



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS *PUSHOVER* STRUKTUR DINDING GESER  
BERANGKAI HIBRID DENGAN BALOK  
PERANGKAI BAJA**

**SKRIPSI**

**DODI IKHSANSHALEH**

**0606072181**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
DEPOK  
JANUARI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS *PUSHOVER* STRUKTUR DINDING  
GESER BERANGKAI HIBRID DENGAN BALOK  
PERANGKAI BAJA**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar**

**Sarjana Teknik**

**DODI IKHSANSHALEH**

**0606072181**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL**

**DEPOK**

**JANUARI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Dodi Ikhsanshaleh**

**NPM : 0606072181**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : Januari 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Dodi Ikhsanshaleh  
NPM : 0606072181  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul Skripsi : Analisis *Pushover* Struktur Dinding Geser Berangkai Hibrid dengan Balok Perangkai Baja

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Yuskar Lase, DEA (.....)

Penguji : Ir. Syahril A.Rahim, M.Eng (.....)

Penguji : Dr.-Ing. Josia I. Rastandi, S.T, M.T (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Januari 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas petunjuk dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr Yuskar Lase, DEA selaku dosen pembimbing yang telah sabar membimbing dan membentuk pola pikir penulis dalam bidang Teknik Sipil khususnya masalah dinamika struktur dan rekayasa struktur tahan gempa;
- (2) Kedua orang tua, Ir Supanto dan Ekki D. Hartati dan adik-adik penulis yang telah memberikan doa, perhatian serta dukungan material dan moral;
- (3) Sahabat penulis yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Terimakasih kepada sahabat-sahabat penulis dari Departemen Teknik Sipil angkatan 2006 yang dari masa perkenalan, PPAM, Mabim, Rohis Sipil Lingkungan 2007, IMS 2008, KERSOS 2009, panitia PPAM 2009, dan MADK 2010. Terima kasih kepada Pudia Prishandy, Satabrasyahdin, Zaki Abdul Gani, Qodrat RH, Pringga Satria, Fakhry Ibrahim yang menemani penulis di Wisma Widya dan RM Aldi, Firman Reza Persada, Udayalaksamana, Denny Lesayuti, Bayu Adikusumo, Bastian Okto, M Angga Kusuma, Vandemora, Reza Farhan, Ari Affandi, Dicky Pratama, Wahyu Trihadi, Wahyu Ahmadi, Aji Baskoro dalam semua barisan perjuangan baik di kampus maupun terjun ke jalan-jalan. Terima kasih kepada Prima Teguh Prasajo, ketua IMS 2008 yang telah mempercayakan amanahnya di IMS 2008 dan KERSOS 2009 kepada penulis untuk memberikan sumbangsih dalam kerja-kerja demi bangsa. Terima kasih kepada Ipan Dwi R, kepala bidang Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi IMS 2008 dan para staf, Feryan Fadhin, Rio Setiadi, Yosep Cristian, Irawan Yudha, atas kerja keras dan kepercayaan yang diberikan untuk mengembangkan keilmuan keteknikan di IMS 2008. Terima kasih yang sebesar-besarnya atas loyalitas dan pengorbanan kepada seluruh

panitia PPAM 2009, M al Fatih, Pratiwi Eka, Yunita Utami, Siti Kurnia Astuti, Yosua Silitonga, Keisha Anggraini, Pugar Septia, Dennis Depri, Andini Pramudita, Mardiah, Ucik Nurhayati. Terima kasih kepada Ismi Mey, PO KERSOS 2008 dan seluruh panitia atas kerja keras dan kepercayaan yang telah diberikan. Terima kasih kepada M Firdaus, ketua BEMFTUI 2009, teman seperjuangan dalam suka duka. Terima kasih kepada teman-teman yang tergabung dalam rohis Ash Shaff, Hifdzi Ulil, Berliyanto, Nuki Suprayitno, Rendi Saputra, Wennie Haristia, Fatihah Fikriyah, Nika R, Aulinita Nafika, Citra, Dewi Syafrida. Terima kasih kepada teman-teman satu bimbingan skripsi, Garlan Ramadhan, Andini P, Batta Septo, dan Stepen Valentino atas bantuan dan dorongan semangat yang diberikan kepada penulis. Terima kasih kepada M Rizki Imansyah atas bimbingan dalam pemodelan dinding geser dengan elemen kolom menggunakan *software* SAP2000 v11. Terimakasih kepada teman-teman staf di YL Engineering, Bintaro yang membantu penulis dalam memfasilitasi proses *running* analisis pushover model 3D.

Penulis meminta mohon dilampirkan hatinya atas kesalahan-kesalahan dan keterbatasan sehingga tidak semua dapat dicantumkan pada kesempatan ini. Akhir kata, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi bangsa Indonesia khususnya pengembangan ilmu rekayasa struktur tahan gempa.

Depok, 6 Januari 2011

Penulis

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dodi Ikhsanshaleh

NPM : 0606072181

Program Studi : Teknik Sipil

Departemen : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

### **ANALISIS *PUSHOVER* STRUKTUR DINDING GESER BERANGKAI HIBRID DENGAN BALOK PERANGKAI BAJA**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : Januari 2011

Yang menyatakan

(Dodi Ikhsanshaleh)

## ABSTRAK

Nama : Dodi Ikhsanshaleh  
Program Studi : Teknik Sipil  
Judul : Analisis *Pushover* Struktur Dinding Geser Berangkai Hibrid dengan Balok Perangkai Baja

Untuk memperoleh sistem penahan beban lateral yang efektif dan efisien dari sebuah struktur dinding geser berangkai, balok perangkai harus didesain daktail dengan perilaku histeresis yang stabil saat pembebanan siklik. Balok profil baja dapat digunakan sebagai balok perangkai yang didesain daktail terhadap beban geser dimana perilakunya mirip dengan link geser pada struktur rangka bresing eksentris. Penelitian ini mengevaluasi perilaku inelastis dari balok perangkai baja yang digunakan pada struktur dinding geser berangkai beton bertulang. Struktur bangunan 10 lantai dengan dua dinding geser berbentuk C yang dirangkai dengan dinding geser berbentuk I dan dikelilingi oleh struktur portal beton bertulang dievaluasi dengan analisis statik nonlinier (*pushover analysis*). Struktur beton bertulang didesain berdasarkan SNI 03-2847-2002, sedangkan prosedur dan parameter inelastis untuk analisis statik nonlinier diadopsi dari FEMA 356. Perilaku inelastis dari balok perangkai baja dimodelkan dengan sendi plastis momen dan geser yang didistribusikan di sepanjang bentang untuk mengevaluasi jenis dan perkembangan pembentukan sendi plastis. Hasil analisis statik nonlinier *pushover* menunjukkan bahwa sistem hibrid ini mempunyai daktilitas yang cukup tinggi. Semakin kaku balok perangkai baja yang digunakan, akan memberikan kinerja dan daktilitas struktur yang semakin meningkat dalam menahan beban gempa.

Kata kunci: balok perangkai baja, dinding geser berangkai, analisis statik nonlinier *pushover*, sendi plastis, daktilitas

## ABSTRACT

Name : Dodi Ikhsanshaleh  
Study Program : Civil Engineering  
Title : Pushover Analysis of Hybrid Couplewall with Steel Coupling Beam

In order to achieve an effective and efficient lateral load-resisting system of couple wall structure, the coupling beam have to posse stable hysteretic response under cyclic loading. Steel coupling beam can be designed to provide satisfactory hysteretic behavior by yielding in shear, similar to behavior of a shearlink in eccentrically braced frame . This research provides an evaluation of inelastic behavior of hybrid couple wall system, in which steel beams are used to couple reinforced concrete shearwall. The 10-story hybrid cople wall structure which steel coupling beam are used to couple reinforced concrete shearwall is analyzed using nonlinier static procedure or pushover analysis. Detailing requirement of reinforce concrete structure was designed based on the SNI 03-2847-2002 and nonlinear static procedure and inelastic parameter adopted form FEMA 356. Hinge property that distributed along the span used to represent inelastic shear and moment behavior of steel coupling beam. From the result of pushover analysis hybrid couple wall provided good performance dan ductility.

Keywords : couple shearwall, steel coupling beam, pushover analysis, plastic hinge, ductility

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	ii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	vi
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xiv
<b>1. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Deskripsi Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Pembatasan Masalah .....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	2
<b>2. STUDI PUSTAKA</b> .....	4
2.1 Definisi Dinding Geser Berangkai .....	4
2.2 Perilaku Dinding Geser Berangkai Terhadap Beban Lateral .....	4
2.3 Dinding Geser Berangkai Hibrid.....	6
2.4 Sistem Ganda Interaksi Dinding Geser dan Rangka Pemikul Momen .....	11
2.5 Desain Balok Perangkai Baja.....	12
2.5.1 Kuat Geser Nominal .....	14
2.5.2 Pelat Pengaku .....	15
2.5.3 Panjang Penyaluran $L_e$ .....	17
2.6 Modelisasi Struktur Dinding Geser Hibrid.....	18
2.7 Perancangan Struktur Tahan Gempa Berbasis Kinerja .....	21
2.8 Analisis Statik Non Linier .....	23
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	26
<b>4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b> .....	32
4.1 Karakteristik Dinamika Struktur .....	32
4.2 Beban Gempa .....	33
4.3 Desain Detail Penulangan Elemen Struktur .....	38

4.4	Hasil Analisis Statik Nonlinier <i>Pushover</i> .....	41
4.4.1.	Kurva <i>Pushover</i> Hubungan Gaya-Lendutan.....	41
4.4.2.	Faktor Kuat Lebih dan Daktilitas Struktur .....	50
4.4.3.	Distribusi Sendi Plastis Balok Perangkai Baja .....	53
<b>5.</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>67</b>
5.1	Kesimpulan.....	67
5.2	Saran.....	68
	<b>DAFTAR REFERENSI</b> .....	<b>69</b>



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perilaku Dinding Geser Berangkai terhadap Beban Lateral .....	5
Gambar 2.2	Kurva Histeresis Hubungan Beban-Putaran Sudut .....	7
Gambar 2.3	Denah Model Dinding Berangkai Hibrid .....	8
Gambar 2.4	Target Lendutan .....	9
Gambar 2.5	Rotasi pada Balok Perangkai pada Variasi Rasio Kopel .....	9
Gambar 2.6	Rotasi pada Dasar Dinding Geser .....	10
Gambar 2.7	Reaksi Perletakan Momen pada Dasar Dinding Geser .....	10
Gambar 2.8	Gaya Aksial pada Dinding Geser .....	10
Gambar 2.9	Deformasi Struktur Terhadap Beban Lateral Terbagi Rata .....	11
Gambar 2.10	Perbandingan Respon Sistem Struktur Terhadap Beban Lateral .....	12
Gambar 2.11	Putaran Sudut pada Balok Perangkai Hibrid.....	13
Gambar 2.12	Detail Pengaku Balok Berangkai Baja.....	16
Gambar 2.13	Kapasitas Balok Perangkai yang Tertanam dalam Dinding Geser .....	17
Gambar 2.14	Detail Sambungan Balok Perangkai Baja dengan Dinding Geser .....	18
Gambar 2.15	<i>End offset</i> Balok dengan Dinding Geser .....	19
Gambar 2.16	Modelisasi Struktur Dinding Geser Berangkai .....	20
Gambar 2.17	Generalisasi Hubungan Gaya-Deformasi FEMA 356 .....	20
Gambar 2.18	Ilustrasi Perancangan Berbasis Kinerja.....	22
Gambar 2.19	Idealisasi Kurva Gaya-Peralihan.....	24
Gambar 3.1	Denah Model Struktur .....	27
Gambar 3.2	Respon Spektra Rencana.....	28
Gambar 3.3	Bagan Alur Metodologi Penelitian.....	31
Gambar 4.1	Perbandingan Periode Getar Alami Model Struktur .....	33
Gambar 4.2	Perbandingan Gaya Geser Dasar Statik dan Dinamik Respon Spektrum ...	35
Gambar 4.3	Distribusi Gaya Geser Lantai dan Dinding Geser .....	36
Gambar 4.4	Detail Penulangan Struktur .....	39
Gambar 4.5	Kurva <i>Pushover</i> Model Balok Perangkai WF200x400 .....	42
Gambar 4.6	Sendi Plastis Model Balok Perangkai WF200x400 .....	42
Gambar 4.7	Kurva <i>Pushover</i> Model Balok Perangkai WF200x500 .....	44
Gambar 4.8	Sendi Plastis Model Balok Perangkai WF200x500 .....	44

Gambar 4.9	Kurva <i>Pushover</i> Model Balok Perangkai WF200x600 .....	46
Gambar 4.10	Sendi Plastis Model Balok Perangkai WF200x600 .....	47
Gambar 4.11	Variasi Kurva <i>Pushover</i> Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja.....	48
Gambar 4.12	Variasi Lendutan Terhadap Dimensi Balok Perangkai pada Level Kinerja <i>Immediate Occupancy</i> dan <i>Life Safety</i> .....	49
Gambar 4.13	Variasi Faktor Kuat Lebih Total Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja	51
Gambar 4.14	Variasi Faktor Kuat Lebih $f_1$ Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja.....	51
Gambar 4.15	Variasi Faktor Kuat Lebih $f_2$ Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja.....	52
Gambar 4.16	Variasi Daktilitas Tersedia Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja.....	52
Gambar 4.17	Distribusi sendi plastis momen pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 150 mm .....	54
Gambar 4.18	Distribusi sendi plastis geser pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 150 mm .....	56
Gambar 4.19	Distribusi sendi plastis momen pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 200mm .....	58
Gambar 4.20	Distribusi sendi plastis geser pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 200 mm .....	60
Gambar 4.21	Distribusi sendi plastis momen pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 300 mm .....	62
Gambar 4.22	Distribusi sendi plastis geser pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 300 mm .....	64
Gambar 4.23	Putaran Sudut Plastis balok Perangkai Baja pada <i>Collapse Prevention</i> .....	66

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Detail Balok Perangkai Hibrid.....	8
Tabel 2.2	Perbedaan Desain Kriteria Balok Perangkai Baja.....	16
Tabel 2.3	Parameter Modelisasi dan Kriteria Kinerja Balok Perangkai Baja FEMA 356.....	21
Tabel 2.4	Level Kinerja FEMA 356 .....	22
Tabel 3.1	Properti Material .....	26
Tabel 3.2	Dimensi Struktur .....	28
Tabel 3.3	Kombinasi Pembebanan untuk Perancangan Struktur .....	29
Tabel 3.4	Variasi Parametrik .....	30
Tabel 4.1	Karakteristik Dinamik Model Struktur .....	32
Tabel 4.2	Pola Getar Struktur.....	33
Tabel 4.3	Berat Struktur dan Gaya Geser Dasar .....	34
Tabel 4.4	Perbandingan Gaya Geser Dasar Statik dan Dinamik Respon Spektrum.....	34
Tabel 4.5	Gaya Dalam pada Balok Perangkai Baja Akibat Beban Gempa .....	37
Tabel 4.6	Lendutan dan Gaya Geser Dasar Analisis Statik Nonlinier .....	50
Tabel 4.7	Faktor Kuat Lebih Model Struktur.....	50
Tabel 4.8	Putaran Sudut Plastis Balok Perangkai ketika <i>Collapse Prevention</i> .....	65

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Hasil Analisis Statik Nonlinier <i>Pushover</i> Struktur Dinding Berangkai Hibrid .....	71
Lampiran 2.	Desain Balok Perangkai Baja .....	80
Lampiran 3.	Tutorial Analisis Statik Nonlinier <i>Pushover</i> dengan SAP 2000 versi 14 ...	81



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Struktur beton dinding geser berangkai (*couple shearwall*) dimana balok merangkai dua atau lebih dinding geser beton telah umum digunakan untuk konstruksi bangunan tinggi. Keuntungan yang diperoleh dari balok perangkai (*couple beam*) yaitu efisiensi mekanisme penahan beban lateral dimana balok perangkai memberikan transfer gaya vertikal pada dinding geser yang berdampingan kemudian menciptakan momen kopel yang menahan sebagian dari momen guling (*overturning moment*) dari gaya gempa (Paulay and Priestley, 1992). Timbulnya momen kopel ini memberikan tiga keuntungan. Pertama, momen kopel mereduksi momen yang harusnya ditahan oleh masing-masing individu dinding geser sehingga menghasilkan desain yang efisien. Kedua, balok kopel akan mengalami deformasi inelastis sehingga mendisipasi energi gempa yang masuk dan mendistribusikan disepanjang dinding geser. Ketiga, balok perangkai memberikan kekakuan lateral yang lebih besar untuk menahan gaya gempa.

Balok perangkai dengan beton bertulang akan menderita gaya geser yang sangat besar sehingga membutuhkan kriteria khusus tulangan diagonal, pengankuran pada sambungan balok perangkai dengan dinding geser dan rasio antara bentang dengan tinggi balok yang rendah untuk memperoleh perilaku histeresis yang daktail (SNI 03-2847-2002,2002 ; ACI 319-08,2008). Karena sering kali didesain dengan balok tinggi (*deep beam*) dengan detail tulangan yang rumit untuk memenuhi gaya geser, konstruksi balok perangkai beton bertulang di lapangan menimbulkan kesulitan sehingga berpotensi meningkatkan biaya dan waktu konstruksi. Dengan mempertimbangkan hal ini, diusulkan penggunaan balok profil baja sebagai alternatif balok perangkai menggantikan balok perangkai beton bertulang sehingga disebut dinding geser berangkai hibrid (*hybrid couple wall*).

Dinding geser berangkai hibrid dengan balok perangkai baja telah diteliti secara eksperimen dan analisis sejak tahun 1990an. Beberapa penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh El-Tawil et al. (2002a, 2002b, 2004); Shahrooz et al (1993); Harries et al (2000, 2006); dan Park et al (2005, 2006) yang hasilnya dapat dirangkum sebagai berikut: (1) balok perangkai baja dapat didesain dengan berperilaku leleh akibat geser analog dengan perilaku link geser pada rangka baja bresing eksentris; (2) jika didesain dengan detail yang baik, sambungan antara balok perangkai baja dengan dinding geser beton bertulang akan memberikan kinerja yang baik saat dibebani beban siklik; (3) perilaku inelastis sistem dinding geser hibrid memberikan kinerja yang baik dengan menyediakan kekuatan dan kekakuan yang cukup untuk bangunan tahan gempa, dan (4) kinerja struktur dipengaruhi oleh rasio kopel (*coupling ratio*).

## 1.2 Deskripsi Masalah

Masalah yang diteliti yaitu bagaimana perilaku inelastis profil baja sebagai balok perangkai pada sistem sistem dinding geser berangkai hibrid yang dibebani dengan beban statik nonlinier (*pushover*).

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk memperoleh pemahaman tentang perilaku inelastis profil baja yang digunakan sebagai balok perangkai pada sistem dinding geser berangkai hibrid.

## 1.4 Pembatasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada analisis sistem dinding geser berangkai hibrid dengan menggunakan analisis statik non linier atau *pushover analysis* untuk merepresentasikan beban gempa.

Model struktur yang digunakan adalah bangunan 10 lantai struktur beton dengan dinding geser berangkai hibrid. Beban gempa yang digunakan adalah Gempa Rencana Wilayah 3 untuk tanah lunak ( $PGA = 0,30g$ ) yang diatur dalam berdasarkan SNI 1726-2002. Beban gempa diberikan kepada struktur sebagai beban lateral statik non linier atau *pushover analysis* dengan distribusi mengikuti distribusi pola getar pertama fundamental.

Modelisasi dan analisis *pushover* dilakukan dengan perangkat lunak *Structural Analysis Program SAP2000 v14*. Struktur dimodelkan sebagai elemen portal sehingga dapat dianalisis secara nonlinier. Perilaku inelastis dari balok perangkai baja dimodelkan sebagai *hinge* dengan data masukan kurva generalisasi hubungan gaya-lendutan dan momen-rotasi serta parameter kriteria kinerja yang disarankan dalam dokumen FEMA 356.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan penelitian ini dibagi menjadi lima bab, yaitu

### 1. BAB 1: PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang penelitian, deskripsi masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.

### 2. BAB 2: TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan teori dasar yang digunakan dalam penelitian ini yaitu perilaku sistem dinding geser berangkai hibrid, desain balok perangkai baja dan analisis statik nonlinier.

3. **BAB 3: METODOLOGI PENELITIAN**

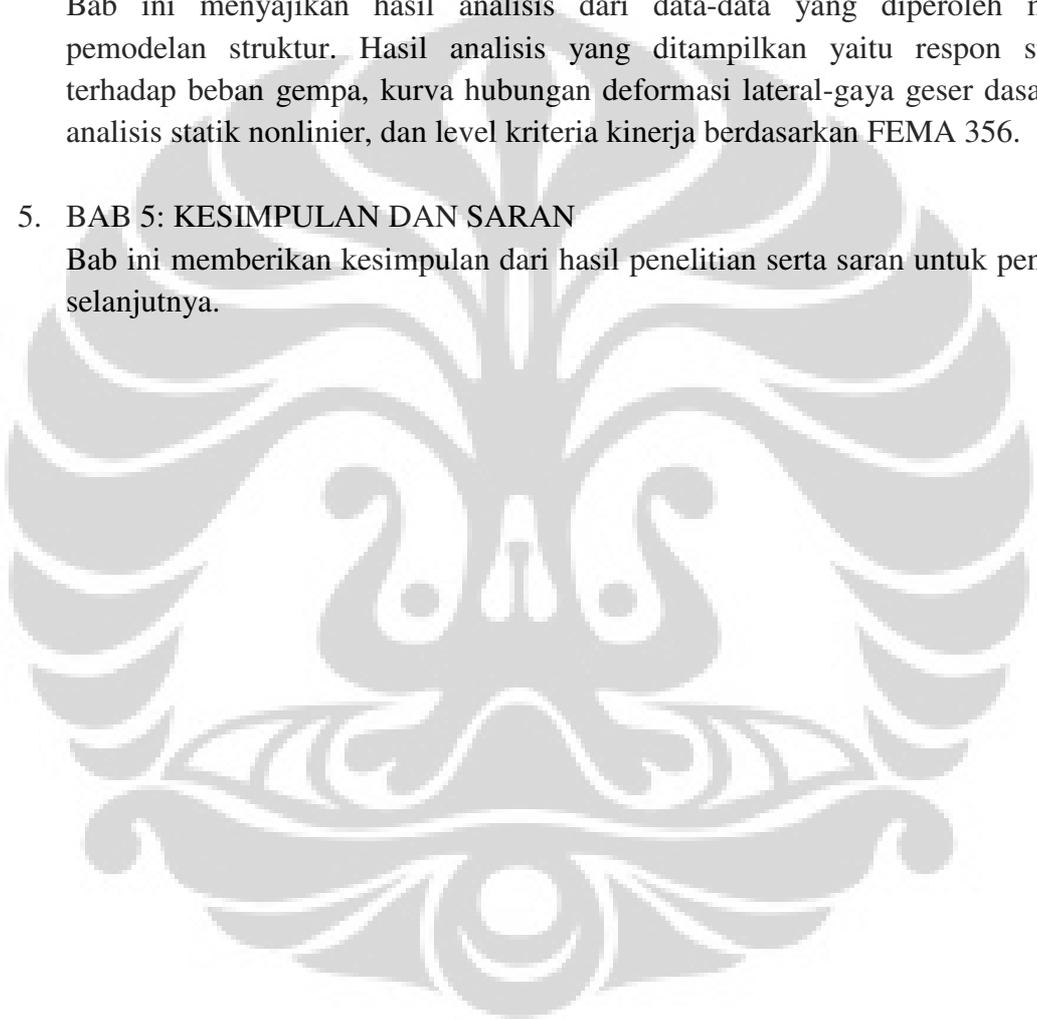
Bab ini menguraikan rangkaian kegiatan dan prosedur penelitian yang dilakukan, mulai dari perancangan struktur dinding geser berangkai hibrid, modelisasi struktur, analisis struktur statik nonlinier, simulasi parameter, analisis dan pengolahan hasil hingga sintesis kesimpulan.

4. **BAB 4: ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menyajikan hasil analisis dari data-data yang diperoleh melalui pemodelan struktur. Hasil analisis yang ditampilkan yaitu respon struktur terhadap beban gempa, kurva hubungan deformasi lateral-gaya geser dasar hasil analisis statik nonlinier, dan level kriteria kinerja berdasarkan FEMA 356.

5. **BAB 5: KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini memberikan kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk penelitian selanjutnya.



## BAB 2

### STUDI PUSTAKA

#### 2.1 Definisi Dinding Geser Berangkai

Dinding geser berangkai adalah subsistem struktur penahan beban lateral yang terdiri dari dua buah atau lebih dinding geser yang dirangkai bersama oleh balok perangkai untuk menyediakan kekuatan dan kekakuan lateral yang lebih besar dibandingkan dinding geser secara individual.

#### 2.2 Perilaku Dinding Geser Berangkai Terhadap Beban Lateral

Gambar 1 menunjukkan sistem dinding geser berangkai yang berdeformasi akibat beban lateral atau beban gempa. Ketika dinding berdeformasi, kedua ujung balok perangkai mengalami rotasi dan lendutan pada arah vertikal. Sebagai respon atas pembebanan tersebut, timbul momen dan gaya geser pada masing-masing ujung balok perangkai. Akumulasi dari gaya geser pada setiap balok menghasilkan gaya aksial pada kedua dinding, gaya aksial tarik (T) dan tekan (C). Interaksi kedua gaya aksial tersebut menimbulkan efek momen kopel pada struktur. Dengan demikian, momen guling akibat beban lateral akan ditahan oleh reaksi momen pada masing-masing dasar dinding geser dan efek momen kopel, dinyatakan dalam

$$M_{OT} = \sum m_i + L_{wall} \sum V_{beam}$$

dimana

$M_{OT}$  = momen guling akibat beban lateral

$m_i$  = reaksi momen pada dasar dinding geser  $i$

$L_{wall}$  = jarak antara kedua sumbu pusat dinding geser

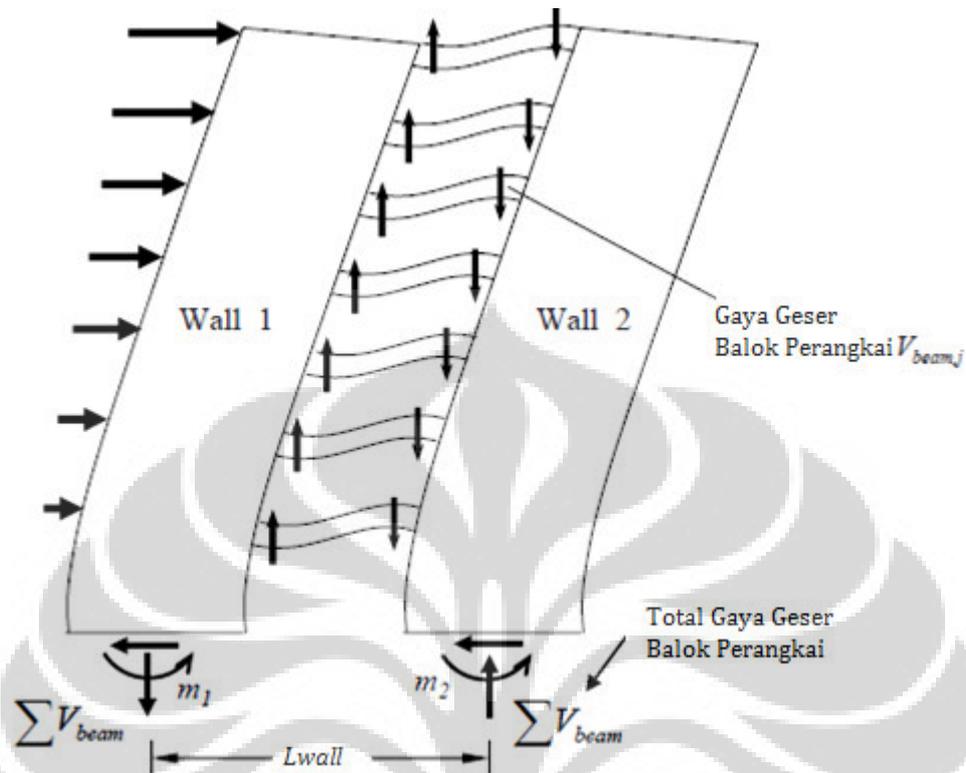
$V_{beam}$  = gaya geser pada ujung balok perangkai

Proporsi dari kontribusi gaya aksial yang menahan momen guling yang dinyatakan dalam rasio kopel,  $CR$  dinyatakan sebagai

$$CR = \frac{L_{wall} \sum V_{beam}}{M_{OT}}$$

Bila nilai  $CR = 0$ , masing-masing dinding akan berperilaku secara individual seperti dinding geser biasa tanpa ada efek momen kopel. Bila nilai  $CR = 50\%$ , momen kopel akan menahan setengah dari besarnya moment guling yang bekerja dan setengah lainnya ditahan oleh reaksi

perletakkan pada masing-masing dinding ( $m_1$  dan  $m_2$ ). Bila nilai CR = 100%, secara teori kedua dinding geser akan berperilaku sebagai dinding geser tunggal.



Gambar 2.1. Perilaku Dinding Geser Berangkai terhadap Beban Lateral

Pemilihan rasio kopel pada sistem struktur dinding geser berangkai akan mempengaruhi kinerja struktur saat menerima beban lateral (El-Tawil et al. 2002a; El-Tawil dan Kuenzli, 2002b; dan Harries et al. 2000). Nilai CR yang sangat rendah tidak memberikan keuntungan karena reduksi momen guling yang bekerja pada struktur dan simpangan lateral yang terjadi tidak signifikan. Sedangkan nilai CR yang sangat besar akan berakibat pada besarnya gaya geser pada masing-masing balok kopel dan gaya aksial tarik dan tekan yang diterima oleh dinding kopel. Efek dari kombinasi keduanya sangat berbahaya bagi struktur sehingga dihindari.

Rekomendasi nilai parameter rasio kopel diberikan oleh Paulay dan Priestley yaitu antara 33-66% (Paulay dan Priestley, 1992). Berdasarkan penelitian terhadap struktur dinding geser berangkai dihubungkan oleh balok perangkai tipikal pada bangunan 12 lantai dengan analisis statik nonlinier (*pushover analysis*), El-Tawil et al (2002b) merekomendasikan nilai rasio kopel untuk desain yang efektif yaitu sebesar 30-45%.

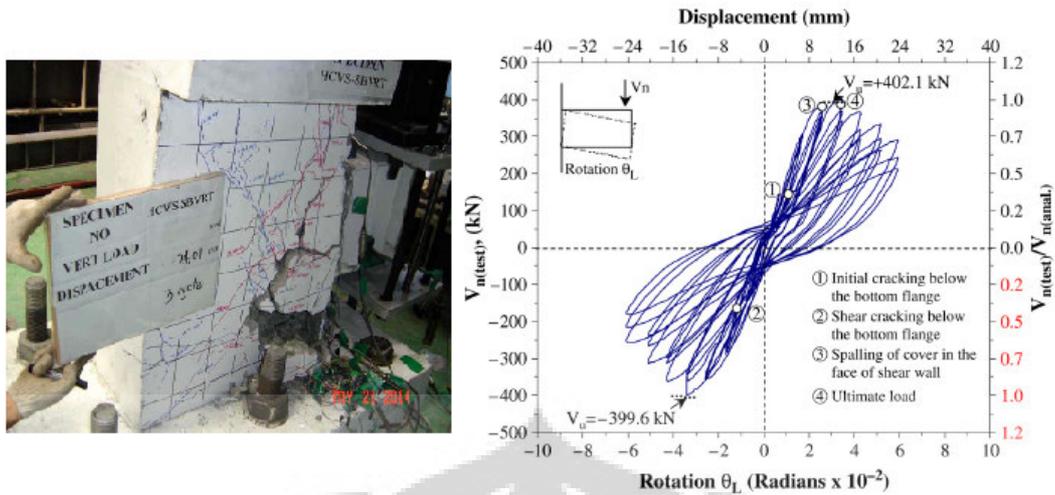
Dengan merangkai dinding geser dengan balok perangkai, struktur akan mendistribusikan gaya dengan merata di seluruh dinding dibandingkan dengan sistem dinding kantiliever tunggal yang menkonsentrasikan gaya pada daerah sendi plastis di bagian dasar dinding. Dengan adanya gaya aksial yang timbul dari akumulasi gaya geser yang ditransfer oleh balok perangkai kepada dinding, akan diperoleh setidaknya dua keuntungan. Pertama, momen yang ditanggung oleh masing-masing dinding geser berkurang karena sebagian ditahan oleh aksi momen kopel sehingga akan menghasilkan struktur yang lebih efisien. Kedua, balok perangkai akan mendisipasi energi ketika struktur menderita beban lateral dan berdeformasi secara inelastis untuk menghasilkan struktur yang daktail.

Meskipun demikian, untuk mendesain balok perangkai beton bertulang yang mampu memenuhi kebutuhan deformasi dan gaya geser yang besar, diperlukan detail penulangan yang khusus dengan tulangan diagonal, pengekangan oleh tulangan transversal dan pengankuran pada dinding. Balok perangkai beton bertulang kerap didesain sebagai balok tinggi untuk memenuhi batas kapasitas geser yang disyaratkan oleh standard. Dengan kesulitan konstruksi tulangan yang kompleks di lapangan dan biaya ekstra, balok perangkai baja digunakan sebagai alternatif substitusi menjadi sistem dinding geser berangkai hibrid.

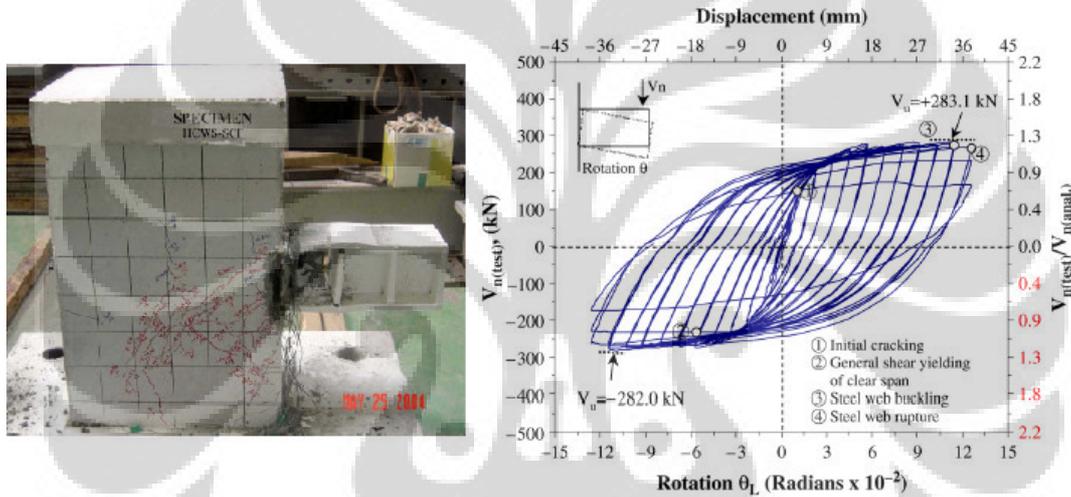
### **2.3 Dinding Geser Berangkai Hibrid**

Struktur dinding geser yang dirangkai dengan balok perangkai baja atau sistem dinding geser berangkai hibrid telah diteliti secara analisis dan eksperimen mampu memberikan kinerja yang baik sebagai sistem struktur yang dibangun di daerah rawan gempa (Harries et al. 2000; El-Tawil et al 2002a; El-Tawil dan Kuenzli, 2002b; Park dan Yun, 2005, 2006). Balok perangkai baja yang didesain dengan perilaku mengalami leleh akibat gaya geser, analog dengan *link* pada rangka baja bresing eksentris, mampu berperilaku daktail dan menghasilkan kurva histeresis yang stabil dibandingkan dengan pola keruntuhan pada sambungan atau akibat lentur, seperti pada Gambar 2.2 (Park dan Yun, 2005, 2006). Dengan kurva histeresis seperti pada Gambar 2.2b, balok perangkai baja akan membentuk sendi plastis dan mendisipasi energi ketika terjadi gempa.

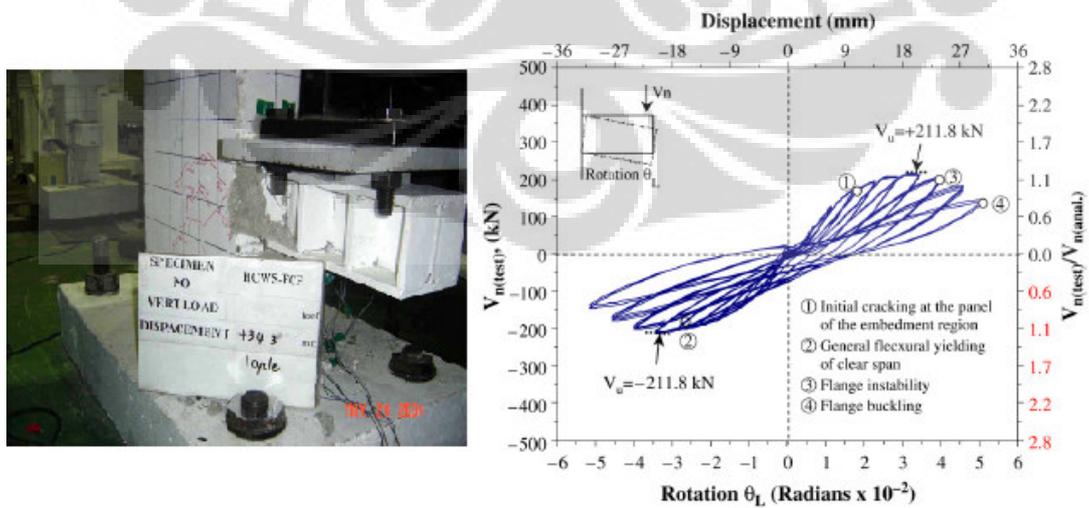
Analisis perilaku struktur dinding berangkai hibrid terhadap beban gempa mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh El-Tawil et al (2002a), El-Tawil dan Kuenzli (2002b) dan Hasan dan El-Tawil (2004). Analisis statik nonlinier (*pushover analysis*) dan analisis dinamik riwayat waktu dilakukan terhadap suatu struktur bangunan 12 lantai dengan tiga buah dinding geser yang dirangkai oleh balok perangkai baja dengan denah ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pemodelan dilakukan dengan Metode Elemen Hingga dengan memasukkan parameter inelastis dari material, retak pada beton, gap antara sambungan balok baja dengan dinding dan nonlinier geometri. Untuk mengevaluasi perilaku struktur, model disimulasi dengan variasi rasio kopel seperti pada Tabel 2.1 dan level kinerja terhadap gempa rencana dengan 10% dan 2% probabilitas terlampaui dalam periode 50 tahun umur rencana.



