

**STUDI KINERJA SISTEM DINDING
BERANGKAI HYBRID**

TESIS



Oleh:

**Thavera Wihardja
NPM: 2013831014**

Pembimbing :

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

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

STUDI KINERJA SISTEM STRUKTUR DINDING BERANGKAI HYBRID

HALAMAN PENGESAHAN



STUDI KINERJA SISTEM DINDING BERANGKAI HYBRID



Oleh:

**Thavera Wihardja
NPM: 2013831014**

TES - PMTS
WIH
5/17

**Disetujui Untuk Diajukan Ujian Sidang pada Hari/Tanggal: tes 1854
Sabtu, 17 Juni 2017**

Pembimbing :

Prof. Ir. Iswandi Imran, M.A.Sc., Ph.D.

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



PERNYATAAN

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

Nama : Thavera Wihardja
Nomor Pokok Mahasiswa : 2013831014
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Program Pascasarjana
Universitas Katolik Parahyangan

Menyatakan bahwa Tesis dengan judul:

STUDI KINERJA SISTEM DINDING BERANGKAI HYBRID

adalah benar-benar karya saya sendiri di bawah bimbingan Prof. Ir. Iswandi Imran, MAS.c, Ph.D, dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan.

Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika ada tuntutan formal atau non-formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini, saya siap menanggung segala resiko, akibat, dan/atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya, termasuk pembatalan gelar akademik yang saya peroleh dari Universitas Katolik Parahyangan.

Dinyatakan : di Bandung
Tanggal : 05 Juni 2017



Thavera Wihardja

Thavera Wihardja
NPM : 2013831014

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

UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
FAKULTAS TEKNIK PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
BANDUNG
JUNI 2017

ABSTRAK

Sistem struktur dinding berangkai (CWS) telah dipelajari secara eksperimental maupun analisis. Sistem dengan dua atau lebih dinding geser yang dihubungkan dengan balok kopel banyak digunakan dalam perencanaan konstruksi bangunan tinggi pada wilayah dengan potensi seismik tinggi. Balok kopel sebagai salah satu elemen penyusun sistem yang berfungsi sebagai penyalur beban vertikal pada dinding, yang mana membentuk aksi kopel yang menahan sebagian momen guling. Pada umumnya balok kopel menggunakan material beton bertulang. Balok kopel baja merupakan alternatif dari pelaksanaan konstruksi detailing balok kopel beton bertulang yang terbilang kompleks dan tidak efisien. Studi kinerja sistem dinding berangkai hybrid menggunakan model matematis struktural 25 lantai gedung perkantoran dengan sistem tunggal dinding geser beton bertulang khusus. Pada studi ini, tiga tipe balok kopel dan tiga dinding geser didistribusikan sepanjang tinggi struktur bangunan. Lokasi sistem struktur yang ditinjau di Kota Jakarta dengan kelas situs tanah D dan struktur termasuk dalam struktur dengan KDS-D. Kinerja sistem struktur dapat diperoleh dengan menggunakan bantuan program PERFORM-3D yang dikenakan beban gempa riwayat waktu terskalakan terhadap spektrum desain gempa maksimum (MCE_R) dengan target kinerja struktur berada pada level *Collapse Prevention*(CP). Pemodelan elemen balok kopel sistem struktur menggunakan model momen-rotasi (*rotational spring*), sedangkan dinding struktural dimodelkan sebagai *fiber section* atau *equivalent frame model* dengan material beton 1D inelastik dan material baja inelastik. Rasio bentang dengan tinggi balok kopel dan material balok kopel merupakan parameter studi yang digunakan. Performa model struktur CWS dan struktur HCWS berdasarkan batasan rotasi balok kopel pada ASCE/SEI 41-13 berada pada level kinerja *Collapse Prevention*(CP), sedangkan berdasarkan ATC40:1996 kedua struktur memenuhi level kinerja *Life Safety*(LS). Tahanan lateral struktur CWS lebih besar daripada struktur HCWS. Hal tersebut direpresentasikan dengan rasio kopel struktur CWS lebih besar 0.71% dari rasio kopel struktur HCWS, yang mana rasio kopel merupakan representasi dari gaya geser dasar yang ditahan oleh sistem struktur. Mekanisme keruntuhan degradasi geser struktur yang direncanakan tercapai, yaitu plastifikasi balok kopel terjadi disepanjang tinggi bangunan disertai kelelahan pada dasar dinding struktural. Plastifikasi juga terjadi pada bagian sisi atas dinding struktural dan keruntuhan terjadi lebih cepat akibat rasio kopel yang cukup tinggi. Kinerja sistem struktur dinilai baik dengan struktur termasuk dalam KDS-D dengan tinggi bangunan yang melebihi tinggi yang disyaratkan. Kedua sistem struktur dinding berangkai menunjukkan bahwa balok kopel baja dapat dijadikan sebagai alternatif pada perencanaan dan konstruksi sistem dinding berangkai.

Kata Kunci : dinding berangkai hybrid, balok kopel baja, rasio kopel, *performance-based design method*

PERFORMANCE STUDY OF HYBRID COUPLED WALL SYSTEM

Thavera Wihardja
NPM : 2013831014

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

PARAHYANGAN CATHOLIC UNIVERSITY
DEPARTEMENT OF ENGINEERING MAGISTER PROGRAME OF CIVIL
ENGINEERING
BANDUNG
JUNI 2017

ABSTRACT

Research over the past half century on coupled wall system (CWS) has shown their performance by experimental study and analysis. System with two or more reinforced concrete (RC) shear wall linked with coupling beam are frequently used in high-rise construction in region with high seismicity. One of the elements composed structure system, coupling beam, provide transfer of vertical forces beetwen adjacent walls, which create a frame-like coupling action that resists a portion of the total overturning moment. Generally, coupling beam using reinforced concrete-RC material. Steel coupling beam is an alternative for RC coupling beam which has complex and unefficient detailing construction. This paper presents a performance study on the use Hybrid Coupled Wall System (HCWS) which use mathematic model 25 storey office buildings with single system of special RC shear wall. In this design, three type of coupling beams and three types of walls distributed over the height of the structure. The building is in Seismic Design Category D (KDS-D) and is situated on Site Class D soils. PERFORM-3D was use to get performance of structure system which loaded by time history earthquake and scaled to a compatible maximum earthquake response spectrum (MCE_R) with target performance structure Collapse Prevention (CP). Coupling beam element modelled with rotational spring and structural shear wall modelled with equivalent frame model or fiber section model. In this study, parametric study is using span-to-depth ratio and different materials for coupling beams. Both structure model, CWS and HCWS, based on coupling beam rotation at ASCE/SEI 41-13 performed at Collapse Prevention (CP), an the other side both of them performed at Life Safety (LS) level based on ATC40:1996. Lateral resistance CWS structure greater than structure HCWS. That thing represented by coupling ratio CWS structure greater 0.71% than coupling ratio HCWS structure, which coupling ratio is representation base shear be resisted by shear reaction of structure system. The design degradation of shear failure mechanisms is reached, which coupling beam yielding over the height of the structure afterwards yielding perform at base of shear wall structure. System with high coupling ratio had more widespread plastification in the upper portions of the wall pier and sufferd earlier crushing failure of the wall. System of the structure design exhibiting and statisfying all performance criteria which structure including in KDS-D with height of the structure over the permit requirement height. Both of stucture coupled wall system shown that steel coupling beam can be used as an alternative.

Keywords: hybrid coupled wall system, steel coupling beam, coupling ratio, performance-based design method

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xiii
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Inti Permasalahan	3
1.3 Tujuan Penulisan	4
1.4 Pembatasan Masalah	4
1.5 Metodologi Penulisan	7
1.6 Sistematika Penulisan	15
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Metode Analisis Struktur Dinding Berangkai	17
2.1.1 Metode Frame Ekuivalen (<i>Equivalent Frame Method</i>)	19

2.1.2	Model Multi Pegas (<i>Multi-Spring Model</i>) – Metode Makro Elemen	24
2.1.3	Metode Elemen Hingga (<i>Finite Element Method</i>)	30
2.2	Metode Analisis Balok Kopel	31
2.3	Perilaku Struktur Dinding Berangkai	37
2.4	Investigasi Eksperimental Struktur Dinding Berangkai	40
2.5	Studi Eksperimental Balok Kopel (<i>Coupling Beam</i>)	46
2.5.1	Balok Kopel Beton Bertulang (<i>RC Coupling Beam</i>)	47
2.5.1.1	Balok Kopel Beton Konvensional	47
2.5.1.2	Balok Kopel Beton HPFRC	53
2.5.2	Balok Kopel Baja (<i>Steel Coupling Beam</i>)	56
2.6	<i>Coupling Ratio</i> (CR)	59
2.6.1	Penentuan <i>Coupling Ratio</i>	65
2.7	PBDM (<i>Performance-Based design Method</i>) Struktur Dinding Berangkai	69
2.7.1	Performa Objektif-Taraf Kinerja Struktur	71
2.7.2	Metoda Analisis Struktur	73
2.7.3	Kriteria Penerimaan berdasarkan ASCE/SEI 41-13	75
2.7.3.1	Kriteria Penerimaan Balok Kopel (<i>Coupling Beam</i>)	75
2.7.3.2	Kriteria Penerimaan Dinding Geser Beton (<i>Concrete Shear Wall</i>)	78

