1-3 dan (b) Lantai 4-10	104
Gambar 4.10	Penampang Dinding Geser Gedung B yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	104
Gambar 4.11	Hasil Desain Penampang dan Tulangan Sistem Ganda Gedung A yang Didesain dengan SNI 2847:2019	106
Gambar 4.12	Hasil Desain Penampang dan Tulangan Sistem Ganda Gedung A yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	107
Gambar 4.13	Hasil Desain Penampang dan Tulangan Sistem Ganda Gedung A yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	108
Gambar 4.14	Hasil Desain Penampang dan Tulangan Sistem Ganda Gedung B yang Didesain dengan SNI 2847:2019	109
Gambar 4.15	Hasil Desain Penampang dan Tulangan Sistem Ganda Gedung B yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	110
Gambar 4.16	Hasil Desain Penampang dan Tulangan Sistem Ganda Gedung B yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	111
Gambar 5.1	Idealisasi Model Elemen <i>Frame</i> atau <i>Beam-Column</i> (Deierlein, Reinhorn, dan Willford, 2010)	114
Gambar 5.2	Diagram Hubungan Beban-Deformasi Elemen Beton Bertulang ( <i>ASCE</i> , 2017)	116
Gambar 5.3	Model Histeresis <i>Pivot</i> (Ling, Mogili, dan Hwang, 2022)	117

Gambar 5.4	Diagram Tegangan-Regangan Model Beton Mander (Mander, Priestley, dan Park, 1988)	119
Gambar 5.5	Model Histeresis <i>Concrete</i> dengan Faktor Degradasi Energi Sebesar 0,7 (CSI, 2017)	120
Gambar 5.6	Diagram Tegangan-Regangan Tulangan Baja (CSI, 2008)	121
Gambar 5.7	Model Histeresis <i>Kinematic</i> (CSI, 2017)	122
Gambar 5.8	Formulir atau Menu Isian Elemen <i>Fiber P-M2-M3</i> Kolom Beton Bertulang (CSI, 2017)	123
Gambar 5.9	Idealisasi Model Elemen Dinding Geser Beton Bertulang <i>Flexure-Controlled</i> (NIST, 2017b)	123
Gambar 5.10	Pemodelan Elemen <i>Fiber</i> pada Penampang Dinding Geser Beton Bertulang (ATC, 2010)	124
Gambar 5.11	Elemen <i>General Shear Wall</i> pada ETABS (CSI, 2022)	124
Gambar 5.12	Formulir atau Menu Isian Elemen <i>Fiber P-M3</i> Dinding Geser Beton Bertulang (CSI, 2017)	126
Gambar 5.13	Kurva <i>Pushover</i> Gedung A	130
Gambar 5.14	<i>Performance Point</i> Gedung A yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	132
Gambar 5.15	<i>Performance Point</i> Gedung A yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	132
Gambar 5.16	Deformasi Sistem Ganda Gedung A yang Didesain dengan SNI 2847:2019 pada Titik Keruntuhan	133

Gambar 5.17	Deformasi dan Mekanisme Plastis Sistem Ganda Gedung A yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i> pada <i>Performance Point</i>	134
Gambar 5.18	Deformasi dan Mekanisme Plastis Sistem Ganda Gedung A yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i> pada <i>Performance Point</i>	135
Gambar 5.19	Kurva <i>Pushover</i> Gedung B	137
Gambar 5.20	<i>Performance Point</i> Gedung B yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	138
Gambar 5.21	<i>Performance Point</i> Gedung B yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	139
Gambar 5.22	Deformasi Sistem Ganda Gedung B yang Didesain dengan SNI 2847:2019 pada Titik <i>Ultimate</i> Kurva <i>Pushover</i>	140
Gambar 5.23	Deformasi dan Mekanisme Plastis Sistem Ganda Gedung B yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i> pada <i>Performance Point</i> Kurva <i>Pushover</i>	141
Gambar 5.24	Deformasi dan Mekanisme Plastis Sistem Ganda Gedung B yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i> pada <i>Performance Point</i>	141
Gambar 5.25	Deformasi dan Mekanisme Plastis <i>Gravity Frames</i> Gedung A yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i> pada <i>Performance Point</i>	142