(a) Model Pola Keruntuhan pada Sambungan (SBVRT)



(b) Model Pola Keruntuhan Akibat Geser (SCF)

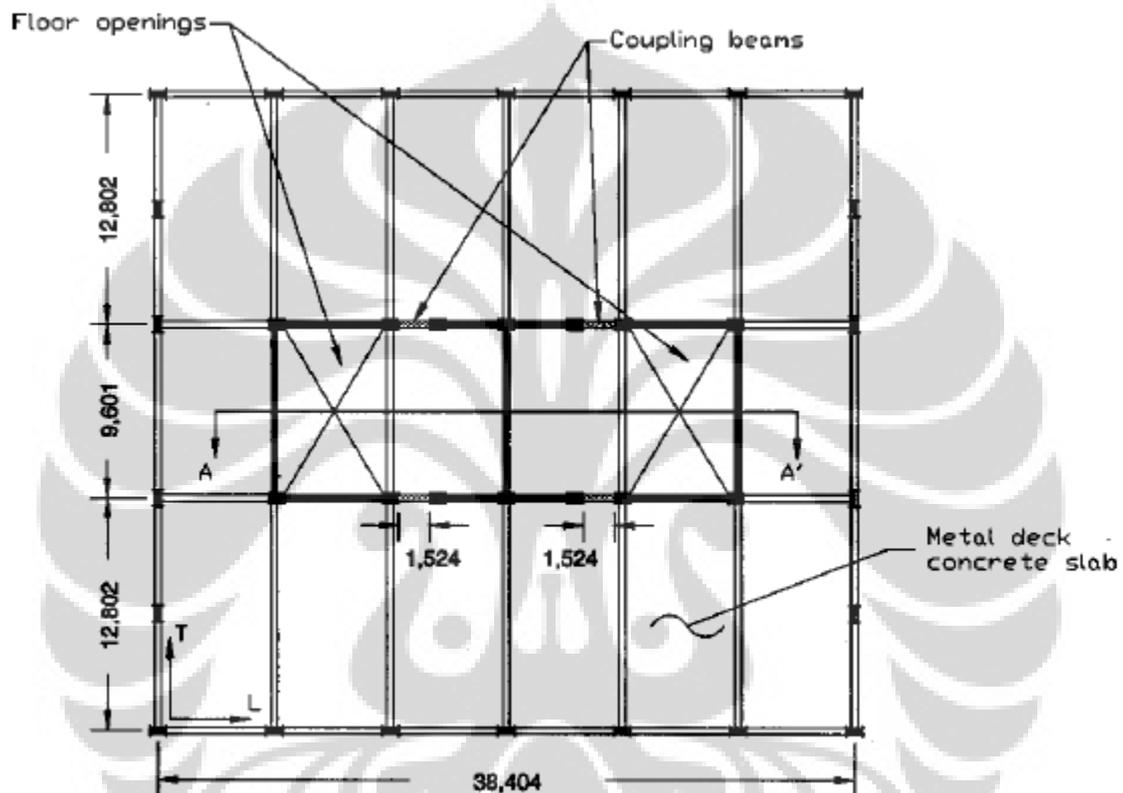


(c) Model Pola Keruntuhan Akibat Lentur (FCF)

Gambar 2.2 Kurva Histeresis Hubungan Beban-Putaran Sudut (Park dan Yun, 2005)

Gambar 2.4 menunjukkan perubahan target lendutan sebagai titik kontrol level kinerja pada *Life Safety* (10/50) dan *Collapse Prevention* (2/50) sebagai fungsi dari rasio kopel. Dengan meningkatnya rasio kopel, target lendutan akan berkurang karena rasio kopel yang tinggi akan menghasilkan struktur yang lebih kaku.

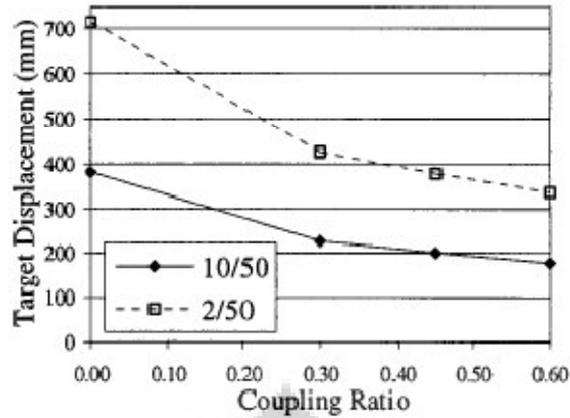
Rotasi yang terjadi pada balok perangkai untuk lantai ganjil dengan variasi rasio kopel ditunjukkan pada Gambar 2.5. untuk rasio kopel  $CR = 30\%$ , rotasi maksimum terletak di lantai teratas. Namun, dengan meningkatnya rasio kopel, lokasi terjadinya rotasi maksimum bergeser ke bawah.



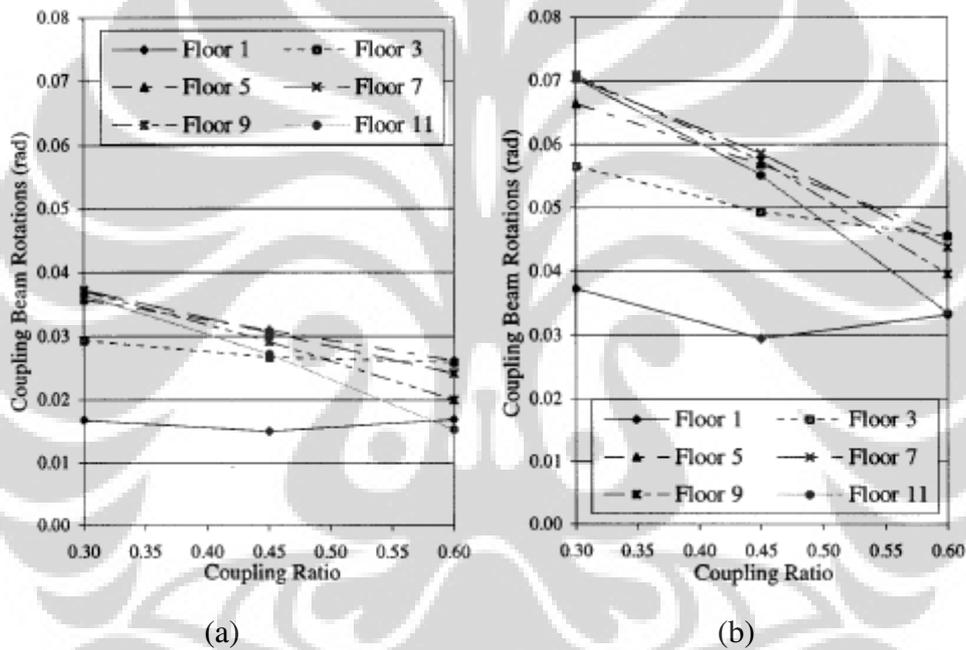
Gambar 2.3 Denah Model Dinding Berangkai Hibrid (El-Tawil et al 2002a)

Tabel 2.1 Detail Balok Perangkai Hibrid (El-Tawil et al 2002a)

Model	CR	Profil			
		$d$ (mm)	$b_f$ (mm)	$t_f$ (mm)	$t_w$ (mm)
HCW-12-U	0	-	-	-	-
HCW-12-30	30%	203	114	25,4	3,2
HCW-12-45	45%	305	152	25,4	6,4
HCW-12-60	60%	457	171	28,6	7,9

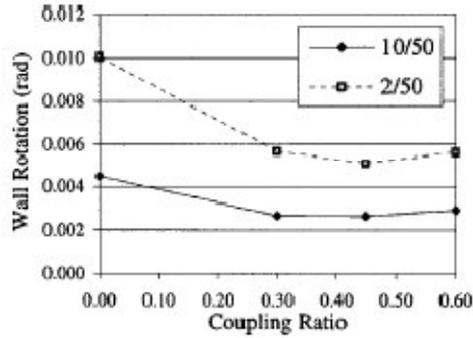


Gambar 2.4 Target Lendutan



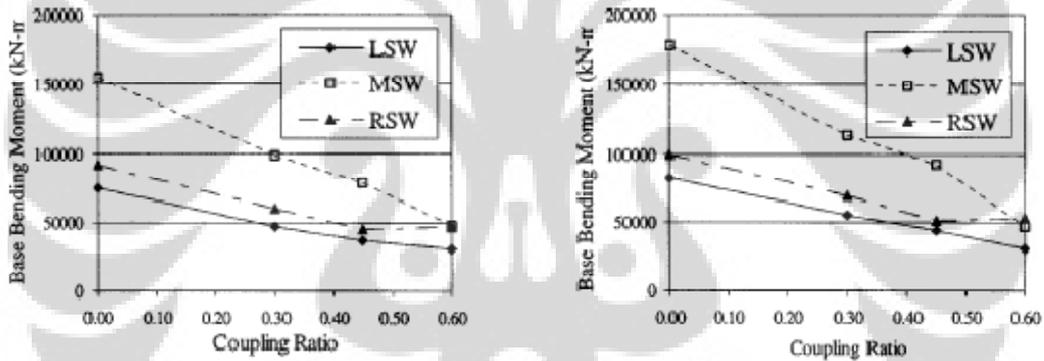
Gambar 2.5. Rotasi pada Balok Perangkai pada Variasi Rasio Kopel Level Kinerja  
(a) *Life Safety* ; (b) *Collapse Prevention*

Rotasi yang terjadi pada dasar dinding geser akibat beban gempa sebagai fungsi dari rasio kopel ditunjukkan pada Gambar 2.6, diambil dari dinding tengah sebagai representatif dari ketiga dinding. Dengan mendesain sebagai dinding berangkai, terdapat keuntungan yang signifikan dalam mereduksi rotasi yang terjadi pada setiap dinding.

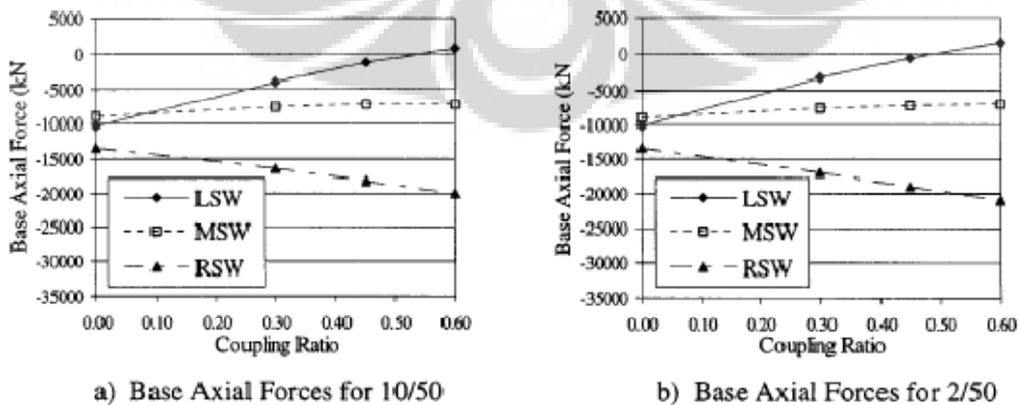


Gambar 2.6 Rotasi pada Dasar Dinding Geser

Perubahan besarnya reaksi perletakan momen pada dasar dinding sebagai fungsi rasio kopel ditunjukkan pada Gambar 2.7. Karena aksi momen kopel sebelumnya telah menahan sebagian dari momen guling, besarnya momen yang ditahan oleh masing-masing dinding turun dengan signifikan. Namun, untuk memberikan aksi momen kopel yang besar, dinding harus menerima gaya aksial yang lebih besar pada perletakan sebagai konsekuensinya.



Gambar 2.7 Reaksi Perletakan Momen pada Dasar Dinding Geser

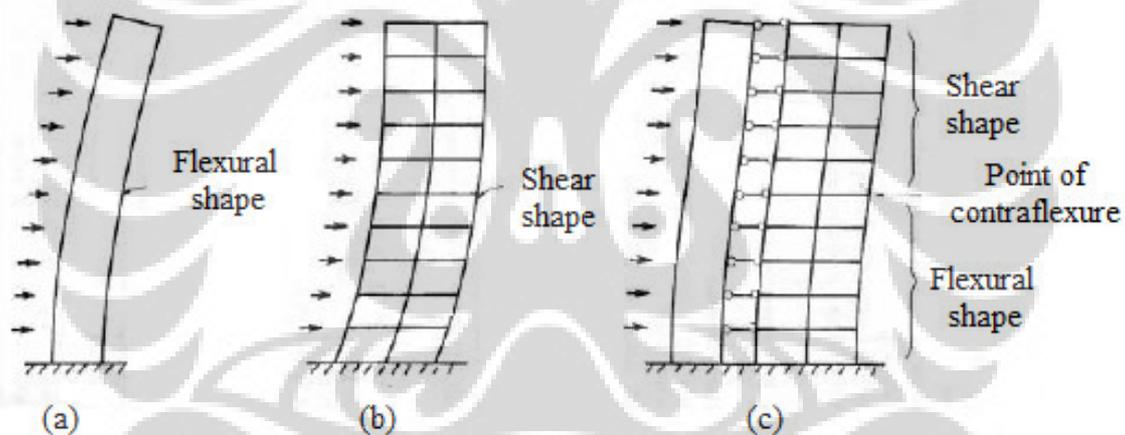


Gambar 2.8 Gaya Aksial pada Dinding Geser

## 2.4 Sistem Ganda Interaksi Dinding Geser dan Rangka Pemikul Momen

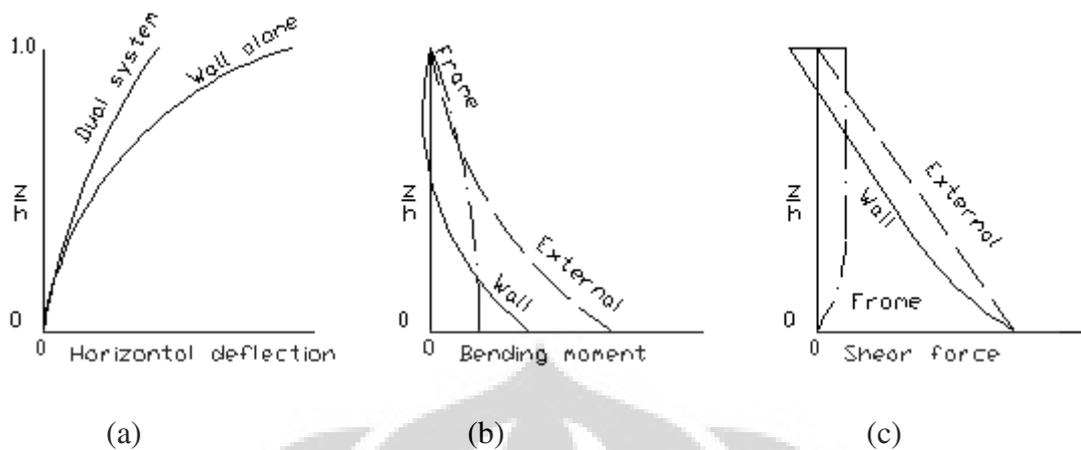
Sistem struktur dimana ketahanan terhadap beban lateral diberikan oleh kombinasi interaksi antara dinding geser dan rangka pemikul momen disebut sistem ganda (*dual system*). Keuntungan yang diperoleh dari sistem ganda adalah kontrol yang lebih baik untuk simpangan antar tingkat (*drift*) dimana nilainya tereduksi secara signifikan dibandingkan hanya didesain sebagai sistem tunggal dengan hanya dinding geser sebagai elemen penahan beban lateral. Momen yang diterima oleh dinding akan berkurang dan pola distribusi gaya geser tingkat yang ditanggung rangka pemikul momen uniform sehingga relatif lebih ekonomis (Smith dan Coull, 1991).

Untuk memahami interaksi antara dinding geser dan rangka pemikul momen pada sistem ganda, Gambar 2.9. mengilustrasikan bentuk deformasi dari dinding geser dan rangka pemikul momen yang menerima beban lateral. Dinding berdeformasi dalam pola lentur (*flexural mode*) dengan kemiringan (*slope*) maksimum di lantai teratas sementara rangka pemikul momen berdeformasi dengan pola geser (*shear mode*) dengan kemiringan maksimum di lantai dasar. Ketika keduanya dihubungkan, pola deformasi yang terjadi adalah gabungan dari keduanya, yaitu pola lentur di bagian dasar dan pola geser pada lantai atas, ditunjukkan pada Gambar 2.9.c.



Gambar 2.9. Deformasi Struktur Terhadap Beban Lateral Terbagi Rata (a) Dinding geser; (b) Rangka pemikul momen; (c) Sistem ganda

Ilustrasi bagaimana pengaruh kinerja sistem ganda dalam menahan beban lateral digambarkan oleh kurva untuk deformasi, momen dan gaya geser pada Gambar 2.10. Pada Gambar 2.10a. dan 2.10b. memperlihatkan bagaimana sistem ganda mereduksi dengan signifikan deformasi dan momen dibandingkan dengan sistem tunggal. Gambar 2.10c. menunjukkan distribusi gaya geser tingkat pada rangka pemikul momen uniform di seluruh tingkat kecuali tereduksi di bagian dasar. Pada lantai teratas dimana gaya geser akibat beban luar bernilai nol, rangka pemikul momen mengalami gaya geser positif sementara dinding menanggung gaya geser negatif dalam besar yang sama.



Gambar 2.10 Perbandingan Respon Sistem Struktur Terhadap Beban Lateral (a) Deformasi Lateral; (b) Diagram Momen; (c) Diagram Gaya Geser Tingkat

Peraturan gempa Indonesia mensyaratkan bahwa dinding geser dan rangka pemikul momen dapat didesain sebagai sistem ganda jika memenuhi kondisi berikut (SNI 03-1726-2002, 2002)

1. Seluruh beban gravitasi dipikul oleh rangka pemikul momen
2. Beban lateral ditahan oleh kombinasi dinding geser dan rangka pemikul momen. Rangka pemikul momen harus didesain terpisah menanggung minimal 25% dari gaya geser rencana.
3. Kedua sistem didesain menahan beban lateral secara bersama-sama dengan memperhatikan proporsi terhadap kekakuan relatif masing-masing dengan memperhatikan interaksi sistem ganda di seluruh lantai.

## 2.5 Desain Balok Perangkai Baja

Prinsip desain untuk balok perangkai baja bisa menggunakan desain link pada sistem rangka bresing eksentris yang terdapat pada AISC Seismic Provision for Structural Steel Building. Respon inelastis sangat dipengaruhi oleh panjang balok perangkai baja yang dinyatakan sebagai rasio momen plastis dengan kuat geser plastis,  $\frac{M_p}{V_p}$  dari penampang yang diklasifikasikan sebagai berikut

1. Balok meleleh akibat geser untuk  $L \leq 1,6 \frac{M_p}{V_p}$
2. Balok meleleh akibat kombinasi geser dan lentur untuk  $1,6 \frac{M_p}{V_p} < L < 2,6 \frac{M_p}{V_p}$
3. Balok meleleh akibat lentur untuk  $L \geq 2,6 \frac{M_p}{V_p}$

Deformasi inelastis yang terjadi pada pertemuan balok perangkai baja dan dinding geser dinyatakan sebagai putaran sudut  $\gamma_p$  dengan mekanisme keruntuhan yang digambarkan pada Gambar 2.11. Selain pada balok, perilaku inelastis diharapkan juga terjadi dengan terbentuknya sendi plastis di dasar dinding geser. Sudut simpangan antar tingkat pada kondisi inelastis  $\theta_p$ , dengan nilai  $C_d\theta_e$ , dimana  $\theta_e$  adalah sudut simpangan antar tingkat pada kondisi elastis dihitung berdasarkan beban lateral pada peraturan gempa.

$$\gamma_p = \frac{\theta_p L_{wall}}{L}$$

dengan  $\theta_p = C_d\theta_e$

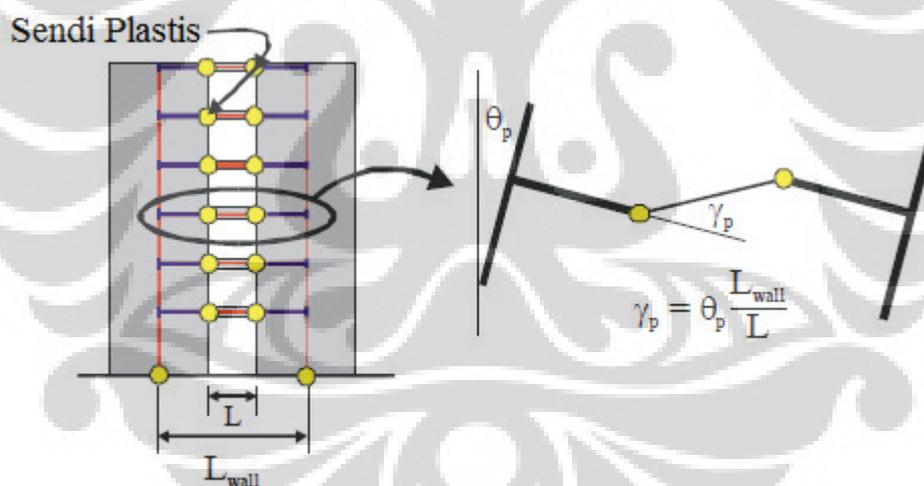
dimana

$\gamma_p$  = putaran sudut pada balok perangkai baja

$\theta_p$  = sudut simpangan antar tingkat pada kondisi inelastis

$\theta_e$  = sudut simpangan antar tingkat pada kondisi elastis

$C_d$  = faktor amplifikasi simpangan lateral akibat beban gempa



Gambar 2.11. Putaran Sudut pada Balok Perangkai Hibrid

Kapasitas deformasi inelastis dari putaran sudut pada balok perangkai dibatasi sesuai perilaku keruntuhannya dimana leleh akibat geser diijinkan berdeformasi lebih besar dibandingkan leleh akibat lentur. Besarnya putaran sudut  $\gamma_p$  dibatasi tidak boleh melebihi

1. 0,08 radian untuk  $L \leq 1,6 \frac{M_p}{V_p}$
2. 0,02 radian untuk  $L \geq 2,6 \frac{M_p}{V_p}$
3. Interpolasi linier antara nilai 0,02 dan 0,08 radian untuk  $1,6 \frac{M_p}{V_p} < L \leq 2,6 \frac{M_p}{V_p}$

Berdasarkan penelitian, balok perangkai yang didesain untuk meleleh akibat geser mampu mendisipasi energi gempa yang masuk ke struktur lebih besar (Harries et al. 2000; Park dan Yun, 2006). Desain balok perangkai harus memastikan bahwa pelat sayap (*flange*) dari profil baja tetap pada kondisi elastis ketika pelat badan (*web*) mengalami leleh akibat geser dan menggunakan profil kompak (*compact section*) untuk mencegah terjadinya tekuk lokal (*local buckling*).

### 2.5.1 Kuat Geser Nominal

Untuk mendesain agar mampu menahan gaya geser terfaktor,  $V_u$  penampang harus memiliki kuat geser nominal,  $V_n$  yang memenuhi persamaan berikut

$$V_u \leq \phi_v V_n$$

$$V_u \leq \phi_v \left\{ \min \left[ 0,6F_y A_w; \frac{2M_p}{L} \right] \right\}$$

dengan

$$A_w = (h - 2t_f)t_w$$

$$M_p = F_y Z$$

dimana

$\phi_v$  = faktor reduksi sebesar 0,9 untuk pelat badan (*web*) yang memikul geser

$F_y$  = kuat leleh profil balok perangkai baja

$h$  = tinggi balok perangkai baja

$t_f$  = tebal pelat sayap (*flange*) profil balok perangkai baja

$t_w$  = tebal pelat badan (*web*) profil balok perangkai baja

$Z$  = modulus penampang plastis

$L$  = bentang balok perangkai baja

Penampang yang digunakan harus dipastikan terhindar dari tekuk lokal (*local buckling*) pada pelat sayap (*flange*) atau pelat badan (*web*) dengan memenuhi ketentuan berikut

$$\frac{b_f}{t_f} \leq \frac{170}{\sqrt{F_y}} \text{ untuk pelat sayap}$$

$$\frac{h}{t_w} \leq \frac{1680}{\sqrt{F_y}} \text{ untuk pelat badan}$$

dimana  $b_f$  dan  $t_f$  adalah lebar dan tebal dari pelat sayap balok perangkai baja dan  $h$  dan  $t_w$  adalah tinggi dan tebal pelat badan balok perangkai.

Pengaruh gaya aksial pada desain balok perangkai dapat diabaikan bila kuat aksial yang diperlukan,  $P_u$  tidak melebihi 15% dari kuat leleh nominal  $P_y$ . Sedangkan, apabila gaya aksial  $P_u$  melebihi 15% dari kuat leleh nominal  $P_y$ , terdapat ketentuan tambahan yaitu

1. Kuat geser rencana ditentukan berdasarkan

$$\phi_v V_n = \min \left\{ \phi_v V_{pa}; \frac{2\phi_v M_{pa}}{L} \right\}$$

dimana

$$V_{pa} = 0,6 F_y A_w \sqrt{1 - \left(\frac{P_u}{P_y}\right)^2}$$

$$M_{pa} = 1,18 F_y Z \left(1 - \frac{P_u}{P_y}\right)$$

2. Bentang balok perangkai baja dibatasi tidak boleh melebihi

$$L \leq \begin{cases} 1,6 \frac{M_p}{V_p} \left(1,15 - 0,5 \rho' \frac{A_w}{A_g}\right) & \text{untuk } \rho' \frac{A_w}{A_g} \geq 0,3 \\ 1,6 \frac{M_p}{V_p} & \text{untuk } \rho' \frac{A_w}{A_g} < 0,3 \end{cases}$$

dengan

$$\rho' = \frac{P_u}{V_u}$$

dimana

$A_w$  = luas penampang pelat badan (*web*) profil balok perangkai baja

$A_g$  = luas penampang gros profil balok perangkai baja

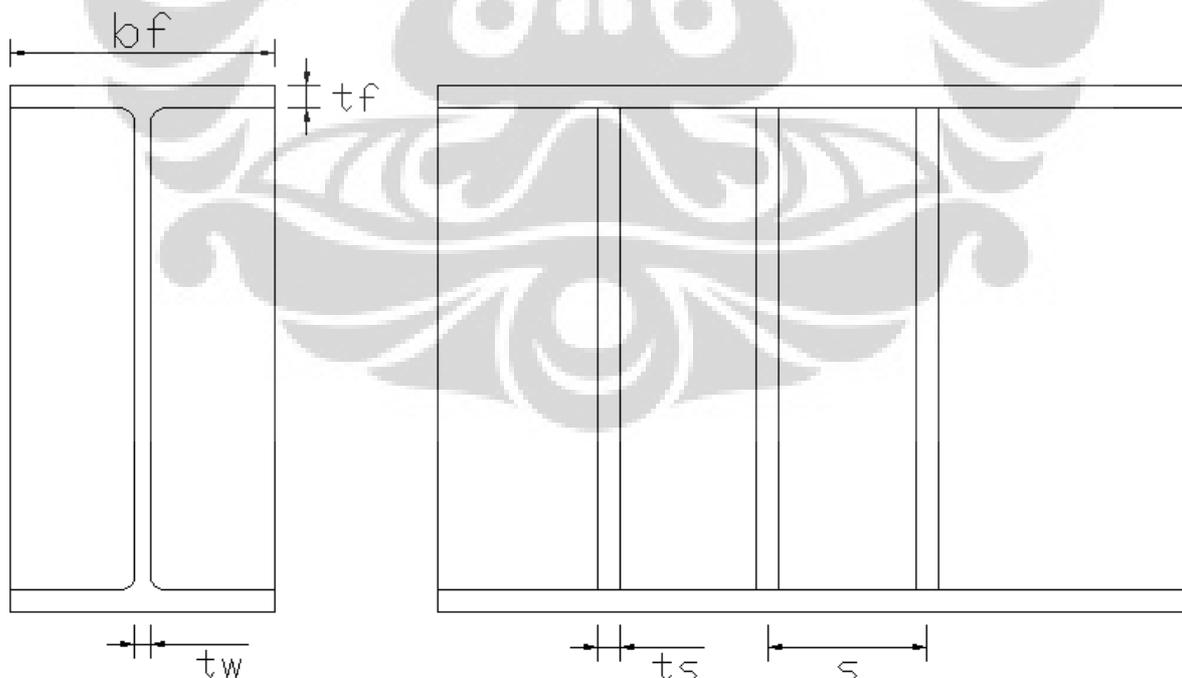
## 2.5.2 Pelat Pengaku

Perencanaan balok perangkai baja membutuhkan perhatian khusus untuk masalah detail pelat pengaku (*stiffener*) untuk memastikan dapat berperilaku stabil dan daktail saat pembebanan siklik. Pengaku setinggi pelat badan mutlak diperlukan di setiap ujung balok untuk mentransfer gaya geser dan menghindari terjadinya tekuk lokal pada pelat badan. Pengaku diperlukan di kedua sisi pelat badan untuk tinggi profil lebih besar dari 25 in (635 mm) dengan lebar total tidak kurang dari  $(b_f - 2t_w)$  dan ketebalan minimum  $t_s$  yaitu harga terbesar antara  $0,75t_w$  dan 10 mm, dengan  $b_f$  dan  $t_w$  adalah lebar pelat sayap dan tebal pelat badan profil balok perangkai baja. Sedangkan pengaku untuk tinggi profil kurang dari 25 in (635 mm) hanya diperlukan pada salah satu sisi pelat badan dengan ketebalan pelat pengaku tidak boleh kurang dari harga terbesar diantara  $t_w$  dan 10 mm, dan lebar salah satu sisi pengaku tidak boleh kurang dari  $\left(\frac{b_f}{2} - t_w\right)$ .

Jarak maksimum antar pengaku pada balok perangkai baja yang leleh akibat geser, bentang balok  $L_{wall} \leq 1,6 \frac{M_p}{V_p}$ , tergantung pada besar putaran sudutnya. Jaraknya tidak boleh melebihi  $(30t_w - d/5)$  untuk putaran sudut  $\gamma_p = 0,08 \text{ rad}$  atau  $(52t_w - d/5)$  untuk putaran sudut  $\gamma_p \leq 0,02 \text{ rad}$ . Interpolasi linier digunakan untuk putaran sudut  $0,02 \text{ rad} < \gamma_p < 0,08 \text{ rad}$ . Balok perangkai baja yang leleh akibat lentur, bentang  $L_{wall} \geq 2,6 \frac{M_p}{V_p}$ , harus direncanakan memiliki pengaku dengan jarak  $1,5b_f$  dari setiap ujung balok. Untuk bentang balok yang berperilaku kombinasi lentur dan geser,  $1,6 \frac{M_p}{V_p} < L_{wall} < 2,6 \frac{M_p}{V_p}$ , harus didesain memenuhi persyaratan kedua perilaku leleh akibat geser dan lentur

Tabel 2.2 Perbedaan Desain Kriteria Balok Perangkai Baja

Perilaku leleh	Geser	Lentur	Kombinasi Geser-Lentur
<b>Bentang <math>L</math></b>	$L \leq 1,6 \frac{M_p}{V_p}$	$L \geq 2,6 \frac{M_p}{V_p}$	$1,6 \frac{M_p}{V_p} < L \leq 2,6 \frac{M_p}{V_p}$
<b>Putaran sudut maksimum <math>\gamma_p \text{ max}</math></b>	0,08 rad	0,02 rad	Interpolasi diantara 0,02-0,08 rad
<b>Jarak pengaku <math>s</math></b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>untuk <math>\gamma_p = 0,08 \text{ rad}</math> <math>c \leq (30t_w - d/5)</math></li> <li>untuk <math>\gamma_p = 0,02 \text{ rad}</math> <math>s \leq (52t_w - d/5)</math></li> <li><math>0,02 \text{ rad} &lt; \gamma_p &lt; 0,08 \text{ rad}</math> Interpolasi linier</li> </ol>	$s \leq 1,5b_f$	Harus memenuhi persyaratan geser dan lentur



Gambar 2.12 Detail Pengaku Balok Perangkai Baja (AISC, 2005)

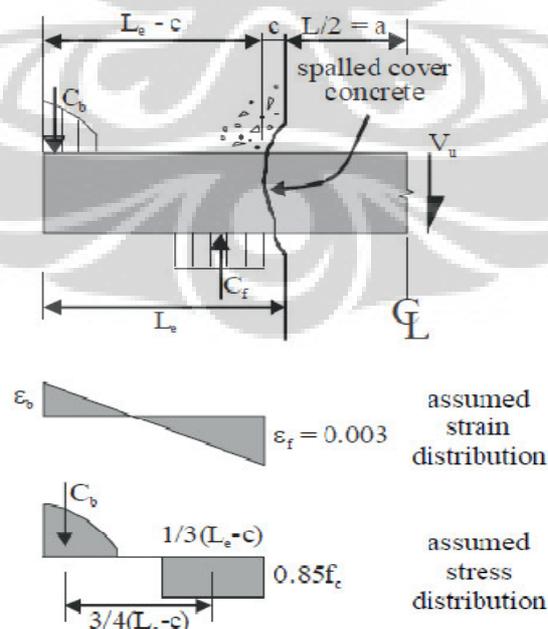
### 2.5.3 Panjang Penyaluran $L_e$

Balok baja yang digunakan sebagai elemen balok perangkai harus dimasukkan ke dalam dinding beton sejauh  $L_e$  sehingga kapasitasnya memberikan kinerja yang daktail saat mengalami beban siklik. Mattock dan Gaafar (1982) mengusulkan model matematis untuk menghitung bentang minimum panjang penyaluran (*embedment length*),  $L_e$  berdasarkan lengan momen internal antara gaya penahan  $C_b$  dan  $C_f$ , seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13. Distribusi tegangan diasumsikan sebagai fungsi parabolik untuk  $C_b$  dan terbagi merata sebesar  $0,85f_c'$  untuk  $C_f$ . Tegangan tersebut terdistribusi di sepanjang lebar sayap penampang baja,  $b_f$ . Panjang balok perangkai yang harus diteruskan masuk ke dalam dinding dapat ditentukan berdasarkan persamaan

$$V_u = 4,05\sqrt{f_c'} \left( \frac{t_{wall}}{b_f} \right)^{0,66} \beta_1 b_f L_e \left[ \frac{0,58 - 0,22\beta_1}{0,88 + a/L_e} \right]$$

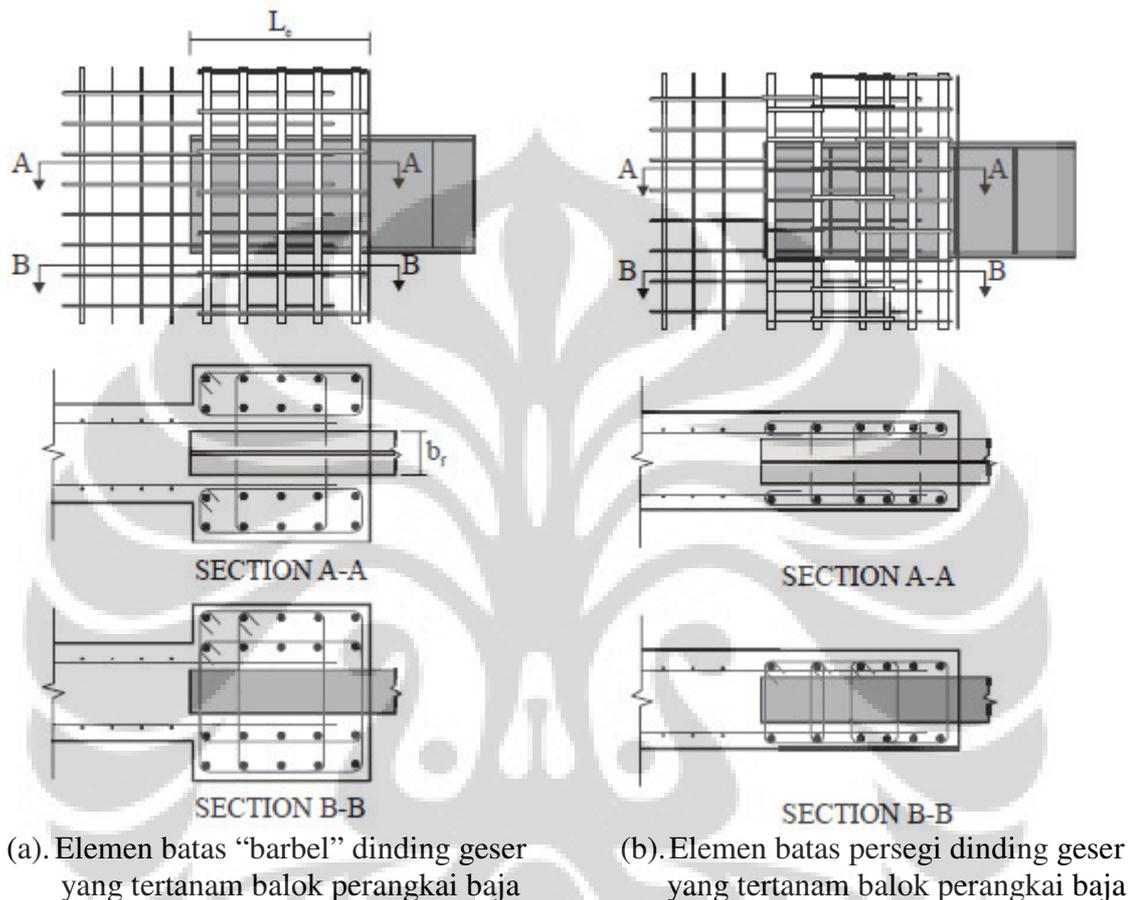
dimana

- $a$  = bentang yang dipengaruhi gaya geser, biasanya diambil sebesar  $L/2$
- $b_f$  = lebar sayap penampang balok perangkai hibrid
- $f_c'$  = kuat tekan beton, dalam MPa
- $t_{wall}$  = tebal dinding geser
- $V_u$  = kuat geser ultimit
- $\beta_1$  = rasio kuat tekan rata-rata beton dengan kuat tekan maksimum



Gambar 2.13 Kapasitas Balok Perangkai yang Tertanam dalam Dinding Geser

Detail pada elemen batas sambungan antara balok perangkai baja dengan dinding geser beton ditunjukkan pada Gambar 2.14. Elemen batas sambungan dapat berbentuk “barbel” atau tetap persegi tanpa pembesaran. Direkomendasikan untuk memasang dua pertiga dari tulangan vertikal elemen batas pada jarak hingga satu setengah kali panjang balok yang tertanam dari muka dinding geser. Kemudian, lebar dari elemen batas maksimum tidak boleh melebihi 2,5 kali lebar sayap (*flange*) penampang balok perangkai baja (Harries et al., 2000)



Gambar 2.14. Detail Sambungan Balok Perangkai Baja dengan Dinding Geser (Harries et al., 2000)

## 2.6 Modelisasi Struktur Dinding Geser Hybrid

Dalam penelitian ini elemen struktur dinding geser tidak dimodelkan sebagai elemen cangkang, melainkan dimodelkan dengan kolom ekuivalen untuk keperluan analisis nonlinier. Untuk memperoleh model yang dapat merepresentasikan perilakunya, dimensi dan kekakuan elemen kolom dibuat sama dengan dinding geser. Elemen kolom lebar diberi batasan (*constraint*) agar nodal-nodalnya berperilaku seperti dinding geser. Batasan yang digunakan dalam pemodelan dengan SAP2000 v.14 adalah *diaphragm constraint* dan *plate constraint*.