2.7.3.3 Kriteria Penerimaan Balok dan Kolom Beton <i>(Beam and Column)</i>	79
2.7.4 Studi Analisis Numerik PBDM pada HCWS	80
BAB III STUDI KASUS	
3.1 Struktur Bangunan dengan Sistem Dinding Berangkai	93
3.2 Data Material Pembebanan	94
3.2.1 Material Beton	94
3.2.2 Material Tulangan Baja	94
3.2.3 Material Baja	94
3.3 Elemen Struktur Bangunan	95
3.3.1 Elemen Balok	97
3.3.2 Elemen Pelat Lantai	98
3.3.3 Elemen Kolom	98
3.3.4 Elemen Dinding Struktural	100
3.3.5 Elemen Balok Kopel	102
3.4 Pembebanan Struktur	103
3.4.1 Kombinasi Pembebanan	103
3.4.2 Data Pembebanan	104
3.4.2.1 Pembebanan Gravitasi	104
3.4.2.2 Pembebanan Seismik Spektrum Respons	106
3.4.2.3 Pembebanan Seisimik Gerak Tanah	108

BAB IV	ANALISIS ELASTIK STRUKTUR	
4.1	Geometri Struktur Bangunan	111
4.1.1	Geometri Struktur CWS	111
4.1.2	Geometri Struktur HCWS	113
4.2	Kategori Desain Seismik (KDS)	114
4.3	Prosedur Analisis Struktur	116
4.3.1	Prosedur Gaya Lateral Ekuivalen	117
4.3.2	Analisis Spektrum Respons Ragam	120
4.4	Beban Spektrum Respons pada Struktur	122
4.4.1	Spektrum Respons pada Struktur CWS	122
4.4.2	Spektrum Respons pada Struktur HCWS	124
4.5	Desain Dinamik Spektrum Respons Ragam	125
4.5.1	Desain Elastik Struktur CWS	126
4.5.1.1	Desain Elemen Balok CWS	126
4.5.1.2	Desain Elemen Kolom CWS	128
4.5.1.3	Desain Elemen Dinding Geser CWS	130
4.5.1.4	Desain Elemen Balok Kopel CWS	134
4.5.2	Desain Elastik Struktur HCWS	140
4.5.2.1	Desain Elemen Balok HCWS	140
4.5.2.2	Desain Elemen Kolom HCWS	143
4.5.2.3	Desain Elemen Dinding Geser HCWS	144

4.5.2.4	Desain Elemen Balok Kopel HCWS	148
4.6	Hasil Analisis Elastik Struktur	157
4.6.1	Perioda Alami dan Partisipasi Massa Ragam	157
4.6.2	Gaya Geser Dasar dan Tingkat Lantai	159
4.6.3	Simpangan antar Lantai Tingkat	162

BAB V ANALISIS DINAMIK RIWAYAT WAKTU NONLINIER

5.1	Parameter dan Pemodelan Material Inelastik	169
5.1.1	Material Beton	170
5.1.1.1	Beton <i>Unconfined</i>	170
5.1.1.2	Beton <i>Confined</i>	172
5.1.2	Material Baja	175
5.2	Beban Seismik Gerak Tanah	177
5.2.1	Rekaman Percepatan Gerak Tanah	177
5.2.2	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah	181
5.3	Prosedur Respons Riwayat Waktu	198
5.3.1	Tahap Pemodelan (<i>Modelling Phase</i>)	199
5.3.1.1	Pemodelan Struktur	199
5.3.1.2	Komponen Elemen Struktur	203
5.3.1.2.1	Model Elemen Balok	204
5.3.1.2.2	Model Elemen Kolom	205
5.3.1.2.3	Model Elemen Dinding Geser	207

5.3.1.2.4 Model Elemen Balok Kopel	209
5.3.2 <i>Analysis Phase</i>	214
5.3.2.1 Pengaturan Load Case	215
5.3.2.2 Hasil Analisis Performa Struktur	217
5.4 Hasil Analisis Dinamik Riwayat Waktu	218
5.4.1 Gaya Geser Dasar Struktur	218
5.4.2 Rasio Kopel (<i>Coupling Ratio</i>)	221
5.4.3 Mekanisme Sistem Struktur	224
5.4.4 Performa Objektif Balok Kopel Elemen	228
5.4.5 Performa Objektik Sistem Struktur Dinding Berangkai	232
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	
6.1 Kesimpulan	255
6.2 Saran	257
DAFTAR PUSTAKA	259

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

Δ_a	= Simpangan antar lantai ijin
$\sum A_{tb}$	= Luas total tulangan penyalur beban yang disediakan
2D	= 2 Dimensi
3D	= 3 Dimensi
a	= panjang pelat
A'_s	= Luas tulangan transversal
ACI	= American Concrete Institute
A_{cw}	= Luas penampang beton suatu segmen dinding horizontal
A_g	= Luas penampang gross
A_s	= Luas tulangan longitudinal
AISC	= American Institute of Steel Construction
ASCE	= American Society of Civil Engineers
A_{tb}	= Luas tulangan penyalur beban perlu
A_{tw}	= Luas badan balok baja
A_v	= Luas tulangan transversal
A_{vd}	= Luas tulangan diagonal dalam kelompok tulangan diagonal
bw	= Lebar pelat profil
B	= Lebar balok
b_f	= Lebar sayap elemen perangkai
BK	= Balok Kopel

b_w	= Ketebelan dinding yang berada berbatasan dengan balok kopel
C	= Conforming
CCW	= Coupled Core Wall
C_d	= Faktor pembesaran defleksi
CMM	= Continous Medium Method
CP	= Collapse Prevention
CR	= Coupling Ratio
C_s	= Koefisien repons seismik
C_u	= Koefisien untuk batasan atas pada perioda yang dihitung
C_{vx}	= Faktor distribusi vertikal
CW	= Core Wall
CWS	= Coupled Wall System
d	= Tinggi balok kopel
DL	= Dead Load
doc	= Degree of Coupling
DU	= Ultimate hinge rotation
DX	= Residual hinge rotation
EBF	= Eccetrically Braced Frame
E_c	= Modulus elastisitas beton
ELF	= Equivalent Lateral Force
EQ	= Earthquake
E_s	= Modulus elastisitas baja

$\sum V_{\text{beam}}$	= Akumulasi dari geser balok kopel yang bekerja di tepi dinding.
f_c	= Kuat tekan beton
f'_{cc}	= Kuat tekan beton terkekang
f'_{co}	= Kuat tekan beton unconfined
F_a	= Faktor amplifikasi percepatan pada getaran perioda pendek
F_a	= Faktor amplifikasi terkait percepatan pada getaran perioda 1 detik
F-D	= Force-Displacement
FEMA	= Federal Emergency Management Agency
FPS	= Fundamental Period Scale
FR	= Residual hinge moment
FS	= Faktor Skala
Fs	= Gaya aksial pegas
ft	= Kuat tarik profil
FU	= Ultimate hinge moment
Fx	= Gaya lateral pada setiap tingkat
f_y	= Tegangan leleh baja tulangan longitudinal
FY	= Yield hinge moment
f_{ys}	= Tegangan leleh baja tulangan transversal
f_{ysr}	= Tegangan leleh tulangan penyalur
g	= Percepatan gravitasi
g_{clear}	= Panjang bentang bersih efektif
GM	= Ground Motion

H	= Tinggi balok
HCW	= Hybrid Core Wall
HCWS	= Hybrid Coupled Wall System
h_n	= Ketinggian diatas dasar sampai tingkat tertinggi struktur
HPFRC= High Performance Fiber Reinforced ConcreteI	
h_{sx}	= Tinggi tingkat dibawah tingkat x
I	= Faktor keutamaan gempa
I_x	= Momen inersia penampang
IO	= Immediate Occupancy
k	= Eksponen yang terkait dengan periode struktur
KDS	= Kategori Desain Seismik
kN	= Kilo Newton
L	= Panjang balok
LDP	= Linier Dinamic Procedure
L_e	= Panjang efektif balok
LL	= Live Load
ln	= Bentang antar dinding
LS	= Life Safety
LSP	= Linier Static Procedure
l_w	= Panjang dinding struktural
LWP	= Link Wall Pier
m	= Meter

M	= Momen lentur panel dinding
MB	= Moment balance
MCE _R	= Maximum Considered Earthquake Risk
m _i	= Momen guling yang ditahan oleh dinding i.
mm	= Milimeter
MPa	= Mega Pascal
NC	= NonConforming
NDP	= Nonlinier Dinamic Procedure
NLTHA	= Non-linear Time History Analysis
NSP	= Nonlinier Statik Prosedur
OTM	= Overturning moment
P	= Kapasitas beban aksial
PB	= Axial balance force
PBDM	= Performance Based Design Methode
PC	= Axial compression force
PEER	= Pacific Earthquake Engineering Reaserch
PGA	= Peak Ground Acceleration
PMV	= Perilaku interaksi momen aksial dan geser
R	= Faktor modifikasi repons
RC	= Reinforced Concrete
RSNI	= Rencana Standar Nasinal Indonesia
R _y	= Rasio tegangan leleh ekspektasi dengan tegangan leleh minimum

s	= Spasi tulangan transversal
S_1	= Percepatan batuan dasar pada periode 1 detik
S_{D1}	= Parameter percepatan respons spektral pada periode 1 detik
SDL	= Super Dead Load
S_{DS}	= Parameter percepatan respons spektral pada periode pendek
SEI	= Structural Engineering Institute
S_{M1}	= Respons percepatan pada periode 1 detik
S_{MS}	= Respons percepatan pada periode pendek
SNI	= Standar Nasional Indonesia
SRSS	= Square Root of The Sum of Square
S_s	= Percepatan batuan dasar pada periode pendek
SS	= Suite Scale
T	= Periode fundamental
$t_{dinding}$	= Tebal dinding
t_{pelat}	= Tebal pelat
t_w	= Ketebalan badan elemen perangka
t_w	= Tebal dinding struktural
V	= Gaya geser dasar
V	= Geser dasar prosedur gaya lateral ekuivalen
ν	= Rasio poisson
V_n	= Kuat geser profil baja
V_s	= Parameter kondisi tanah