Gambar 5.26	Deformasi dan Mekanisme Plastis <i>Gravity Frames</i> Gedung B yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i> pada <i>Performance Point</i>	143
Gambar 5.27	Diagram Gaya Geser Dasar vs. Waktu Gedung A yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	150
Gambar 5.28	Distribusi Sendi Plastis Sistem Ganda Arah X Gedung A yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	151
Gambar 5.29	Distribusi Sendi Plastis Sistem Ganda Arah Y Gedung A yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	152
Gambar 5.30	Diagram Gaya Geser Dasar vs. Waktu Gedung A yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	153
Gambar 5.31	Distribusi Sendi Plastis Sistem Ganda Arah X Gedung A yang Didesain dengan metode <i>PBPD</i>	154
Gambar 5.32	Distribusi Sendi Plastis Sistem Ganda Arah Y Gedung A yang Didesain dengan metode <i>PBPD</i>	154
Gambar 5.33	Diagram Gaya Geser Dasar vs. Waktu Gedung B yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	155
Gambar 5.34	Distribusi Sendi Plastis Sistem Ganda Arah X Gedung B yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	156



Gambar 5.35	Distribusi Sendi Plastis Sistem Ganda Arah Y Gedung B yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	157
Gambar 5.36	Diagram Gaya Geser Dasar vs. Waktu Gedung B yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	158
Gambar 5.37	Distribusi Sendi Plastis Sistem Ganda Arah X Gedung B yang Didesain dengan metode <i>PBPD</i>	159
Gambar 5.38	Distribusi Sendi Plastis Sistem Ganda Arah Y Gedung B yang Didesain dengan metode <i>PBPD</i>	159
Gambar 6.1	Kurva <i>Fragility</i> Gedung A yang Didesain dengan SNI 2847:2019	167
Gambar 6.2	Kurva <i>Fragility</i> Gedung A yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	168
Gambar 6.3	Kurva <i>Fragility</i> Gedung A yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	169
Gambar 6.4	Kurva <i>Fragility</i> Gedung B yang Didesain dengan Metode Konvensional	170
Gambar 6.5	Kurva <i>Fragility</i> Gedung B yang Kapasitas Geser Dindingnya Didesain dengan <i>ACI 318-19</i>	171
Gambar 6.6	Kurva <i>Fragility</i> Gedung B yang Didesain dengan Metode <i>PBPD</i>	172

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Spektrum Desain Inelastis Newmark dan Hall (1982) untuk Sistem <i>EP-SDOF</i> (Liao, 2010)	21
Tabel 2.2	Asumsi Rasio Simpangan saat Leleh (Liao, 2010)	24
Tabel 2.3	Estimasi Rasio Simpangan saat Leleh ( <i>BSSC</i> , 2009)	25
Tabel 2.4	Parameter Desain Sistem Rangka Pemikul Momen Beton Bertulang (Liao dan Goel, 2014)	30
Tabel 2.5	Faktor Massa Efektif, $C_m$ ( <i>ASCE</i> , 2000)	31
Tabel 2.6	Rekomendasi Nilai $C_2$ (Liao, 2010)	32
Tabel 2.7	Parameter Desain <i>HCW</i> (Chan-Anan, Leelataviwat, dan Goel, 2016)	52
Tabel 2.8	Rekomendasi Nilai $\eta$ (Bai, Yang, dan Ou, 2018)	56
Tabel 2.9	Hasil Studi <i>FEMA P695 Ductile Reinforced Concrete Coupled Walls</i> yang Didesain berdasarkan <i>ACI 318-14</i> (Tauberg, Kolozvari, dan Wallace, 2019)	68
Tabel 4.1	Parameter Desain Metode <i>PBPD</i> untuk Sistem Ganda Dinding-Portal	93
Tabel 4.2	Perbandingan Parameter Desain Seismik Metode Desain Konvensional dan <i>PBPD</i>	94
Tabel 4.3	Perbandingan Dimensi dan Massa Beton Balok dan Kolom Rangka Pemikul Momen Gedung A	96
Tabel 4.4	Perbandingan Dimensi dan Massa Beton Balok dan Kolom Rangka Pemikul Momen Gedung B	96