### 1. *Diaphragm Constraint*

Batasan ini menyebabkan semua sambungan *joint* yang termasuk di dalamnya akan bergerak secara bersama-sama sebagai sebuah diafragma yang kaku terhadap

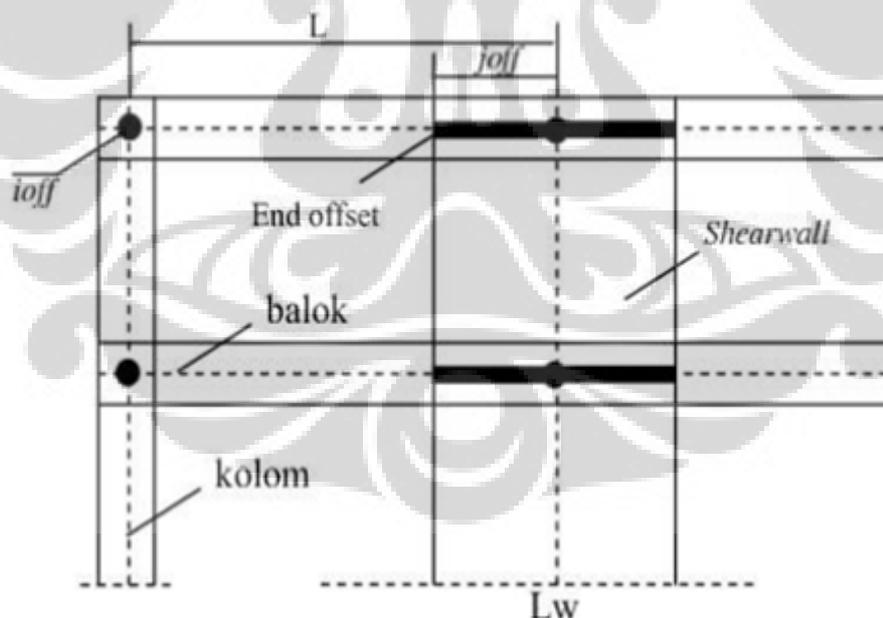
deformasi arah dalam bidangnya (*in plane*). Batasan dengan *diaphragm constraint* akan membuat pelat lantai struktur bergerak bersamaan ketika mengalami beban lateral

2. *Plate constraint*

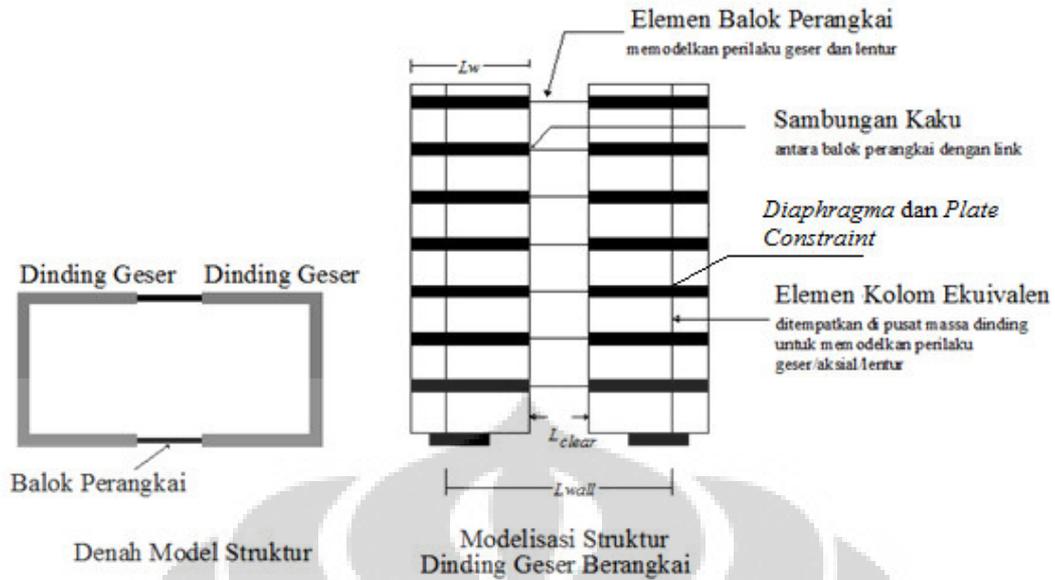
Batasan ini menyebabkan semua *joint* yang termasuk di dalamnya bergerak secara bersamaan sebagai sebuah *plate* planar yang kaku terhadap deformasi arah luar bidang (*out of plane*). Batasan ini diberikan untuk menghubungkan tipe elemen struktur seperti portal atau cangkang ke tipe elemen struktur yang bersifat solid. Dengan *Plate constraint*, rotasi pada elemen struktur dapat dikonversi menjadi sama.

Pada kenyataannya, elemen struktur seperti balok dan kolom memiliki dimensi yang saling berpotongan dan berpengaruh terhadap taraf penjepitan dan besarnya momen tumpuan di balok. Dalam modelisasi dengan perangkat lunak, biasanya diidealisasikan sebagai elemen garis yang berhubungan pada *joint*. Mengingat dimensi kolom dibuat selebar dinding geser, keadaan perpotongan untuk balok dengan dinding geser perlu diidealisasikan dengan memberikan dua *end offset* untuk setiap elemen menggunakan parameter  $i_{off}$  dan  $j_{off}$  yang terkait dengan ujung nodal  $i$  dan  $j$  dari elemen.

Pemberian *end offset* elemen balok dengan  $L$  jarak masing-masing as pada sambungan dengan elemen dinding geser senilai  $i_{off} = 0$  dan  $j_{off} =$  setengah dari panjang dinding geser ( $L_w$ ). Nilai *end offset* untuk  $j_{off}$  ini harus disertai dengan pemberian *rigid zone factor* sebesar 1.



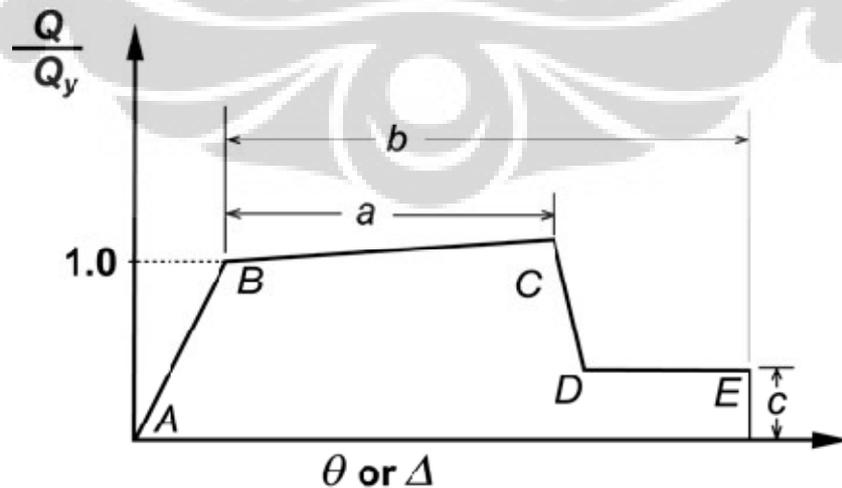
Gambar 2.15 *End offset* balok dengan dinding geser



Gambar 2.16 Modelisasi Struktur Dinding Geser Berangkai

Perilaku inelastis balok perangkai baja dimodelkan mengikuti kurva generalisasi hubungan gaya-deformasi atau momen-rotasi beserta parameter kriteria kinerja yang ditetapkan dalam dokumen FEMA 356. Pada Gambar 2.17, segmen A-B menggambarkan kondisi elastis dimana hubungan gaya dengan deformasi adalah linier, sementara segmen B-C menggambarkan kondisi plastis. Parameter  $a$  dan  $b$  pada kurva di bawah merepresentasikan deformasi yang terjadi setelah elemen mengalami leleh. Parameter  $c$  adalah kapasitas yang tersisa setelah mengalami reduksi kekuatan secara tiba-tiba dari C-D.

Untuk balok perangkai baja, parameter untuk modelisasi perilaku inelastis mengikuti parameter yang disediakan dalam FEMA 356 untuk perilaku link pada struktur baja bresing eksentris.



Gambar 2.17 Generalisasi Hubungan Gaya-Deformasi FEMA 356

Tabel 2.3 Parameter Modelisasi dan Kriteria Kinerja Balok Perangkai Baja FEMA 356

Elemen	Plastic Rotation Angle, radian		Residual strength	Kriteria Kinerja		
	a	b		IO	LS	CP
Eccentrically Brace Frame Link Beam; Steel Couple Beam <sup>1</sup>						
$l \leq \frac{1,6M_p}{V_p}$	0,15	0,17	0,8	0,005	0,11	0,14
$l \geq \frac{2,6M_p}{V_p}$	$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ Dan $\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}}$	$9\theta_y$	$11\theta_y$	0,6	$1\theta_y$	$6\theta_y$
	$\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ Dan $\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}}$	$4\theta_y$	$6\theta_y$	0,2	$0,25\theta_y$	$2\theta_y$
$\frac{1,6M_p}{V_p} < l < \frac{2,6M_p}{V_p}$	Interpolasi Linier					
<b>Keterangan:</b>						
1. Berlaku untuk link dengan tiga atau lebih pangaku badan (web stiffeners). Jika tidak ada, nilainya dibagi dengan 2						
2. $\theta_y = \frac{ZF_y l}{6EI}$						

## 2.7 Perancangan Struktur Tahan Gempa Berbasis Kinerja

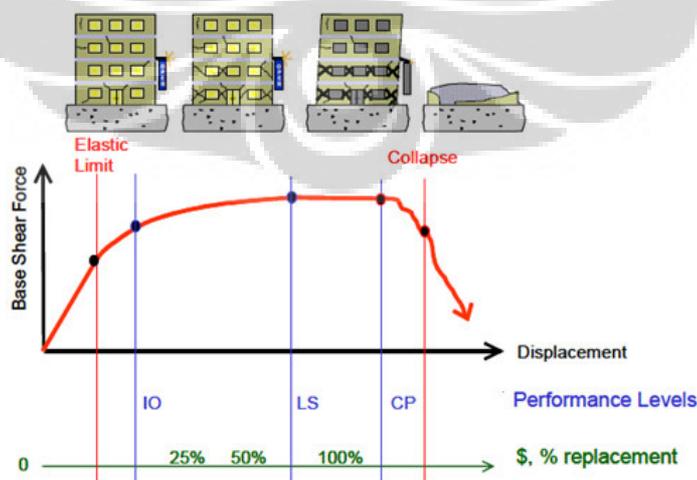
Perancangan bangunan tahan gempa bertujuan untuk mempertahankan setiap pelayanan vital dari fungsi bangunan, membatasi ketidaknyamanan penghunian dan kerusakan bangunan hingga masih dapat diperbaiki ketika terjadi gempa ringan sampai sedang dan menghindari terjadinya korban jiwa oleh runtuhnya bangunan akibat gempa kuat (SNI 03-1726-2002, 2002). Kecenderungan perancangan saat ini memanfaatkan teknik analisis nonlinier berbasis komputer untuk mengetahui respon inelastis struktur saat terjadi gempa dan mengukurnya terhadap level kinerja atau disebut perancangan tahan gempa berbasis kinerja (*performance based seismic design*).

Perancangan bangunan tahan gempa berbasis kinerja merupakan proses yang dapat digunakan untuk perancangan bangunan baru maupun perkuatan bangunan yang sudah ada dengan pemahaman terhadap aspek resiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan resiko kerugian finansial yang timbul akibat gempa (*economic loss*). FEMA 356 (2000) menetapkan level kinerja untuk perancangan struktur tahan gempa sebagai berikut.

Tabel 2.4. Level Kinerja FEMA 356

Level Kinerja	Peluang Terlampaui	Keterangan
<i>Operational</i>	50%/50 Tahun umur bangunan	Tidak ada kerusakan struktural dan non struktural yang berarti, bangunan dapat tetap berfungsi.
<i>Immediate Occupancy</i> (IO)	20%/50 Tahun umur bangunan	Tidak terjadi kerusakan struktural, komponen non struktural masih berada di tempatnya dan bangunan tetap dapat berfungsi tanpa terganggu masalah perbaikan.
<i>Life Safety</i> (LS)	10%/50 Tahun umur bangunan	Terjadi kerusakan struktural tetapi tidak terjadi keruntuhan, komponen non struktural tidak berfungsi tetapi bangunan masih dapat digunakan setelah dilakukan perbaikan.
<i>Collapse Prevention</i> (CP)	2%/50 Tahun umur bangunan	Kerusakan terjadi pada komponen struktural dan non struktural, bangunan hampir runtuh, dan kecelakaan akibat kejatuhan material bangunan sangat mungkin terjadi.

Hal penting dalam perancangan berbasis kinerja adalah penetapan sasaran kinerja bangunan terhadap gempa. Sasaran kinerja terdiri dari gempa rencana yang ditentukan (*earthquake hazard*) dan taraf kerusakan yang diijinkan atau level kinerja dari bangunan terhadap gempa tersebut. Gambar 2.18 menjelaskan level kinerja secara kualitatif yang digambarkan dalam kurva hubungan gaya-lendutan dari perilaku struktur secara global terhadap beban lateral.



Gambar 2.18. Ilustrasi Perancangan Berbasis Kinerja

## 2.8 Analisis Statik Non Linier

Analisis statik nonlinier atau analisis beban dorong statik (*pushover analysis*) adalah metode simplifikasi untuk mengevaluasi kinerja struktur dengan memberikan beban lateral sebagai representasi gaya inersia gempa hingga menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama, kemudian dengan peningkatan beban hingga mencapai kondisi di ambang keruntuhan. Analisis statik nonlinier dengan relatif cepat dan praktis memberikan estimasi besarnya gaya gempa maksimum dan kebutuhan deformasi dan mengidentifikasi daerah kritis yang memerlukan pendetilan khusus. Metode ini berdasarkan asumsi bahwa respon struktur didominasi oleh pola getar fundamental pertama dengan partisipasi massa sebesar 90%.

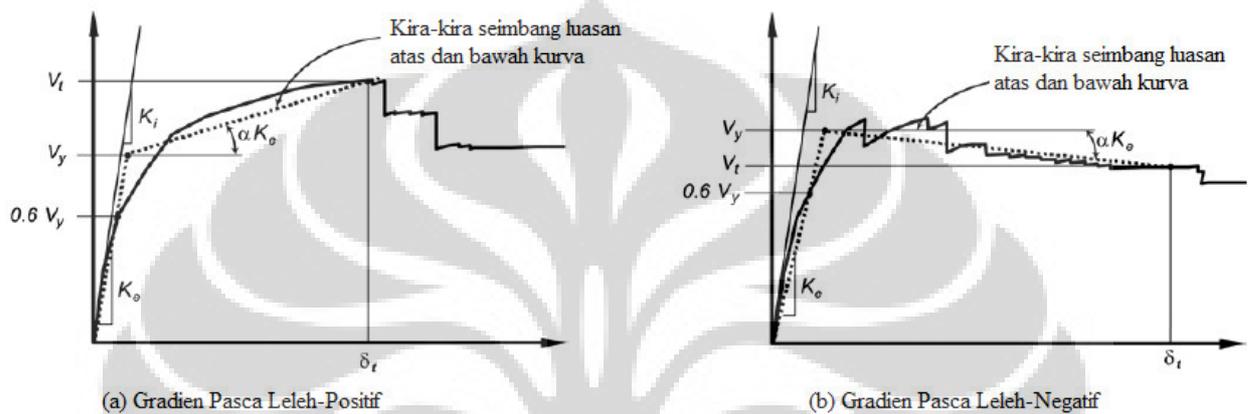
Implementasi analisis statik nonlinier FEMA 356 (2002) meliputi prosedur berikut yaitu membuat kurva beban dorong (*pushover curve*), mengestimasi target lendutan (*target displacement*) dan mengevaluasi level kinerja.

Analisis statik nonlinier yang direkomendasikan dalam dokumen FEMA 356 menghasilkan kurva beban dorong yang mengilustrasikan hubungan antara gaya geser dasar dengan lendutan lateral dari titik kontrol, biasanya pusat massa lantai teratas (atap) bangunan. Kurva ini diperoleh dengan memberikan beban gravitasi, kemudian diiringi dengan gaya lateral monotonik yang nilainya berangsur-angsur meningkat hingga mencapai titik batas level kinerja yang telah ditentukan. Batas level kinerja ini direpresentasikan dengan target lendutan yaitu lendutan maksimum yang akan dialami struktur ketika gempa rencana terjadi.

Pemberian gaya lateral dilakukan dengan variasi pola distribusi pembebanan di seluruh lantai struktur sebagai representasi respon terhadap gempa yang mengakibatkan deformasi inelastis dan perubahan karakteristik kekakuan. Minimal dua variasi pola distribusi pembebanan yang harus diberikan pada struktur dimana yang pertama diambil salah satu dari distribusi pola getar fundamental, distribusi statik ekuivalen dan distribusi SRSS. Pola distribusi kedua diambil salah satu antara distribusi merata atau distribusi adaptif.

1. Distribusi pola getar fundamental:  $s_j^* = m_j \phi_{j1}$  dimana  $s_j^*$  adalah gaya lateral,  $m_j$  adalah massa dan  $\phi_{j1}$  adalah pola getar fundamental pertama di lantai ke- $j$ .
2. Distribusi statik ekuivalen:  $s_j^* = m_j h_j^k$  dimana  $h_j$  adalah elevasi lantai ke- $j$  dari lantai dasar dan eksponen  $k = 1$  untuk struktur dengan periode getar alami fundamental  $T_1 \leq 0,5$  detik,  $k = 2$  untuk  $T_1 > 2,5$  detik dan interpolasi linier untuk nilai  $T_1$  diantaranya.
3. Distribusi SRSS (*Square Root of the Sum of Square*):  $s_j^*$  dihitung mundur dari gaya geser tingkat akibat analisis dinamik respon spektrum dengan menyertakan sejumlah pola getar untuk mencapai 90% partisipasi massa. Pola distribusi ini digunakan untuk struktur dengan periode getar fundamental pertama  $T_1 > 1$  detik.
4. Distribusi merata:  $s_j^* = m_j$  dimana pola distribusi ini berlaku jika seluruh massa lantai tipikal
5. Distribusi adaptif: pola distribusi bervariasi terhadap perubahan deformasi struktur setelah mengalami leleh.

Hubungan antara gaya geser dengan lendutan titik kontrol pada kurva beban dorong dapat diidealisasikan untuk menghitung kekakuan lateral efektif  $K_e$  dan kuat leleh efektif  $V_y$ . Hubungan ini dinyatakan dengan kurva bilinear dengan gradien awal  $K_e$  dan pasca leleh  $\alpha$ . Kurva bilinear dikembangkan secara iterasi grafis hingga mendekati keseimbangan antara luas bagian atas dan bawah kurva beban dorong sebelumnya. Kekakuan lateral efektif  $K_e$  diambil sebagai kekakuan *secant*, dihitung pada gaya geser dasar 60% dari kuat leleh efektif struktur. Grafik diteruskan dengan gradien pasca leleh  $\alpha$  melalui kurva beban dorong hingga bertemu di titik lendutan rencana. Kuat leleh efektif  $V_y$  tidak boleh melebihi gaya geser maksimum pada seluruh titik di kurva beban dorong.



Gambar 2.19 Idealisasi Kurva Gaya-Lendutan

Dengan idealisasi dari kurva beban dorong menjadi kurva bilinear, seperti pada Gambar 2.19, periode getar efektif  $T_e$  untuk arah sumbu yang ditinjau menjadi

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

dimana

$T_i$  = periode getar fundamental pada kondisi elastis (detik)

$K_i$  = kekakuan lateral pada kondisi elastis (N/m)

$K_e$  = kekakuan lateral efektif (N/m)

Target lendutan dalam analisis statik nonlinier FEMA 356 dikalkulasi dengan memodifikasi respon elastif struktur SDOF dengan empat koefisien pengali-  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  dan  $C_3$  dituliskan dalam

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left( \frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g$$

dimana

$\delta_t$  = target lendutan

$C_0$  = faktor modifikasi untuk menghubungkan respon lendutan spektra dari struktur SDOF dengan lendutan lantai teratas dari struktur MDOF

$C_1$  = faktor modifikasi untuk menghubungkan lendutan inelastis maksimum dengan respon lendutan linier elastis dimana nilainya

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{untuk } T_e \geq T_s \\ \frac{\left[1 + (R - 1) \frac{T_s}{T_e}\right]}{R} & \text{untuk } T_e < T_s \end{cases}$$

dimana  $T_s$  adalah periode transisi segmen respon spektrum pada percepatan konstan dengan segmen respon pada kecepatan konstan

$C_2$  = Faktor modifikasi untuk merepresentasikan efek dari bentuk histeresis *pinching*, degradasi kekakuan dan penurunan kekuatan struktur pada respon lendutan maksimum

$C_3$  = Faktor modifikasi untuk merepresentasikan kenaikan lendutan akibat efek P-delta untuk struktur,

$$C_3 = \begin{cases} 1 & \text{untuk } \alpha - \text{positif} \\ 1 + \frac{|\alpha|(R - 1)^{\frac{3}{2}}}{T_e} & \text{untuk } \alpha - \text{negatif} \end{cases}$$

$S_a$  = percepatan respon spektrum pada periode getar efektif  $T_e$  dan rasio redaman struktur

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian berikut menguraikan rangkain kegiatan dan prosedur yang digunakan untuk menganalisis perilaku dan kinerja dari struktur dinding geser berangkai hibrid dengan menggunakan balok perangkai baja.

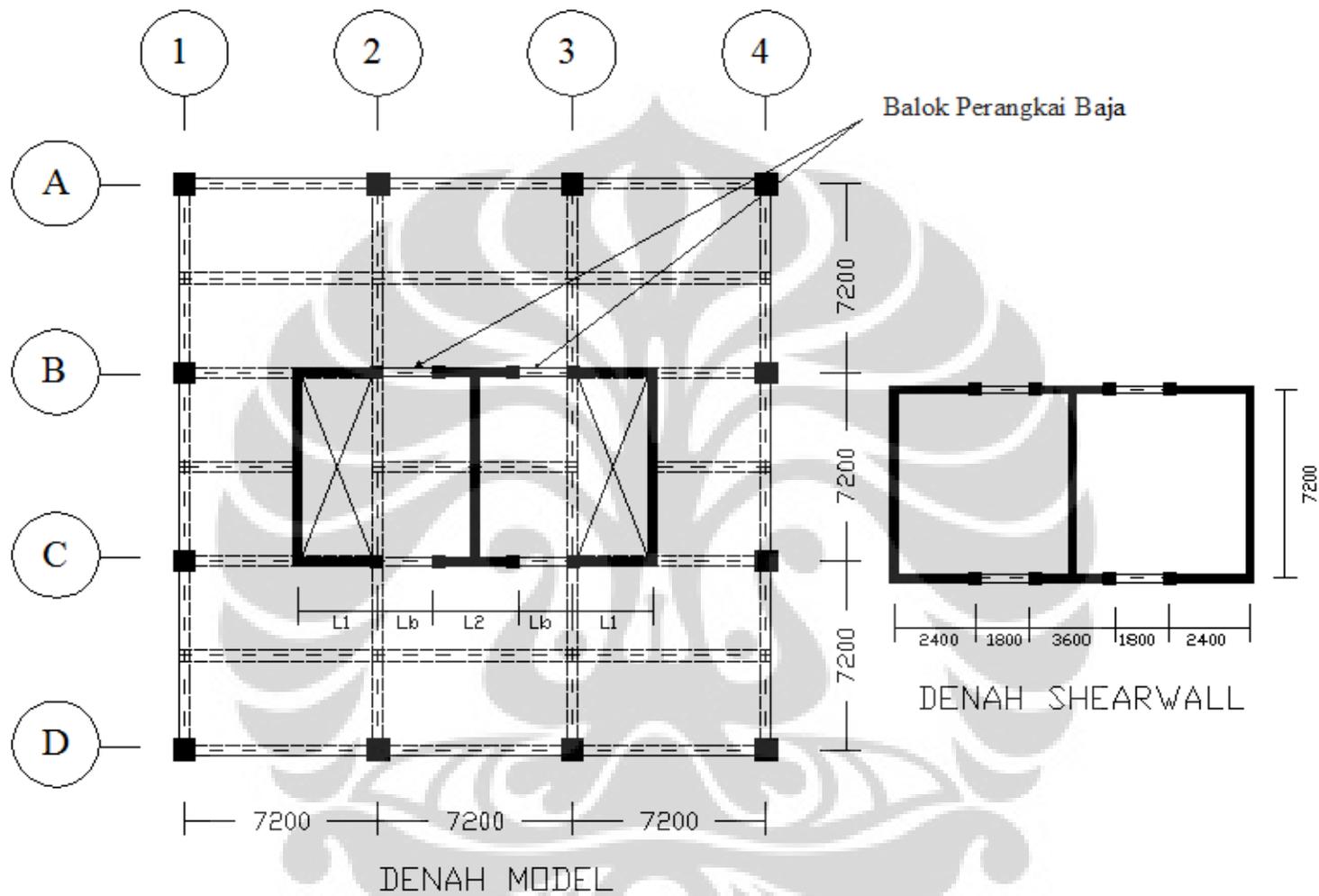
Bangunan yang digunakan sebagai pemodelan struktur dalam penelitian ini adalah bangunan perkantoran 10 lantai dengan struktur beton bertulang. Tinggi lantai dasar yaitu 3,7 meter dan tinggi tipikal lantai di atasnya yaitu 3,2 meter. Denah yang digunakan adalah denah simetris tipikal di setiap lantai dengan dimensi 21,6m x 21,6m.

Sistem struktur penahan beban lateral yang digunakan sebagai pemodelan adalah sistem dinding geser beton berangkai sebagai sistem tunggal. Faktor reduksi gempa yang diijinkan untuk dinding geser berangkai yang didesain sebagai sistem tunggal sebesar  $R = 6,5$  (SNI 03-1726-2002, 2002).

Material yang digunakan dalam pemodelan diberikan dalam Tabel 3.1 berikut. Untuk struktur beton bertulang, mutu beton direncanakan memiliki kuat tekan  $f'_c = 25$  MPa (K-300) untuk elemen balok dan pelat lantai dan  $f'_c = 29$  MPa (K-350) untuk elemen kolom dan dinding geser, sedangkan baja tulangan yang digunakan memiliki kuat leleh  $f_y = 400$  MPa. Profil balok perangkai baja menggunakan baja BJ 37 dengan tegangan leleh  $F_y = 240$  MPa dan tegangan putus  $F_u = 400$  MPa.

Tabel 3.1 Properti Material

Material		Mutu	Modulus Elastisitas
Beton	K 300	$f'_c = 25$ MPa	$E_c = 24.000$ MPa
	K 350	$f'_c = 29$ MPa	$E_c = 25.000$ MPa
Baja tulangan		$f_y = 400$ MPa	$E_s = 200.000$ MPa
Profil Baja BJ37		$F_y = 240$ MPa	$E_s = 200.000$ MPa
		$F_u = 370$ MPa	



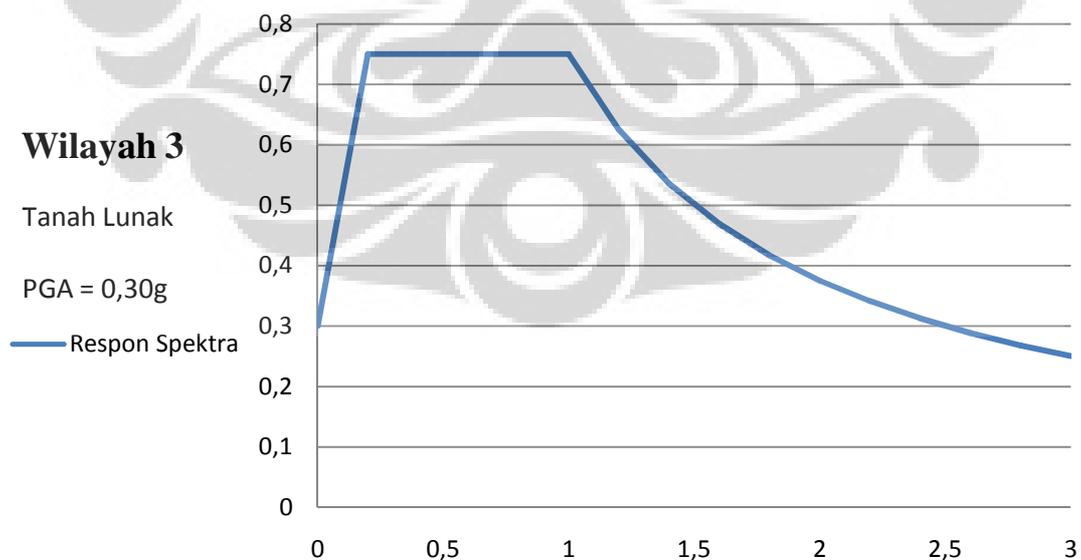
Gambar 3.1 Denah Model Struktur

Tabel 3.2 Dimensi Struktur

Element Struktur	Dimensi	Material
Pelat	t = 120 mm	K300
Balok anak	300x500 mm <sup>2</sup>	K300
Balok Induk	350x650 mm <sup>2</sup>	K300
Kolom	650x650mm <sup>2</sup>	K350
Shearwall - Elemen batas	t <sub>wall</sub> = 300 mm 450x450 mm <sup>2</sup>	K350
Balok Perangkai	WF200x400 WF200x500 WF200x600	BJ 37

Pembebanan pada struktur mengacu pada SNI 03-1727-1989-F Tata Cara Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung. Untuk beban mati, selain berat sendiri struktur, ditetapkan sebesar 150 kg/m<sup>2</sup> untuk beban tambahan pada lantai yang meliputi berat *screed*, keramik, plafon dan peralatan mekanik dan instalasi listrik (M/E). Kemudian beban partisi ditetapkan sebesar 100 kg/m<sup>2</sup>. Sedangkan untuk beban hidup pada bangunan perkantoran, pelat lantai menerima beban sebesar 250 kg/m<sup>2</sup> dan khusus untuk lantai atap sebesar 100 kg/m<sup>2</sup>. Untuk peninjauan gempa, karena peluang terjadinya beban hidup penuh membebani semua bagian sangat kecil, diijinkan untuk mereduksi beban hidup dengan koefisien reduksi sebesar 0,3.

Beban Gempa dihitung berdasarkan peraturan gempa Indonesia SNI 03-1726-2002 dengan asumsi bangunan berlokasi di Jakarta dengan jenis tanah diasumsikan yaitu tanah lunak. Berdasarkan peta gempa, respon spektra yang digunakan adalah respon spektra gempa rencana wilayah 3 dengan percepatan tanah puncak PGA = 0,30g untuk tanah lunak.



Gambar 3.2 Respon Spektra Rencana (SNI 03-1726-2002,2002)

Analisis dan desain detail penulangan untuk elemen struktur balok kolom dan dinding geser menggunakan perangkat lunak ETABS versi 9. Balok dan kolom dimodelkan dengan elemen garis (*line element*). Pelat dan dinding geser dimodelkan sebagai elemen cangkang (*shell*).

Modelisasi dinding geser dengan cangkang pada ETABS dilakukan dengan menggabungkan ketiga dinding geser sebagai sebuah elemen *pier* untuk menganalisis persentase gaya gempa yang diterima oleh dinding geser dan struktur portal. Setelah model dipastikan sebagai sistem tunggal dimana dinding geser menerima minimal 90% dari beban gempa, analisis dan detail penulangan dilakukan dengan memodelkan masing-masing dinding geser sebagai element *pier*.

Untuk keperluan perencanaan model struktur, ditetapkan kombinasi pembebanan seperti ditunjukkan pada Tabel 3.3. Kombinasi pembebanan memperhitungkan pembebanan akibat beban gravitasi dan beban gempa dengan efek ortogonal untuk model tiga dimensi. Untuk perencanaan detail penulangan dinding geser, beban gempa yang digunakan yaitu beban gempa rencana sepenuhnya.

Tabel 3.3 Kombinasi Pembebanan untuk Perancangan Struktur

Pembebanan	Kombinasi
Beban gravitasi	1. $U = 1,4DL$ 2. $U = 1,2DL + 1,6LL$
Beban Gempa $100\%E_x + 30\%E_y$	1. $U = 1,2DL + LL \pm E_x \pm 0,3E_y$ 2. $U = 0,9DL \pm E_x \pm 0,3E_y$
Beban Gempa $30\%E_x + 100\%E_y$	1. $U = 1,2DL + LL \pm 0,3E_x \pm E_y$ 2. $U = 0,9DL \pm 0,3E_x \pm E_y$

Analisis lebih lanjut dilakukan dengan meninjau respon struktur terhadap berbagai pembebanan yang telah dikenakan. Parameter respon yang dianalisis meliputi reaksi perletakan dan gaya dalam. Analisis untuk karakteristik dinamik dari model struktur meliputi periode alami getaran  $T_n$ , pola getar, partisipasi massa efektif. Analisis terhadap respon dinamik dilakukan dengan meninjau gaya geser dasar dan tingkat, momen guling, dan simpangan lateral (*lateral displacement*). Gaya geser dasar pada analisis dinamik perlu diverifikasi dengan membandingkannya terhadap analisis statik dimana nilainya tidak boleh lebih kecil dari 80% gaya geser dasar statik (SNI 03-1726-2002, 2002). Momen guling ditinjau untuk memperoleh efektifitas kinerja struktur dinding geser berangkai dengan menghitung rasio kopel dan simpangan akibat beban gempa bertujuan untuk mengontrol stabilitas struktur dan menghindari keruntuhan akibat perbesaran momen P- $\Delta$ .

Perancangan struktur untuk semua model akan menghasilkan detail tulangan yang selanjutnya digunakan dalam analisis nonlinier untuk mengevaluasi kinerja struktur. Model struktur tidak hanya didesain berdasarkan kekuatan pada kondisi ultimit (*ultimate limit state*) dan kondisi layan (*service limit state*), harus pula memenuhi kriteria desain kapasitas (*capacity design*). Desain kapasitas menganut filosofi kolom kuat-balok lemah (*strong column-weak beam*) dimana disipasi energi diijinkan terjadi pada bagian tertentu seperti

terjadinya sendi plastis secara simultan pada balok atau pada dasar dinding geser sehingga perilaku keruntuhan yang terjadi bersifat daktail (Wangsadinata, 1999).

Analisis dan modelisasi struktur tiga dimensi untuk mengevaluasi kinerja dengan analisis statik nonlinier *pushover* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SAP2000 versi 14. Analisis dibatasi dengan memberi beban pada arah sumbu X untuk memfokuskan pada perilaku inelastis dari balok perangkai baja. Elemen pelat dimodelkan sebagai cangkang dan elemen balok dan kolom dimodelkan sebagai elemen garis. Dinding geser juga dimodelkan sebagai kolom dengan menggunakan elemen garis dengan memberikan batasan *plate constraint* supaya penampang kolom-kolom berperilaku sebagai penampang datar. Data detail penulangan dari elemen balok, kolom dan dinding geser dimasukkan menggunakan fasilitas desain penampang (*section designer*).

Perilaku inelastis dari tiap elemen struktur dimodelkan sebagai *hinge*. Parameter yang diperlukan untuk membangun kurva generalisasi hubungan gaya-deformasi atau momen-rotasi diperoleh dari FEMA 356.