V_t	= Geser dasar dari kombinasi ragam yang diisyaratkan
W	= Berat seismik efektif
w_i	= Berat seismik setiap lantai
Y	= Yield
α	= Sudut antara batang tulangan diagonal dan sumbu longitudinal balok kopel
β_1	= Faktor sehubungan dengan tinggi dari blok tegangan tekan persegi panjang ekuivalen terhadap kedalaman sb. netral, seperti didefinisikan ACI 318
γ	= Rasio natural frekuensi
δ_a	= Deformasi aksial dinding
ϵ_c	= Regangan tekan beton terkekang longitudinal
ϵ_{co}	= Regangan beton
θ	= Rotasi dinding
ρ	= Rasio tulangan
ρ_l	= Rasio minimum luas tulangan vertikal dinding
ρ_t	= Rasio minimum luas tulangan horizontal dinding
Ω_o	= Faktor kuat lebih sistem

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Denah Bangunan dengan Sistem Dinding Berangkai (CWS)	6
Gambar 1.2 Denah Bangunan dengan Sistem Dinding Berangkai Komposit (HCWS)	6
Gambar 1.3 Distribusi Balok Kopel pada Struktur CWS dan HCWS	6
Gambar 1.4 Diagram Alir Pendahuluan	8
Gambar 1.5 Diagram Alir Studi Literatur	10
Gambar 1.6 Diagram Alir Studi Analitis – Analisis Numerik	12
Gambar 1.7 Diagram Alir Studi Analitis – Analisis Numerik	14
Gambar 2.1 Metode Pemodelan Dinding Geser pada Sistem Dinding BerangkaiKomposit (Draft ASCE v8)	17
Gambar 2.2 Model Struktur Dinding Berangkai Komposit (Draft ASCE v8)	24
Gambar 2.3 Model Orginal Elemen Makro (Kabeyasawa, 1992)	25
Gambar 2.4 Model Dinding Multi-Komponen (Bolander dan Wight 1991, Sharooz et al 1993)	26
Gambar 2.5 Perilaku Lentur Nonlinier pada Penampang Dinding(Hassan, M. 2004)	28
Gambar 2.6 Elongation Elemen Batas pada Lantai Pertama vs Gaya Geser Dasar (Hassan, M. 2004)	29
Gambar 2.7 Model Penyederhanaan Histeristik untuk Pegas Luas (Linde. 1993)	30
Gambar 2.8 Model Balok Kopel (Lu, Xilin dan Chen, Yuntao. 2005)	33
Gambar 2.9 Model Komponen: Model Sendi M_n dan Model Sendi V_n (Naish, David. 2013)	35
Gambar 2.10 Model Dinding setelah Uji(Paulay, T. 1969)	39
Gambar 2.11 Elevasi Spesimen Dinding Berangkai CW1 (N. Lowes, Laura et. al. 2011)	42
Gambar 2.12 Layout Penulangan Spesimen CW1 (N. Lowes, Laura et. al. 2011)	43
Gambar 2.13 Detail Tulangan Balok Kopel (N. Lowes, Laura et. al. 2011)	44
Gambar 2.14 Detail Tulangan Penampang dari Dinding (N. Lowes, Laura et. al. 2011)	44
Gambar 2.15 Program pembebanan CW1: histori drift (N. Lowes, Laura et. al. 2011)	45
Gambar 2.16 Program pembebanan CW1: histori pembebanan (N. Lowes, Laura et. al. 2011)	45
Gambar 2.17 Perbandingan Momen-drift PW1 dan CW1	45

(N. Lowes, Laura et. al. 2011)	
Gambar 2.18 Gaya-drift CW1 (N. Lowes, Laura et. al. 2011)	46
Gambar 2.19 Detail Tulangan dari Spesimen Uji [mm] (Canbolat, A. et. al. 2005)	54
Gambar 2.20 Pola Peralihan Siklik (Canbolat, A. et. al. 2005)	55
Gambar 2.21 Detail Balok Kopel Baja [mm] (Wan-Shin Park dan Hyun-Do, Yun. 2005)	57
Gambar 2.22 Histori Pembebanan (Wan-Shin Park dan Hyun-Do, Yun. 2005)	58
Gambar 2.23 Definisi <i>coupling ratio</i> (CR) (draft ASCE v8)	60
Gambar 2.24 Efek Kopel pd Peralihan Ujung Atas Dinding (draft ASCE v8)	61
Gambar 2.25 Efek Kopel pd Peralihan Ujung Atas Dinding (draft ASCE v8)	63
Gambar 2.26 Fungsi Berat Baja dan Beton terhadap CR pada Prototipe Bangunan 12 Lantai (El-Tawil et al. 2002a)	64
Gambar 2.27 Representasi Skematik Distribusi Kapasitas Dinding dan Balok dan Hasil CR (draft ASCE v8)	67
Gambar 2.28 Level Performa Struktur (FEMA303/NEHRP1997)	73
Gambar 2.29 Identifikasi Komponen Elemen Dinding Geser (ASCE/SEI 41-13)	77
Gambar 2.30 Denah Plan Bangunan 12 Lantai dan Elevasi CCW(Eljadei.2012)	81
Gambar 2.31 Plan Sistem CCW [ft] (Eljadei.2012)	82
Gambar 2.32 Dimensi Dinding CCW (Eljadei.2012)	82
Gambar 2.33 Distribusi Balok Kopel pada Struktur (Eljadei.2012)	83
Gambar 2.34 Distribusi Penampang Dinding pada Struktur (Eljadei.2012)	83
Gambar 2.35 Detailing Tulangan pada Section 1 (Eljadei.2012)	84
Gambar 2.36 Detailing Tulangan pada Section 2 (Eljadei.2012)	84
Gambar 2.37 Detailing Tulangan pada Section 3 (Eljadei.2012)	85
Gambar 2.38 Detailing Tulangan pada Section 4 (Eljadei.2012)	85
Gambar 2.39 Detailing Tulangan pada Section 5 (Eljadei.2012)	86
Gambar 2.40 Roof Displacement Histories (Eljadei.2012)	87
Gambar 2.41 Interstory Drift Envelopes (Eljadei.2012)	87
Gambar 2.42 Interaksi Momen-Beban Aksial pada Dasar Dinding (Eljadei.2012)	88
Gambar 3.1 Stuktur Bangunan Dinding Berangkai(CWS)	96
Gambar 3.2 Stuktur Bangunan Dinding Berangkai Hybrid (HCWS)	96
Gambar 3.3 Dimensi Elemen Dinding Struktural (Lantai 1-10)	100
Gambar 3.4 Dimensi Elemen Dinding Struktural (Lantai 11-20)	101
Gambar 3.5 Dimensi Elemen Dinding Struktural (Lantai 21-25)	101
Gambar 3.6 Desain Spektrum Respons	107

Gambar 3.7 Spektrum Respons Desain dan MCE_R	110
Gambar 4.1 Denah Struktur CWS pada ETABS 2015	112
Gambar 4.2 Struktur CWS (a) Elevasi 2, (b) 3D Model CWS	112
Gambar 4.3 Denah Struktur HCWS pada ETABS 2015	113
Gambar 4.4 Struktur CWS (a) Elevasi 2, (b) 3D Model HCWS	114
Gambar 4.5 Denah Elemen Balok CWS	127
Gambar 4.6 Rasio Tulangan Longitudinal untuk Kondisi Pembatas Dinding Tipikal (SNI2847:2013)	132
Gambar 4.7 Denah Dinding Geser CWS Lantai 01-10	133
Gambar 4.8 Denah Dinding Geser CWS Lantai 11-20	133
Gambar 4.9 Denah Dinding Geser CWS Lantai 21-25	133
Gambar 4.10 Dinding dengan Bukaan (SNI2847:2013)	134
Gambar 4.11 Balok Kopel dengan Tulangan yang diorientasikan secara diagonal. Tulangan Pembatas Dinding ditunjukkan pada satu sisi saja untuk kejelasan (SNI2847:2013)	135
Gambar 4.12 Detailing BK 1000-Balok Kopel Tinggi [mm]	139
Gambar 4.13 Detailing BK 750-Balok Kopel Sedang [mm]	139
Gambar 4.14 Detailing BK 500-Balok Kopel Pendek [mm]	140
Gambar 4.15 Denah Elemen Balok HCWS	141
Gambar 4.16 Penulangan untuk Mencegah Kegagalan Retak (ANSI/AISC341-10)	146
Gambar 4.17 Denah Dinding Geser HCWS Lantai 01-10	147
Gambar 4.18 Denah Dinding Geser HCWS Lantai 11-20	147
Gambar 4.19 Denah Dinding Geser HCWS Lantai 21-25	148
Gambar 4.20 Kemungkinan Detail Balok Kopel Tertanam dalam Dinding Beton Bertulang (Draft ASCE v8)	150
Gambar 4.21 Detail Tualangan Penyalur Beban Balok Kopel Tertanam dalam Dinding Beton Bertulang (ANSI/AISC 341-10)	152
Gambar 4.22 Detailing BK IWF 700X300X13X24 [mm]	154
Gambar 4.23 Detailing Potongan BK IWF 700X300X13X24 [mm]	154
Gambar 4.24 Detailing BK IWF 600X200X11X17 [mm]	155
Gambar 4.25 Detailing Potongan BK IWF 600X200X11X17 [mm]	155
Gambar 4.26 Detailing BK IWF 200X200X8X12 [mm]	156
Gambar 4.27 Detailing Potongan BK IWF 200X200X8X12 [mm]	156
Gambar 4.28 Distribusi Gaya Lateral Tingkat	160
Gambar 4.29 Gaya Geser Tingkat Struktur pada Arah-X	160
Gambar 4.30 Gaya Geser Tingkat Struktur pada Arah-Y	161
Gambar 4.31 <i>Interstory Drift Ratio</i> Arah-X	163
Gambar 4.32 <i>Interstory Drift Ratio</i> Arah-Y	163
Gambar 4.33 Simpangan antar Lantai Tingkat Struktur Arah-X	165
Gambar 4.34 Simpangan antar Lantai Tingkat Struktur Arah-X	166
Gambar 4.35 Simpangan Total Struktur Arah-X	166