Tabel 4.5	Perbandingan Massa Tulangan Longitudinal Balok dan Kolom Rangka Pemikul Momen Gedung A	97
Tabel 4.6	Perbandingan Massa Tulangan Longitudinal Balok dan Kolom Rangka Pemikul Momen Gedung B	97
Tabel 4.7	Perbandingan Tulangan Geser Balok dan Kolom Rangka Pemikul Momen Gedung A	98
Tabel 4.8	Perbandingan Tulangan Geser Balok dan Kolom Rangka Pemikul Momen Gedung B	98
Tabel 4.9	Perbandingan Dimensi dan Massa Dinding Geser Gedung A	101
Tabel 4.10	Perbandingan Dimensi dan Massa Dinding Geser Gedung B	101
Tabel 4.11	Perbandingan Massa Tulangan Longitudinal Dinding Geser Gedung A dan Gedung B	104
Tabel 4.12	Perbandingan Tulangan Geser <i>Critical Section</i> (Penampang Kritis) Dinding Geser Gedung A	105
Tabel 4.13	Perbandingan Tulangan Geser <i>Critical Section</i> (Penampang Kritis) Dinding Geser Gedung B	105
Tabel 5.1	Data Rekaman Gempa untuk <i>IDA</i>	147
Tabel 5.2	Ilustrasi Algoritma <i>Hunt &amp; Fill</i> (Vamvatsikos dan Cornell, 2004)	148
Tabel 5.3	Rangkuman Hasil <i>IDA</i> Gedung A	161
Tabel 5.4	Rangkuman Hasil <i>IDA</i> Gedung B	161
Tabel 6.1	Probabilitas Keruntuhan Gedung A dan B	173
Tabel 6.2	<i>Collapse Margin Ratio</i> Gedung A dan B	175

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Saat ini desain seismik sebagian besar struktur gedung beton bertulang di Indonesia dilakukan berdasarkan analisis struktur elastis linear. Dengan kata lain, perilaku inelastis struktur diperhitungkan secara tidak langsung dalam proses desain. Peraturan perencanaan struktur bangunan tahan gempa yang berlaku di Indonesia, yaitu SNI 1726:2019, mengharuskan struktur bangunan gedung untuk memiliki sistem penahan gaya lateral dan gravitasi yang kekuatan, kekakuan, dan kapasitas disipasi energinya cukup untuk menahan gerakan tanah akibat gempa desain/rencana sesuai dengan batasan-batasan deformasi dan kekuatan yang berlaku. Untuk memenuhi ketentuan desain bangunan tahan gempa tersebut, elemen-elemen struktur gedung beton bertulang harus mampu berdeformasi secara inelastis tanpa mengalami keruntuhan prematur yang bersifat getas. Hal ini diasumsikan dapat tercapai selama ketentuan-ketentuan perencanaan dan *detailing* tahan gempa yang tercantum di dalam peraturan desain struktur gedung beton bertulang, seperti SNI 2847:2019, diikuti sepenuhnya.

Metode desain seismik konvensional seperti yang disebutkan di atas mengandung dua ketentuan umum yang harus dipenuhi, yaitu: (1) kemampuan struktur untuk menahan gaya geser dasar yang nilainya bergantung pada percepatan gempa rencana, faktor keutamaan struktur, jenis sistem struktur, dan karakteristik dinamik struktur, dan (2) kemampuan struktur untuk berdeformasi secara inelastis

tanpa mengalami keruntuhan atau yang seringkali disebut dengan daktilitas struktur. Penggunaan analisis struktur elastis linear pada metode desain konvensional menyebabkan perilaku inelastis dan daktilitas struktur harus didekati dengan menggunakan faktor atau koefisien yang diasumsikan dapat memodifikasi respons elastis menjadi respons inelastis struktur.

Pada metode desain seismik konvensional, gaya geser dasar desain,  $V$ , yang diasumsikan sudah memperhitungkan perilaku inelastis dan daktilitas struktur ditentukan melalui perkalian antara parameter percepatan gempa, berat seismik efektif,  $W$ , dan faktor keutamaan struktur,  $I$ , yang kemudian dibagi dengan faktor modifikasi respons,  $R$ . Faktor  $I$  digunakan untuk memperhitungkan target kinerja dan risiko keruntuhan struktur, sementara faktor  $R$  digunakan untuk memperhitungkan perilaku inelastis dan daktilitas struktur. Deformasi inelastis struktur ditentukan melalui perkalian antara peralihan/defleksi struktur yang diperoleh dari analisis elastis dan faktor pembesaran defleksi,  $C_d$ . Dengan demikian, pada metode desain konvensional, respons inelastis struktur didekati melalui dua buah faktor, yaitu  $R$  dan  $C_d$ , yang nilainya diatur di dalam peraturan perencanaan struktur bangunan tahan gempa seperti SNI 1726:2019.