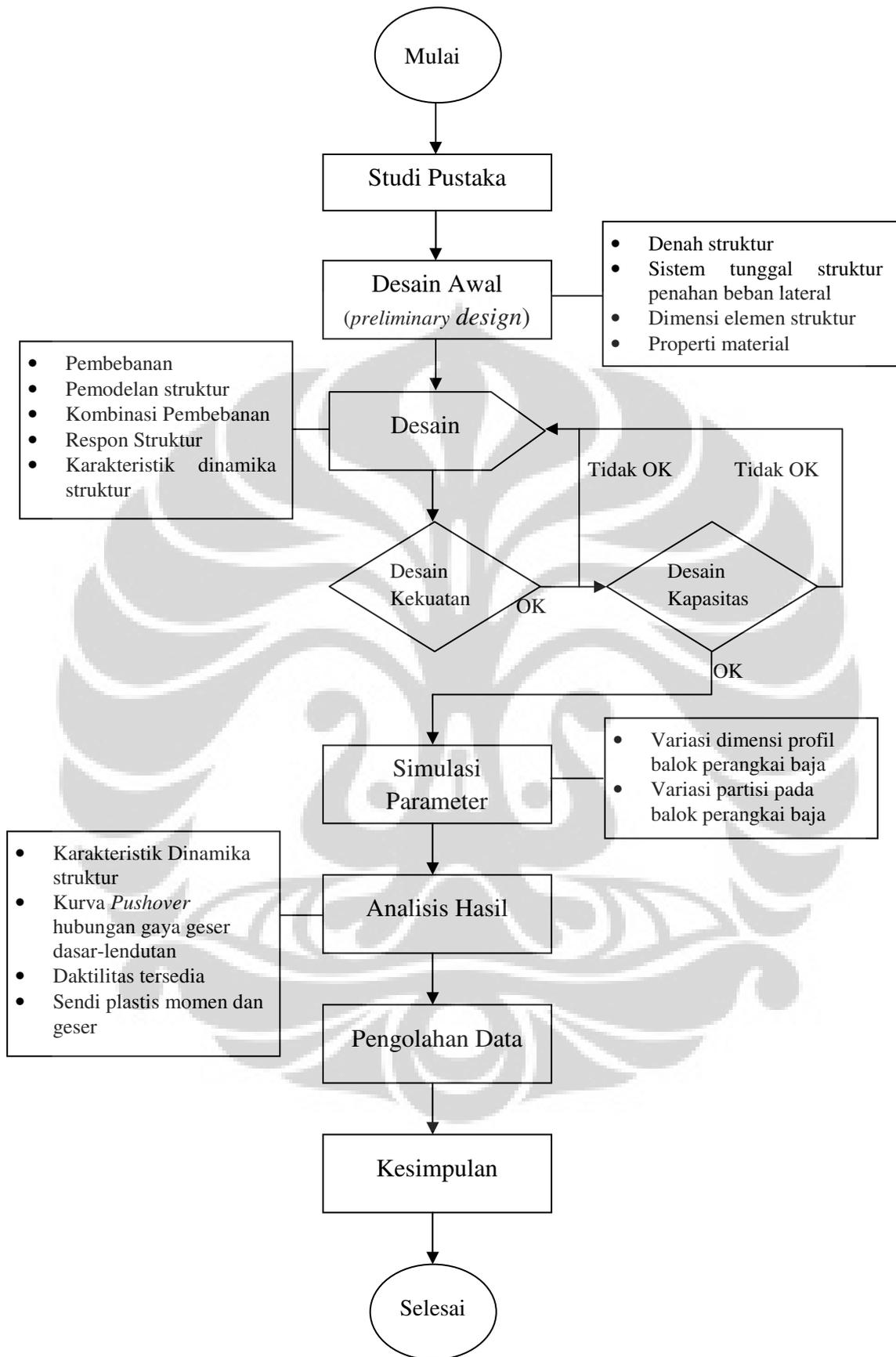
Simulasi parametrik untuk mengevaluasi perilaku inelastis dari balok perangkai baja dilakukan dengan memvariasikan dimensi profil baja yaitu menggunakan profil baja WF200x400, WF200x500 dan WF200x600. Simulasi parametrik juga dilakukan dengan mendiskretisasi balok perangkai baja menjadi elemen-elemen kecil setiap 150mm, 200mm, dan 300mm. Setiap elemen-elemen tersebut akan dimasukkan sendi plastis momen dan geser untuk merepresentasikan perilaku inelastis dari balok perangkai baja. Diskretisasi balok perangkai baja dilakukan untuk mengetahui jenis dan perkembangan pembentukan sendi.

Tabel 3.4 Variasi Parametrik

Parameter	Variasi		
Dimensi profil	WF200x400	WF200x500	WF200x600
Diskretisasi	150mm	200mm	300mm

Analisis hasil dan pengolahan data dilakukan dengan mengolah hasil keluaran dari SAP2000 dalam bentuk grafik dan tabel untuk respon-respon yang ditinjau. Hasil keluaran yang dianalisis yaitu karakteristik dinamika struktur, kurva *pushover* hubungan gaya geser dasar-lendutan, daktilitas tersedia dan faktor kuat lebih, penyebaran lokasi terjadinya sendi plastis pada balok perangkai. Analisis dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh simulasi parametrik yang dilakukan terhadap variabel yang diamati untuk setiap model struktur.

Dari analisis terhadap hasil keluaran, dibuat kesimpulan-kesimpulan lokal yang kemudian disintesis menjadi kesimpulan global dari penelitian ini.



Gambar 3.3 Bagan Alur Metodologi Penelitian

## BAB 4

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Karakteristik Dinamika Struktur

Model struktur dianalisis dengan analisis getaran bebas (*free vibration*) untuk memperoleh karakteristik dinamika struktur. Karakteristik yang ditinjau meliputi periode getar alami fundamental, pola getar dan partisipasi massa. Analisis untuk ketiga model yang dilakukan dengan perangkat lunak ETABS versi 9 dirangkum pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Karakteristik Dinamik Model Struktur

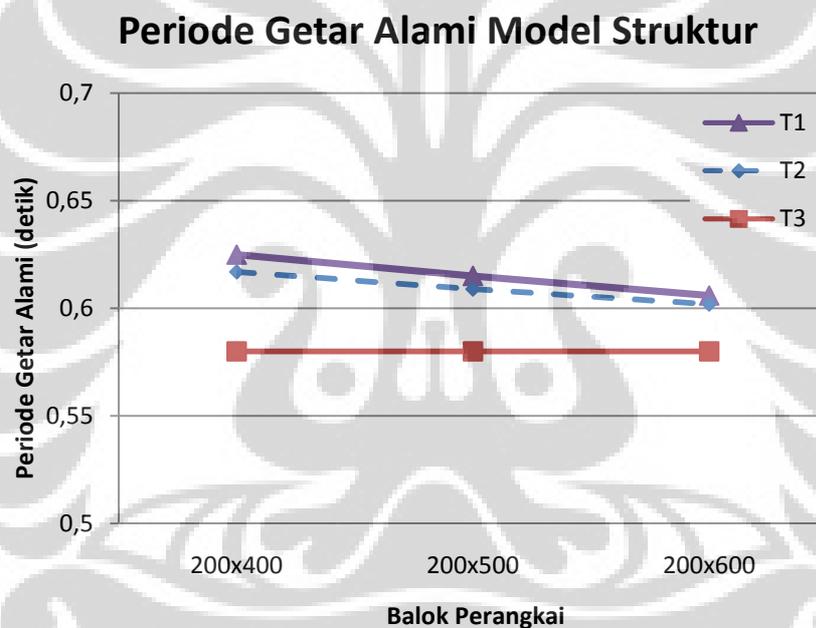
Balok Penampang	Periode (detik)	MME	Keterangan
WF200x400	T <sub>1</sub>	0,625	78,19% Translasi Ux
	T <sub>2</sub>	0,617	78,15% Rotasi Rz
	T <sub>3</sub>	0,580	70,01% Translasi Uy
WF200x500	T <sub>1</sub>	0,615	78,21% Translasi Ux
	T <sub>2</sub>	0,609	78,43% Rotasi Rz
	T <sub>3</sub>	0,580	70,01% Translasi Uy
WF200x600	T <sub>1</sub>	0,606	78,23% Translasi Ux
	T <sub>2</sub>	0,602	78,65% Rotasi Rz
	T <sub>3</sub>	0,580	70,01% Translasi Uy

Ketiga model struktur yang digunakan memiliki pola getar pertama yaitu bergetar translasi arah sumbu X dimana balok perangkai dipasang. Kemudian untuk pola getar kedua dan ketiga berturut-turut yaitu berotasi pada sumbu Z dan translasi arah sumbu Y.

Variasi dari model struktur terhadap periode getarnya diilustrasikan pada Gambar 4.1. Periode getar alami fundamental dari ketiga model struktur berada pada interval 0,580-0,625 detik. Untuk periode T<sub>1</sub> dan T<sub>2</sub>, terdapat kecenderungan menurun seiring bertambahnya dimensi balok perangkai yang digunakan. Hal ini disebabkan naiknya dimensi balok perangkai akan semakin memperkaku struktur, sehingga periode getarnya menurun. Periode getar T<sub>3</sub> dari masing-masing model struktur tidak ada perubahan karena tidak dilakukan variasi pada arah sumbu Y.

Tabel 4.2 Pola Getar Struktur

Lantai	$\Phi_1$ (Translasi $U_x$ )			$\Phi_2$ (Translasi $R_z$ )			$\Phi_3$ (Translasi $U_y$ )		
	WF200x400	WF200x500	WF200x600	WF200x400	WF200x500	WF200x600	WF200x400	WF200x500	WF200x600
10	0,6878	0,6884	0,689	0,00007	0,00007	0,00007	0,7873	0,7871	0,7871
9	0,6481	0,6482	0,6484	0,00007	0,00007	0,00007	0,697	0,6969	0,6968
8	0,5981	0,5978	0,5977	0,00006	0,00006	0,00006	0,6031	0,603	0,603
7	0,5373	0,5368	0,5363	0,00006	0,00006	0,00006	0,5075	0,5074	0,5073
6	0,4664	0,4658	0,4653	0,00005	0,00005	0,00005	0,4118	0,4117	0,4117
5	0,3871	0,3866	0,3862	0,00004	0,00004	0,00004	0,3185	0,3185	0,3184
4	0,302	0,3018	0,3016	0,00003	0,00003	0,00003	0,2306	0,2306	0,2306
3	0,2143	0,2145	0,2146	0,00002	0,00002	0,00002	0,1514	0,1513	0,1513
2	0,1288	0,1293	0,1297	0,00001	0,00001	0,00001	0,0843	0,0843	0,0843
1	0,0531	0,0537	0,0541	0,00001	0,00001	0,00001	0,0331	0,0331	0,0331



Gambar 4.1 Perbandingan Periode Getar Alami Model Struktur

#### 4.2 Beban Gempa

Beban gempa dihitung dengan menggunakan kurva respon spektrum SNI 1726-2002 Wilayah 3 untuk tanah lunak. Periode getar fundamental dari masing-masing model struktur terletak pada interval periode dominan sehingga nilai  $C$  pada arah sumbu  $X$  dan  $Y$  adalah  $C = 0,75$ . Dengan asumsi bangunan difungsikan sebagai gedung perkantoran, nilai faktor keutamaan  $I$  yang digunakan yaitu  $I = 1$ . Nilai faktor reduksi gempa  $R$  untuk struktur dinding geser berangkai sebagai sistem tunggal penahan beban lateral sebesar  $R = 6,5$ .

Berat total bangunan yang terdiri dari beban mati dan 30% beban hidup dan gaya geser dasar  $V_b$  masing-masing model dirangkum dalam Tabel 4.2. Kemudian gaya geser dasar didistribusikan sebagai gaya lateral statik ke tiap-tiap lantai dengan mengikuti pola getar pertama (Tabel 4.3).

Tabel 4.3 Berat Struktur dan Gaya Geser Dasar

Lantai	Berat $w_i$ (kN)			Gaya lateral $F_x$ (kN)		
	WF200x400	WF200x500	WF200x600	WF200x400	WF200x500	WF200x600
10	4217	4219	4220	946,62	947,78	948,82
9	4852	4854	4855	891,98	892,44	892,91
8	4852	4854	4855	823,17	823,05	823,09
7	4852	4854	4855	739,49	739,06	738,54
6	4852	4854	4855	641,91	641,31	640,77
5	4852	4854	4855	532,77	532,27	531,84
4	4852	4854	4855	415,64	415,52	415,33
3	4852	4854	4855	294,94	295,32	295,53
2	4852	4854	4855	177,27	178,02	178,61
1	4953	4955	4956	73,08	73,93	74,5
$\Sigma$	47986	48002	48013	5536,86	5538,7	5539,94

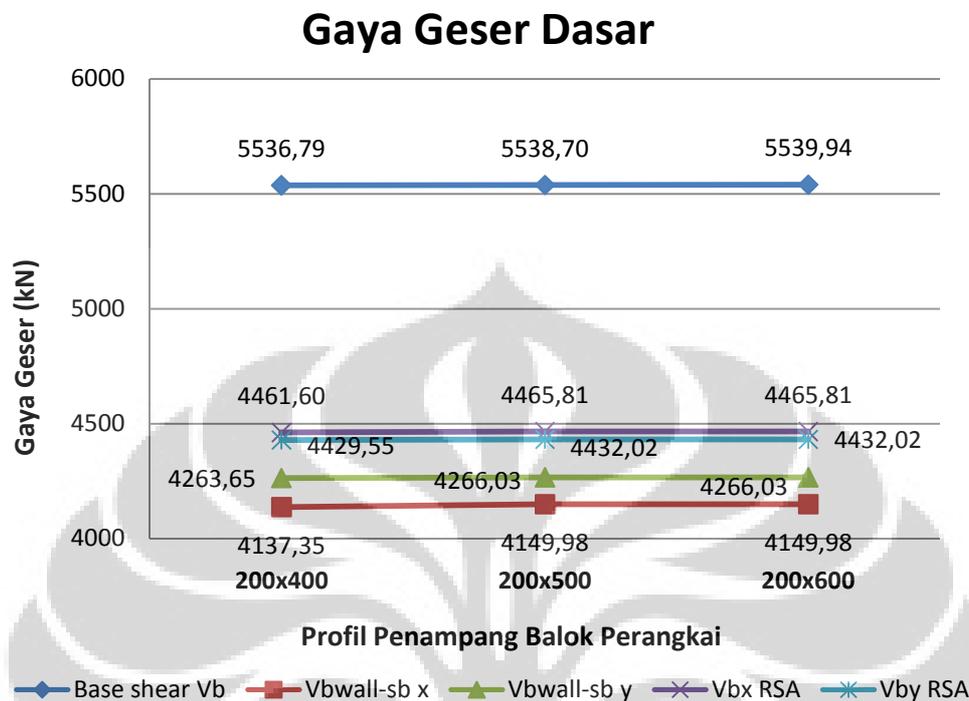
Analisis respon struktur terhadap beban gempa dilakukan dengan analisis dinamik respon spektrum. Hasil dari analisis dinamik dibandingkan dengan hasil analisis secara statik dengan persyaratan bahwa nilainya tidak boleh lebih kecil dari 80%.

Tabel 4.4 Perbandingan Gaya Geser Dasar Statik dan Dinamik Respon Spektrum

Gaya Geser (kN)		Dimensi Balok Perangkai Baja		
		WF200x400	WF200x500	WF200x600
<b>V<sub>b</sub> statik</b>		5536,79	5538,70	5539,94
<b>Arah sb -X</b>	V <sub>b</sub> RSA <sup>1</sup>	4461,60	4465,81	4465,81
	V <sub>b</sub> shearwall <sup>2</sup>	4137,35	4149,98	4149,98
<b>Arah sb -Y</b>	V <sub>b</sub> RSA <sup>1</sup>	4429,55	4432,02	4432,02
	V <sub>b</sub> shearwall <sup>2</sup>	4263,65	4266,03	4266,03
Keterangan:				
1. Gaya geser dasar yang diperoleh dari analisis dinamik respon spektrum tidak boleh lebih kecil dari 80% gaya geser dasar statik				
2. Untuk sistem tunggal, disyaratkan bahwa 90% dari beban gempa diterima oleh dinding geser.				

Analisis dilanjutkan untuk memverifikasi desain sebagai sistem tunggal dimana disyaratkan bahwa dinding geser menerima minimal 90% dari total beban gempa yang masuk ke struktur. Untuk memastikan persyaratan tersebut terpenuhi, modelisasi struktur dilakukan dengan memodelkan ketiga dinding geser sebagai satu buah elemen *pier* pada ETABS. Dari data keluaran, persentase gaya geser dasar yang diterima oleh dinding geser pada arah sumbu X

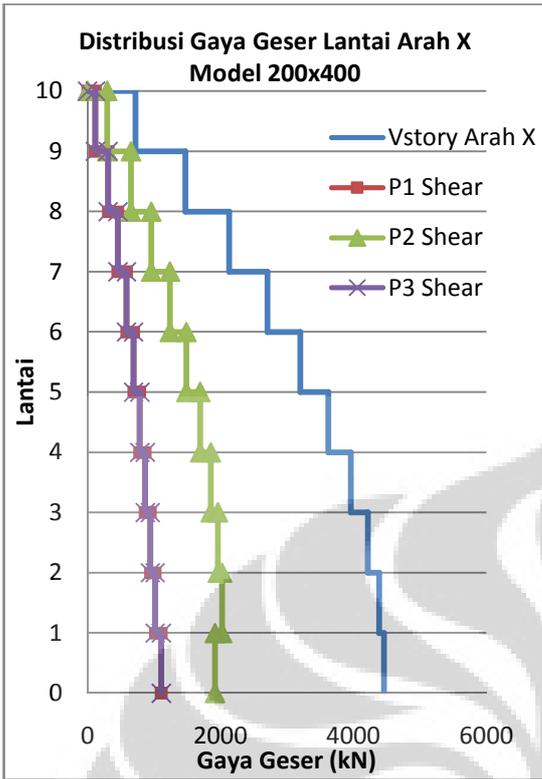
dan Y masing-masing adalah sekitar 92% dan 96% sehingga struktur dapat didesain berperilaku sebagai sistem tunggal.



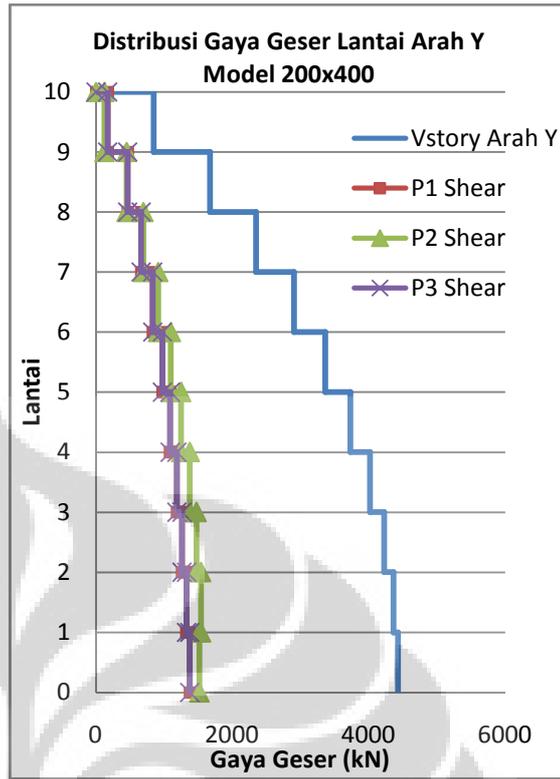
Gambar 4.2 Perbandingan Gaya Geser Dasar Statik dan Dinamik Respon Spektrum

Gambar 4.2 menunjukkan variasi gaya geser dasar statik dan dinamik respon spektrum serta proporsi yang diterima oleh dinding geser. Tidak ada kecenderungan yang dapat diamati dari perubahan kenaikan dimensi balok perangkai baja terhadap besarnya gaya geser dasar. Hal demikian juga disimpulkan oleh El-Tawil dan Kuenzli (2002b).

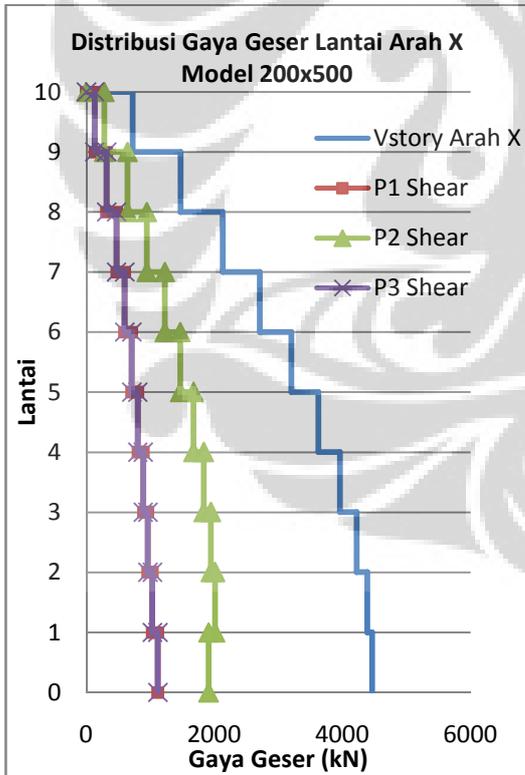
Gambar 4.3 mengilustrasikan distribusi gaya geser tingkat masing-masing model struktur pada arah sumbu X dan Y. Gaya geser yang diterima oleh masing-masing dinding geser juga diberikan pada gambar yang sama.



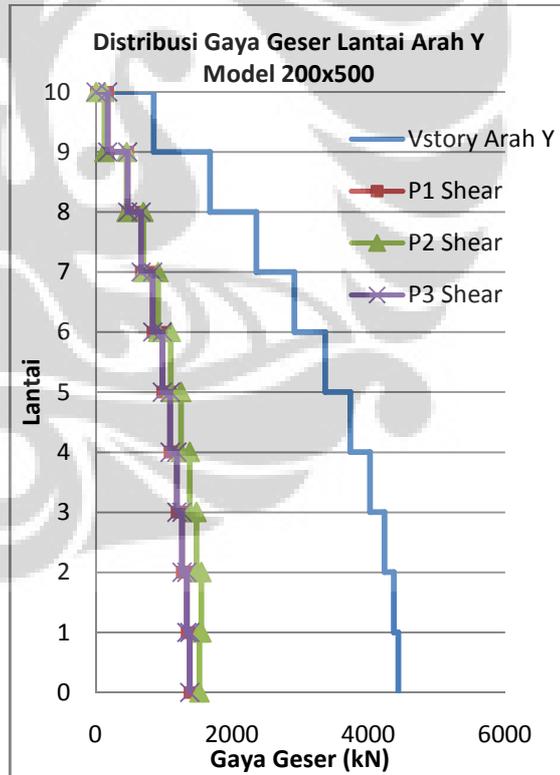
(a) Model WF200x400 Arah sumbu X



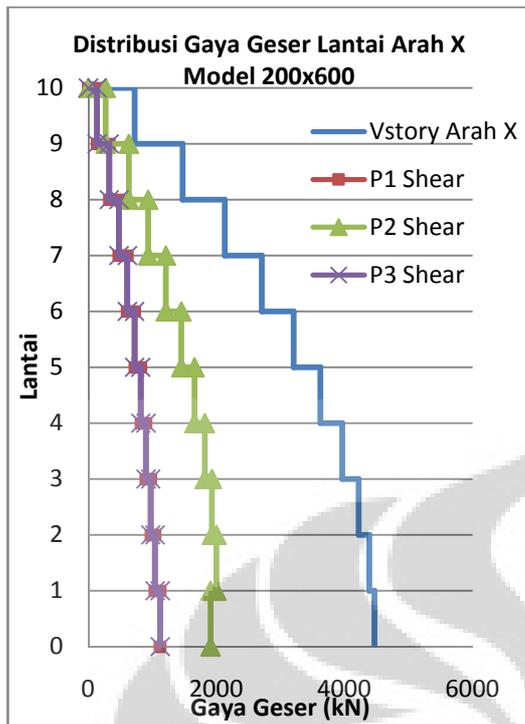
(b) Model WF200x400 Arah sumbu Y



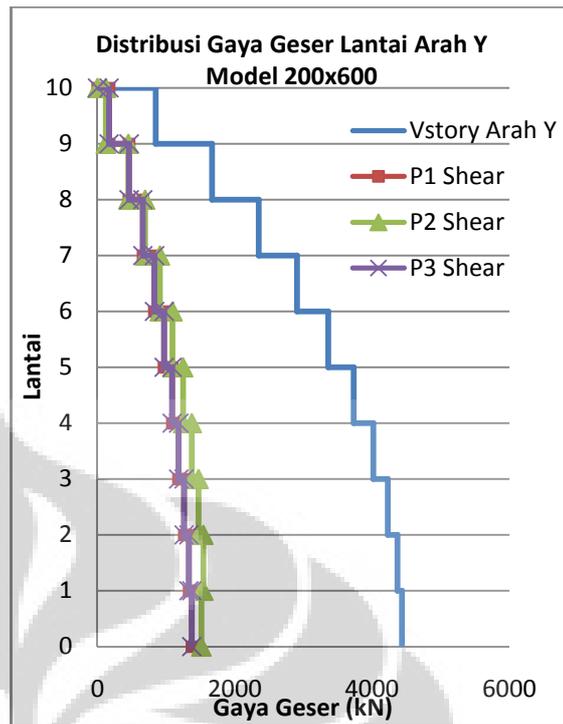
(c) Model WF200x500 Arah sumbu X



(d) Model WF200x500 Arah sumbu Y



(e) Model WF200x600 Arah sumbu X



(f) Model WF200x600 Arah sumbu Y

Gambar 4.3 Distribusi Gaya Geser Lantai dan Dinding Geser

Gaya dalam geser dan momen pada balok perangkai baja akibat beban gempa disajikan pada Tabel 4.5. Gaya geser pada balok perangkai akan ditransfer kepada dinding geser sehingga akan menghasilkan aksi kopel berupa momen kopel yang mereduksi momen guling  $M_{OT}$ .

Tabel 4.5 Gaya Dalam pada Balok Perangkai Baja Akibat Beban Gempa

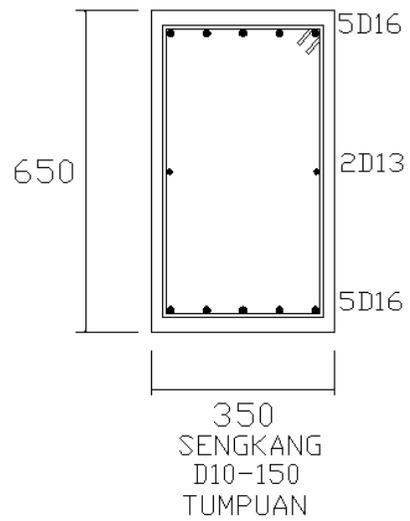
Dimensi Profil	WF200x400		WF200x500		WF200x600	
	V (kN)	M (kNm)	V (kN)	M (kNm)	V (kN)	M (kNm)
<b>Lantai</b>						
<b>10</b>	165,06	148,89	164,6	147,45	156,47	139,85
<b>9</b>	189,21	170,27	181,22	181,22	202,52	182,26
<b>8</b>	226,95	204,54	231,64	231,64	270,33	243,78
<b>7</b>	267,79	241,52	285,74	285,74	342,4	308,99
<b>6</b>	304,93	275,12	335,81	335,81	409,39	369,55
<b>5</b>	332,24	299,87	375,32	375,32	463,89	418,84
<b>4</b>	343,66	310,31	397,74	397,74	498,39	450,18
<b>3</b>	332,03	300,03	394,64	394,64	502,58	454,39
<b>2</b>	287,81	260,46	353,35	353,35	459,28	416,18
<b>1</b>	196,77	178,8	252,12	252,12	336,22	306,73
<b><math>\Sigma V</math></b>	2646,45		2972,18		3641,47	
<b><math>M_{kopel}</math></b>	25405,92		28532,93		34958,11	
<b><math>M_{OT}</math></b>	127311,5		127310,1		127334,9	
<b>Couple ratio</b>	19,96%		22,41%		27,45%	

Rasio kopel atau *couple ratio* yaitu perbandingan antara momen kopel dengan momen guling untuk model struktur dengan balok perangkai WF200x400, WF200x500, dan WF200x600 masing-masing adalah 19,96%, 22,41% dan 27,45%. El-Tawil et al (2002a) dalam penelitiannya dengan struktur dinding geser berangkai hibrid 12 lantai dengan balok perangkai uniform merekomendasikan besarnya rasio kopel yaitu antara 30% sampai 45% untuk desain efisien. Dengan perbandingan tersebut, rasio kopel yang diperoleh masih dibawah dari nilai yang disarankan sehingga keuntungan yang harusnya diperoleh dari mekanisme reduksi momen guling oleh aksi kopel menjadi tidak signifikan.

### 4.3 Desain Detail Penulangan Elemen Struktur

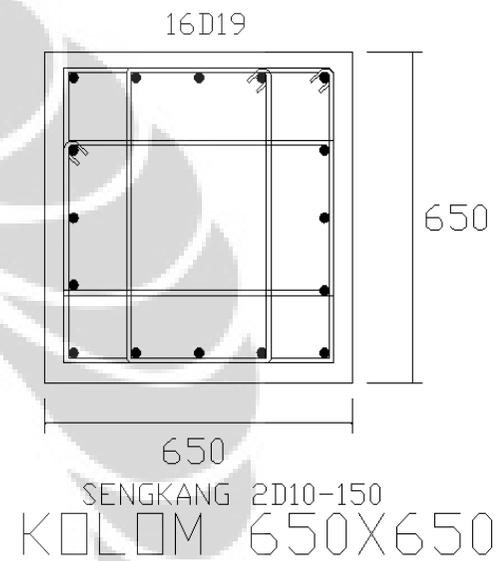
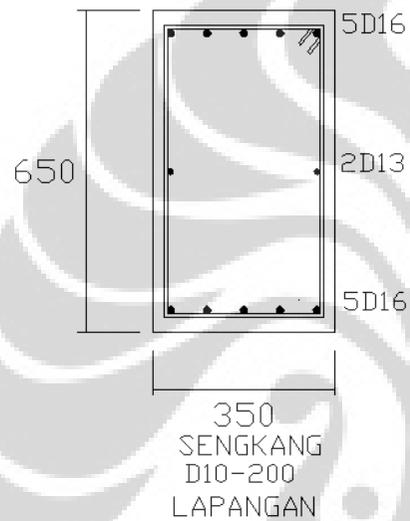
Elemen balok dan kolom didesain dengan persyaratan detail penulangan sebagai sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) untuk mengakomodasi interaksi antara dinding geser dengan struktur portal ketika berdeformasi akibat beban gempa. Struktur balok dan kolom harus dijamin tidak runtuh saat ikut berdeformasi mengikuti deformasi dinding geser.

Dinding geser didesain sebagai dinding geser khusus dengan elemen batas (*boundary element*) berdasarkan SNI 03-2847-2002. Pada daerah elemen batas, dimensi penampang diperbesar untuk memberi ruang bagi sambungan antara dinding geser dengan balok perangkai baja. Detail penulangan yang digunakan oleh model struktur pada penelitian ini terdapat pada Gambar 4.4.

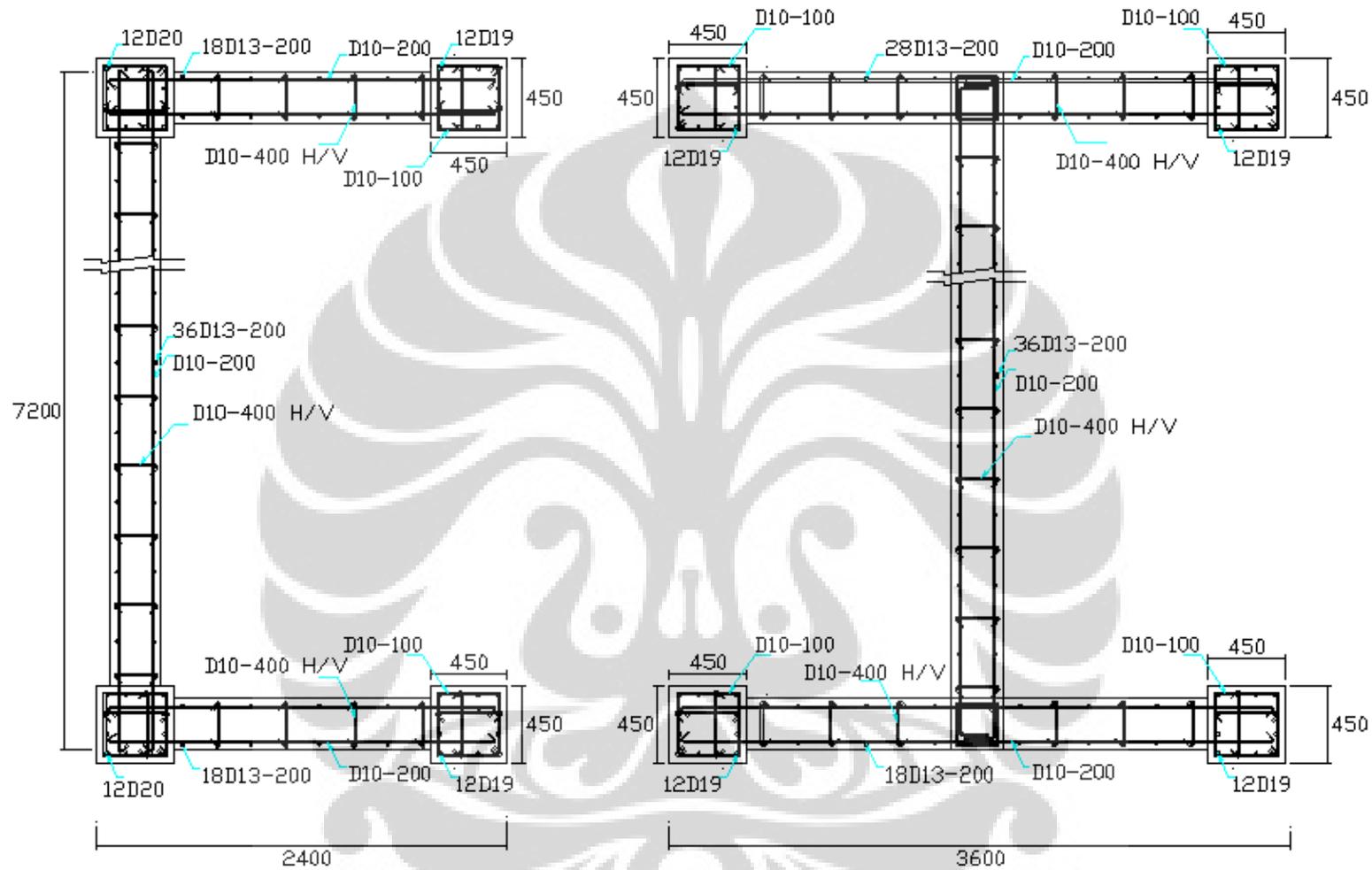


BALOK 350X650

(a) Balok 350x650



(b) Kolom 650x650



(c) Dinding geser

Gambar 4.4. Detail Penulangan Struktur

## 4.4 Hasil Analisis Statik Nonlinier *Pushover*

### 4.4.1. Kurva *Pushover* Hubungan Gaya-Lendutan

Variasi model struktur dinding geser hibrid yang pertama adalah model dengan balok perangkai baja WF200x400 tipikal tiap lantai. Model ini mencapai leleh pertama pada lendutan dan gaya geser dasar masing-masing sebesar 33,843mm dan 5610,62 kN atau  $1,013V_n$  gaya geser dasar nominal. Lokasi terjadinya sendi plastis pertama yaitu pada balok perangkai baja di lantai 4. Balok tersebut leleh akibat momen, sedangkan geser masih dalam kondisi elastis. Kemudian dilanjutkan dengan leleh akibat momen pada balok perangkai baja di lantai 2 hingga lantai 6, balok beton di lantai 4 dan di dasar dinding geser.

Pada proses pembebanan selanjutnya, struktur mencapai kondisi level kinerja *Immediate Occupancy* (IO) setelah berdeformasi sejauh 47,78mm dengan gaya geser dasar sebesar 7197,53 kN atau  $1,29V_n$ . Elemen struktur pertama yang telah berdeformasi hingga level kinerja IO yaitu balok perangkai baja di lantai 3-5. Kemudian disusul balok perangkai di lantai 2-6, sementara di lantai 7-8 baru mengalami leleh akibat momen.

Pada struktur beton bertulang di perimeter bangunan, balok mencapai leleh ketika lendutan dan gaya geser dasarnya masing-masing sebesar 66,142mm dan 8594,712 kN atau  $1,552V_n$ . Lokasi terjadinya sendi plastis pertama yaitu di lantai 4. Kemudian, satu per satu sendi plastis terbentuk di seluruh balok, dimulai dari balok di lantai 3-5 seiring dengan peningkatan beban lateral statik nonlinier.

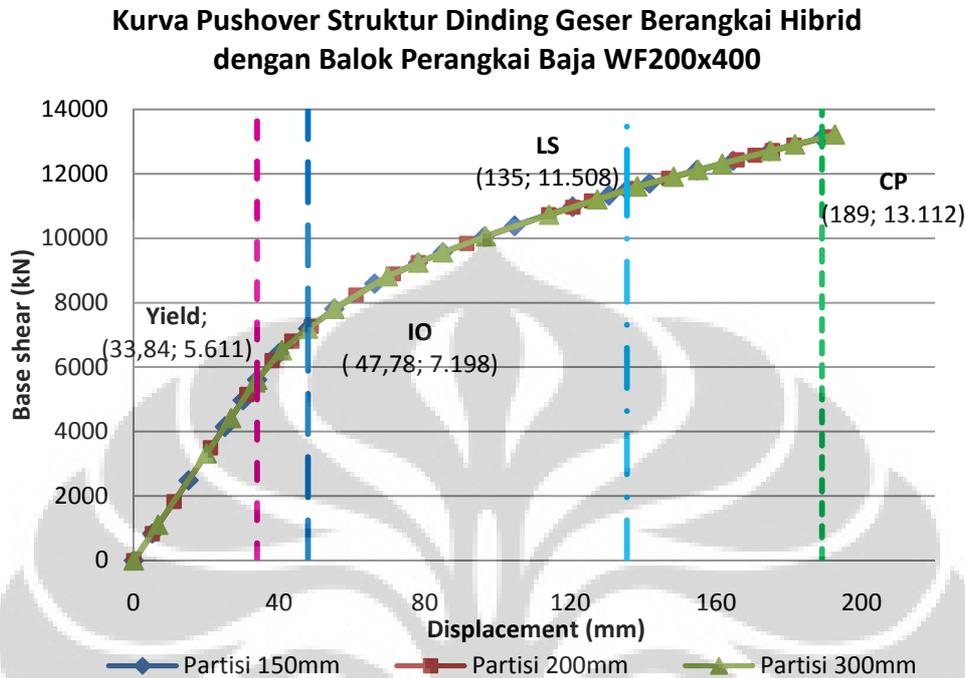
Setelah seluruh balok di lantai 1-9 di perimeter bangunan telah melewati batas elastis, terbentuk sendi plastis di dasar salah satu kolom. Hal ini terjadi ketika kurva *pushover* dari struktur berada pada lendutan dan gaya geser dasarnya masing-masing sebesar 130,468mm dan 11331,90kN atau  $2,046V_n$ .