Gambar 4.36 Simpangan Total Struktur Arah-Y	167
Gambar 5.1 Model Tegangan-Regangan pada Beban Monotonik untuk Beton <i>Unconfined</i> dan <i>Confined</i> (Mander, Priestly, dan Park . 1988)	171
Gambar 5.2 Parameter Pemodelan Beton <i>Unconfined</i>	172
Gambar 5.3 Parameter Pemodelan Beton <i>Confined</i>	174
Gambar 5.4 Parameter Kuat Beton Terkekang	174
Gambar 5.5 Parameter Regangan Keruntuhan (<i>Crushing Strain</i>)	175
Gambar 5.6 Model Tegangan-Regangan Material Baja Bilinier dengan Strain Hardening parabolik	176
Gambar 5.7 Parameter Model Baja Bilinier dengan Strain Hardening Parabolik	176
Gambar 5.8 Percepatan Gerak Tanah Landers 1992	178
Gambar 5.9 Percepatan Gerak Tanah Chi-Chi Taiwan 1999	178
Gambar 5.10 Percepatan Gerak Tanah Loma Prieta 1989	179
Gambar 5.11 Percepatan Gerak Tanah Imperial Valley 1979	179
Gambar 5.12 Percepatan Gerak Tanah Northridge 1994	179
Gambar 5.13 Percepatan Gerak Tanah Kobe-Japan 1999	179
Gambar 5.14 Percepatan Gerak Tanah San Fernando 1971	180
Gambar 5.15 Percepatan Gerak Tanah Superstition Hills 1987	180
Gambar 5.16 Percepatan Gerak Tanah Tabas Iran 1978	180
Gambar 5.17 Percepatan Gerak Tanah Kocaeli Turkey 1999	180
Gambar 5.18 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Landers 1992 CWS	183
Gambar 5.19 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Chi-Chi Taiwan 1999 CWS	183
Gambar 5.20 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Loma Prieta 1989 CWS	184
Gambar 5.21 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Imperial Valley 1979 CWS	184
Gambar 5.22 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Northridge 1994 CWS	184
Gambar 5.23 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Kobe-Japan 1999 CWS	185
Gambar 5.24 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah San Fernando 1971 CWS	185
Gambar 5.25 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Superstition Hills 1987 CWS	185
Gambar 5.26 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Tabas Iran 1978 CWS	186
Gambar 5.27 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Kocaeli Turkey 1999 CWS	186
Gambar 5.28 Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan	186

	Gerak Tanah Landers 1992 HCWS	
Gambar 5.29	Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Chi-Chi Taiwan 1999 HCWS	187
Gambar 5.30	Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Loma Prieta 1989 HCWS	187
Gambar 5.31	Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Imperial Valley 1979 HCWS	187
Gambar 5.32	Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Northridge 1994 HCWS	188
Gambar 5.33	Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Kobe-Japan 1999 HCWS	188
Gambar 5.34	Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah San Fernando 1971 HCWS	188
Gambar 5.35	Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Superstition Hills 1987 HCWS	189
Gambar 5.36	Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Tabas Iran 1978 HCWS	189
Gambar 5.37	Penskalaan Pseudo Spektra Percepatan Gerak Tanah Kocaelli Turkey 1999 HCWS	189
Gambar 5.38	Pseudo Spektra Rata-rata FPS CWS	190
Gambar 5.39	Penskalaan Pseudo Spektra Rata-rata – <i>Suite Scale</i> CWS	190
Gambar 5.40	Pseudo Spektra Rata-rata FPS HCWS	191
Gambar 5.41	Penskalaan Pseudo Spektra Rata-rata – <i>Suite Scale</i> HCWS	192
Gambar 5.42	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Landers 1992 CWS	193
Gambar 5.43	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Chi-Chi Taiwan 1999 CWS	193
Gambar 5.44	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Loma Prieta 1989 CWS	193
Gambar 5.45	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Imperial Valley 1979 CWS	193
Gambar 5.46	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Northridge 1994 CWS	194
Gambar 5.47	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Kobe-Japan 1999 CWS	194
Gambar 5.48	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah San Fernando 1971 CWS	194
Gambar 5.49	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Superstition Hills 1987 CWS	194
Gambar 5.50	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Tabas Iran 1978 CWS	195
Gambar 5.51	Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Kocaelli Turkey 1999 CWS	195

Gambar 5.52 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Landers 1992 HCWS	195
Gambar 5.53 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Chi-Chi Taiwan 1999 HCWS	195
Gambar 5.54 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Loma Prieta 1989 HCWS	196
Gambar 5.55 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Imperial Valley 1979 HCWS	196
Gambar 5.56 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Northridge 1994 HCWS	196
Gambar 5.57 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Kobe-Japan 1999 HCWS	196
Gambar 5.58 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah San Fernando 1971 HCWS	197
Gambar 5.59 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Superstition Hills 1987 HCWS	197
Gambar 5.60 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Tabas Iran 1978 HCWS	197
Gambar 5.61 Penskalaan Percepatan Gerak Tanah Kocaelli Turkey 1999 HCWS	197
Gambar 5.62 Kerangka Model Matematis Struktur pada PERFORM-3D	200
Gambar 5.63 Drift pada PERFORM-3D	202
Gambar 5.64 Ilustrasi Performa Struktur (ASCE/SEI 41-13)	202
Gambar 5.65 Hubungan Gaya-Peralihan pada PERFORM-3D (Perform-3D <i>Documentation</i> , 2011)	203
Gambar 5.66 Hubungan Momen-Rotasi Balok pada PERFORM-3D	204
Gambar 5.67 Faktor Degradasi Siklik Balok pada PERFORM-3D	205
Gambar 5.68 F-D Relationship Kolom pada PERFORM-3D	206
Gambar 5.69 Model Penampang Leleh Kolom pada PERFORM-3D	207
Gambar 5.70 Faktor Degradasi Siklik Kolom pada PERFORM-3D	207
Gambar 5.71 Hubungan Tegangan-Regangan Material Penampang FiberDinding Geser pada PERFORM-3D	208
Gambar 5.72 Pemodelan Balok Kopel Beton Bertulang Tinggi (Dr. Graham. H. Powell. 2013)	211
Gambar 5.73 Pemodelan Balok Kopel Langsing (Dr. Graham. H. Powell. 2013)	211
Gambar 5.74 Faktor Degradasi Siklik Balok Kopel Beton Bertulang pada PERFORM-3D	213
Gambar 5.75 Faktor Degradasi Siklik Balok pada PERFORM-3D	214
Gambar 5.76 Histori Gaya Geser Dasar Struktur CWS pada Arah-X	219
Gambar 5.77 Histori Gaya Geser Dasar Struktur CWS pada Arah-Y	219
Gambar 5.78 Histori Gaya Geser Dasar Struktur HCWS pada Arah-X	220
Gambar 5.79 Histori Gaya Geser Dasar Struktur HCWS pada Arah-Y	220
Gambar 5.80 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah	233

Landers 1992 CWS	
Gambar 5.81 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Imperial Valley 1979 CWS	233
Gambar 5.82 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Chi-Chi Taiwan CWS	234
Gambar 5.83 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Northridge 1994 CWS	234
Gambar 5.84 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Loma Prieta 1989 CWS	234
Gambar 5.85 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Kobe-Japan 1999 CWS	234
Gambar 5.86 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah San Fernando 1971 CWS	234
Gambar 5.87 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Kocaeli-Turkey 1999 CWS	234
Gambar 5.88 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Superstition Hills 1987 CWS	235
Gambar 5.89 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Tabas-Iran 1978 CWS	235
Gambar 5.90 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Landers 1992 HCWS	235
Gambar 5.91 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Chi-Chi Taiwan HCWS	235
Gambar 5.92 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Loma Prieta 1989 HCWS	235
Gambar 5.93 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Kobe-Japan 1999 HCWS	235
Gambar 5.94 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Imperial Valley 1979 HCWS	236
Gambar 5.95 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah San Fernando 1971 HCWS	236
Gambar 5.96 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Northridge 1994 HCWS	236
Gambar 5.97 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Superstition Hills 1987 HCWS	236
Gambar 5.98 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Tabas-Iran 1978 HCWS	236
Gambar 5.99 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Kocaeli-Turkey 1999 HCWS	236
Gambar 5.100 Interstory Drift Ratio Rata-rata Struktur CWS akibat Gerak Tanah arah-X	238
Gambar 5.101 Interstory Drift Ratio Rata-rata Struktur CWS akibat Gerak Tanah arah-Y	238