Proses penentuan faktor modifikasi respons,  $R$ , dan faktor pembesaran defleksi,  $C_d$ , dipandang sebagai bagian yang paling kontroversial dalam proses pembuatan peraturan desain struktur gedung tahan gempa (Uang, 1991). Whittaker, Hart, dan Rojahn (1999) menyatakan bahwa  $R$  merupakan faktor empiris yang didasarkan pada *engineering judgment* dan tidak memiliki landasan teknis yang cukup kuat. Sementara itu, Uang dan Maarouf (1994) menyatakan bahwa faktor pembesaran defleksi,  $C_d$ , yang berlaku di Amerika Serikat pada saat itu terlalu kecil

dan dapat menghasilkan estimasi simpangan yang tidak konservatif sehingga mereka merekomendasikan penggunaan  $C_d$  yang besarnya setidaknya sama dengan  $R$ . Pada proses pengembangan *NEHRP Provisions* yang berisi rekomendasi untuk perubahan terhadap *ASCE 7-16*, terdapat usulan untuk menggantikan peran  $C_d$  dalam penentuan simpangan dengan  $R$  (BSSC, 2020). Saat ini nilai  $R$  dan  $C_d$  untuk suatu sistem struktur ditentukan dengan menggunakan metodologi yang lebih sistematis dan rasional, yaitu metodologi *FEMA P695* (ATC, 2009a). Meskipun demikian, metodologi *FEMA P695* tetap didasarkan pada struktur *archetypes* yang bentuknya beraturan. Selain itu, tidak semua sistem struktur yang tercantum di dalam SNI 1726:2019 yang berlaku di Indonesia saat ini sudah dievaluasi dengan metodologi *FEMA P695*.

Selain permasalahan terkait faktor-faktor modifikasi seperti yang telah diuraikan di atas, metode desain konvensional juga dianggap kurang praktis karena sifatnya yang iteratif. Gedung yang elemen-elemen strukturnya sudah didesain berdasarkan ketentuan desain dan *detailing* tahan gempa tidak dengan sendirinya dapat dinyatakan sudah memenuhi ketentuan batasan simpangan antar-lantai (*story drift*). Proses desain akan menjadi lebih ringkas dan sederhana apabila batasan simpangan yang berfungsi untuk mencegah terjadinya instabilitas global akibat deformasi inelastis yang berlebihan sudah diperhitungkan secara langsung pada tahap awal perencanaan.

Penggunaan analisis struktur elastis linear pada metode desain konvensional tidak memungkinkan perencana untuk mengetahui secara langsung perilaku inelastis struktur yang dirancangnya. Hal ini memungkinkan terjadinya perilaku-perilaku struktur yang tidak diharapkan pada saat menahan gempa kuat, seperti

sendi plastis yang tidak terbentuk pada balok, kaki kolom lantai dasar, dan kaki dinding geser, sendi plastis yang terbentuk pada kedua ujung kolom sebelum balok, dan kegagalan yang bersifat getas seperti tekuk dan geser. Perilaku-perilaku tersebut dapat menyebabkan tidak terpenuhinya target kinerja struktur yang telah ditetapkan melalui faktor keutamaan struktur, *I*.

Untuk menghindari berbagai permasalahan yang telah disebutkan di atas, pada akhir dekade 1990-an, beberapa peneliti dari *University of Michigan, Ann Arbor* mengembangkan sebuah metode desain seismik yang target simpangan (*drift*) dan lokasi sendi-sendi plastisnya sudah diperhitungkan sejak tahap awal perencanaan (Goel, dkk., 2010). Metode tersebut dinamakan *performance-based plastic design (PBPD)* atau desain plastis berbasis kinerja.

Metode *PBPD* telah berhasil diterapkan pada sistem struktur baja dengan bresing eksentris (Chao dan Goel, 2006), bresing konsentris (Bayat, Goel, dan Chao, 2010), bresing tahan tekuk (Sahoo dan Chao, 2010), dinding geser pelat baja (Bayat, 2010), rangka batang pemikul momen (Chao dan Goel, 2008), dan rangka pemikul momen (Lee dan Goel, 2001; Lee, 2002). Berdasarkan beberapa studi tersebut, sebuah buku panduan desain struktur gedung tahan gempa dengan metode *PBPD* untuk sistem struktur baja telah dipublikasikan oleh *International Code Council* (Goel dan Chao, 2008). Metode *PBPD* juga telah berhasil diterapkan pada sistem rangka pemikul momen beton bertulang (Liao, 2010; Liao dan Goel, 2014) dan *hybrid coupled wall*, yakni dinding geser beton bertulang dengan balok perangkai baja (Chan-Anan, Leelataviwat, dan Goel, 2016).