Setelah semua balok perangkai mencapai level kinerja IO, dan balok beton serta dasar dinding geser mengalami leleh, struktur mencapai level kinerja *Life Safety* (LS) pada lendutan dan gaya geser dasar masing-masing sebesar 135,47mm dan 11508,15kN atau  $2,078V_n$ . Lokasi sendi plastis pertama yang mencapai level kinerja LS yaitu balok perangkai baja di lantai 4 dan 5. Mekanisme terbentuknya sendi plastis yaitu leleh akibat moment, sedangkan geser tetap elastis.

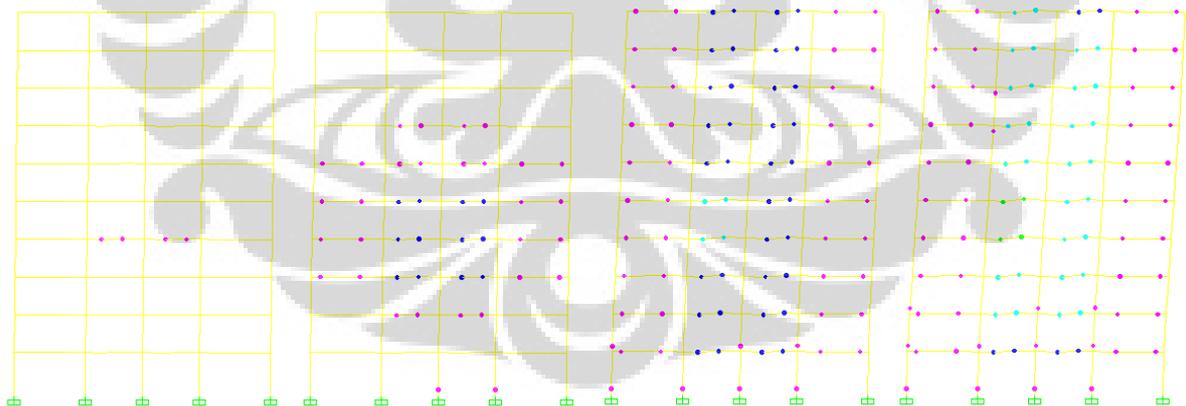
Setelah beberapa balok perangkai baja mencapai level kinerja LS, sendi plastis kembali terbentuk di dasar kolom yang berada di perimeter bangunan. Sendi plastis kedua di dasar kolom terjadi ketika lendutan dan gaya geser dasar masing-masing sebesar 154,609mm dan 12106kN atau  $2,186V_n$ . Pada saat yang sama, semua balok beton bertulang telah mengalami leleh, meskipun belum mencapai level kinerja IO.

Dalam simulasi, struktur dinding geser berangkai hibrid didorong dengan beban yang terus bertambah secara bertahap hingga mencapai kondisi diambang keruntuhan sampai lendutan dan gaya geser dasar maksimumnya masing-masing sebesar 189,01mm dan 13112,34kN atau  $2,368V_n$ . Lokasi terjadinya sendi plastis yang telah mencapai level kinerja *Collapse Prevention* (CP) yaitu pada balok perangkai baja di lantai 4 dan 5. Balok tersebut runtuh

akibat momen dengan rotasi yang terjadi sebesar 0,0166 rad sementara geser tetao berperilaku elastis. Pada kondisi tersebut, balok perangkai baja lainnya telah mencapai level kinerja LS, kecuali di lantai 1 masih berada di level kinerja IO.



Gambar 4.5 Kurva *Pushover* Model Balok Perangkai WF200x400



Gambar 4.6 Sendi Plastis Model Balok Perangkai WF200x400

Variasi model struktur dinding geser berangkai hibrid yang kedua yaitu dengan balok perangkai WF200x500 tipikal di tiap lantai. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh bahwa sendi plastis pertama dialami oleh struktur setelah didorong oleh beban *pushover* hingga titik kontrol lendutan yang berada di lantai teratas berdeformasi sejauh 33,758mm. Gaya geser dasar saat terjadi leleh pertama yaitu sekitar 7184,61kN atau  $1,277V_n$  gaya geser dasar

nominal. Lokasi terjadinya leleh pertama yaitu pada balok perangkai baja di lantai 3 dan 4 dengan mekanisme leleh diakibatkan oleh momen, sedangkan geser tetap elastis. Ketika beban dinaikkan bertahap, leleh akibat momen juga dialami oleh balok perangkai di lantai 2 dan 5-6, balok beton serta dasar dinding geser tengah.

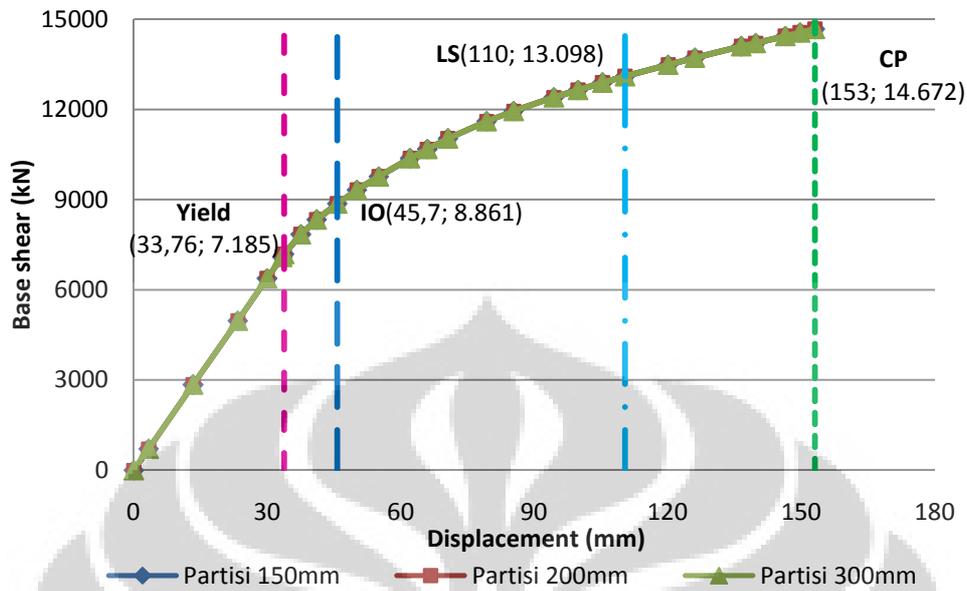
Ketika dinding geser didorong sejauh 45,7mm dengan gaya geser dasar 8861,358kN atau  $1,599V_n$ , level kinerja *Immediate Occupancy* (IO) tercapai. Lokasi terjadinya sendi plastis pertama yang mencapai IO dengan mekanisme leleh akibat momen yaitu pada balok perangkai di lantai 3-5. Secara bertahap beban dinaikkan sehingga terjadinya sendi plastis dapat diamati. Berdasarkan hasil simulasi, dapat ditunjukkan bahwa sendi plastis level kinerja IO akibat momen terbentuk secara bertahap, tidak simultan di seluruh lantai.

Setelah balok perangkai baja di lantai 1-7 telah mengalami deformasi inelastis hingga level kinerja IO, balok beton di perimeter bangunan mencapai batas elastis. Lokasi leleh pertama pada balok beton perimeter yaitu di lantai 3 dan 4 ketika lendutan dan gaya geser dasar dari kurva *pushover* menunjukkan nilai 65,99 dan 10638,77kN atau  $1,92V_n$ .

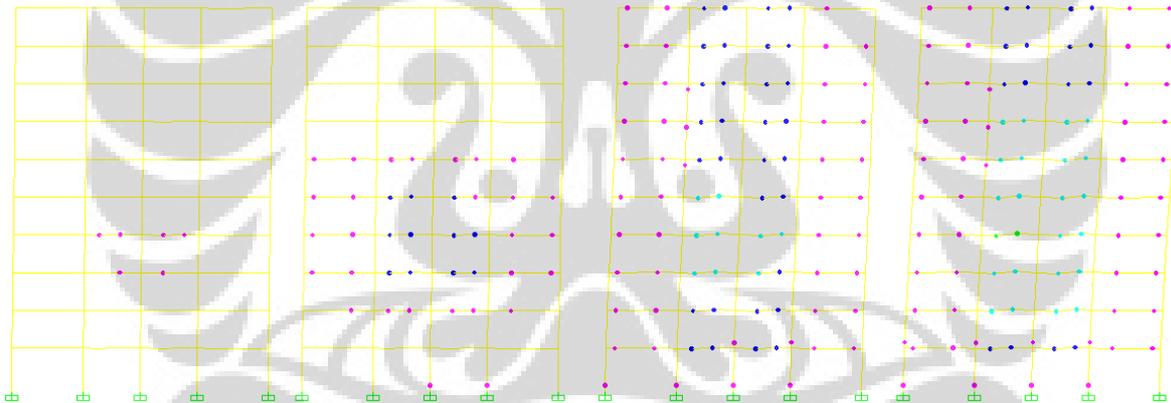
Level kinerja *Life Safety* (LS) dimana terjadi kerusakan struktural tetapi tidak terjadi keruntuhan dicapai setelah didorong hingga 110,373mm dengan gaya geser dasar yang bekerja yaitu 13098,112kN atau  $2,364V_n$ . Lokasi terjadinya sendi plastis pertama dengan level kinerja LS yaitu pada balok perangkai baja di lantai 4. Mekanisme sendi plastis yang terjadi disebabkan oleh momen, sementara leleh akibat geser belum tercapai. Pada level kinerja ini, seluruh balok beton pada struktur portal telah mencapai titik lelehnya. Hal yang sama dialami oleh ketiga dinding geser, terjadi leleh didasarnya.

Lendutan ultimit yang mampu dicapai struktur dinding geser berangkai hibrid dengan balok perangkai berdimensi WF200x500 adalah sejauh 153,057mm. Gaya geser dasar yang bekerja pada kondisi di ambang keruntuhan atau level kinerja *Collapse Prevention* (CP) adalah sebesar 14672,402kN atau  $2,648V_n$ . Deformasi plastis hingga level kinerja CP terjadi pada sendi plastis balok perangkai baja di lantai 4 dengan mekanisme keruntuhan akibat momen, sementara perilaku geser tetap elastis. Kondisi balok perangkai baja lainnya yaitu di lantai 2-3 dan 5-7 berada di level kinerja LS dan di lantai 1 dan 8-10 baru mencapai IO. Pada portal struktur beton, semua balok, dasar kolom dan dinding geser mengalami mengalami leleh, namun tidak mencapai level IO.

### Kurva Pushover Struktur Dinding Geser Berangkai Hibrid dengan Balok Perangkai Baja WF200x500



Gambar 4.7 Kurva *Pushover* Model Balok Perangkai WF200x500



Gambar 4.8 Sendi Plastis Model Balok Perangkai WF200x500

Variasi model struktur dinding geser berangkai hibrid yang ketiga yaitu dengan balok balok perangkai WF200x600 tipikal di tiap lantai. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh bahwa kondisi leleh dialami oleh struktur ketika didorong dengan beban *pushover* sejauh 34,39mm dengan gaya geser dasar sebesar 8618,817kN atau  $1,556V_n$  gaya geser dasar nominal. Lokasi terjadinya leleh pertama yaitu pada sendi plastis balok perangkai baja di lantai 3. Mekanisme leleh yang terjadi disebabkan oleh momen, sedangkan geser masih elastis. Kemudian, dilanjutkan dengan terjadinya leleh pada balok perangkai di lantai 2, 4 dan 5 dan balok struktur beton.

Level kinerja *Immediate Occupancy* (IO) tercapai setelah pusat massa di lantai 10 yang digunakan sebagai titik kontrol lendutan didorong sejauh 42,523mm dengan gaya geser dasar sebesar 10033,328kN atau  $1,811V_n$ . Balok perangkai baja di lantai 3 dan 4 adalah lokasi pertama terbentuknya sendi plastis IO dengan mekanisme leleh yang terjadi diakibatkan oleh momen, sedangkan geser masih elastis. Balok perangkai lainnya yaitu di lantai 2, 5 dan 6 telah mengalami leleh akibat momen, sedangkan di lantai lainnya belum melewati batas elastis. Dari hasil simulasi selanjutnya dengan kenaikan beban *pushover*, diamati bahwa terbentuknya sendi plastis momen dengan level kinerja IO tidak simultan pada balok perangkai di semua lantai, melainkan secara bertahap.

Di struktur beton perimeter bangunan, balok pertama yang mengalami leleh yaitu di lantai 3 dan 4 pada lendutan dan gaya geser dasar masing-masing sebesar 65,22mm dan 12422,26kN atau  $2,242V_n$ , setelah balok perangkai baja di lantai 1-7 telah mencapai level kinerja IO.

Ketika didorong hingga sejauh 94,55mm dengan gaya geser dasar sebesar 14472,53kN atau  $2,612V_n$ , level kinerja *Life Safety* (LS) tercapai. Lokasi terjadinya kerusakan struktur pada level kinerja LS yaitu pada balok perangkai baja di lantai 4. Mekanisme sendi plastis yang terjadi yaitu leleh akibat momen, sedangkan geser masih elastis. Balok perangkai baja lainnya yaitu dari lantai 1-3 dan 5-8 mencapai level kinerja IO sementara di lantai 9 dan 10 baru melewati titik leleh.

Setelah terjadi LS pertama, pembebanan *pushover* kembali dilanjutkan. Dari hasil simulasi ditunjukkan bahwa sendi plastis momen dengan level kinerja LS terbentuk pada balok perangkai di lantai lainnya secara bertahap. Ketika pada balok perangkai baja yang berada di sekitar lantai 4 telah terbentuk sendi plastis level kinerja LS, mulai terjadi leleh pada sendi plastis geser.

Setelah lendutan struktur akibat beban statik nonlinier mencapai 98,78mm dengan gaya geser dasar yaitu 14719,18kN atau  $2,657V_n$ , terjadi sendi plastis pertama di dasar salah satu kolom. Pada saat yang bersamaan, sendi plastis telah tersebar di balok beton perimeter mulai dari lantai 1-7.

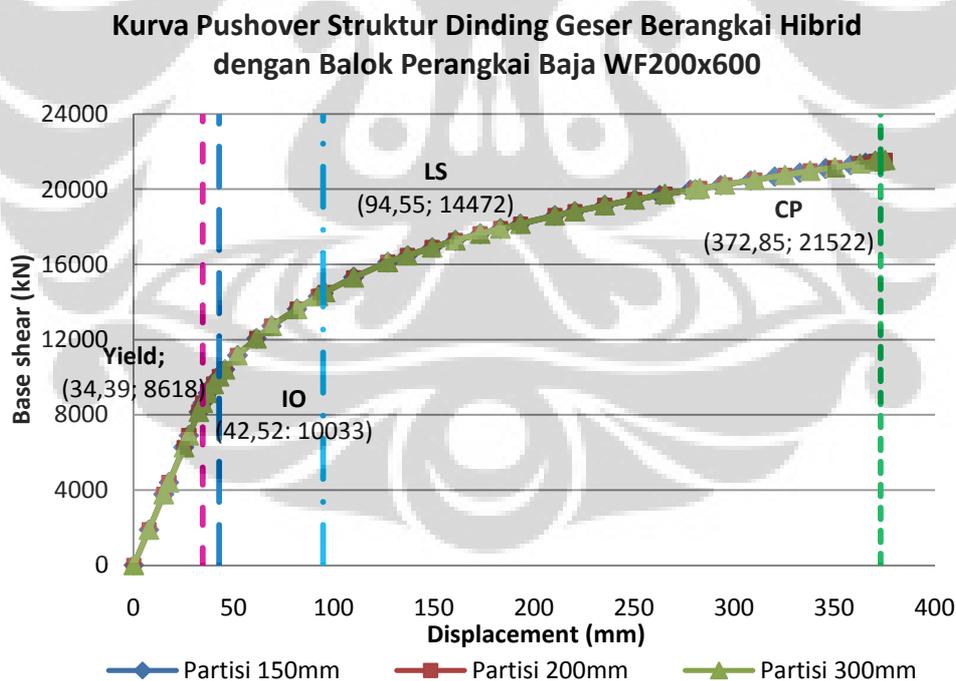
Sendi plastis pada balok perangkai baja dengan mekanisme leleh akibat geser pertama terbentuk ketika lendutan dan gaya geser dasar masing-masing sebesar 118,363mm dan 15757,609kN atau  $2,844V_n$ . Lokasi terjadinya sendi plastis pertama yang leleh akibat geser yaitu pada balok perangkai di lantai 4 dengan konfigurasi leleh terdistribusi merata di sepanjang bentang. Pada saat yang sama, sendi plastis momen di balok tersebut masih berada di level kinerja LS. Kondisi balok perangkai lainnya yaitu di lantai 2-3, dan 5 mengalami LS, di lantai 1, 6, 7 dan 9 mengalami IO dan di lantai 10 baru mencapai leleh. Semakin beban *pushover* dinaikkan, energi yang didisipasi semakin besar dengan terbentuknya sendi plastis yang leleh akibat geser pada balok perangkai baja di tiap lantai secara bertahap.

Setelah balok perangkai di lantai 1-7 telah berdeformasi inelastis akibat momen hingga level kinerja LS dan sebagian diantaranya telah ikut mengalami leleh akibat geser, di dasar semua kolom perimeter bangunan terjadi leleh. Ini terjadi ketika lendutan dan gaya geser dasar yang ditunjukkan pada kurva *pushover* hubungan lendutan dan gaya geser dasar menunjukkan nilai

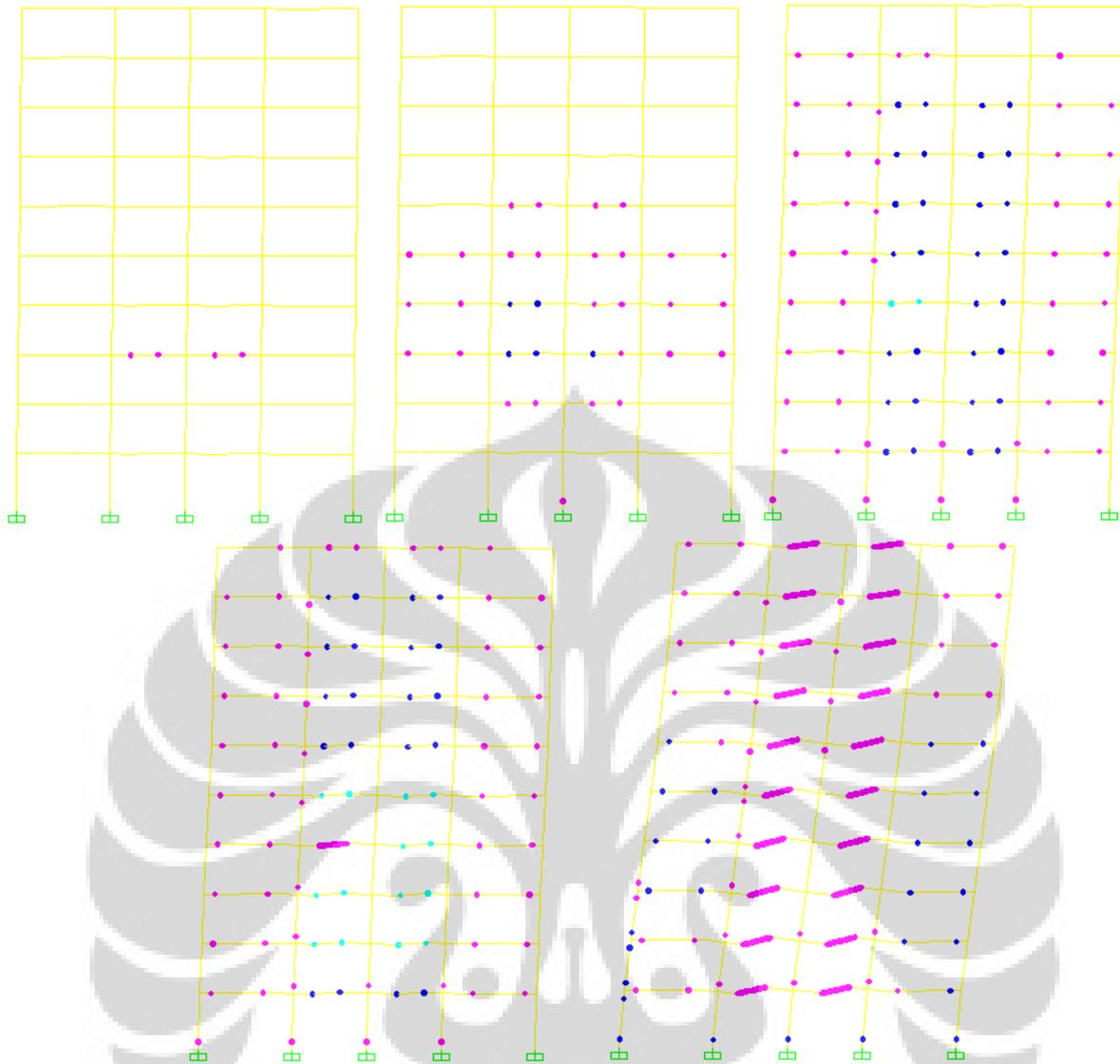
170,51mm dan 17555,39kN atau  $3,168V_n$ . Ketika di dasar semua kolom telah mengalami leleh, mekanisme disipasi energi melalui sendi plastis juga terjadi di balok perimeter bangunan di lantai 1-7.

Sendi plastis di dasar kolom di perimeter bangunan terus berdeformasi hingga mencapai level kinerja IO pada lendutan struktur mencapai 217,705mm dan gaya geser dasar sebesar 18771,85kN atau  $3,388V_n$ . Namun, tidak satu pun balok beton yang telah mencapai level kinerja tersebut. Level kinerja balok tidak meningkat meskipun di titik lendutan dan gaya geser dasar masing-masing sebesar 277,85mm dan 19955,027kN atau  $3,602V_n$ , semua sendi plastis di dasar kolom telah mencapai level kinerja IO. Balok beton baru mencapai level kinerja IO setelah lendutan dan gaya geser dasar masing-masing yaitu 352,89mm dan 21213,435kN atau  $3,829V_n$  dimana lokasi pertama terbentuknya adalah di lantai 4.

Struktur dinding geser berangkai hibrid dengan balok perangkai baja berdimensi WF200x600 mencapai kondisi di ambang keruntuhan atau level kinerja *Collapse Prevention* (CP) setelah terjadi lendutan sejauh 372,85mm. Pada saat terjadi lendutan ultimit yang dimonitor dari titik kontrol di pusat massa lantai 10, gaya geser dasar maksimum yang bekerja sebesar 21522,93kN atau  $3,885V_n$ . Lokasi sendi plastis pertama yang mengalami keruntuhan yaitu pada balok perangkai baja di lantai 3 dengan mekanisme keruntuhan akibat momen, sementara terjadi leleh akibat geser. Kondisi balok perangkai lainnya yaitu sendi plastis momen telah mencapai level kinerja LS dan sendi plastis geser mengalami leleh.



Gambar 4.9 Kurva *Pushover* Model Balok Perangkai WF200x600

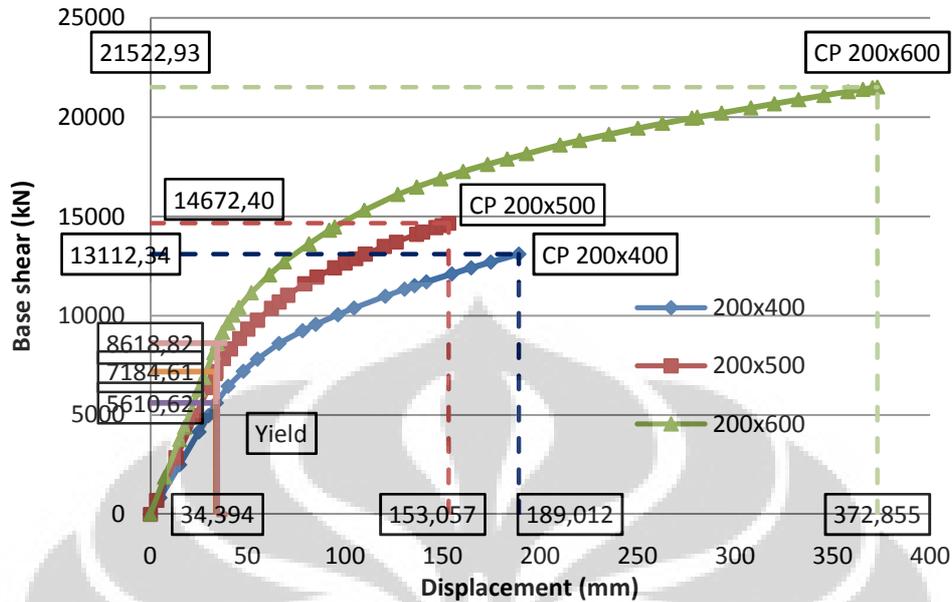


Gambar 4.10 Sendi Plastis Model Balok Perangkai WF200x600

Pada struktur beton di perimeter bangunan, tersebar sendi plastis di seluruh balok dan dasar kolom. Disipasi energi hingga level kinerja IO tersebar di balok di lantai 3-5 dan di dasar semua kolom. Kondisi balok di lantai lainnya yaitu telah mengalami leleh, tetapi belum mencapai level kinerja IO.

Secara umum ketiga model tersebut mengalami leleh pertama yaitu terbentuknya sendi plastis di balok perangkai baja dengan mekanisme leleh akibat momen. Kemudian berdeformasi plastis hingga mencapai di ambang keruntuhan di balok perangkai. Mekanisme keruntuhan yang terjadi saat level kinerja *Collapse Prevention* (CP) yaitu runtuh akibat momen. Perilaku geser saat di ambang keruntuhan yaitu pada model dengan balok perangkai WF200x400 dan WF200x500 tetap elastis.

### Kurva Pushover Struktur Dinding Geser Berangkai Hibrid



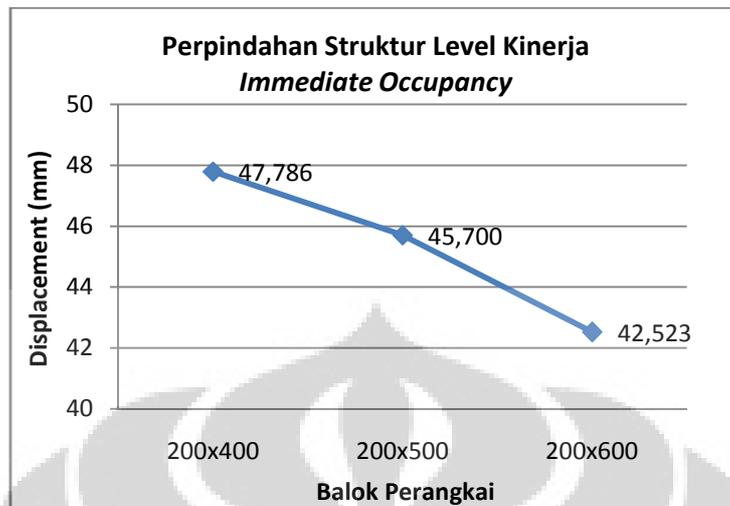
Gambar 4.11 Variasi Kurva *Pushover* Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja

Pengaruh dari variasi dimensi balok terhadap kinerja struktur diilustrasikan sebagai perbandingan antara kurva *pushover* dari tiap-tiap model. Berdasarkan Gambar 4.11, gaya geser dasar maksimum meningkat dengan kenaikan dimensi balok perangkai baja. Gaya geser dasar pada kondisi ultimit yang terbesar yaitu pada model dengan balok perangkai WF200x600 sebesar 21522,93kN. Lendutan pada kondisi ultimit yang terbesar juga terdapat pada model dengan balok perangkai WF200x600 yaitu sejauh 372,85mm. Dalam SNI 1726-2002 disyaratkan kinerja pada kondisi ultimit yaitu deformasi yang terjadi dibatasi tidak boleh lebih besar dar 0,02*h* dimana *h* adalah tinggi bangunan. Untuk bangunan 10 lantai yang digunakan sebagai model dengan tinggi *h* = 32,5m, deformasi pada kondisi ultimit yang terjadi tidak boleh lebih dari 650mm. Dengan demikian deformasi maksimum yang terjadi telah memenuhi ketentuan.

Berdasarkan grafik pengaruh variasi dimensi terhadap lendutan struktur saat terjadi level kinerja *Immediat Occupancy* (IO) dan *Life Safety* (LS) dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi dimensi balok perangkai baja yang digunakan, lendutan level kinerja yang diperoleh akan semakin rendah. Hal tersebut disebabkan dimensi balok yang lebih besar akan memperkaku struktur sehingga mereduksi lendutan akibat gempa.

Namun hal tersebut tidak berlaku ketika pengaruh variasi dimensi balok perangkai baja terhadap lendutan maksimum di ambang keruntuhan ditinjau. Sebelum mencapai kondisi di ambang keruntuhan, struktur dengan balok perangkai baja berdimensi WF200x600 mendisipasi energi lebih besar dengan membentuk sendi plastis yang leleh dengan mekanisme geser sehingga mampu berdeformasi lebih jauh. Mekanisme disipasi energi

melalui sendi plastis yang leleh akibat geser tidak terjadi pada struktur dengan balok perangkai berdimensi WF200x400 dan WF200x500.



(a)



(b)

Gambar 4.12 Variasi Lendutan Terhadap Dimensi Balok Perangkai pada Level Kinerja (a) *Immediate Occupancy*, (b) *Life Safety*

#### 4.4.2. Faktor Kuat Lebih dan Daktilitas Tersedia

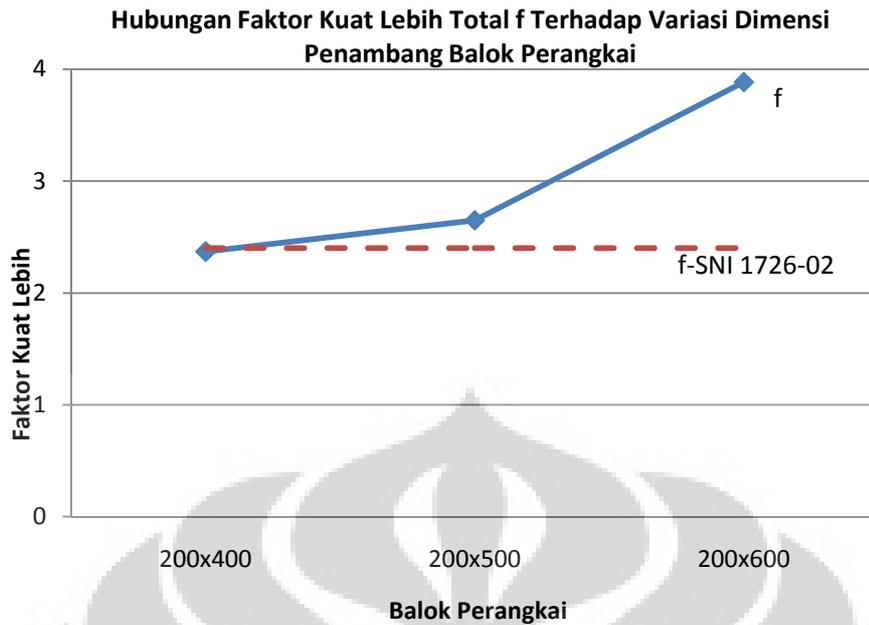
Tabel 4.6 merangkum hubungan variasi dimensi dan diskretisasi pada balok perangkai baja terhadap lendutan dan gaya geser dasar pada kondisi layan dengan beban gempa nominal, kondisi leleh dan kondisi ultimit. Nilai-nilai tersebut digunakan untuk menganalisis daktilitas yang tersedia oleh struktur dinding geser gerangkai hibrid dengan balok perangkai baja. Diskretisasi yang dilakukan terhadap balok perangkai baja tidak mempengaruhi perilaku global dari seluruh struktur.

Tabel 4.6 Lendutan dan Gaya Geser Dasar Analisis Statik Nonlinier

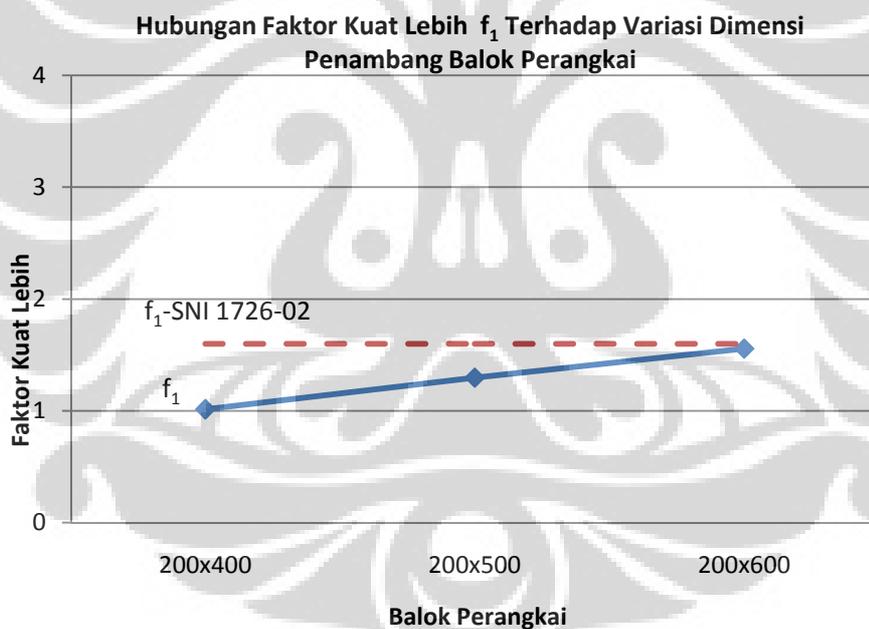
Balok Perangkai		Parameter	Kriteria		
Profil	Diskretisasi		Kondisi Layan	Kondisi Leleh	Kondisi Ultimit
WF 200x400	150mm	Lendutan (mm)	33,398	33,843	189,012
		Gaya geser dasar (kN)	5536,790	5610,617	13112,337
	200mm	Lendutan (mm)	33,637	38,043	190,543
		Gaya geser dasar (kN)	5536,790	6200,146	13151,657
	300mm	Lendutan (mm)	33,398	33,843	192,579
		Gaya geser dasar (kN)	5536,790	5610,622	13217,139
WF 200x500	150mm	Lendutan (mm)	26,029	33,758	153,057
		Gaya geser dasar (kN)	5539,700	7184,610	14672,402
	200mm	Lendutan (mm)	26,029	33,758	153,057
		Gaya geser dasar (kN)	5539,700	7184,610	14672,387
	300mm	Lendutan (mm)	26,029	33,758	153,056
		Gaya geser dasar (kN)	5539,700	7184,610	14672,354
WF200x600	150mm	Lendutan (mm)	22,107	34,394	372,855
		Gaya geser dasar (kN)	5539,900	8618,817	21522,927
	200mm	Lendutan (mm)	22,107	34,394	375,130
		Gaya geser dasar (kN)	5539,900	8618,856	21564,055
	300mm	Lendutan (mm)	22,107	34,394	375,130
		Gaya geser dasar (kN)	5539,900	8618,856	21564,060

Tabel 4.7 Faktor Kuat Lebih Model Struktur

Balok Perangkai Baja		Tarf Kinerja Struktur			
Profil	Diskretisasi	$\mu$	f	$f_1$	$f_2$
WF200x400	150mm	5,585	2,368	1,013	2,337
	200mm	5,009	2,375	1,120	2,121
	300mm	5,690	2,387	1,013	2,356
WF200x500	150mm	4,534	2,649	1,297	2,042
	200mm	4,534	2,649	1,297	2,042
	300mm	4,534	2,649	1,297	2,042
WF200x600	150mm	10,841	3,885	1,556	2,497
	200mm	10,907	3,892	1,556	2,502
	300mm	10,907	3,892	1,556	2,502
SNI 1726-2002		4	2,4	1,6	1,51



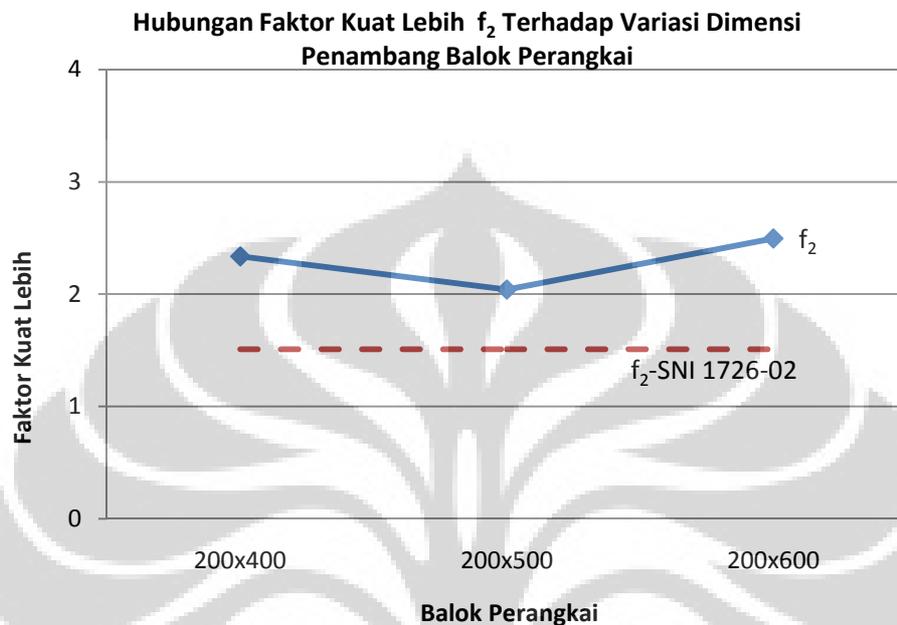
Gambar 4.13 Variasi Faktor Kuat Lebih Total Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja



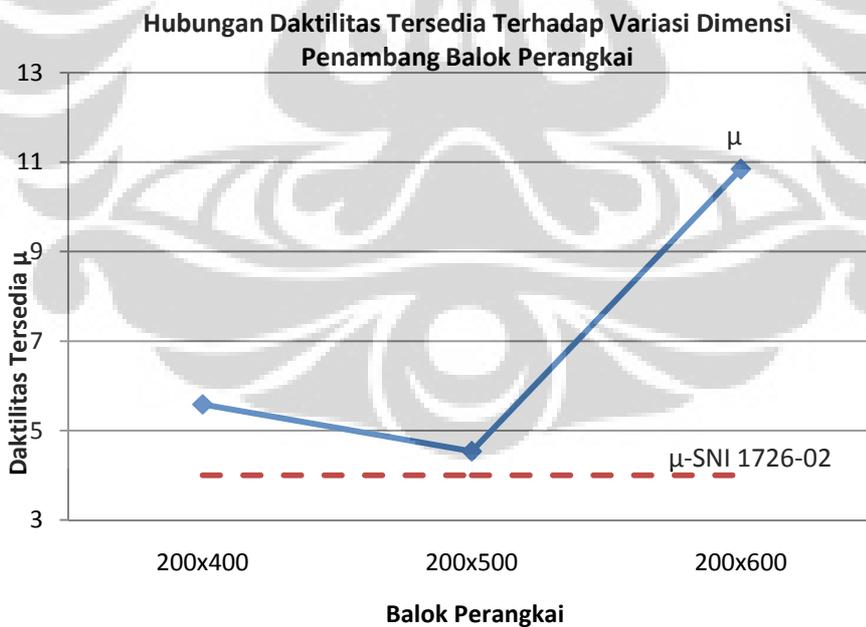
Gambar 4.14 Variasi Faktor Kuat Lebih  $f_1$  Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja

Hubungan antara variasi balok perangkai dengan rasio antara gaya geser maksimum dengan gaya geser nominal dari Gempa Rencana atau disebut faktor kuat lebih total  $f$  ditunjukkan pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.13. Semakin tinggi profil balok perangkai yang digunakan maka faktor kuat lebih total semakin meningkat. Nilai faktor kuat lebih total dibatasi untuk struktur dinding geser berangkai sebesar 2,4 (SNI 1726-2002, 2002).