Gambar 5.102 Interstory Drift Ratio Rata-rata Struktur HCWS akibat Gerak Tanah arah-X	239
Gambar 5.103 Interstory Drift Ratio Rata-rata Struktur HCWS akibat Gerak Tanah arah-Y	239
Gambar 5.104 Definisi Roof Drift Ratio dan Roof Drift	243
Gambar 5.105 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Landers 1992 CWS	245
Gambar 5.106 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Chi-Chi Taiwan 1999 CWS	246
Gambar 5.107 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Loma Prieta 1989 CWS	246
Gambar 5.108 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Imperial Valley 1979 CWS	246
Gambar 5.109 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Northridge 1994 CWS	246
Gambar 5.110 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Kobe-Japan 1999 CWS	247
Gambar 5.111 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah San Fernando 1971 CWS	247
Gambar 5.112 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Superstition Hills 1987 CWS	247
Gambar 5.113 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Tabas-Iran 1978 CWS	247
Gambar 5.114 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Kocaeli-Turkey 1999 CWS	248
Gambar 5.115 Interstory Drift Ratio pada Gerak Tanah Landers 1992 HCWS	248
Gambar 5.116 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Chi-Chi Taiwan 1999 HCWS	248
Gambar 5.117 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Loma Prieta 1989 HCWS	248
Gambar 5.118 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Imperial Valley 1979 HCWS	249
Gambar 5.119 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Northridge 1994 HCWS	249
Gambar 5.120 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Kobe-Japan 1999 HCWS	249
Gambar 5.121 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah San Fernando 1971 HCWS	249
Gambar 5.122 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah Superstition Hills 1987 HCWS	250
Gambar 5.123 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah	250

Tabas-Iran 1978 HCWS	
Gambar 5.124 Roof Drift Ratio pada Gerak Tanah	250
Kocaeli-Turkey 1999 HCWS	
Gambar 5.125 Histori Roof Drift Ratio Struktur CWS pada arah-X	251
Gambar 5.126 Histori Roof Drift Ratio Struktur CWS pada arah-Y	251
Gambar 5.127 Histori Roof Drift Ratio Struktur HCWS pada arah-X	252
Gambar 5.128 Histori Roof Drift Ratio Struktur HCWS pada arah-Y	252

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Lebar Efektif Flens pada Pembebanan Tarik (Draft ASCE v8)	24
Tabel 2. Lebar History Pembebanan (N. Lowes, Laura et. al. 2011)	44
Tabel 3. Deskripsi dari Spesimen Uji (Canbolat, A. et. al. 2005)	53
Tabel 4. Rangkuman dari Hasil Uji Eksperimental (Canbolat, A. et. al. 2005)	55
Tabel 5. Rangkuman Kebutuhan Rekaman Percepatan Gerak Tanah untuk dan Kasus Analisis NDP (ASCE/SEI 41-13 – Table 7-1)	74
Tabel 6. Kriteria Penerimaan Balok Kopel Baja (ASCE/SEI 41-13 Table 9-6)	76
Tabel 7. Kriteria Penerimaan Balok Kopel Beton Bertulang (ASCE/SEI 41-13 Table 10-19)	77
Tabel 8. Kriteria Penerimaan Dinding Geser (ASCE/SEI 41-13 Table 10-19)	78
Tabel 9. Kriteria Penerimaan Dinding Geser (ASCE/SEI 41-13 Table 10-19)	79
Tabel 10. Kriteria Penerimaan Elemen Kolom (ASCE/SEI 41-13 Table 10-8)	79
Tabel 11. Rekam Gerak Tanah untuk Analisis	109
Tabel 12. Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode Pendek (SNI1726-2012)	115
Tabel 13. Kategori Desain Seismik berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Periode 1 detik (SNI1726-2012)	115
Tabel 14. Koefisien untuk Batas Atas Periode (SNI1726-2012)	118
Tabel 15. Nilai Parameter Pendekatan C_t dan α (SNI1726-2012)	118
Tabel 16. Distribusi Gaya Lateral pada Tingkatan Struktur	119
Tabel 17. Partisipasi Massa Ragam Terkombinasi	120
Tabel 18. Gaya Geser Dasar Struktur	122
Tabel 19. Tulangan Terpasang Balok CWS	128
Tabel 20. Tulangan Terpasang Kolom CWS	129
Tabel 21. Tulangan Terpasang Dinding Geser CWS	132
Tabel 22. Tulangan Terpasang Balok Kopel CWS	138
Tabel 23. Tulangan Terpasang Balok HCWS	142
Tabel 24. Tulangan Terpasang Kolom HCWS	143
Tabel 25. Tulangan Terpasang Dinding Geser HCWS	147
Tabel 26. Profil Terpasang Balok Kopel Baja HCWS	153
Tabel 27. Periode Alami dan Partisipasi Massa Ragam Struktur CWS	158
Tabel 28. Periode Alami dan Partisipasi Massa Ragam Struktur HCWS	158
Tabel 29. Simpangan antar Lantai Tingkat Ijin Struktur	164
Tabel 30. Faktor Skala Gerak Tanah Struktur CWS	192
Tabel 31. Faktor Skala Gerak Tanah Struktur HCWS	192

Tabel 32. Massa Struktur pada PERFORM-3D	201
Tabel 33. Persen Rasio Penampang Fiber Dinding Geser	209
Tabel 34. Parameter Karakteristik Balok Kopel Beton Bertulang	212
Tabel 35. Parameter Karakteristik Balok Kopel Baja	213
Tabel 36. Gaya Geser Dasar Maksimum Struktur	219
Tabel 37. Rasio Kopel (<i>CR-Coupling Ratio</i>)	222
Tabel 38. Representasi Mekanisme Sistem Struktur CWS Akibat Gempa Arah-X	225
Tabel 39. Representasi Mekanisme Sistem Struktur CWS Akibat Gempa Arah-Y	225
Tabel 40. Representasi Mekanisme Sistem Struktur HCWS Akibat Gempa Arah-X	226
Tabel 41. Representasi Mekanisme Sistem Struktur HCWS Akibat Gempa Arah-Y	226
Tabel 42. Kriteria Penerimaan Balok Kopel berdasarkan ASCE/SEI 41-13	229
Tabel 43. Performa Objektif Maksimum Balok Kopel akibat Gerak Tanah pada Struktur CWS Kopel berdasarkan ASCE/SEI 41-13	229
Tabel 44. Performa Objektif Maksimum Balok Kopel akibat Gerak Tanah pada Struktur HCWS Kopel berdasarkan ASCE/SEI 41-13	229
Tabel 45. Performa Objektif rata-rata Balok Kopel berdasarkan ASCE/SEI 41-13	230
Tabel 46. Kriteria Penerimaan Performa Struktur berdasarkan ASCE/SEI 41-13	229
Tabel 47. Rasio Simpangan antar Lantai Rata-rata Struktur CWS	237
Tabel 48. Rasio Simpangan antar Lantai Rata-rata Struktur HCWS	237
Tabel 49. Kategori Intensitas Instrumen Kerusakan Struktur	240
Tabel 50. Nilai PGA Struktur CWS	241
Tabel 51. Nilai PGA Struktur HCWS	241
Tabel 52. Roof Drift Ratio Struktur CWS akibat Percepatan GM	244
Tabel 53. Roof Drift Ratio Struktur HCWS akibat Percepatan GM	245
Tabel 55. Roof Drift Ratio rata-rata Struktur CWS	251
Tabel 56. Roof Drift Ratio rata-rata Struktur HCWS	252

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada tahun 1960an, sistem dinding berangkai (*CWS-Coupled Wall System*), telah dipelajari secara eksperimental maupun analitis. Dimana, sistem dinding berangkai merupakan sistem dari dua atau lebih dinding geser yang dihubungkan oleh balok kopel.

Perencanaan konstruksi bangunan tinggi dengan menggunakan sistem dinding berangkai banyak diterapkan pada wilayah dengan potensi seismik yang tinggi. Sistem dinding berangkai memiliki perilaku seismik yang lebih baik dengan banyaknya disipasi energi pada sistem.

Dalam SNI 1726-2012 terdapat batasan ketinggian untuk struktur dengan dinding geser kantilever. Sedangkan tidak terdapat batasan ketinggian untuk struktur bangunan dengan sistem dinding berangkai. Maka, diharapkan struktur dengan sistem dinding berangkai yang memiliki ketinggian lebih daripada batasan untuk dinding geser kantilever, dapat memiliki perilaku seismik yang baik.

Elemen struktur pada sistem dinding berangkai, balok kopel, berfungsi sebagai penghubung dinding struktural dan bukan hanya sebagai penyalur gaya akan tetapi sebagai penerima beban lateral yang bekerja pada sistem. Gaya lentur timbul akibat beban gravitasi yang berupa berat sendiri bangunan maupun beban

rencana, sedangkan beban lateral seperti beban seismik mengakibatkan gaya geser. Pada saat gempa terjadi balok kopel berfungsi sebagai penyalur beban geser dari satu dinding ke dinding lainnya, serta menghasilkan kopel internal.

Kombinasi antara kekuatan dan kekakuan balok kopel pada sistem dinding berangkai diperuntukan untuk memberikan kekakuan tambahan dan mendisipasi energi pada sistem akibat beban seismik. Kombinasi keduanya pada balok kopel didapat dengan perencanaan detailing tulangan, yaitu tulangan longitudinal, tulangan transversal, dan tulangan diagonal. Tulangan longitudinal berfungsi dalam menahan gaya lentur, sedangkan tulangan transversal dan diagonal untuk menahan gaya geser, dan khusus untuk tulangan diagonal juga dapat memberikan kekuatan terhadap lentur.

Pelaksanaan konstruksi pada struktur dengan sistem dinding berangkai, terutama pada detailing tulangan diagonal, sulit dan tidak efisien. Pelaksanaan yang sulit dan tidak efisien, karena membutuhkan waktu pengerjaan yang relatif lebih lama dan membutuhkan biaya pelaksanaan yang cukup besar. Balok kopel baja (*Steel Coupling Beam*) dapat menjadi salah satu alternatif yang lebih efisien daripada penggunaan tulangan diagonal pada balok kopel biasa. Sistem dinding berangkai dengan balok kopel baja secara struktural dapat disebut sebagai sistem HCW (*Hybrid Core Wall*).