Studi-studi mengenai metode *PBPD* yang disebutkan di atas menyatakan bahwa struktur yang didesain dengan metode *PBPD* memiliki kinerja yang lebih

baik daripada struktur yang didesain dengan metode desain konvensional. Selain itu, target simpangan (*drift*) dan urutan terbentuknya sendi plastis dapat tercapai pada semua struktur yang didesain dengan menggunakan metode *PBPD* tanpa memerlukan banyak iterasi. Meskipun metode *PBPD* sudah berhasil diterapkan pada berbagai sistem struktur baja dan beton bertulang, hingga saat ini belum terdapat literatur yang membahas mengenai penerapan metode *PBPD* pada sistem ganda dinding-portal beton bertulang seperti yang banyak digunakan pada struktur gedung bertingkat menengah dan tinggi di Indonesia.

## 1.2 Inti Permasalahan

Gedung-gedung dengan sistem ganda dinding-portal beton bertulang memiliki jumlah, lokasi, dan lebar dinding yang berbeda antara gedung satu dan lainnya. Hal ini secara langsung mempengaruhi perilaku elastis dan inelastis gedung-gedung tersebut. Sistem ganda dinding-portal beton bertulang direncanakan untuk mendisipasi energi gempa melalui deformasi inelastis balok, kaki kolom lantai dasar, dan kaki dinding geser. Perbedaan jumlah, lokasi, dan lebar dinding dapat menyebabkan deformasi inelastis terjadi pada lokasi yang tidak direncanakan ataupun tidak terjadi pada lokasi yang justru direncanakan. Hal ini menimbulkan pertanyaan terhadap praktik desain dengan metode konvensional yang didasarkan pada faktor  $R$  dan  $C_d$  yang bernilai konstan.

Pada metode *PBPD*, perilaku inelastis struktur diperhitungkan secara langsung melalui target simpangan (*drift*) dan mekanisme kelelahan (plastis). Hal ini dapat mengurangi ketidakpastian terkait perilaku inelastis gedung dan



kemampuannya untuk mendisipasi energi pada saat terjadinya gempa kuat. Saat ini tidak terdapat literatur mengenai aplikasi metode *PBPD* pada sistem ganda dinding-portal beton bertulang. Oleh karena itu, studi untuk mengembangkan dan menerapkan metode *PBPD* pada sistem ganda dinding-portal beton bertulang perlu dilakukan.