Untuk persyaratan faktor kuat lebih beban dan bahan yang terkandung dalam struktur  $f_1$  yang ditetapkan sebesar 1,6, nilai tersebut tidak mampu dicapai oleh ketiga model dengan semua variasi dimensi balok perangkai. Faktor kuat lebih  $f_1$  dari model dengan balok perangkai WF200x400, WF200x500 dan WF200x600 masing-masing hanya mencapai 1,013, 1,297 dan 1,556 atau hanya sekitar 63,31%, 81,06% dan 97,25% dari batas yang ditentukan.



Gambar 4.15 Variasi Faktor Kuat Lebih  $f_2$  Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja



Gambar 4.16 Variasi Daktilitas Tersedia Terhadap Dimensi Balok Perangkai Baja

Hasil yang lebih baik ditunjukkan oleh nilai faktor kuat lebih akibat kehiperstatikan struktur yang menyebabkan terjadinya redistribusi gaya-gaya oleh proses pembentukan sendi plastis secara bertahap, dinotasikan dengan  $f_2$ , dari masing-masing model. Besarnya rasio antara gaya geser dasar maksimum yang dicapai pada kondisi ultimit dengan gaya geser dasar ketika terjadi leleh pertama untuk model dengan balok perangkai WF200x400, WF200x500 dan WF200x600 masing-masing adalah 2,337, 2,042 dan 2,497. Nilai yang diperoleh ketiga model tersebut melebihi persyaratan sebesar  $f_2 = 1,51$ .

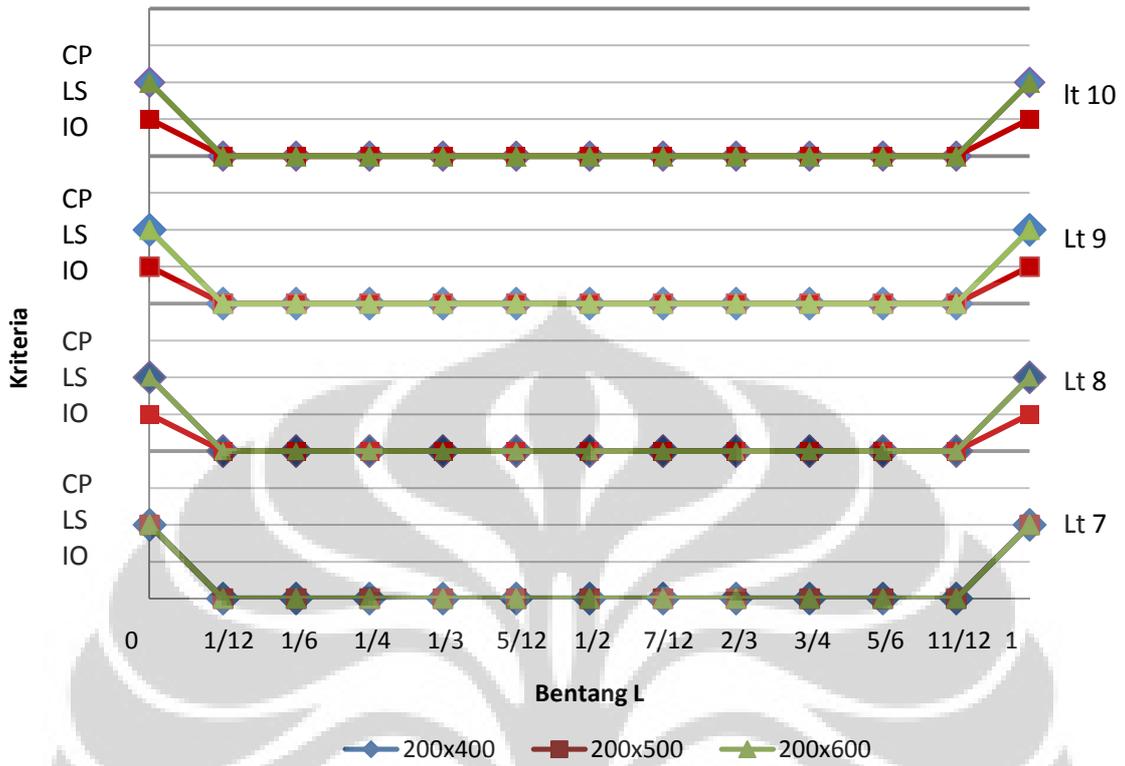
Berdasarkan grafik hubungan antara daktilitas dengan variasi dimensi balok penampang, daktilitas tersedia  $\mu$  dari ketiga model dinding geser berangkai hibrid telah memenuhi batasan daktilitas tersedia yang ditetapkan SNI 1726-2002 untuk struktur dinding geser berangkai. Daktilitas tersedia maksimum diberikan oleh model dengan balok perangkai baja WF200x600 yaitu sebesar  $\mu = 10,84$ . Nilai daktilitas tersedia pada model dengan balok perangkai baja WF200x400 dan WF200x500 adalah sebesar  $\mu = 5,585$  dan  $\mu = 4,534$  atau sekitar 54,772% dan 35,245% lebih besar dari yang disyaratkan. Balok perangkai baja dengan dimensi WF200x600 mengalami leleh akibat mekanisme momen dan leleh sehingga mampu berdeformasi dan mendisipasi energi lebih besar. Meskipun gaya geser dasar ultimit lebih rendah, daktilitas tersedia dari struktur dengan balok perangkai baja berdimensi WF200x400 lebih besar dibandingkan dengan struktur dengan balok perangkai baja berdimensi WF200x500 dengan perbedaan sekitar 23%.

#### **4.4.3. Distribusi Sendi Plastis Balok Perangkai Baja**

Distribusi sendi plastis yang terjadi akibat momen dan geser beserta kriteria kinerja berdasarkan FEMA 356 pada balok perangkai baja ketika model struktur didorong hingga di ambang keruntuhan dipetakan pada Gambar 4.17-22. Distribusi sendi plastis dilakukan berdasarkan diskretisasi yang telah dilakukan yaitu setiap 150mm, 200mm dan 300mm untuk mengevaluasi jenis dan bagaimana penjalaran mekanisme leleh pada balok perangkai baja.

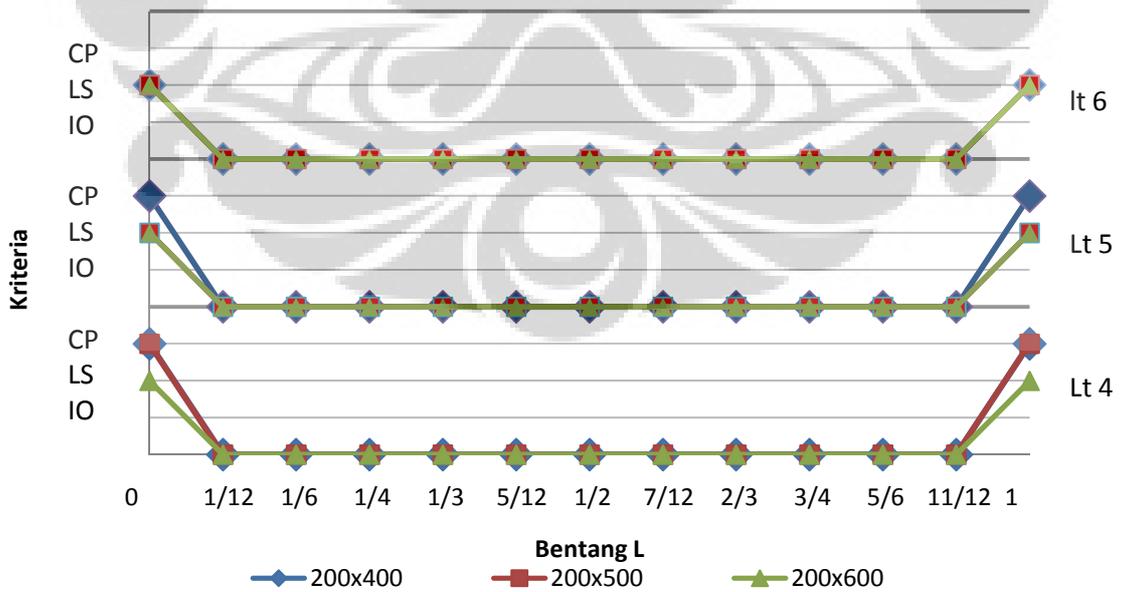
Berdasarkan pemetaan berikut, ketiga model struktur runtuh akibat momen, sedangkan geser berada pada kondisi elastis, kecuali model WF200x600 dimana telah terjadi leleh akibat geser. Keruntuhan terjadi umumnya berada pada daerah lantai 4-5 dari 10 lantai model struktur yang diteliti.

Kriteria Sendi Plastis Moment Balok Perangkai Baja



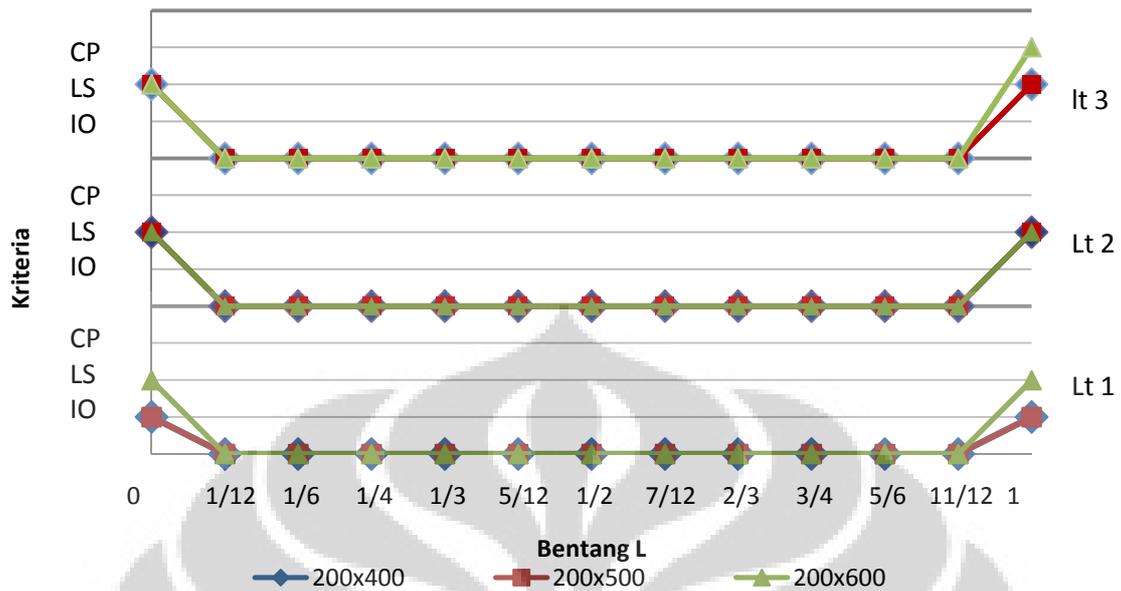
(a) Lantai 7-10

Kriteria Sendi Plastis Moment Balok Perangkai Baja



(b) Lantai 4-6

### Kriteria Sendi Plastis Moment Balok Perangkai Baja

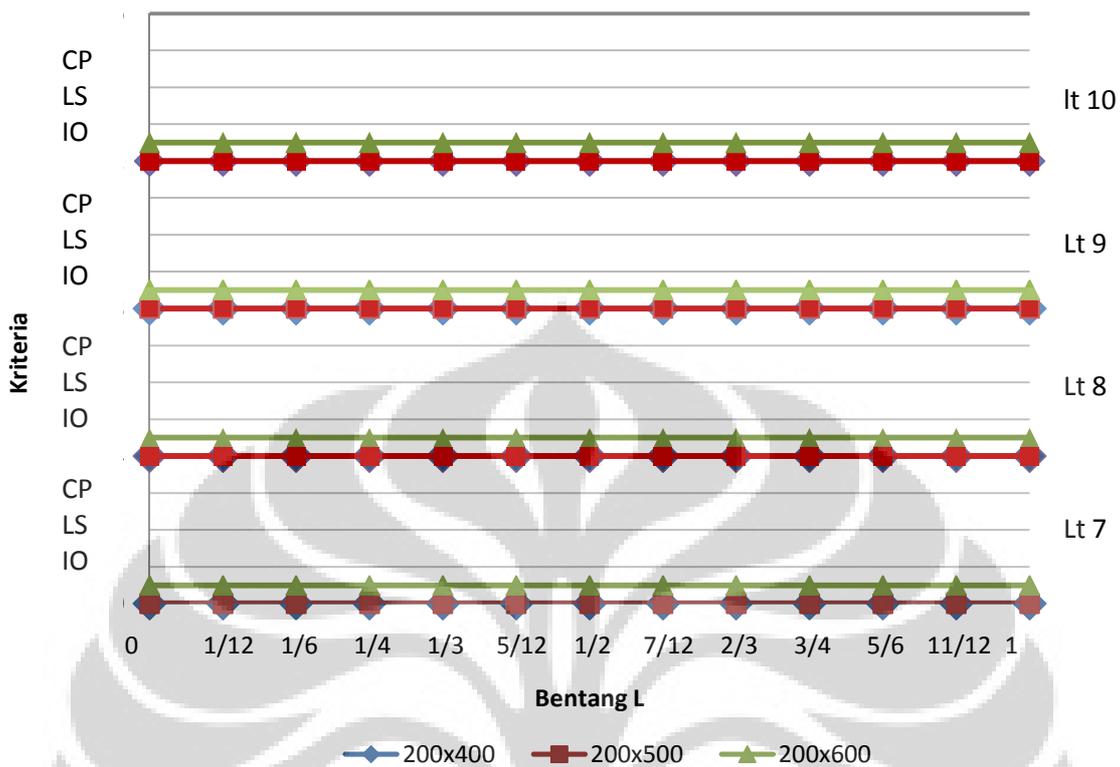


(c) Lantai 1-3

Gambar 4.17 Distribusi sendi plastis momen pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 150 mm

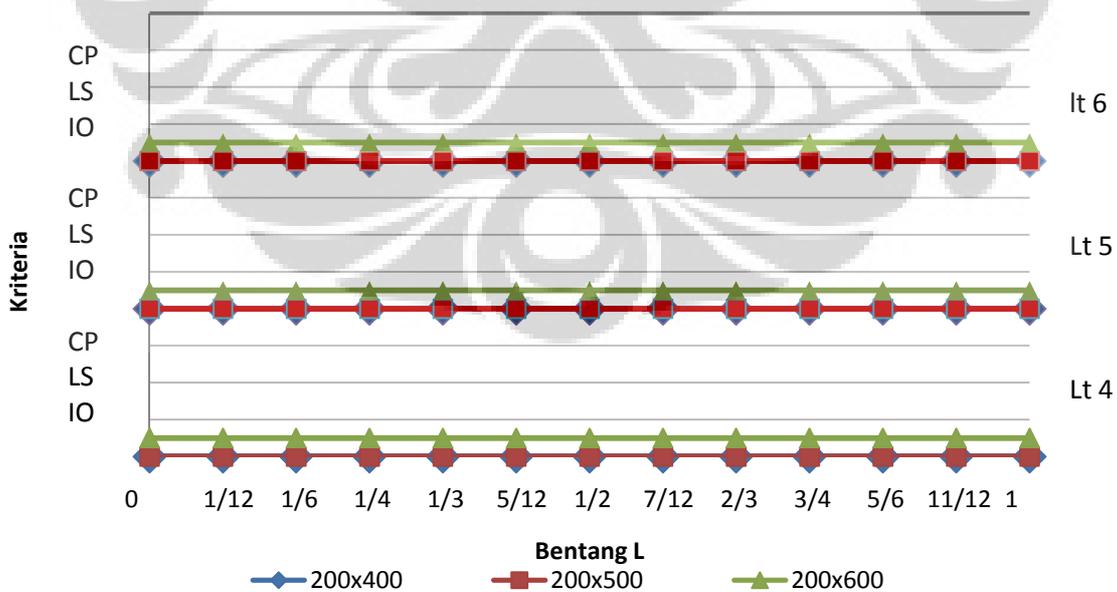
Berdasarkan Gambar 4.17 di atas, lokasi terjadinya keruntuhan akibat momen pada balok perangkai baja yang didiskretisasi setiap 150mm yaitu hanya di masing-masing ujungnya. Sendi plastis yang tersebar di tengah bentang balok belum melewati batas elastis. Keruntuhan struktural pada level kinerja *Collapse Prevention* terjadi pada balok perangkai yang berada di sekitar lantai 3-5.

### Kriteria Sendi Plastis Geser Balok Perangkai Baja



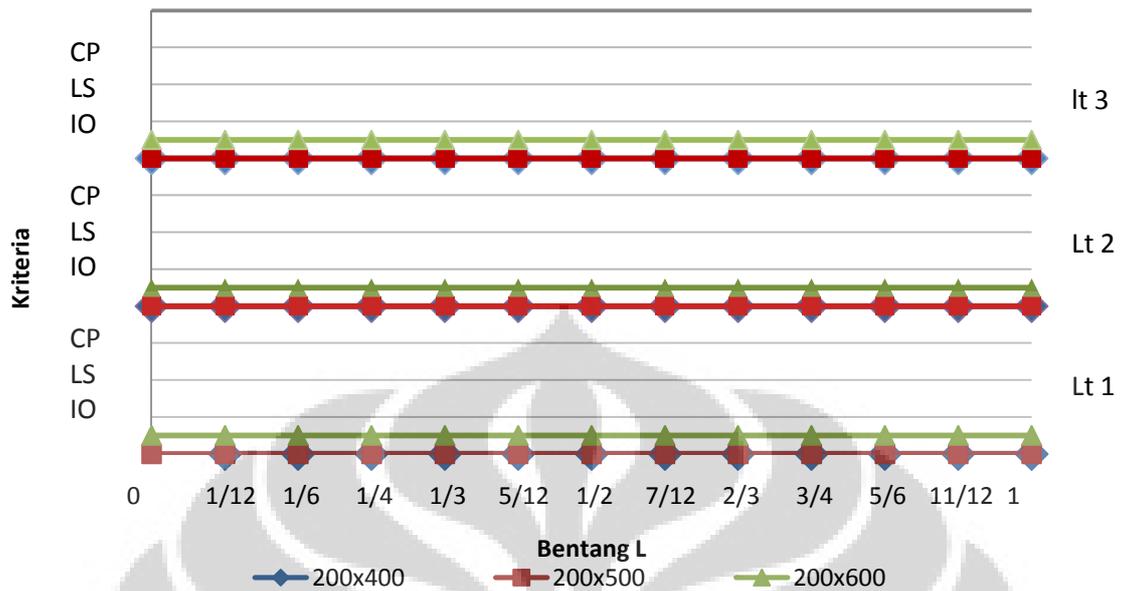
(a) Lantai 7-10

### Kriteria Sendi Plastis Geser Balok Perangkai Baja



(b) Lantai 4-6

### Kriteria Sendi Plastis Geser Balok Perangkai Baja

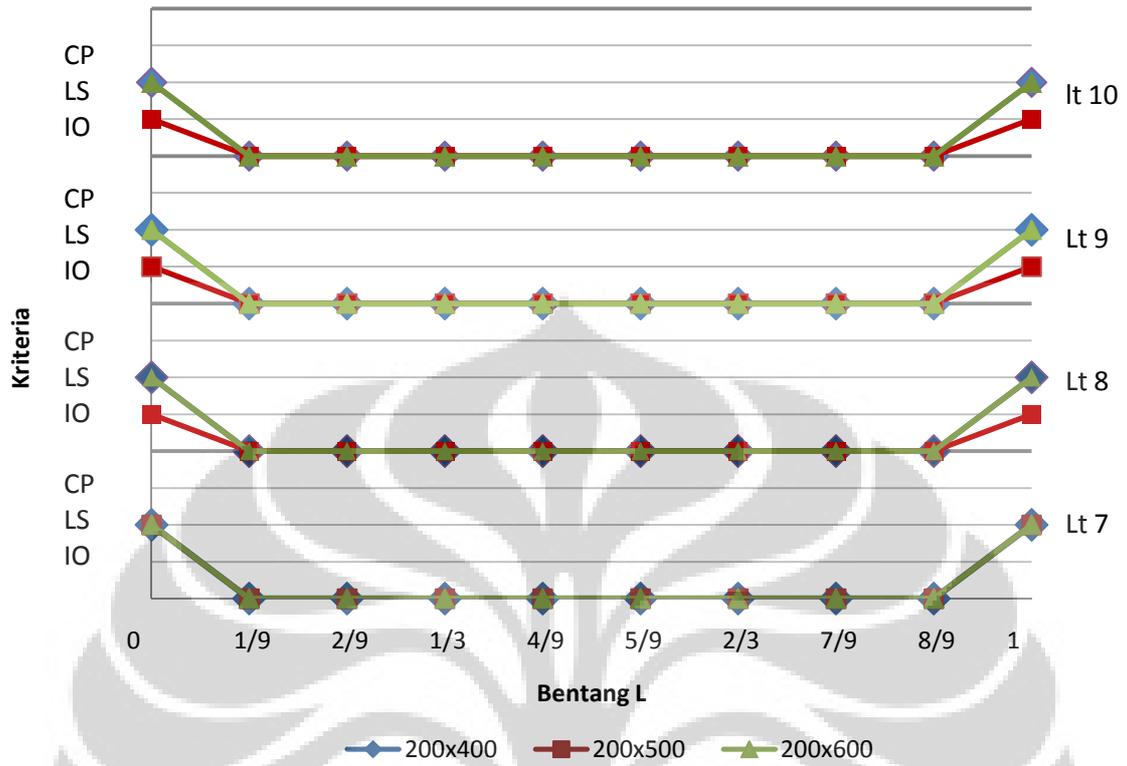


(a) Lantai 1-3

Gambar 4.18 Distribusi sendi plastis geser pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 150 mm

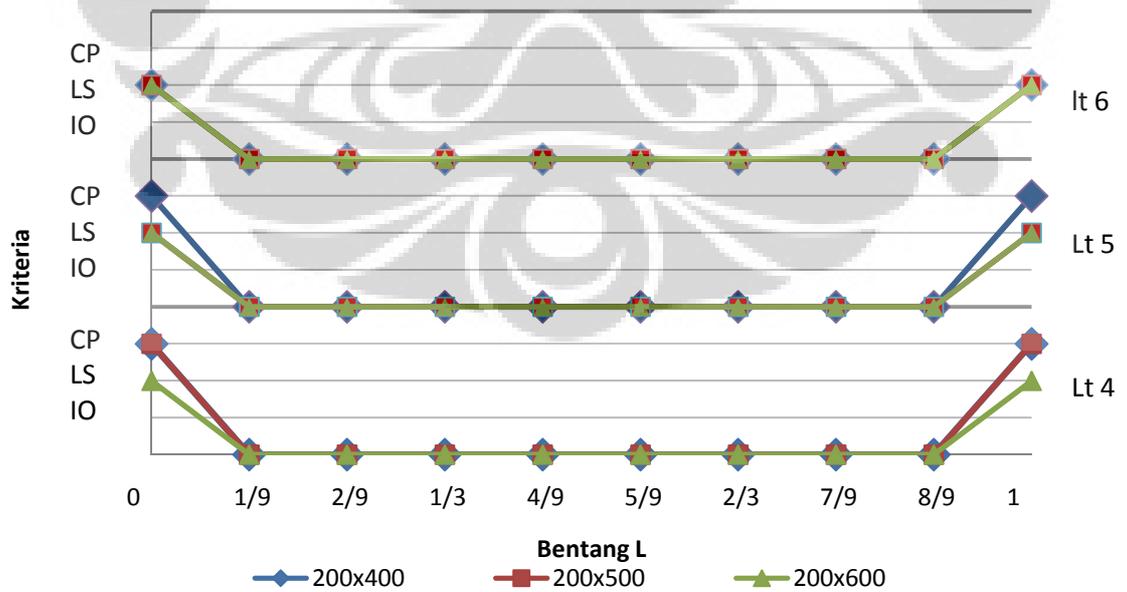
Perilaku geser dari balok perangkai baja diilustrasikan dengan pemetaan distribusi sendi plastis pada Gambar 4.18 di atas. Terjadinya leleh akibat geser pada balok perangkai baja yang didiskretisasi setiap 150mm yaitu hanya pada struktur dengan balok perangkai WF200x600. Pada saat level kinerja *Collapse Prevention*, geser pada struktur dengan balok perangkai berdimensi WF200x400 dan WF200x 500 tidak mengalami leleh.

Kriteria Sendi Plastis Moment Balok Perangkai Baja



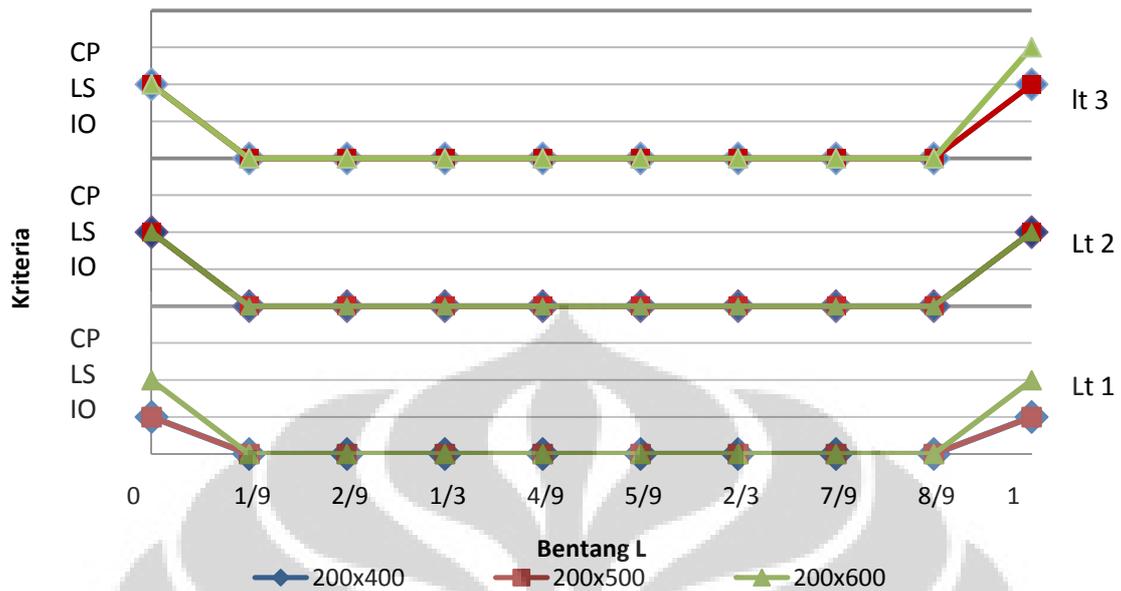
(a) Lantai 7-10

Kriteria Sendi Plastis Moment Balok Perangkai Baja



(b) Lantai 4-6

### Kriteria Sendi Plastis Moment Balok Perangkai Baja

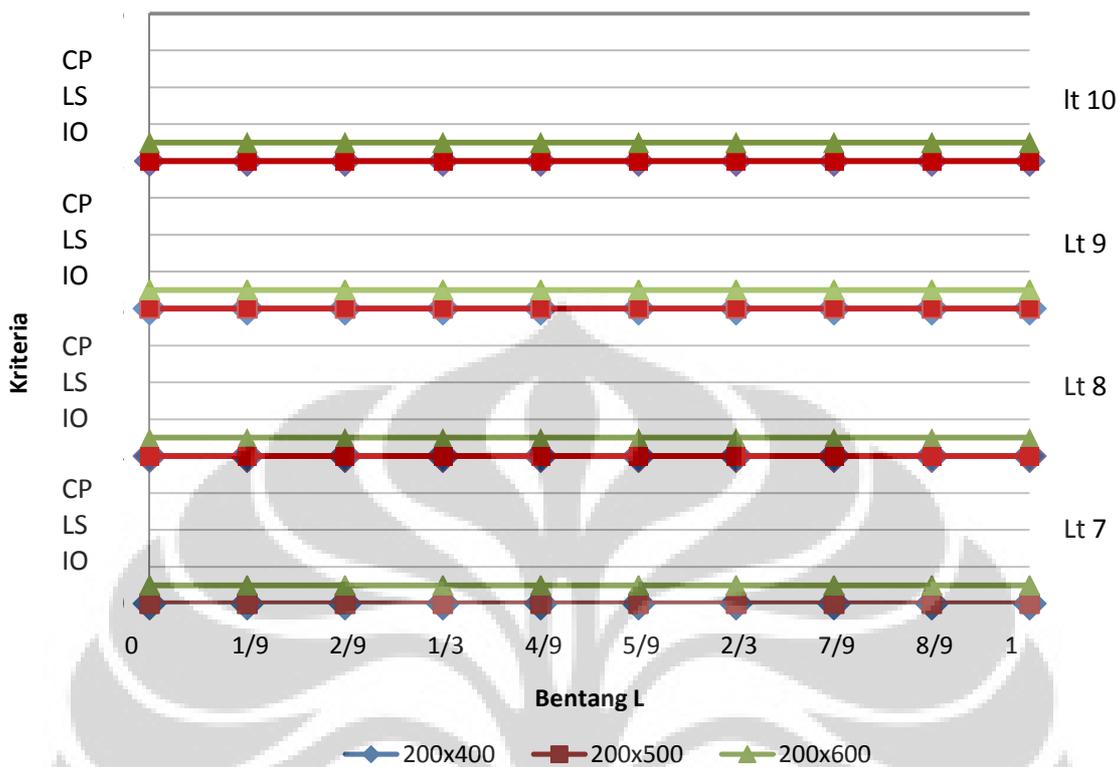


(c) Lantai 1-3

Gambar 4.19 Distribusi sendi plastis momen pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 200mm

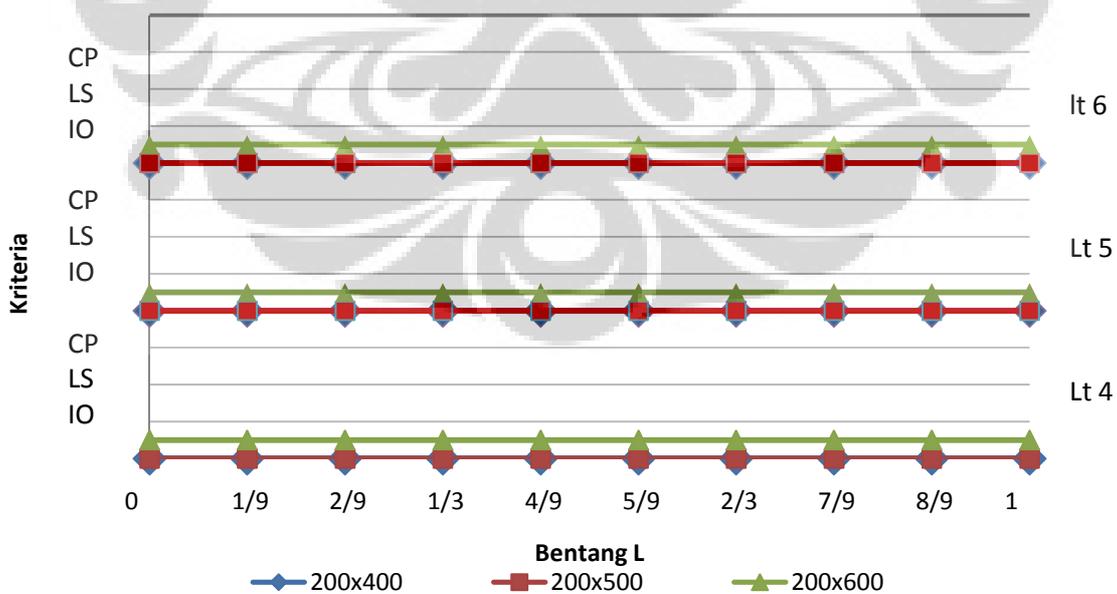
Berdasarkan Gambar 4.19 di atas, lokasi terjadinya keruntuhan akibat momen pada balok perangkai baja yang didiskretisasi setiap 200mm yaitu hanya di masing-masing ujungnya. Sendi plastis yang tersebar di tengah bentang balok masih dalam kondisi elastis. Ketika level kinerja *Collapse Prevention* tercapai, keruntuhan struktural terjadi pada balok perangkai baja yang berada di sekitar lantai 3-5.