1.2 Inti Permasalahan

Perilaku struktur dengan sistem dinding berangkai, baik CWS maupun HCWS, memiliki lebih banyak disipasi energi dibandingkan dengan struktur dengan dinding geser kantilever. Banyaknya disipasi energi pada struktur dinding berangkai, diharapkan memiliki perilaku seismik yang lebih baik.

Berdasarkan beberapa studi yang pernah dilakukan diungkapkan bahwa perilaku struktur dengan HCWS lebih baik dibandingkan struktur dengan CWS. Hal tersebut dapat terlihat dari perilaku struktur beserta elemen penyusunnya, balok kopel maupun dinding geser.

Kekuatan, kekakuan, dan disipasi energi balok kopel mempengaruhi mekanisme yang terjadi pada sistem dinding berangkai. Disipasi energi pada sistem diharapkan terjadi pada daerah sambungan antara balok kopel dengan struktur dinding geser. Proses disipasi energi dipengaruhi oleh detailing tulangan maupun oleh titik pertemuan antara balok kopel dengan dinding.

Balok kopel berdasarkan geometri struktural, yaitu rasio antara panjang bentang dengan tinggi balok, dikategorikan menjadi tiga, yaitu *short*, *medium*, dan *deep*. Proses disipasi energi pada balok kopel dapat berupa distorsi geser inelastis atau rotasi sendi plastis. Balok kopel dengan kategori *deep*, mekanisme disipasi energi yang terjadi berupa distorsi geser inelastis, sedangkan pada balok kopel yang lebih panjang, mekanisme disipasi energi berupa rotasi sendi plastis.

Pada tahap perencanaan, struktur dengan sistem dinding berangkai, maupun sistem dinding berangkai hybrid, direncanakan terhadap mekanisme

kegagalan pada geser. Mekanisme kegagalan akibat geser, didominasi oleh disipasi energi berupa distorsi geser inelastis, yang mana terjadi setelah kelelahan balok kopel pada keseluruhan struktur disertai kegagalan pada dasar dinding. Mekanisme yang terjadi pada struktur dengan sistem dinding berangkai dapat terlihat dari bagaimana struktur tersebut berperilaku. Perilaku yang dihasilkan merupakan perilaku yang tidak linear, baik secara karakteristik material maupun respons pada struktur.

1.3 Tujuan Penulisan

Penulisan tesis yang berjudul “Studi Kinerja Sistem Dinding Berangkai Hybrid” ditujukan untuk:

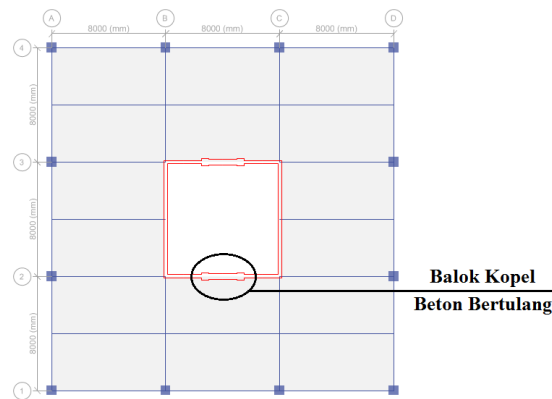
1. Mempelajari detailing balok kopel pada struktur dengan sistem dinding berangkai (*CWS-Coupled Wall System*), maupun sistem dinding berangkai hybrid (*HCWS-Hybrid Coupled Wall System*).
2. Mempelajari perilaku struktur dengan sistem dinding berangkai, baik dengan CWS maupun HCWS.
3. Membandingkan kinerja struktur HCWS dengan struktur CWS berdasarkan *performance-based design method (PBDM)*.

1.4 Pembatasan Masalah

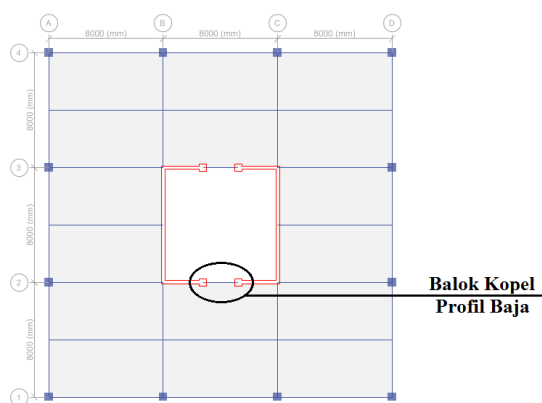
Pembatasan pada tesis dilakukan agar pembahasan tidak terlalu luas. Maka, dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Pemodelan struktur berupa bangunan beton bertulang dengan CWS dan HCWS yang menggunakan sistem tunggal.
2. Data dimensi bangunan sebagai berikut:
 - Jumlah lantai : 25 lantai
 - Tinggi antar lantai : 3.5 m
 - Tinggi lantai dasar : 3.5 mDenah bangunan dapat dilihat pada **Gambar 1.1** dan **Gambar 1.2**
3. Data fungsi dan wilayah bangunan sebagai berikut:
 - Fungsi bangunan : Perkantoran
 - Kota : Jakarta
 - Kelas Situs Tanah : D
4. Data pemodelan material beton sebagai berikut:
 - Mutu Beton : 35 MPa
 - Mutu baja tulangan : 400 Mpa
5. Data pemodelan material profil baja sebagai berikut:
 - Tegangan Leleh : 400 MPa
 - Tegangan Tarik : 480 MPa
 - Modulus Elastisitas : 200000 MPa
6. Balok kopel dimodelkan dengan rasio bentang dengan tinggi yang bervariasi seperti pada **Gambar 1.3**.
7. Lantai bangunan dianggap sebagai diafragma kaku.
8. Model struktur tanpa basement sehingga struktur terjepit lateral di pondasi

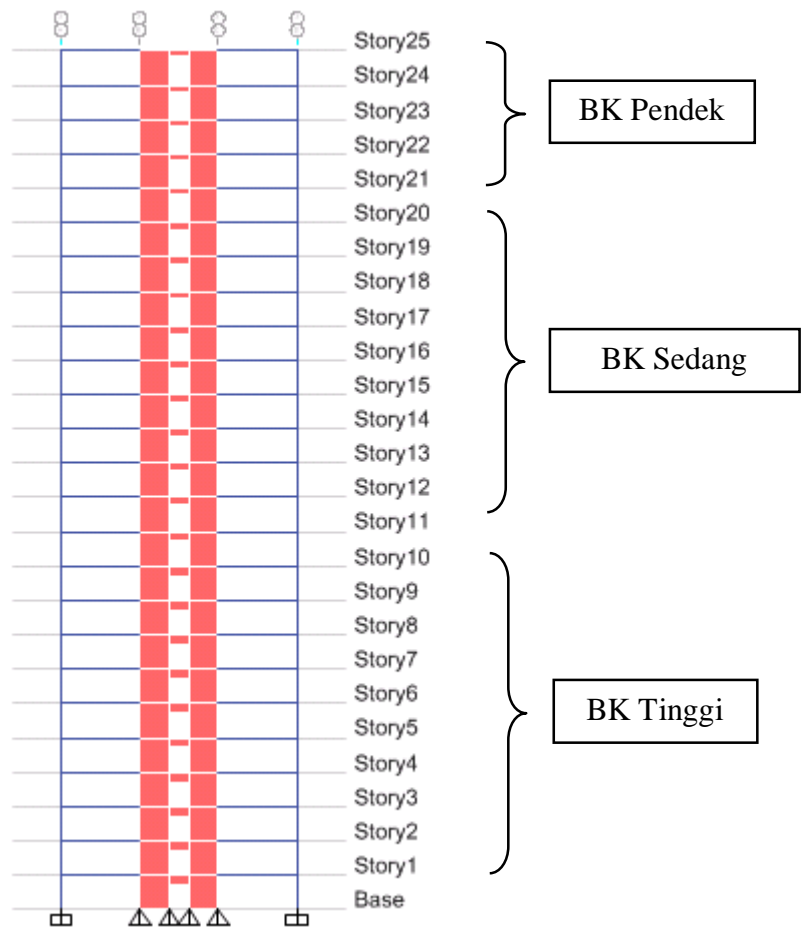
9. Beban gempa rencana sesuai dengan SNI 03-1726-2012 dengan sistem dinding beton bertulang khusus.
10. Pemodelan, desain, dan analisis dinamik spektrum respons ragam gedung akan dilakukan dengan menggunakan program ETABS 2015.
11. Pemodelan dan analisis dinamik non-linier riwayat waktu (*Non-linear Time History Analysis-NLTHA*) gedung akan dilakukan dengan bantuan program PERFORM-3D v.5.
12. Parameter untuk properties penampang elemen balok-kolom PERFORM-3D akan dilakukan dengan bantuan program Xtract v3.0.8.