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

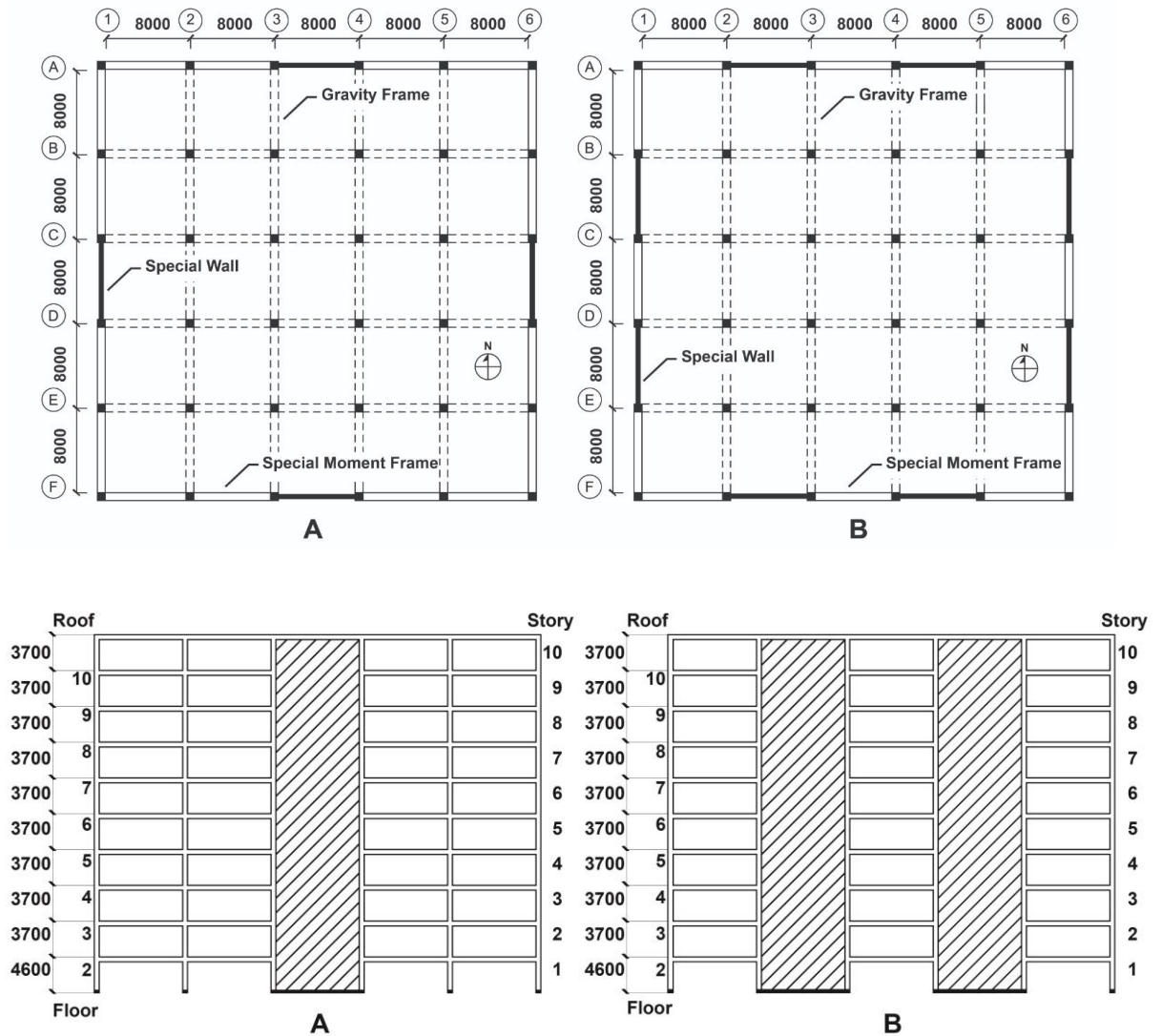
1. Mengembangkan metode *PBPD* untuk sistem ganda dinding-portal beton bertulang.
2. Membandingkan respons inelastis dan kinerja gedung dengan sistem ganda dinding-portal beton bertulang yang didesain dengan menggunakan metode *PBPD* dan metode desain konvensional.
3. Membandingkan risiko keruntuhan gedung dengan sistem ganda dinding-portal beton bertulang yang didesain dengan menggunakan metode *PBPD* dan metode desain konvensional.

### **1.4 Pembatasan Masalah**

Cakupan masalah yang dibahas di dalam penelitian ini dibatasi oleh hal-hal berikut:

1. Sistem struktur gedung yang ditinjau adalah sistem ganda dinding-portal beton bertulang yang terdiri dari dinding struktural khusus dan rangka pemikul momen khusus yang harus mampu menahan paling sedikit 25% gaya gempa.

2. Geometri gedung yang ditinjau didasarkan pada denah dan elevasi gedung yang dimodifikasi dari studi Bao dan Kunnath (2010) seperti terlihat pada Gambar 1.1.



**Gambar 1.1** Denah dan Elevasi Gedung A dan B; dalam mm (Dimodifikasi dari Bao dan Kunnath, 2010)

- Perencanaan mengenai beban gempa dan elemen struktur beton bertulang masing-masing mengacu kepada SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019.
- Sistem penahan gaya lateral hanya terletak di perimeter gedung.
- Gedung berlokasi di Kota Jakarta dengan kelas situs SE (tanah lunak).

6. Gedung berfungsi sebagai kantor.
7. Mutu beton yang digunakan adalah  $f'_c = 35$  MPa.
8. Tulangan baja yang digunakan adalah BjTS 420B (SNI 2052:2017).
9. Interaksi tanah-struktur tidak diperhitungkan dan fondasi tidak dimodelkan. Gedung dimodelkan dengan tumpuan jepit di lantai dasar.
10. Analisis struktur dilakukan dengan menggunakan program komputer *ETABS* versi 20 (CSI, 2017).