### Kriteria Sendi Plastis Geser Balok Perangkai Baja



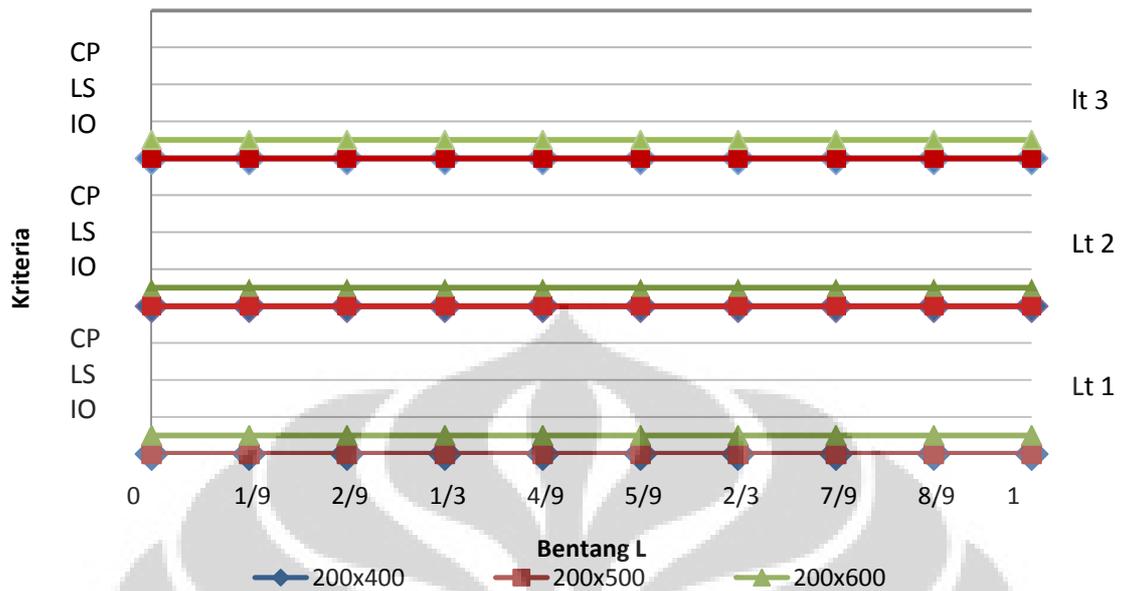
(a) Lantai 7-10

### Kriteria Sendi Plastis Geser Balok Perangkai Baja



(b) Lantai 4-6

### Kriteria Sendi Plastis Geser Balok Perangkai Baja

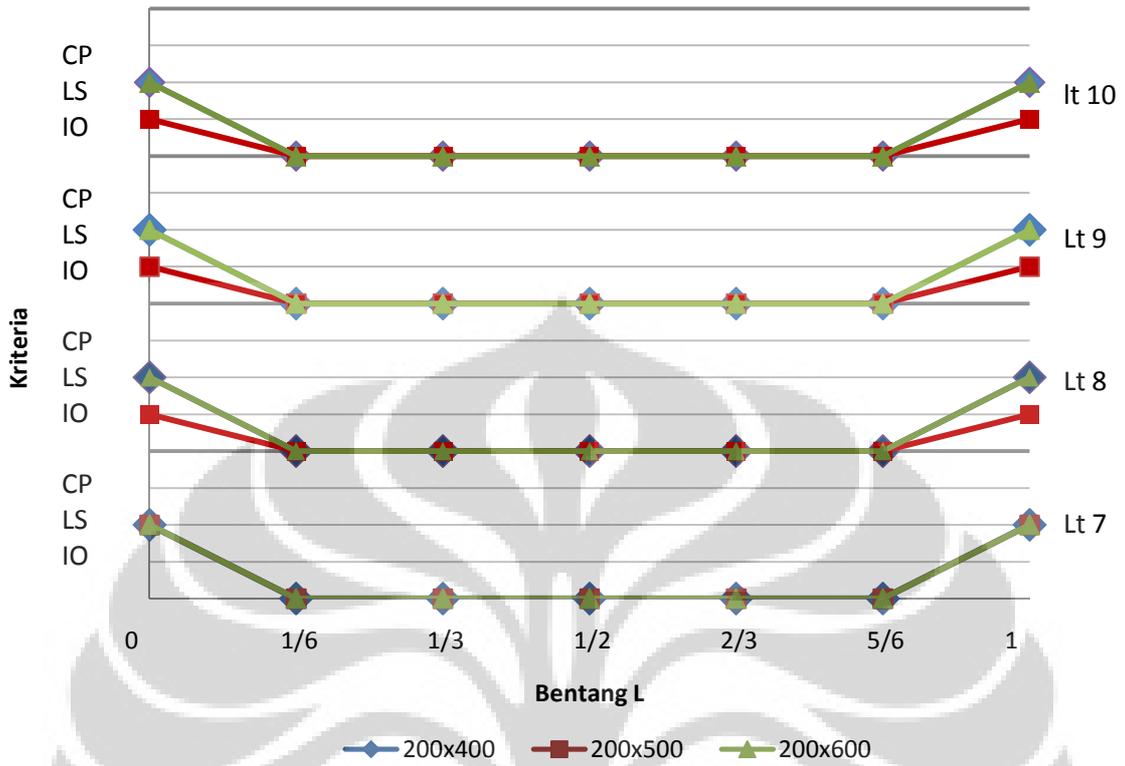


(c) Lantai 1-3

Gambar 4.20 Distribusi sendi plastis geser pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 200 mm

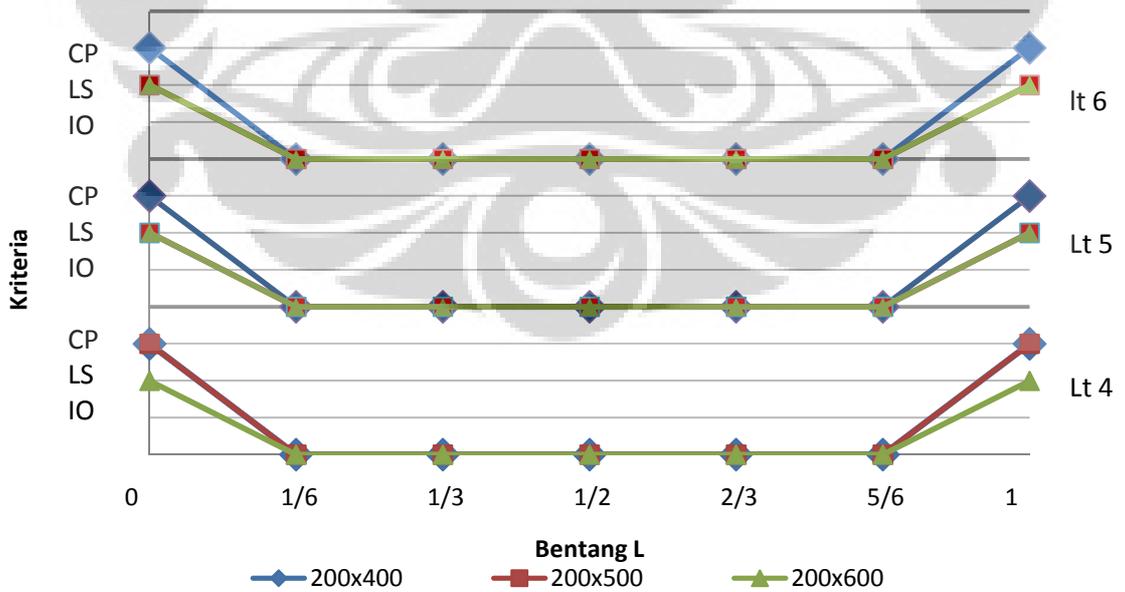
Perilaku geser dari balok perangkai baja diilustrasikan dengan pemetaan distribusi sendi plastis pada Gambar 4.20 di atas. Terjadinya leleh akibat geser pada balok perangkai baja yang didiskretisasi setiap 200mm yaitu hanya pada struktur dengan balok perangkai WF200x600 dan merata di seluruh lantai. Pada saat level kinerja *Collapse Prevention*, geser pada struktur dengan balok perangkai berdimensi WF200x400 dan WF200x 500 belum melewati titik lelehnya.

Kriteria Sendi Plastis Moment Balok Perangkai Baja



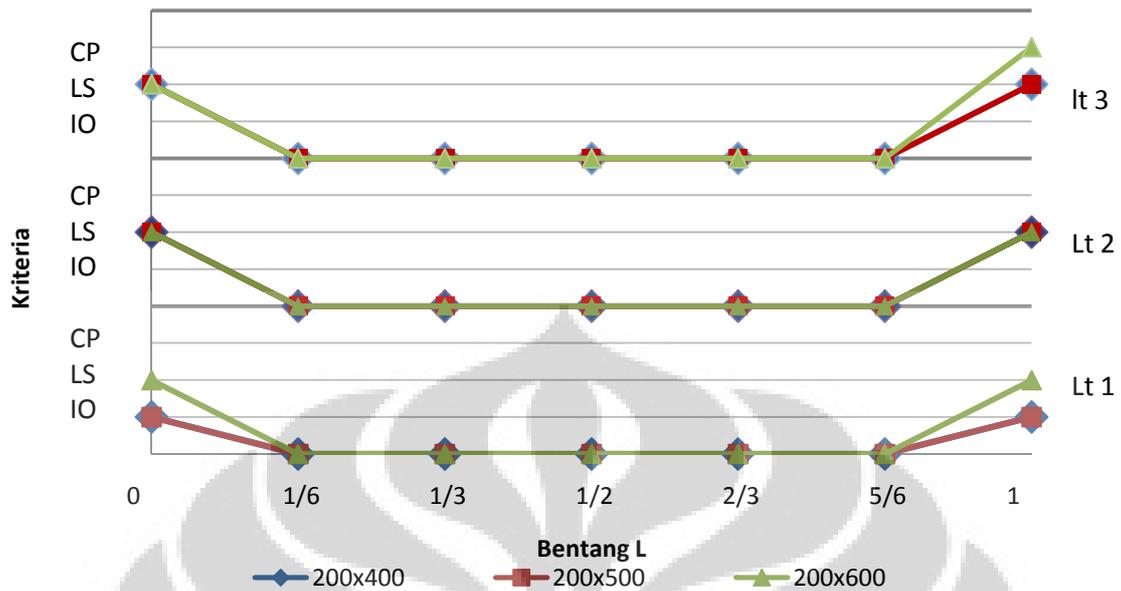
(a) Lantai 7-10

Kriteria Sendi Plastis Moment Balok Perangkai Baja



(b) Lantai 4-6

### Kriteria Sendi Plastis Moment Balok Perangkai Baja

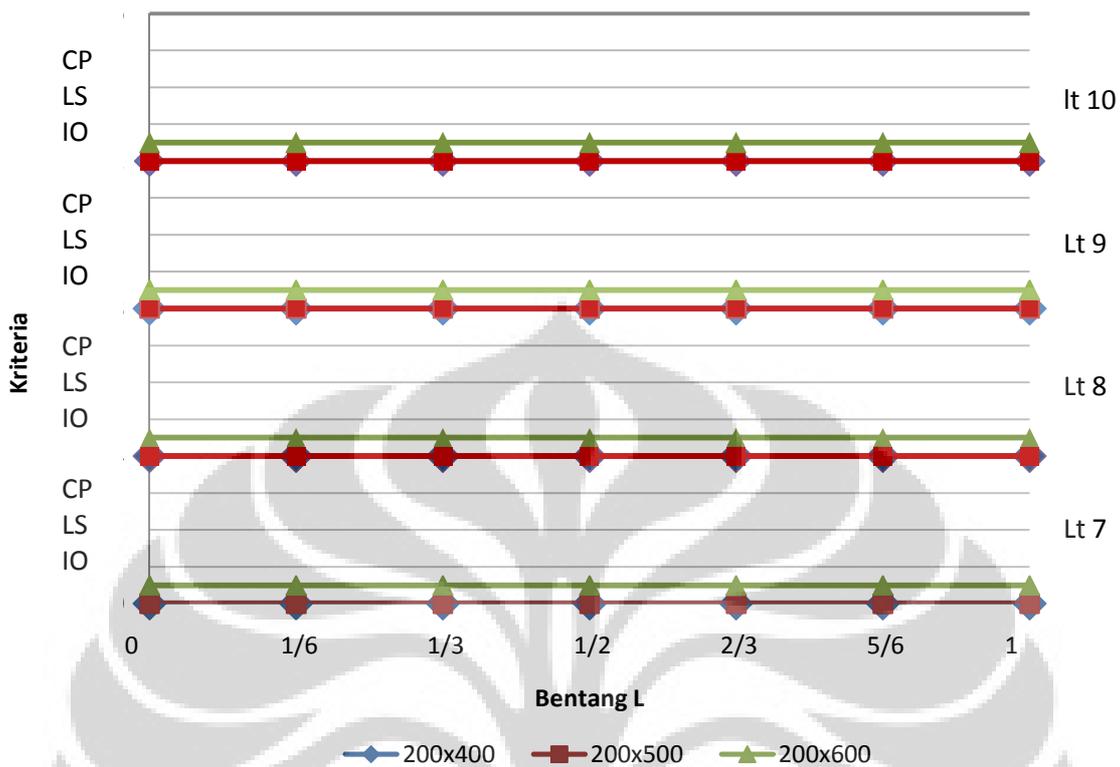


(c) Lantai 1-3

Gambar 4.21 Distribusi sendi plastis momen pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 300 mm

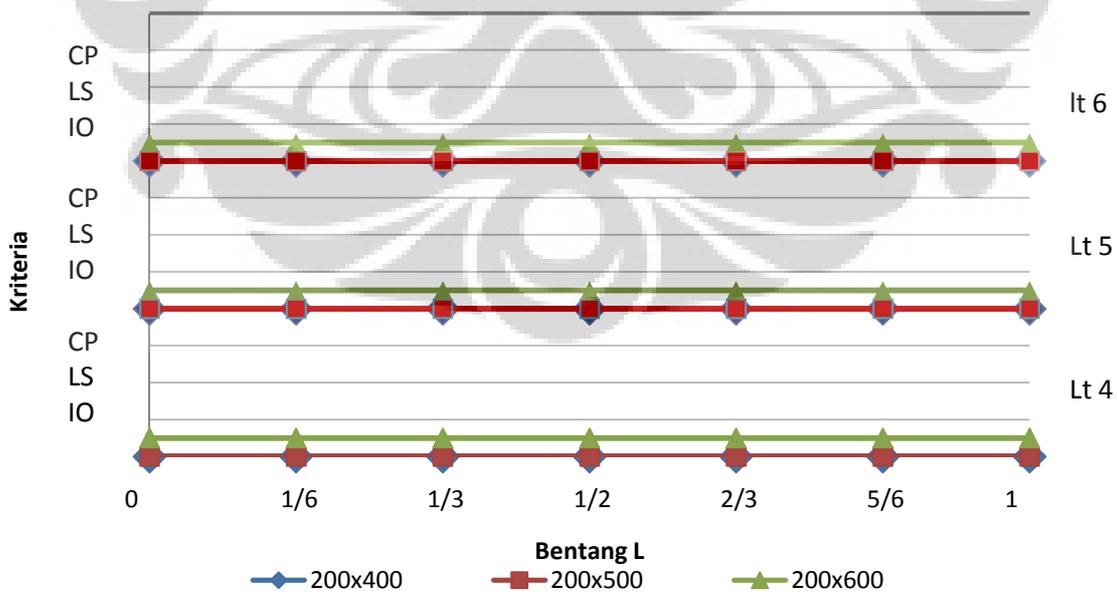
Berdasarkan pemetaan sendi plastis balok perangkai baja yang didiskretisasi setiap 300mm pada Gambar 4.21 di atas, lokasi terjadinya keruntuhan hanya di masing-masing ujungnya. Sendi plastis yang tersebar di tengah bentang balok masih dalam kondisi elastis. Ketika level kinerja *Collapse Prevention* tercapai, keruntuhan struktural terjadi pada balok perangkai baja yang berada di sekitar lantai 3-5.

### Kriteria Sendi Plastis Geser Balok Perangkai Baja



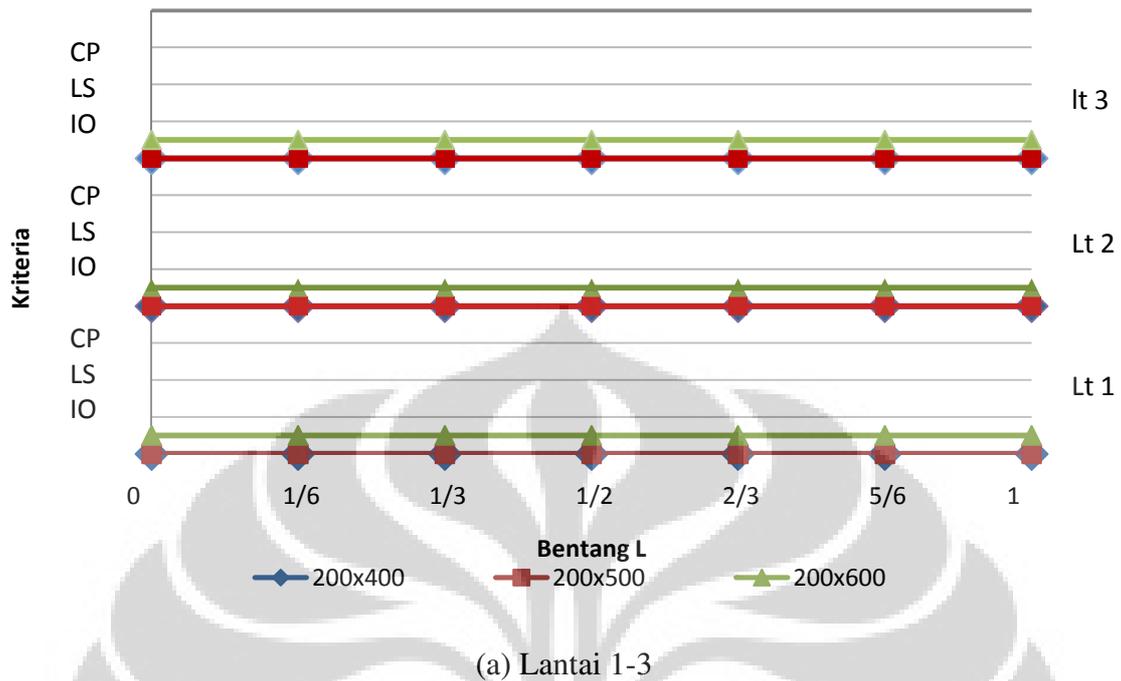
(a) Lantai 7-10

### Kriteria Sendi Plastis Geser Balok Perangkai Baja



(b) Lantai 4-6

### Kriteria Sendi Geser Geser Balok Perangkai Baja



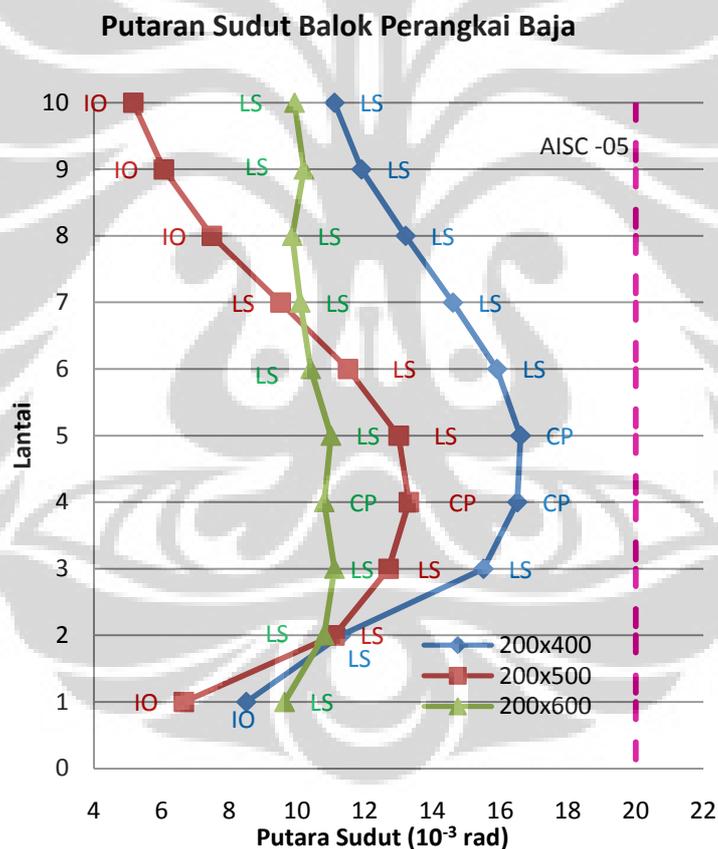
Gambar 4.22 Distribusi sendi plastis geser pada balok perangkai untuk diskretisasi setiap 300 mm

Perilaku geser balok perangkai baja ketika struktur di ambang keruntuhan atau *Collapse Prevention* (CP) diilustrasikan dengan pemetaan distribusi sendi plastis pada Gambar 4.22 di atas. Terjadinya leleh akibat geser pada balok perangkai yang didiskretisasi setiap 300mm yaitu hanya pada struktur dengan balok perangkai WF200x600 dan merata di seluruh lantai. Pada saat level kinerja CP, geser pada struktur dengan dimensi WF200x400 dan WF200x 500 belum melewati titik lelehnya.

Tabel 4.8 Putaran Sudut Plastis Balok Perangkai ketika *Collapse Prevention*

Lantai	Putaran Sudut Plastis $\theta_p$ ( $10^{-3}$ rad)		
	WF200x400	WF200x500	WF200x600
10	11,1	5,16	9,927
9	11,9	6,067	10,2
8	13,2	7,48	9,86
7	14,6	9,51	10,1
6	15,9	11,5	10,4
5	16,5	13	11
4	16,5	13,3	10,8
3	15,5	12,7	11,1
2	11,3	11,1	10,8
1	8,5	6,654	9,629
$\theta_y$	5,376	4,372	3,693

Besarnya putaran sudut pada balok perangkai baja ketika di ambang keruntuhan atau level kinerja *Collapse Prevention* dirangkum dalam Tabel 4.8 dan Gambar 4.23. Besarnya putaran sudut pada struktur dengan balok perangkai berdimensi WF200x400 dan WF200x500 bervariasi pada masing-masing tingkat dimana nilai maksimum terdapat di sekitar lantai 3-5 dan minimum di lantai teratas atau lantai 10. Bila dibandingkan dengan balok perangkai berdimensi WF200x400, putaran sudut pada struktur dengan balok perangkai WF200x500 mengalami reduksi. Besarnya putaran sudut pada struktur dengan balok perangkai WF200x600 relatif merata di seluruh tingkat dimana semua sendi plastis momen telah mencapai level kinerja *Life Safety*. Besarnya putaran sudut plastis yang terjadi pada balok perangkai ketika deformasi struktur mengalami inelastis dibatasi sebesar 0,02rad untuk balok perangkai dengan dominasi perilaku lentur (AISC, 2005). Berdasarkan hasil yang diplot pada Gambar 4.23 diperoleh bahwa batas putaran sudut inelastis yang ditetapkan tidak dilampaui oleh putaran sudut plastis maksimum dari balok perangkai ketika terjadi *Collapse Prevention*.



Gambar 4.23 Putaran Sudut Plastis Balok Perangkai Baja ketika *Collapse Prevention*

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari keseluruhan hasil penelitian ini adalah

1. Analisis statik nonlinier dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur terhadap beban gempa
2. Dengan meningkatkan dimensi balok perangkai baja, gaya geser maksimum akan meningkat. Dari ketiga model, gaya geser dasar terbesar pada kondisi ultimit yaitu 21522,927 kN untuk model WF200x600, kemudian 14672,402kN untuk model WF200x500 dan 13112,337kN untuk model WF200x400.
3. Lendutan maksimum pada kondisi ultimit yaitu sejauh 283mm untuk model WF200x600, 185mm untuk model WF200x400 dan 147,25 untuk model WF200x600.
4. Daktilitas tersedia  $\mu$  dari ketiga model struktur dinding berangkai hibrid yaitu sebesar 10,841 untuk balok perangkai WF200x600, 5,585 untuk balok WF200x400 dan 4,534 untuk balok WF200x500. Nilai daktilitas tersedia dari ketiga model lebih besar dari batas yang ditentukan dalam SNI 1726-2002 yaitu  $\mu = 4$
5. Faktor kuat lebih total dari struktur dinding geser berangkai hibrid dengan balok perangkai WF200x600 dan WF200x500 sebesar 3,885 dan 2,649 telah memenuhi faktor kuat lebih total yang disyaratkan SNI 1726-2002 yaitu sebesar 2,4. Sedangkan untuk balok perangkai WF200x400, nilai faktor kuat lebih total yang diperoleh sebesar 2,368 atau 98,67% dari batas yang ditentukan.
6. Faktor kuat lebih  $f_1$  dari ketiga struktur dinding geser berangkai hibrid dengan balok perangkai tidak ada yang memenuhi batasan SNI 1726-2002.
7. Faktor kuat lebih  $f_2$  dari ketiga struktur dinding geser berangkai hibrid dengan balok perangkai telah yang memenuhi batasan SNI 1726-2002 karena pada struktur terjadi mekanisme disipasi energi melalui terbentuknya sendi plastis diberbagai lokasi, tidak terfokus pada satu tempat.
8. Sendi plastis akibat leleh karena momen pada balok perangkai hanya terjadi diujung-ujung balok perangkai, sedangkan sendi plastis akibat leleh karena geser menyebar di sepanjang bentang balok perangkai.
9. Lokasi balok perangkai baja yang mengalami putaran sudut terbesar yaitu di lantai 4. Besarnya putaran sudut maksimum yaitu 0,0165rad untuk balok perangkai bajaa dengan dimensi WF200x400mm<sup>2</sup>.
10. Putaran sudut yang terjadi ketika *Collapse Prevention* telah memenuhi persyaratan putaran sudut inelastis yang ditetapkan oleh AISC-2005 yaitu dibatasi tidak lebih dari 0,02rad.

## 5.2 SARAN

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah

1. Pola distribusi beban lateral yang digunakan pada penelitian ini hanya menggunakan pola distribusi yang mengikuti distribusi pola getar pertama. Sedangkan di dalam FEMA 356, ditentukan bahwa harus digunakan minimal dua pola pembebanan untuk analisis statik nonlinier. Disarankan supaya struktur dinding geser berangkai dievaluasi dengan pola pembebanan lainnya yaitu pola distribusi uniform dan *higher mode* kemudian dibandingkan dengan pola pembebanan berdasarkan pola getar pertama yang telah dilakukan.
2. Model yang digunakan untuk analisis sebaiknya yang memiliki rasio kopel diantara 30% hingga 45% untuk bangunan 10 lantai yang sama sehingga efek reduksi momen guling dapat diamati.
3. Model yang digunakan pada penelitian ini hanya satu variasi yaitu bangunan 10 lantai dengan desain balok perangkai baja tipikal untuk semua lantai. Disarankan untuk meneliti dengan variasi tingkat dan variasi desain balok perangkai baja.
4. Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa telah tersedia kapasitas yang mencukupi pada sambungan antara balok perangkai baja dengan dinding geser beton sehingga tidak terjadi keruntuhan lebih dahulu. Disarankan supaya sambungan antara keduanya ikut dimodelkan sehingga lebih representatif untuk mengevaluasi perilaku inelastis dari balok perangkai baja pada struktur dinding geser berangkai hibrid.
5. Semua desain balok perangkai baja yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam kategori mekanisme leleh akibat interaksi momen dan geser. Disarankan untuk menganalisis balok perangkai yang leleh akibat geser. Disarankan untuk mereduksi bentang balok perangkai atau memperbesar tebal pelat badan (*web*) sehingga kuat geser rencana meningkat.

## DAFTAR REFERENSI

1. AISC. 2005. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL.
2. Boen, T. and Tjhin, T. N. 2006. MDOF Effect on the Accuracy of Nonlinear Static Seismic (Pushover) Procedure. Seminar HAKI 2006, Jakarta 22-23 Agustus.
3. Chopra, A. K. 2000. "Dynamics of Structures : Theory and Application to Earthquake Engineering." Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
4. El-Tawil, S., Kuenzli, C. M., and Hassan, M. 2002a. Pushover of Hybrid Coupled Walls. Part I: Design and Modeling, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128(10), 1272-1281.
5. El-Tawil, S. and Kuenzli, C. M. 2002b. Pushover of Hybrid Coupled Walls. Part II: Analysis and Behavior, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 128(10), 1282-1289.
6. FEMA-356. 2000. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356/November 2000, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.
7. FEMA-273.1997. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA 273/October 1997, Applied Technology Council (ATC-33 Project), Redwood City, California.
8. Fortney P.J., Shahrooz B.M., and Rassati, G.A. 2007. Seismic Performance Evaluation of Coupled Core Walls with Concrete and Steel Coupling Beams, *Journal of Steel and Composite Structures*, August, 7(4), 279-301.
9. Harries, K.A. and McNeice, D.S. 2006. Performance-Based Design of High-Rise Coupled Wall Systems, *The Structural Design of Tall and Special Structures*, Vol. 15(3), 289-306.
10. Harries, K.A., Shahrooz, B.M., Brienens, P. and Fortney, P. 2004. Performance Based Design of Coupled Walls, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Composite Construction*, South Africa, July 2004.
11. Harries, K.A., Moulton, D. and Clemson, R. 2004. Parametric Study of Coupled Wall Behavior – Implications for the Design of Coupling Beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 130(3): 480-488.

12. Harries, K. A., Gong, B., and Shahrooz, B. M. 2000. Behavior and design of reinforced concrete, steel, and steel-concrete coupling beams. *Earthquake Spectra*, 16(4),775–799.
13. Hassan, M. and El-Tawil S. 2004. Inelastic Dynamic Behavior of Hybrid Coupled Walls, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 130(2), pp. 285-296.
14. Krawinkler, H, Seneviratna, GDPK. 1998. Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures* 1998. 20(4-6), 452-464.
15. Lase, Y. 2006. Rational selection of structural ductility capacity and reinforcement detail for seismic design of reinforced concrete shear wall-frame structure. *Proceeding of the 2<sup>nd</sup> ACF International Conference Recent Development of Concrete Technology and Structures™*, Bali, Indonesia 20-21, November 2006
16. Lubis, M. R. Imansyah. 2010. Analisis ketelitian struktur *corewall* yang dimodelkan dengan elemen-elemen kolom yang dikonstrain sebagai sebuah penampang. Skripsi Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok,
17. Park, W.S., Yun, H. D. 2006. Seismic behaviour and design of steel coupling beams in a hybrid coupled shear wall systems. *Nuclear Engineering and Design*. 236 (1), 2474-2484.
18. Park, W. S., and Yun, H. D. 2005. Seismic behaviour of steel coupling beams linking reinforced concrete shear walls. *Engineering Structures*. 27 (7), 1024–1039.
19. Paulay, T., and Priestley, M.J.N. 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. John Wiley & Sons, Inc., USA.
20. Popov, E., Ricles, J. M., and Kasai, K. 1992. Methodology for optimum EBF link design. *Proceedings of the Earthquake Engineering 10<sup>th</sup> World Conference*, Balkema, Rotterdam.
21. Shahrooz, B. M., Remetter, M. E., and Qin, F. (1993), "Seismic Design and Performance of Composite Coupled Walls," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 119(11), pp. 3291-3309.
22. Stafford-Smith, B., and Coull, A. 1991. *Tall building structures—Analysis and design*, Wiley Interscience, New York.
23. SNI 03-1726-2002 (2002). "*Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung.*", Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 63 pp.
24. SNI 03-2847-2002 (2002). "*Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung.*", Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 278 pp.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1.. Hasil Analisis Statik Nonlinier *Pushover* Struktur Dinding Berangkai Hibrid

Tabel A1. Hasil Analisis Statik Nonlinier *Pushover* Model Balok Perangkai WF200x400

Model WF200x400 Diskretisasi 150mm								
TABLE: Pushover Curve - PUSH								
Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPToC	Total
	mm	KN						
0	0,000	0,000	2720	0	0	0	0	2720
1	5,000	828,901	2720	0	0	0	0	2720
2	15,000	2486,712	2720	0	0	0	0	2720
3	25,000	4144,539	2720	0	0	0	0	2720
4	30,000	4973,462	2720	0	0	0	0	2720
<b>5</b>	<b>33,843</b>	<b>5610,617</b>	<b>2712</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2720</b>
6	39,979	6441,110	2678	42	0	0	0	2720
<b>7</b>	<b>47,786</b>	<b>7197,562</b>	<b>2636</b>	<b>60</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2720</b>
8	55,046	7805,418	2612	70	38	0	0	2720
9	66,143	8594,742	2586	86	48	0	0	2720
10	78,044	9243,597	2516	136	68	0	0	2720
11	84,828	9561,000	2496	148	76	0	0	2720
12	96,306	10047,934	2478	162	80	0	0	2720
13	104,596	10382,950	2462	178	80	0	0	2720
14	120,468	10976,650	2440	200	80	0	0	2720
15	130,468	11331,902	2436	204	80	0	0	2720
<b>16</b>	<b>135,468</b>	<b>11508,147</b>	<b>2436</b>	<b>204</b>	<b>72</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>2720</b>
17	141,637	11704,331	2426	214	56	24	0	2720
18	154,609	12105,995	2420	220	42	38	0	2720
19	164,609	12410,313	2418	222	32	48	0	2720
20	174,609	12703,920	2416	224	24	56	0	2720
<b>21</b>	<b>189,012</b>	<b>13112,337</b>	<b>2408</b>	<b>232</b>	<b>12</b>	<b>60</b>	<b>8</b>	<b>2720</b>

Model WF200x400 Diskretisasi 200mm								
TABLE: Pushover Curve - PUSH								
Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	Total
	mm	KN						
0	0,000	0,000	2240	0	0	0	0	2240
1	5,000	828,901	2240	0	0	0	0	2240
2	11,061	1833,631	2240	0	0	0	0	2240
3	21,056	3490,692	2240	0	0	0	0	2240
4	31,039	5145,643	2240	0	0	0	0	2240
5	38,043	6200,146	2208	32	0	0	0	2240
6	43,390	6802,188	2164	76	0	0	0	2240
7	48,677	7276,507	2152	64	24	0	0	2240
8	60,991	8246,354	2118	74	48	0	0	2240
9	71,241	8901,984	2060	124	56	0	0	2240
10	78,160	9245,039	2036	136	68	0	0	2240
11	91,398	9836,161	2002	158	80	0	0	2240
12	113,977	10732,460	1970	190	80	0	0	2240
13	120,593	10972,253	1960	200	80	0	0	2240
14	125,731	11154,625	1960	200	80	0	0	2240
15	136,629	11540,220	1954	206	64	16	0	2240
16	146,920	11862,563	1946	214	48	32	0	2240
17	165,639	12436,511	1938	222	30	50	0	2240
18	170,642	12588,175	1936	224	24	56	0	2240
19	175,421	12723,899	1936	224	24	56	0	2240
20	181,344	12892,168	1936	224	20	60	0	2240
21	190,543	13151,657	1928	232	12	56	12	2240

Model WF200x400 Diskretisasi 300mm								
TABLE: Pushover Curve - PUSH								
Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	Total
	mm	KN						
0	0,000	0,000	1760	0	0	0	0	1760
1	6,667	1105,202	1760	0	0	0	0	1760
2	20,000	3315,623	1760	0	0	0	0	1760
3	26,667	4420,847	1760	0	0	0	0	1760
4	33,333	5526,084	1760	0	0	0	0	1760
<b>5</b>	<b>33,843</b>	<b>5610,622</b>	<b>1752</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
6	40,623	6514,324	1714	46	0	0	0	1760
<b>7</b>	<b>47,786</b>	<b>7197,530</b>	<b>1676</b>	<b>60</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
8	55,048	7805,351	1652	70	38	0	0	1760
9	69,771	8821,482	1594	110	56	0	0	1760
10	78,159	9245,220	1556	136	68	0	0	1760
11	84,848	9558,011	1538	146	76	0	0	1760
12	96,642	10055,028	1518	162	80	0	0	1760
13	114,053	10735,764	1490	190	80	0	0	1760
14	127,258	11209,384	1480	200	80	0	0	1760
<b>15</b>	<b>138,294</b>	<b>11599,466</b>	<b>1470</b>	<b>210</b>	<b>64</b>	<b>16</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
<b>16</b>	<b>148,280</b>	<b>11910,895</b>	<b>1464</b>	<b>216</b>	<b>48</b>	<b>32</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
17	154,947	12116,444	1460	220	40	40	0	1760
18	161,614	12320,326	1458	222	38	42	0	1760
19	174,947	12718,876	1456	224	24	56	0	1760
20	181,614	12908,358	1456	224	20	60	0	1760
<b>21</b>	<b>192,579</b>	<b>13217,139</b>	<b>1448</b>	<b>232</b>	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>20</b>	<b>1760</b>

Tabel A2. Hasil Analisis Statik Nonlinier *Pushover* Model Balok Perangkai WF200x500

Model Balok Perangkai WF200x500 Diskretisasi 150mm								
TABLE: Pushover Curve - PUSH								
Step	Displacement (mm)	BaseForce (kN)	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	Total
0	0,000	0,000	2720	0	0	0	0	2720
1	3,333	709,419	2720	0	0	0	0	2720
4	13,330	2836,953	2720	0	0	0	0	2720
7	23,330	4965,222	2720	0	0	0	0	2720
9	29,978	6380,153	2720	0	0	0	0	2720
10	33,311	7089,583	2720	0	0	0	0	2720
<b>11</b>	<b>33,758</b>	<b>7184,610</b>	<b>2708</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2720</b>
12	37,565	7845,178	2690	30	0	0	0	2720
13	41,078	8328,413	2656	64	0	0	0	2720
<b>14</b>	<b>45,700</b>	<b>8861,358</b>	<b>2642</b>	<b>56</b>	<b>22</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2720</b>
15	50,106	9319,729	2626	62	32	0	0	2720
16	55,019	9768,577	2612	68	40	0	0	2720
18	62,030	10370,773	2600	72	48	0	0	2720
19	65,997	10683,773	2580	84	56	0	0	2720
20	70,589	11025,962	2556	108	56	0	0	2720
22	79,252	11607,495	2514	142	64	0	0	2720
23	85,326	11948,310	2502	154	64	0	0	2720
25	94,403	12405,303	2476	176	68	0	0	2720
26	99,815	12646,231	2470	178	72	0	0	2720
27	105,332	12885,585	2462	180	78	0	0	2720
<b>28</b>	<b>110,373</b>	<b>13098,112</b>	<b>2452</b>	<b>188</b>	<b>76</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>2720</b>
30	120,055	13486,336	2444	196	56	24	0	2720
31	126,091	13720,253	2438	202	52	28	0	2720
33	136,463	14097,906	2426	214	40	40	0	2720
34	139,737	14211,465	2426	214	40	40	0	2720
36	146,396	14441,847	2426	214	32	48	0	2720
37	149,730	14557,223	2426	214	32	48	0	2720
<b>38</b>	<b>153,057</b>	<b>14672,402</b>	<b>2426</b>	<b>214</b>	<b>32</b>	<b>44</b>	<b>4</b>	<b>2720</b>

Model Balok Perangkai WF200x500 Diskretisasi 200mm								
TABLE: Pushover Curve - PUSH-UNIFORM								
Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoO	IOtoLS	LStoCP	CPToC	Total
	mm	KN						
0	0,000	0,000	2240	0	0	0	0	2240
1	3,333	709,419	2240	0	0	0	0	2240
4	13,330	2836,953	2240	0	0	0	0	2240
7	23,330	4965,222	2240	0	0	0	0	2240
9	29,978	6380,153	2240	0	0	0	0	2240
10	33,311	7089,583	2240	0	0	0	0	2240
<b>11</b>	<b>33,758</b>	<b>7184,610</b>	<b>2228</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2240</b>
12	37,565	7845,178	2210	30	0	0	0	2240
13	41,078	8328,413	2176	64	0	0	0	2240
<b>14</b>	<b>45,700</b>	<b>8861,357</b>	<b>2162</b>	<b>56</b>	<b>22</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2240</b>
15	50,106	9319,729	2146	62	32	0	0	2240
16	55,019	9768,577	2132	68	40	0	0	2240
18	62,030	10370,773	2120	72	48	0	0	2240
19	65,997	10683,773	2100	84	56	0	0	2240
20	70,589	11025,961	2076	108	56	0	0	2240
22	79,252	11607,495	2034	142	64	0	0	2240
23	85,326	11948,310	2022	154	64	0	0	2240
25	94,403	12405,303	1996	176	68	0	0	2240
26	99,815	12646,230	1990	178	72	0	0	2240
27	105,332	12885,585	1982	180	78	0	0	2240
<b>28</b>	<b>110,373</b>	<b>13098,111</b>	<b>1972</b>	<b>188</b>	<b>76</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>2240</b>
30	120,055	13486,336	1964	196	56	24	0	2240
31	126,091	13720,249	1958	202	52	28	0	2240
33	136,463	14097,905	1946	214	40	40	0	2240
34	139,737	14211,449	1946	214	40	40	0	2240
36	146,396	14441,831	1946	214	32	48	0	2240
37	149,729	14557,208	1946	214	32	48	0	2240
<b>38</b>	<b>153,057</b>	<b>14672,387</b>	<b>1946</b>	<b>214</b>	<b>32</b>	<b>44</b>	<b>4</b>	<b>2240</b>