Gambar 1.1 Denah Bangunan dengan Sistem Dinding Berangkai (CWS)



Gambar 1.2 Denah Bangunan dengan Sistem Dinding Berangkai Komposit (HCWS)



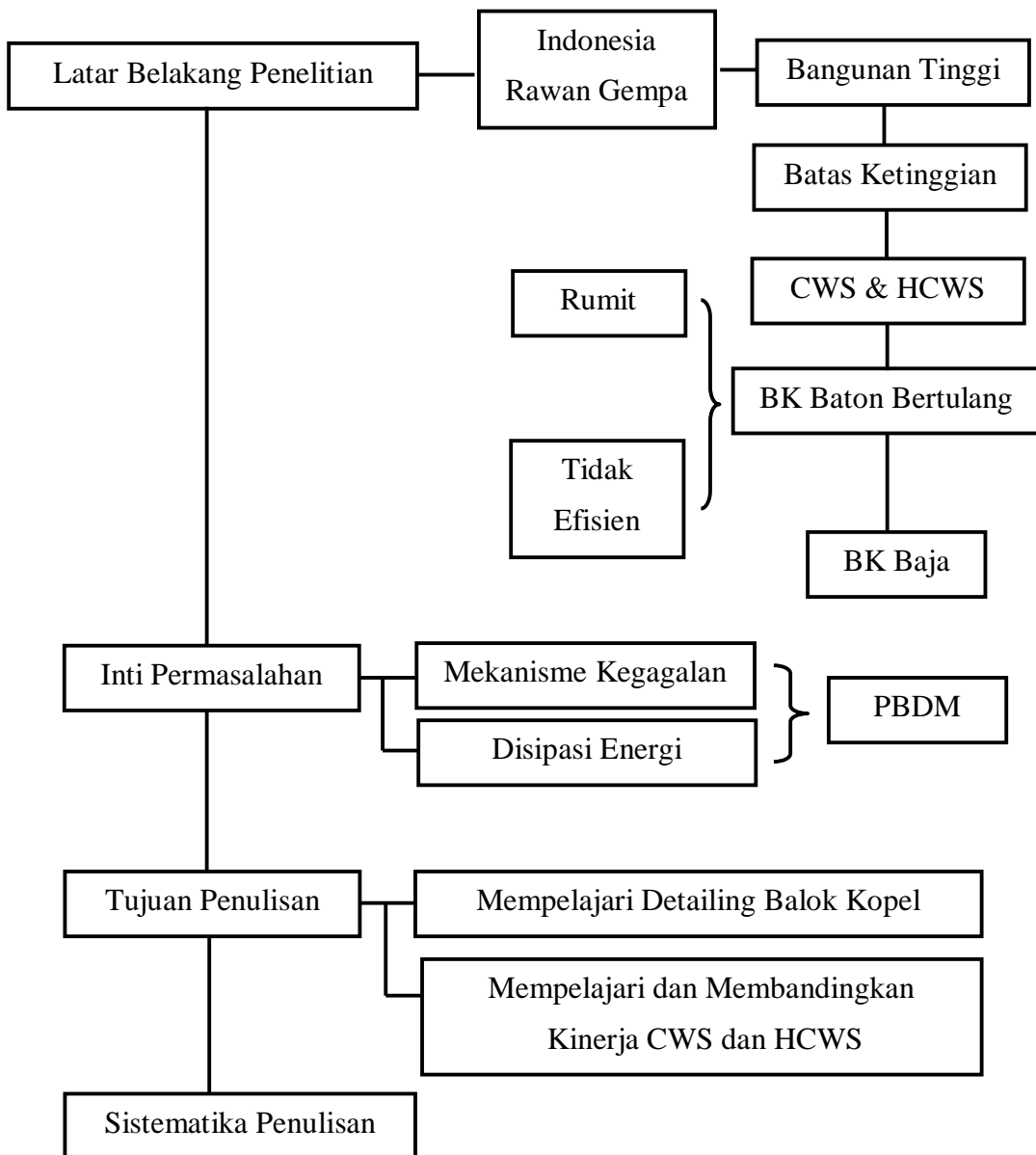
Gambar 1.3 Distribusi Balok Kopel pada Struktur CWS dan HCWS

1.5 Metodologi Penulisan

Metodologi penulisan dapat dijelaskan dengan diagram alir penulisan. Diagram alir digunakan untuk menjelaskan langkah-langkah perencanaan dalam melakukan penelitian. Penulisan tesis dengan judul “Studi Kinerja Sistem Dinding Berangkai Hybrid” ini dimulai dan dilatar belakangi oleh suatu masalah hingga ditemukan jawaban atas permasalahan mengenai topik bahasan. Studi mengenai CWS maupun HCWS dapat dibagi menjadi empat tahapan utama, yaitu sebagai berikut:

1. Tahap Pertama – Pendahuluan

Tahapan awal pada penulisan ini memilih topik bahasan beserta latar belakang dan tujuan dari penulisan. Alur penulisan pada tahap ini dapat dilihat pada **Gambar 1.4**.



Gambar 1.4 Diagram Alir Pendahuluan

Topik bahasan mengenai kinerja pada HCWS dilatar belakangi oleh sulitnya pelaksanaan dan kurang efisiensi dalam pengerjaan detailing pada sistem dinding berangkai yang menggunakan balok kopel beton bertulang. Maka, balok kopel baja pada sistem dinding berangkai hybrid akan diharapkan dapat memiliki kinerja yang sama atau lebih baik daripada balok kopel beton bertulang. Sehingga kinerja yang dihasilkan pada sistem HCW secara keseluruhan dapat lebih baik dengan adanya balok kopel baja.

Inti permasalahan dari studi mengenai kinerja sistem dinding berangkai didasari atas Indonesia merupakan daerah rawan gempa dan memiliki berbagai macam struktur bangunan tinggi. Bangunan tinggi membutuhkan sistem yang dapat menahan gaya lateral gempa, yaitu sistem dengan dinding geser. Sistem dinding geser berangkai merupakan sistem yang memiliki kinerja yang lebih baik daripada sistem dinding geser kantilever. Balok kopel yang merupakan elemen struktur dari sistem dinding berangkai memiliki dominasi gaya geser akibat beban lateral. Geser akan ditahan oleh tulangan baja diagonal pada balok kopel beton bertulang. Mekanisme yang diharapkan pada sistem adalah kelelahan pada dasar dinding geser. Maka, balok kopel direncanakan memiliki kapasitas geser yang lebih dibandingkan dinding geser.

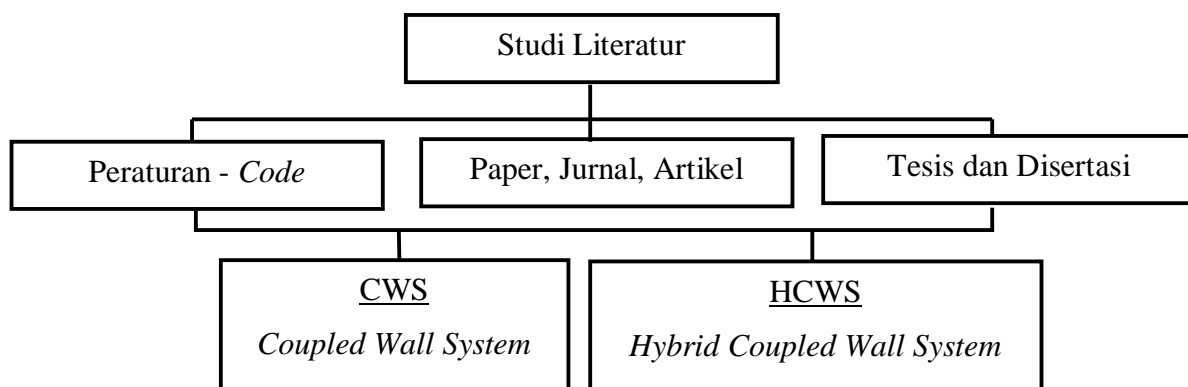
Studi mengenai studi kinerja pada sistem dinding berangkai ditujukan untuk mempelajari detailing balok kopel pada struktur dengan CWS dan HCWS; serta membandingkan performa struktur dengan CWS dan HCWS.

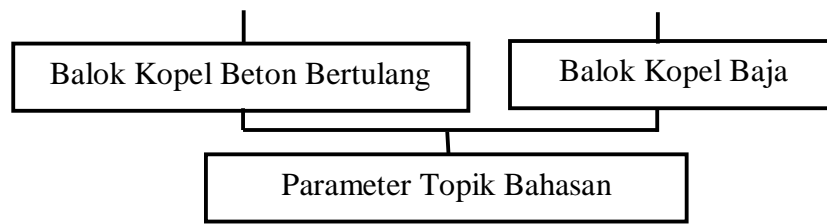
Batasan-batasan pada studi ini dilakukan dengan membatasi analisis pada balok kopel yang digunakan pada struktur, yaitu balok kopel beton bertulang dan balok kopel dengan profil baja.

Sistematika penulisan disusun setelah studi literatur dan pembatasan masalah dilakukan. Sistematika penulisan ditujukan sebagai susunan garis besar dari penulisan mengenai studi analisis numerik pada HCWS.

2. Tahap Kedua – Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahapan selanjutnya dalam studi ini, dan dapat dilihat pada **Gambar 1.5**. Studi literatur dilakukan dengan melakukan kajian terhadap tulisan-tulisan yang berkaitan dengan CWS dan HCWS. Tulisan dalam bentuk peraturan, paper, jurnal, tesis, disertasi, studi maupun kajian baik secara eksperimental maupun numerik, merupakan bahan yang akan digunakan dalam studi ini.