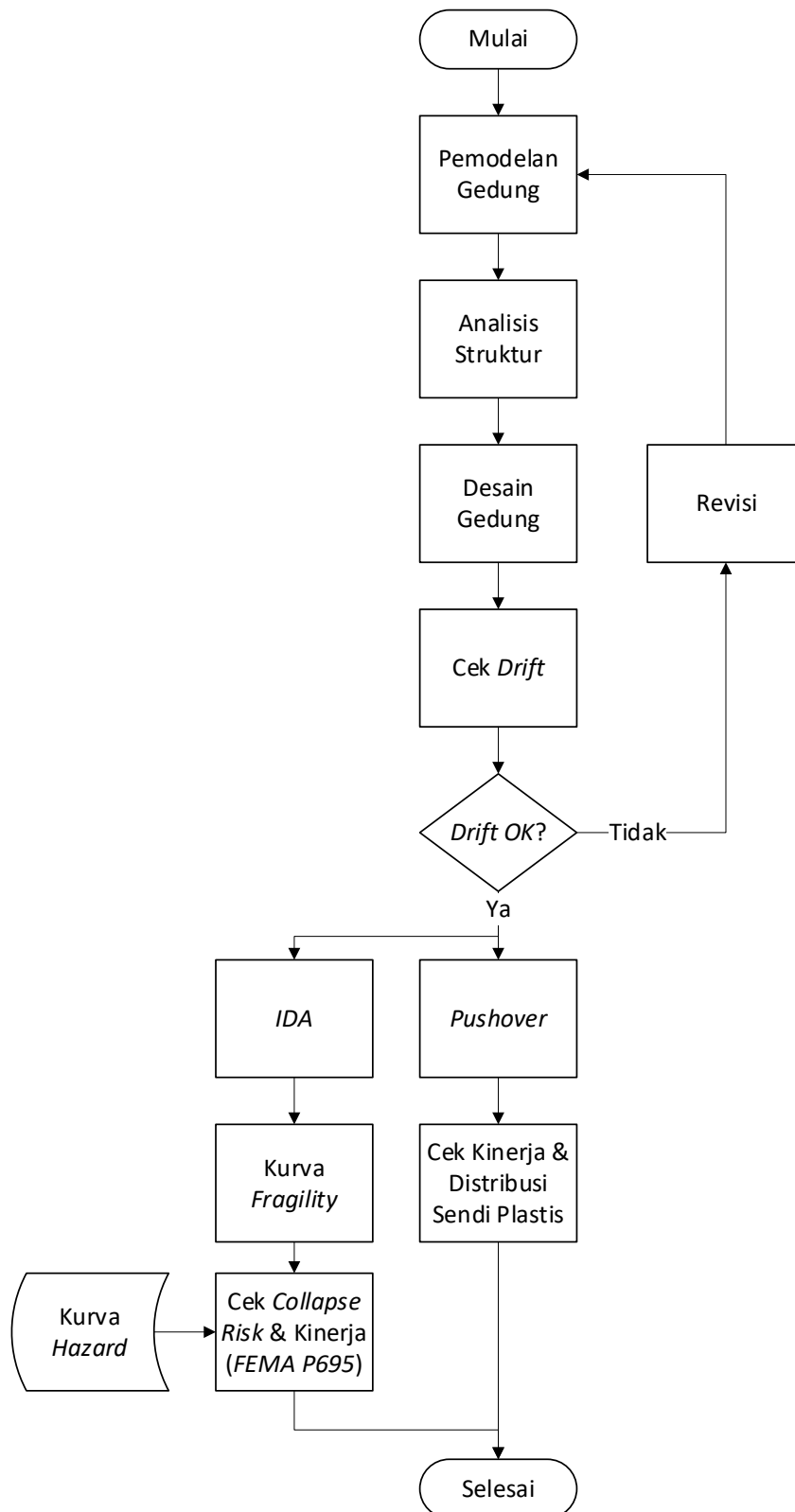
## 1.5 Metode Penelitian

Metodologi penelitian yang digunakan di dalam tesis ini adalah sebagai berikut:

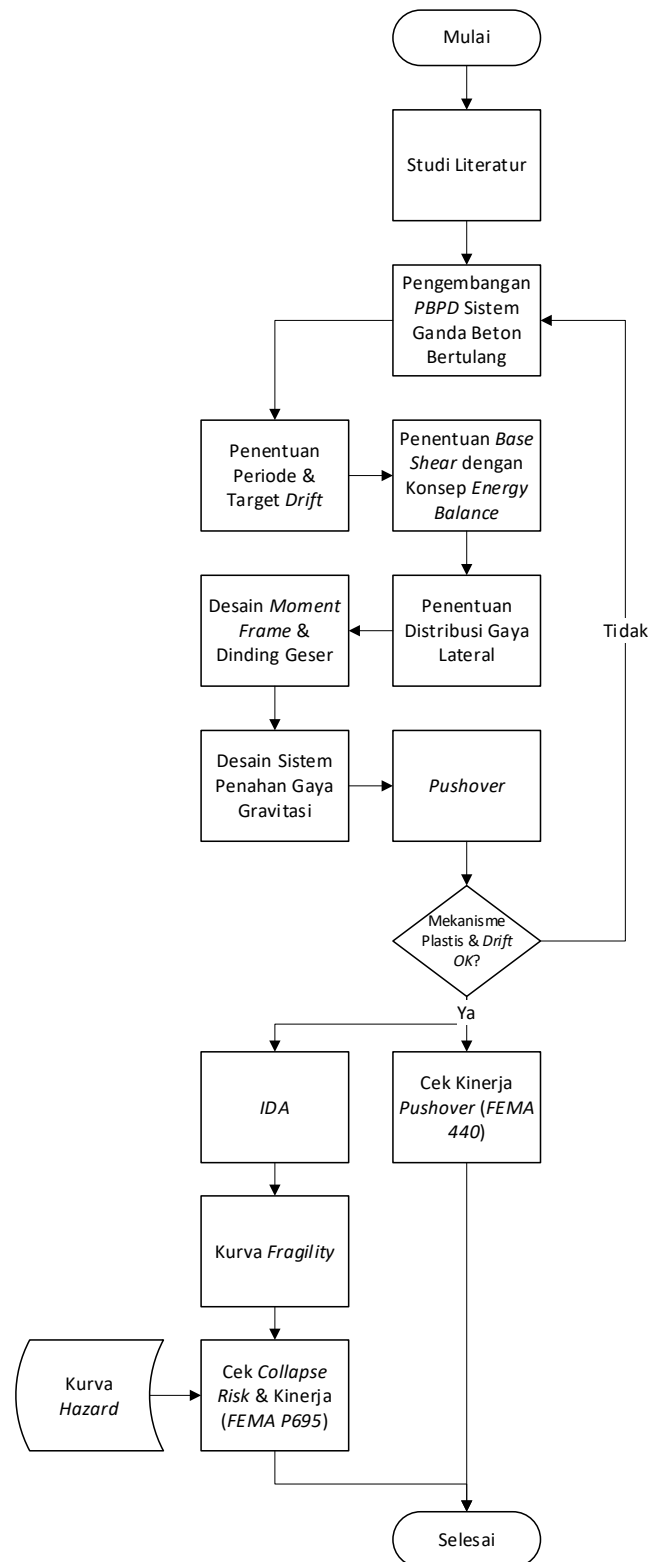
1. Studi literatur berdasarkan buku, karya ilmiah, tesis, disertasi, peraturan, dan panduan teknis.
2. Analisis struktur dengan menggunakan program komputer berbasis metode elemen hingga yang terdiri dari analisis statik linear, analisis statik nonlinear (analisis *pushover*) berdasarkan metodologi *FEMA 440* (ATC, 2005), dan analisis dinamik nonlinear (*nonlinear response history analysis* atau *NRHA*).
3. Analisis risiko keruntuhan akibat beban gempa atau *seismic risk analysis* (McGuire, 2004; Baker, Bradley, dan Stafford, 2021) berdasarkan kurva *fragility* yang diperoleh dari *incremental dynamic analysis* atau *IDA* (Vamvatsikos dan Cornell, 2002) dan kurva *hazard* yang diperoleh dari studi *probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)* Kota Jakarta (Patrisia, Boediono, dan Sidi, 2017).
4. Evaluasi kinerja seismik struktur berdasarkan metodologi *FEMA P695*.

## 1.6 Diagram Alir Penelitian

Penelitian yang dilakukan dapat dibagi menjadi dua buah diagram alir, yaitu diagram alir penelitian untuk gedung yang didesain dengan metode desain konvensional dan diagram alir penelitian untuk gedung yang didesain dengan metode *PBPD* seperti terlihat pada Gambar 1.2 dan 1.3 di bawah ini.



**Gambar 1.2** Diagram Alir Penelitian Metode Desain Konvensional



**Gambar 1.3** Diagram Alir Penelitian Metode *PBPD*