Gambar 1.5 Diagram Alir Studi Literatur

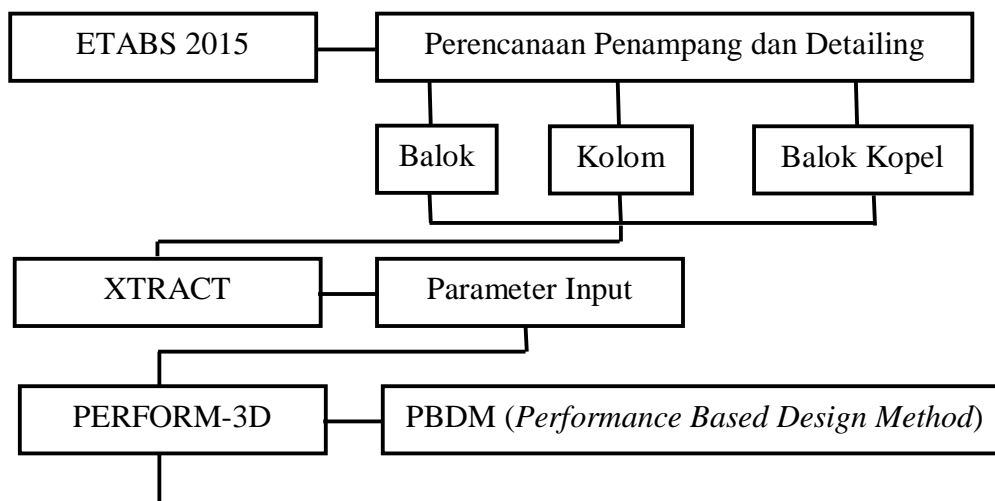
Kajian literatur dilakukan terhadap berbagai macam tulisan mengenai CWS dan HCWS, seperti: draft ASCE v8 *Recomendation for Seismic Design of Hybrid Coupled Wall System* yang membahas mengenai perencanaan struktur dengan HCWS; disertasi oleh Hassan, M. (2004). “*Inelastic Dynamic Behaviour and Design of Hybrid Coupled Wall System*” menjelaskan mengenai analisis numerik mengenai struktur dengan menggunakan HCWS; disertasi oleh Abdalla Eljadei, Abdelate. (2012), “*Performanced Based Design of Coupled Wall Structures*” menjelaskan mengenai analisis berdasarkan PBDM pada struktur dengan HCWS; disertasi oleh Paulay, T. (1969), “*The Coupling of Shear Walls*” yang membahas mengenai perilaku balok kopel berdasarkan tiga kategori, yaitu *shallow*, *medium*, dan *deep coupling beam*. Selain itu, dilakukan pula kajian terhadap paper dan jurnal yang membahas mengenai balok kopel beton bertulang maupun baja, secara uji eksperimental dan analisis numerik.

Setelah dilakukan studi literatur, terdapat beberapa parameter yang disoroti. Sistem dinding berangkai hybrid (HCWS) memiliki kekuatan dan kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan sistem dinding berangkai

(CCW), karena memiliki banyak disipasi energi sehingga menghasilkan perilaku seismik yang lebih baik. Perencanaan dan pelaksanaan pengerjaan balok kopel baja lebih mudah dibandingkan dengan balok kopel beton bertulang. Rasio perbandingan antara panjang bentang dengan tinggi (l/d) merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi perilaku pada balok kopel. Semakin besar rasio l/d yang dimiliki balok kopel maka balok akan cenderung dipengaruhi oleh perilaku geser. Maka, didapat beberapa parameter yang dapat dijadikan acuan sebagai topik bahasan.

3. Tahap Ketiga – Studi Analitis

Studi analitis pada penulisan ini dilakukan secara numerik dengan bantuan program untuk menganalisis struktur dengan sistem CWS dan HCW sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Studi mengenai kinerja sistem dinding berangkai menggunakan metode *Performance Based Design* (PBDM). Alur dari studi analitis dapat terlihat pada **Gambar 1.6**.



Hasil Analisis Struktur

Gambar 1.6 Diagram Alir Studi Analitis – Analisis Numerik

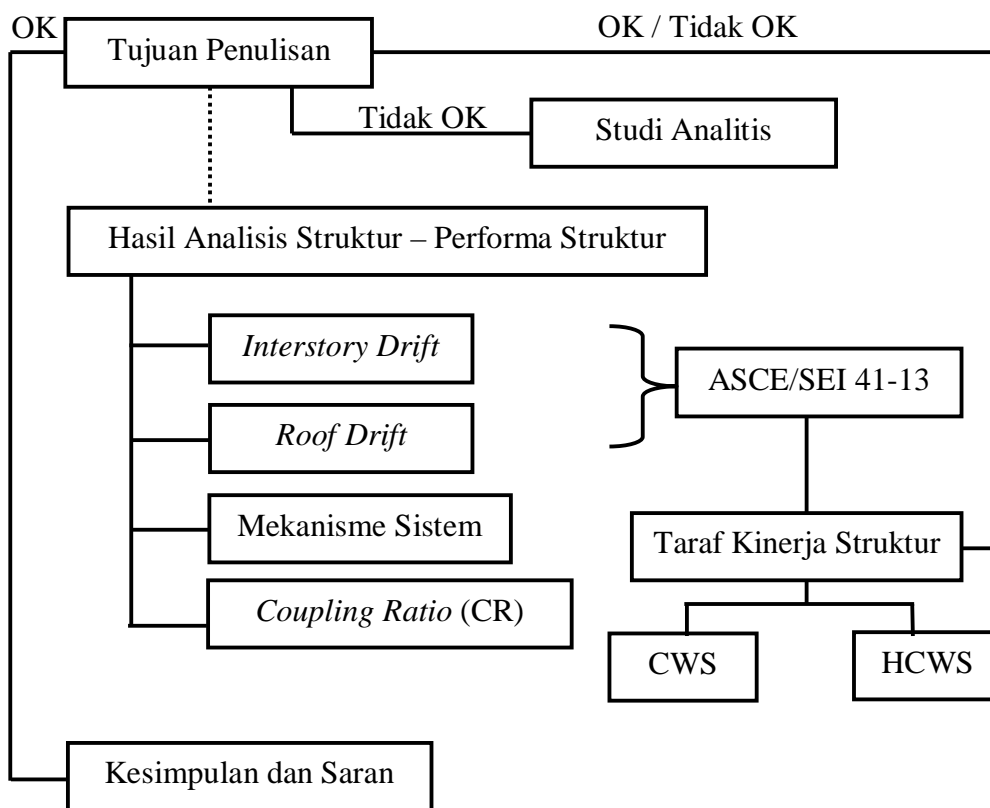
Perencanaan dimensi dan detailing penampang untuk elemen struktur dilakukan dengan bantuan program ETABS 2015. Setelah didapatkan detailing penampang kolom, balok, dinding geser dan balok kopel, properties penampang untuk input PERFORM-3D diperoleh dengan bantuan program XTRACT. Untuk analisis performa struktur CWS dan HCWS menggunakan bantuan program PERFORM-3D. Dimana, data masukan properties untuk PERFORM-3D yang diperoleh dari XTRACT hanya untuk elemen balok, kolom, dan balok kopel. Sedangkan untuk dinding geser data material dan data penampang dapat langsung dimasukkan di dalam PERFORM-3D. Setelah dilakukan analisis PBDM pada program PERFORM-3D, didapat hasil analisis berupa *drift*, *interstory drif*, *maximum roof displacemet*, *base shear*, *performance structure*, dll. Hasil analisis akan digunakan untuk mendapatkan performa struktur dengan mengacu pada kriteria penerimaan berdasarkan FEMA356-2000 atau ASCE/SEI 41-13.

4. Tahap Keempat – Pembahasan Hasil Analisis

Pembahasan hasil analisis merupakan pembahasan mengenai kinerja struktur. Taraf kinerja struktur dapat ditinjau dengan menggunakan hasil keluaran analisis sebagai parameter perfoma dari struktur. Analisis struktur pada

PERFORM-3D memberikan hasil berupa letak sendi plastis, *drift* atau *deflection*, *interstory drift*, *base shear*, dll. Alur pembahasan hasil tersebut dapat dilihat pada **Gambar 1.7**.

Batasan-batasan parameter untuk memenuhi taraf kinerja struktur maupun elemen struktur terdapat pada ASCE41-13. ASCE41-13 merupakan salah satu peraturan yang mengakomodasi dasar dan persyaratan untuk bangunan dengan ketahanan gempa yang dinilai berdasarkan taraf kinerja struktur.



Gambar 1.7 Diagram Alir Studi Analitis – Analisis Numerik

Studi mengenai sistem dinding berangkai memiliki dua tujuan utama, yaitu mempelajari detailing balok kopel dan mempelajari perilaku struktur serta

membandingkan performa CWS dengan HCWS. Maka, setelah didapatkan taraf kinerja struktur dari kedua sistem dengan balok kopel yang berbeda, dapat terlihat sistem manakah yang memberikan perilaku lebih baik dan dapat disarankan untuk pelaksanaan maupun studi lebih lanjut.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis dengan judul “Studi Kinerja Sistem Dinding Berangkai Hybrid”, sebagai berikut:

Bab 1 PENDAHULUAN

Pembahasan mengenai latar belakang, inti permasalahan, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan.

Bab 2 STUDI LITERATUR

Pembahasan konsep dan prinsip dasar mengenai hal-hal yang berkaitan pada struktur dengan sistem dinding berangkai berdasarkan kajian literatur tertentu.

Bab 3 STUDI KASUS

Uraian mengenai pemodelan struktur beserta elemen penyusunnya.

Bab 4 ANALISIS ELASTIK STRUKTUR

Uraian mengenai prosedur analisis dan perencanaan struktur beserta elemen penyusunnya berdasarkan analisis spektrum respons ragam.

Bab 5 ANALISIS DINAMIK RESPONS RIWAYAT WAKTU

Uraian dan pembahasan analisis nonlinier dinamik respons riwayat waktu dengan metode *performance based design* pada struktur bangunan dengan menggunakan program PERFORM-3D.

Bab 6 KESIMPULAN dan SARAN

Kesimpulan pembahasan masalah serta saran yang diberikan untuk perencanaan dan studi yang akan datang.