Model Balok Perangkai WF200x500 Diskretisasi 300mm

TABLE: Pushover Curve - PUSH

Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoO	OtoLS	LStoCP	CptoC	Total
	mm	KN						
0	0,000	0,000	1760	0	0	0	0	1760
1	3,333	709,419	1760	0	0	0	0	1760
4	13,330	2836,953	1760	0	0	0	0	1760
7	23,330	4965,222	1760	0	0	0	0	1760
9	29,978	6380,152	1760	0	0	0	0	1760
10	33,311	7089,582	1760	0	0	0	0	1760
<b>11</b>	<b>33,758</b>	<b>7184,610</b>	<b>1748</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
12	37,565	7845,179	1730	30	0	0	0	1760
13	41,078	8328,413	1696	64	0	0	0	1760
<b>14</b>	<b>45,700</b>	<b>8861,357</b>	<b>1682</b>	<b>56</b>	<b>22</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
15	50,106	9319,729	1666	62	32	0	0	1760
16	55,019	9768,576	1652	68	40	0	0	1760
18	62,030	10370,772	1640	72	48	0	0	1760
19	65,997	10683,773	1620	84	56	0	0	1760
20	70,589	11025,959	1596	108	56	0	0	1760
22	79,252	11607,495	1554	142	64	0	0	1760
23	85,326	11948,309	1542	154	64	0	0	1760
25	94,403	12405,302	1516	176	68	0	0	1760
26	99,815	12646,228	1510	178	72	0	0	1760
27	105,332	12885,585	1502	180	78	0	0	1760
<b>28</b>	<b>110,373</b>	<b>13098,109</b>	<b>1492</b>	<b>188</b>	<b>76</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
30	120,055	13486,334	1484	196	56	24	0	1760
31	126,091	13720,240	1478	202	52	28	0	1760
33	136,463	14097,903	1466	214	40	40	0	1760
34	139,736	14211,415	1466	214	40	40	0	1760
36	146,395	14441,798	1466	214	32	48	0	1760
37	149,728	14557,178	1466	214	32	48	0	1760
<b>38</b>	<b>153,056</b>	<b>14672,354</b>	<b>1466</b>	<b>214</b>	<b>32</b>	<b>44</b>	<b>4</b>	<b>1760</b>

Tabel A3. Hasil Analisis Statik Nonlinier *Pushover* Model Balok Perangkai WF200x600

Model Balok Perangkai WF200x600 Diskretisasi 150mm								
Step	Displacement mm	BaseForce kN	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	Total
0	0,000	0,000	2720	0	0	0	0	2720
1	7,500	1879,435	2720	0	0	0	0	2720
2	15,000	3758,874	2720	0	0	0	0	2720
3	17,500	4385,354	2720	0	0	0	0	2720
4	24,988	6261,681	2720	0	0	0	0	2720
5	27,488	6888,163	2720	0	0	0	0	2720
6	32,488	8141,132	2720	0	0	0	0	2720
<b>7</b>	<b>34,394</b>	<b>8618,817</b>	<b>2712</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2720</b>
8	36,990	9159,321	2694	26	0	0	0	2720
9	39,852	9628,061	2666	54	0	0	0	2720
<b>10</b>	<b>42,523</b>	<b>10033,328</b>	<b>2654</b>	<b>56</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2720</b>
11	45,460	10414,485	2636	66	18	0	0	2720
12	51,805	11156,338	2616	72	32	0	0	2720
13	61,156	12055,079	2602	70	48	0	0	2720
14	68,773	12713,175	2548	116	56	0	0	2720
15	81,422	13617,291	2516	148	56	0	0	2720
16	91,856	14303,065	2500	156	64	0	0	2720
<b>17</b>	<b>94,546</b>	<b>14472,535</b>	<b>2488</b>	<b>168</b>	<b>60</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>2720</b>
18	109,814	15314,245	2462	194	34	30	0	2720
19	126,889	16112,917	2194	454	32	40	0	2720
20	136,705	16474,797	2090	550	40	40	0	2720
21	148,994	16902,354	1938	702	30	50	0	2720
22	160,522	17272,198	1928	712	24	56	0	2720
23	173,016	17625,186	1924	716	24	56	0	2720
24	183,017	17897,619	1732	906	18	64	0	2720
25	193,003	18161,824	1728	910	18	64	0	2720
26	210,201	18597,811	1670	968	12	70	0	2720
27	220,207	18826,282	1612	1024	12	72	0	2720
28	235,185	19140,901	1600	1034	6	80	0	2720
29	250,146	19445,110	1490	1142	8	80	0	2720
30	262,622	19687,743	1392	1238	10	80	0	2720
31	277,845	19955,027	1380	1242	18	80	0	2720
32	280,401	19999,010	1380	1242	18	80	0	2720
33	292,955	20214,685	1372	1250	18	80	0	2720
34	307,953	20469,652	1362	1258	20	80	0	2720
35	319,993	20673,276	1360	1246	34	80	0	2720
36	332,492	20883,906	1352	1250	38	80	0	2720
37	345,431	21095,390	1344	1244	52	80	0	2720
38	357,877	21290,690	1336	1236	68	80	0	2720
39	365,372	21406,881	1334	1230	76	80	0	2720
40	370,355	21484,080	1334	1220	86	80	0	2720
<b>41</b>	<b>372,855</b>	<b>21522,927</b>	<b>1332</b>	<b>1214</b>	<b>94</b>	<b>78</b>	<b>2</b>	<b>2720</b>

Model Balok Perangkai WF200x600 Diskretisasi 200mm								
Step	Displacement mm	BaseForce kN	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	Total
0	0,000	0,000	2240	0	0	0	0	2240
1	7,500	1879,435	2240	0	0	0	0	2240
2	15,000	3758,874	2240	0	0	0	0	2240
3	17,500	4385,354	2240	0	0	0	0	2240
4	25,000	6264,801	2240	0	0	0	0	2240
5	27,500	6891,284	2240	0	0	0	0	2240
6	32,500	8144,255	2240	0	0	0	0	2240
<b>7</b>	<b>34,394</b>	<b>8618,856</b>	<b>2232</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2240</b>
8	36,989	9159,322	2214	26	0	0	0	2240
9	39,852	9627,987	2186	54	0	0	0	2240
<b>10</b>	<b>42,523</b>	<b>10033,330</b>	<b>2174</b>	<b>56</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2240</b>
11	45,460	10414,518	2156	66	18	0	0	2240
12	51,804	11156,287	2136	72	32	0	0	2240
13	61,156	12055,181	2122	70	48	0	0	2240
14	68,772	12713,195	2068	116	56	0	0	2240
15	81,429	13617,921	2036	148	56	0	0	2240
16	91,857	14303,290	2020	156	64	0	0	2240
<b>17</b>	<b>95,448</b>	<b>14528,223</b>	<b>1996</b>	<b>180</b>	<b>58</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>2240</b>
18	109,780	15312,763	1982	194	34	30	0	2240
19	126,885	16113,131	1774	394	32	40	0	2240
20	136,694	16474,880	1694	466	40	40	0	2240
21	148,992	16902,941	1578	582	30	50	0	2240
22	160,500	17272,257	1568	592	24	56	0	2240
23	173,000	17625,548	1564	596	24	56	0	2240
24	183,000	17898,046	1420	738	18	64	0	2240
25	193,000	18162,730	1416	742	18	64	0	2240
26	210,163	18598,884	1370	788	12	70	0	2240
27	220,163	18827,356	1324	832	12	72	0	2240
28	235,130	19141,940	1312	842	6	80	0	2240
29	250,130	19447,157	1226	926	8	80	0	2240
30	265,130	19736,055	1150	1000	10	80	0	2240
31	280,130	19997,171	1140	1002	18	80	0	2240
32	282,630	20040,280	1140	1002	18	80	0	2240
33	295,130	20254,992	1128	1014	18	80	0	2240
34	310,130	20509,963	1120	1016	24	80	0	2240
35	325,130	20763,567	1118	1006	36	80	0	2240
36	337,630	20974,069	1110	1008	42	80	0	2240
37	350,130	21174,690	1098	1002	60	80	0	2240
38	362,630	21369,772	1096	988	76	80	0	2240
39	370,130	21486,240	1094	980	86	80	0	2240
40	372,630	21525,089	1092	974	94	80	0	2240
<b>41</b>	<b>375,130</b>	<b>21564,055</b>	<b>1090</b>	<b>976</b>	<b>94</b>	<b>78</b>	<b>2</b>	<b>2240</b>

Model Balok Perangkai WF200x600 Diskretisasi 300mm								
Step	Displacement mm	BaseForce kN	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	Total
0	0,000	0,000	1760	0	0	0	0	1760
1	7,500	1879,435	1760	0	0	0	0	1760
2	15,000	3758,874	1760	0	0	0	0	1760
3	17,500	4385,354	1760	0	0	0	0	1760
4	25,000	6264,800	1760	0	0	0	0	1760
5	27,500	6891,284	1760	0	0	0	0	1760
6	32,500	8144,255	1760	0	0	0	0	1760
<b>7</b>	<b>34,394</b>	<b>8618,856</b>	<b>1752</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
8	36,989	9159,322	1734	26	0	0	0	1760
9	39,852	9627,987	1706	54	0	0	0	1760
<b>10</b>	<b>42,523</b>	<b>10033,330</b>	<b>1694</b>	<b>56</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
11	45,460	10414,518	1676	66	18	0	0	1760
12	51,804	11156,287	1656	72	32	0	0	1760
13	61,156	12055,182	1642	70	48	0	0	1760
14	68,772	12713,197	1588	116	56	0	0	1760
15	81,429	13617,924	1556	148	56	0	0	1760
16	91,857	14303,295	1540	156	64	0	0	1760
<b>17</b>	<b>95,448</b>	<b>14528,229</b>	<b>1516</b>	<b>180</b>	<b>58</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>1760</b>
18	109,780	15312,773	1502	194	34	30	0	1760
19	126,885	16113,146	1354	334	32	40	0	1760
20	136,694	16474,897	1298	382	40	40	0	1760
21	148,993	16902,931	1218	462	30	50	0	1760
22	160,501	17272,252	1208	472	24	56	0	1760
23	173,001	17625,546	1204	476	24	56	0	1760
24	183,001	17898,044	1108	570	18	64	0	1760
25	193,001	18162,729	1104	574	18	64	0	1760
26	210,164	18598,889	1070	608	12	70	0	1760
27	220,164	18827,362	1036	640	12	72	0	1760
28	235,130	19141,939	1024	650	6	80	0	1760
29	250,130	19447,157	962	710	8	80	0	1760
30	265,130	19736,056	910	760	10	80	0	1760
31	280,130	19997,172	900	762	18	80	0	1760
32	282,630	20040,281	900	762	18	80	0	1760
33	295,130	20254,994	888	774	18	80	0	1760
34	310,130	20509,965	880	776	24	80	0	1760
35	325,130	20763,570	878	766	36	80	0	1760
36	337,630	20974,072	870	768	42	80	0	1760
37	350,130	21174,694	858	762	60	80	0	1760
38	362,630	21369,777	856	748	76	80	0	1760
39	370,130	21486,245	854	740	86	80	0	1760
40	372,630	21525,094	852	734	94	80	0	1760
<b>41</b>	<b>375,130</b>	<b>21564,060</b>	<b>850</b>	<b>736</b>	<b>94</b>	<b>78</b>	<b>2</b>	<b>1760</b>

## Lampiran 2. Desain Balok Perangkai Baja

Bentang L

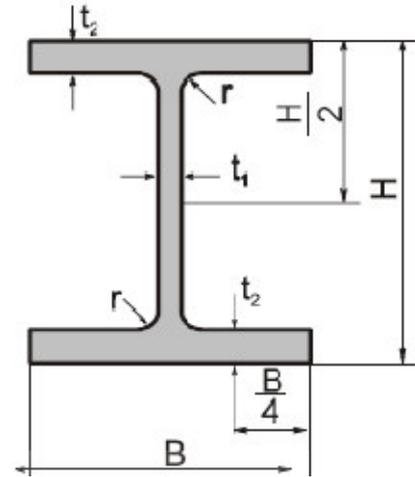
1800 mm

Properti Material

Fy 240 MPa

E 200000 MPa

G 76923 MPa

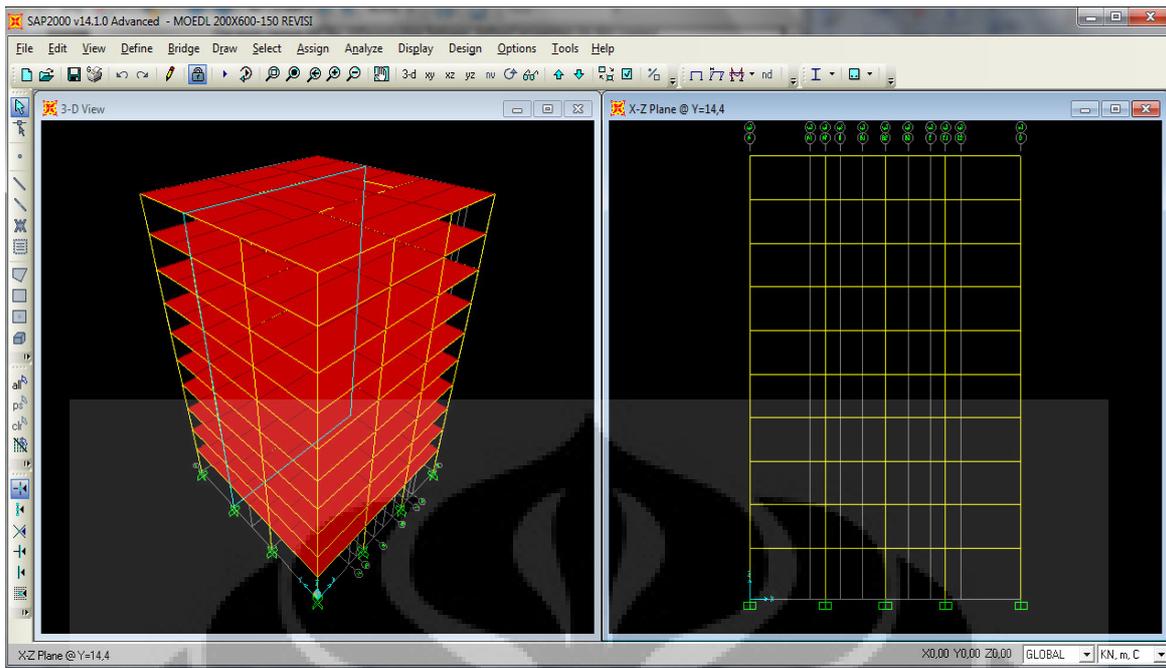


		Profil			
		Unit	WF200x400	WF200x500	WF200x600
Dimension	$b_f$	mm	200	200	200
	H	mm	400	500	600
	$t_w$	mm	8	10	11
	$t_f$	mm	13	16	17
	A	cm <sup>2</sup>	8410	11420	13448
	$A_w$	mm <sup>2</sup>	2992	4680	6226
	$I_x$	cm <sup>4</sup>	22960	47800	77600
	$Z_x$	cm <sup>3</sup>	1148	1910	2481
Shear, Flexural and Rotational Capacities	$V_{p\text{shear}}$	kN	430,85	673,92	896,54
	$M_p$	kNm	275,52	458,40	595,44
	$V_{p\text{flexural}}$	kN	306,13	509,33	661,60
	$V_n$	kN	306,13	509,33	661,60
	$\phi V_n$	kN	<b>275,52</b>	<b>458,40</b>	<b>595,44</b>
	$\phi M_p$	kNm	<b>247,97</b>	<b>412,56</b>	<b>535,90</b>
	$M_p/V_p$		0,90	0,90	0,90
	$1,6M_p/V_p$		1,44	1,44	1,44
	$2,6M_p/V_p$		2,34	2,34	2,34

### Lampiran 3. Tutorial Analisis Statik Nonlinier *Pushover* dengan SAP2000 versi 14.

Berikut ini adalah tutorial aplikasi analisis statik nonlinier atau analisis *pushover* untuk mengevaluasi kinerja struktur berdasarkan konsep perancangan berbasis kinerja (*performance-based design*) dengan menggunakan perangkat lunak SAP2000 versi 14. Analisis statik nonlinier yang digunakan adalah metode *displacement coefficient* yang mengacu pada dokumen FEMA 356. Secara garis besar, langkah-langkah yang harus dilakukan adalah sebagai berikut

1. Buat model struktur
2. Tentukan properti *hinge* dan masukkan pada elemen masing-masing elemen frame.
3. Tentukan pola pembebanan *Load Patterns* yang akan digunakan, termasuk
  - a. Beban gravitasi dan beban lainnya yang bekerja pada struktur sebelum gaya gempa diaplikasikan.
  - b. Beban lateral sebagai representasi beban gempa.
4. Tentukan pembebanan statik nonlinier pada *Load Cases* yang akan digunakan untuk analisis *pushover*, termasuk
  - a. Beban gravitasi dan beban lainnya secara kontrol beban (*load control*)
  - b. Beban lateral *pushover* yang melanjutkan beban gravitasi. Beban diberikan secara kontrol lendutan (*displacement control*) hingga titik kontrol yang biasanya berada di lantai paling atas struktur mencapai target lendutan (*displacement target*).
5. Lakukan proses analisis *pushover*
6. Lakukan review terhadap hasil analisis *pushover*: plot kurva *pushover*, *hinge* status, dan lainnya.
7. Revisi model struktur bila diperlukan

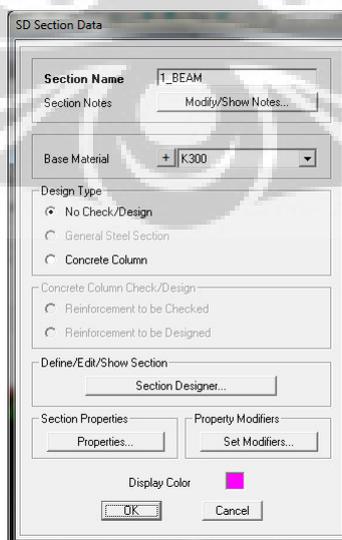


Gambar A1. Model Struktur

### **Tutorial 1 Membuat Desain Penampang (*Section Designer*)**

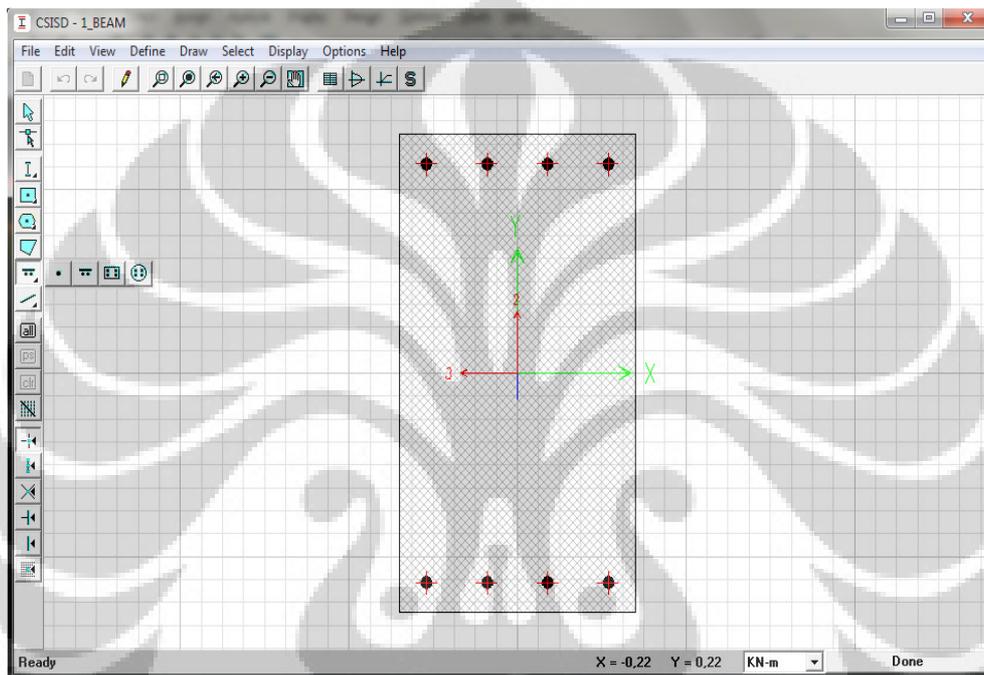
Pada bagian ini, akan dijelaskan bagaimana mendesain penampang dengan fasilitas *Section Designer* dalam SAP2000 versi 14.

1. Menu **Define > Section Properties > Frame Sections** untuk mengakses ke form **Frame Properties**.
2. Klik **Add New Property** untuk mengakses form **Add Frame Section Property**.
3. Pilih **Other** pada drop-down list **Frame Section Property Type**.
4. Klik tombol **Section Designer** untuk mengakses form **SD Section Data**.



Gambar A2. Menu SD Section Data

5. Klik **Section Designer** pada **Define/Edit/Show Section** untuk mengakses form CSISD.
6. Buat bentuk penampang yang diinginkan melalui menu **Draw** atau toolbar yang tersedia untuk mempermudah. Fasilitas yang tersedia diantaranya:
  - a. **Draw Structural Shape** untuk membuat profil penampang yang biasa digunakan pada struktur baja.
  - b. **Draw Solid Shape** untuk membuat geometri penampang kotak atau lingkaran pada struktur beton.
  - c. **Draw Reinforcing Shape** untuk membuat detail penulangan pada struktur beton.



Gambar A3. Section Designer

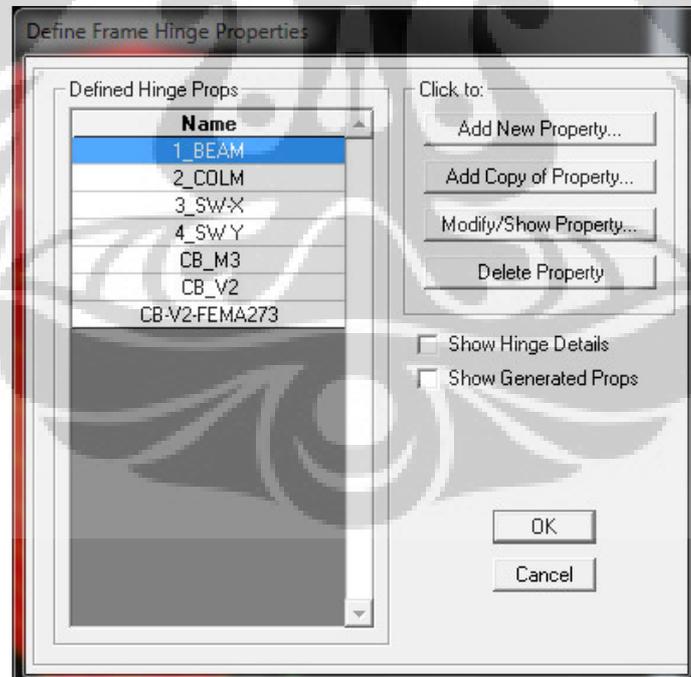
7. Untuk membuat dimensi baja tulangan, pilih menu **Define > Section Properties > Reinforcement Bar Sizes** untuk mengakses form **Reinforcing Bar Sizes**. Tentukan nama, dimensi dan luas properti tulangan yang diinginkan.  
Dimensi baja tulangan yang tersedia di SAP2000 sebagai *default* yaitu
  - a. **ASTM standard bar sizes:** #2, #3, #4, #5, #6, #7, #8, #9, #10, #11, #14, and #18.
  - b. **ASTM metric bar sizes:** 10M, 15M, 20M, 25M, 30M, 35M, 45M and 55M.
  - c. **European (metric) bar sizes:** 6d, 8d, 10d, 12d, 14d, 16d, 20d, 25d, 26d and 28d



Gambar A4. Reinforcing Bar Sizes

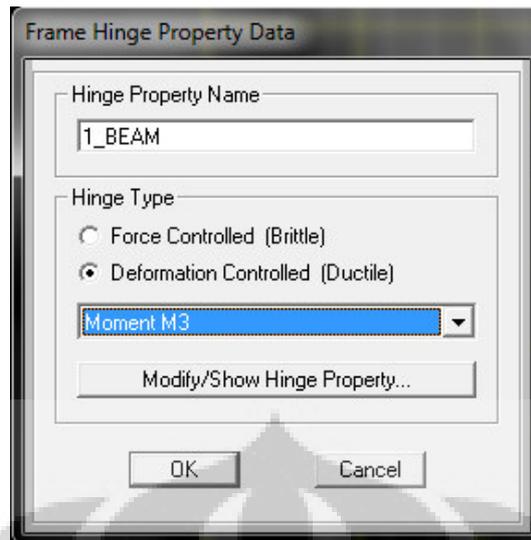
### **Tutorial 2 Membuat Properti Hinge**

1. Klik Menu **Define > Section Properties > Hinge Properties** untuk mengakses form **Define Frame Hinge Properties**.
2. Klik Add New Property untuk mengakses form **Frame Hinge Property Data** form dimana properti hinge baru dapat didefinisikan.



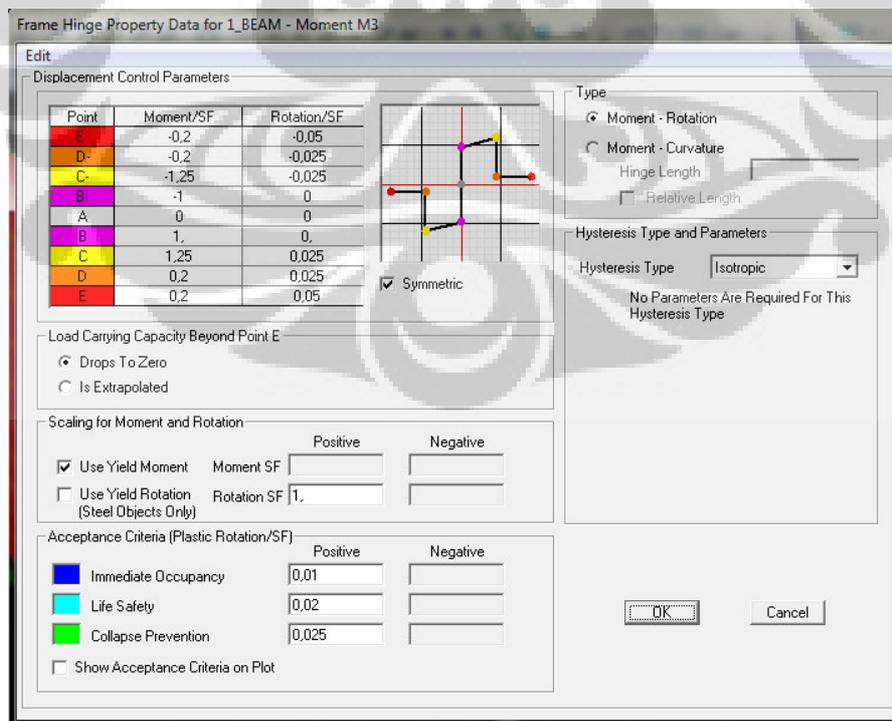
Gambar A5. Form Define Frame Hinge Properties

3. Tentukan tipe hinge yang diinginkan



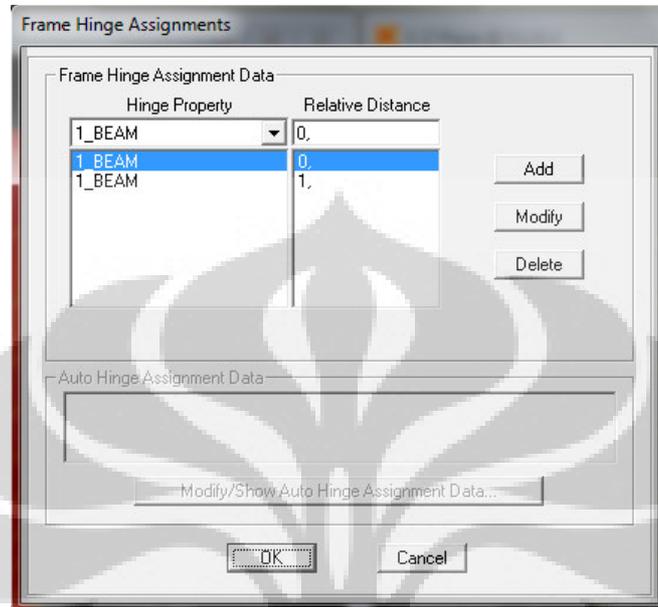
Gambar A6. Form Frame Hinge Property Data

4. Masukkan parameter perilaku hinge yang disediakan pada FEMA 356 untuk membentuk kurva generalisasi hubungan antara gaya-deformasi atau momen-rotasi
5. Pada **Scaling** area, jika **Use Yield Moment** dan **Use Yield Rotation** dicontreng, program akan menghitung secara otomatis nilai tersebut.
6. Masukkan parameter **Acceptance Criteria** untuk level kinerja *Immediate Occupancy*, *Life Safety* dan *Collapse Prevention* yang telah tersedia di FEMA 356 Tabel 5.6 untuk baja dan Tabel 6.7- 6.19 untuk beton.



Gambar A7. Form Hinge Property Data

7. Pilih frame yang akan dipasang hinge.
8. Klik menu **Assign>Frame > Hinges** untuk mengakses form **Frame Hinge Assignments**.

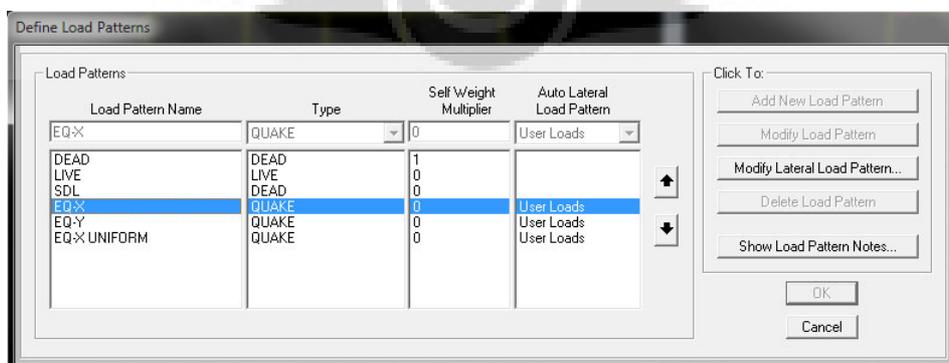


Gambar A8. Form Frame Hinge Assignment

9. Pilih properti hinge yang tersedia pada drop-down list **Frame Hinge Assignments Data**. Selain properti hinge yang telah didefinisikan secara manual, SAP2000 menyediakan Auto hinge properties. Tentukan lokasi hinge yang dihitung relatif terhadap bentang elemen frame pada **Relative Distance**.

### **Tutorial 3 Mendefinisikan Beban Statik Pushover**

1. Untuk mendefinisikan pola distribusi beban gempa statik, pilih menu **Define > Load Patterns** sehingga akan muncul form **Define Load Patterns**.



Gambar A9. Form Define Load Pattern

2. Pilih **QUAKE** pada drop-down list **Type**.
3. Pilih **User Load** pada drop-down list **Auto Lateral Load Pattern**. Klik **Add New Load Pattern**.
4. Klik **Modify Lateral Load Pattern** untuk mengakses form **User Seismic Load Pattern**.
5. Pilih **Apply at Center of Mass** supaya beban gempa statik bekerja pada pusat massa masing-masing lantai. Masukkan pola distribusi beban gempa statik pada kolom yang tersedia.

Diaphragm	Diaphragm Z	FX	FY	MZ	X	Y
DIAPH10	32,5	946,62	0,	0,		
DIAPH9	29,3	891,9	0,	0,		
DIAPH8	26,1	823,17	0,	0,		
DIAPH7	22,9	739,49	0,	0,		
DIAPH6	19,7	641,91	0,	0,		
DIAPH5	16,5	532,77	0,	0,		
DIAPH4	13,3	415,64	0,	0,		
DIAPH3	10,1	294,94	0,	0,		
DIAPH2	6,9	177,27	0,	0,		
DIAPH1	3,7	73,08	0,	0,		

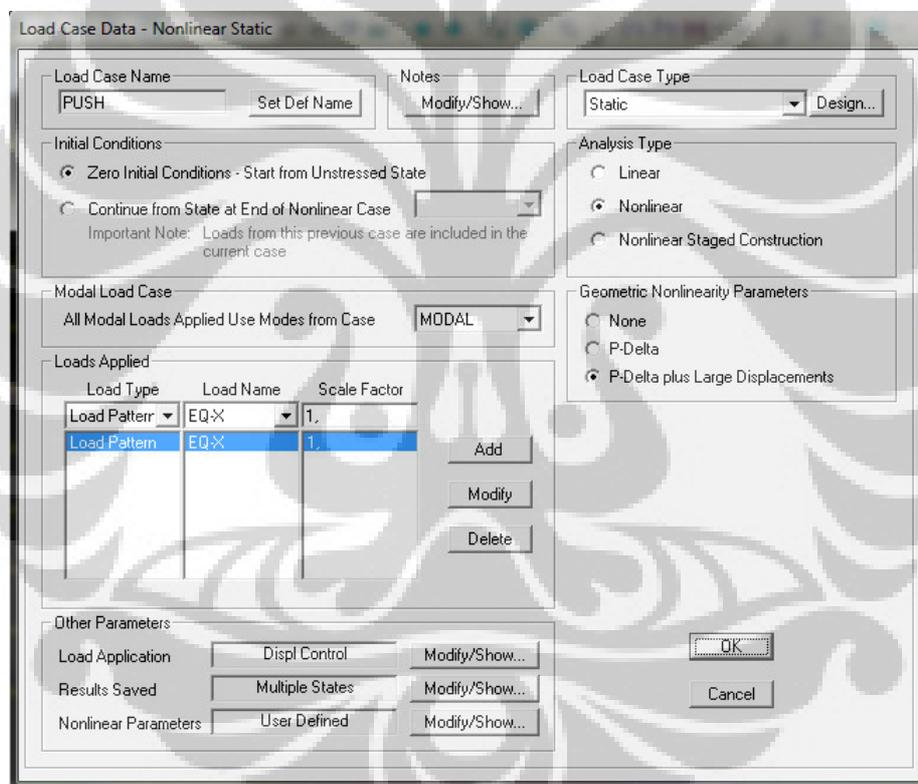
Gambar A10. Form User Seismic Load Pattern

6. Pilih menu **Define>Load Cases** untuk mengakses form **Define Load Case**. Klik **Add New Load Case** atau pilih beban yang sebelumnya telah didefinisikan dan klik **Add Copy of Load Case** atau **Modify/Show Load Case** untuk menampilkan form **Load Case Data**.
7. Pilih **Static** pada drop-down list **Load Case Type** dan pilih **Nonlinear** pada **Analysis Type**.

Untuk analisis nonlinier, **Initial Conditions** ketika analisis dimulai yaitu

- a. **Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State** — struktur belum terbebani dengan displacement dan velocity sama dengan nol, semua elemen struktur dalam kondisi unstressed, dan belum mengalami deformasi nonlinier
- b. **Continue from State at End of Nonlinear Case** — analisis dimulai dengan kondisi awal yaitu mengalami displacements, velocities, stresses, beban, energi, dan deformation nonlinier hasil analisis sebelumnya. Gunakan drop-down list untuk memilih analisis sebelumnya.

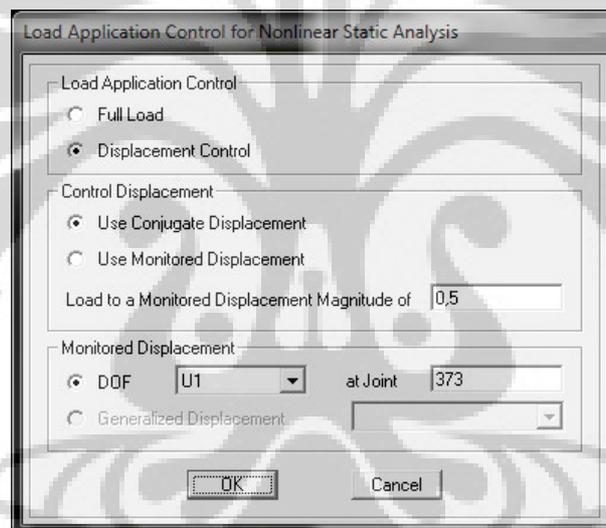
**Note:** Umumnya analisis statik nonlinier *pushover* dimulai dengan memberi beban gravitasi nonlinier kemudian dilanjutkan dengan beban lateral statik nonlinier.



Gambar A11. Form Load Case Data

8. Untuk beban gravitasi nonlinier, misalnya diberi nama GRAV pada Load Case Name, klik **Zero Initial Condition-Start from Unstressed State**.
9. Pilih **Load Pattern** pada **Load Type** drop-down list. Pilih beban-beban gravitasi pada **Load Name**.
10. Pada parameter **Load Application**, klik **Modify/Show**. Untuk beban gravitasi, pilih **Full Load** pada **Load Application Control**.

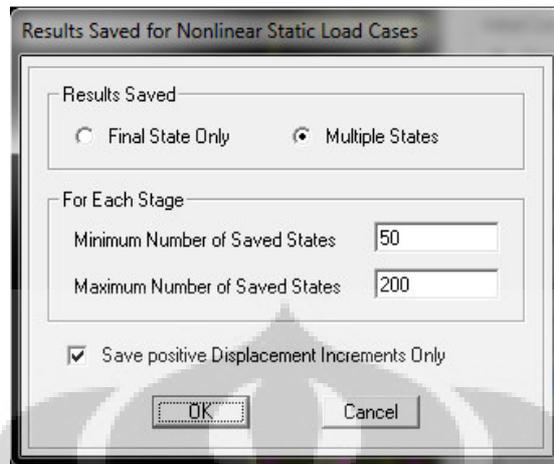
11. Pada parameter **Results Saved**, klik **Modify/Show**. Pilih **Final State Only**.
12. Berikutnya untuk beban lateral statik nonlinier, misalnya diberi nama PUSH pada Load Case Name, klik **Continue from State at End of Nonlinear Case** dan pilih GRAV pada drop-down list.
13. Pilih **Load Pattern** pada **Load Type** drop-down list. Pilih pola distribusi beban lateral statik pada **Load Name**.
14. Pada parameter **Load Application**, klik **Modify/Show**. Untuk beban gravitasi, pilih **Displacement Control**.
15. Pilih **Used Conjugate Displacement** dan ketikkan besarnya target lendutan pada **Load to a Monitored Displacement Magnitude**.
16. Tentukan titik kontrol lendutan untuk analisis statik nonlinier pada **Monitored Displacement**. Pada umumnya, titik kontrol yang digunakan adalah pusat massa lantai teratas bangunan.



Gambar A12. Form Load Application Control

17. Pada parameter **Results Saved**, klik **Modify/Show**. Pilih **Multiple States** sehingga program akan menyimpan hasil analisis di setiap langkah kalkulasi. Pilihan ini berfungsi khususnya pada analisis statik nonlinier *pushover* untuk membentuk kurva *pushover* hubungan lendutan-gaya geser dasar.
18. Tentukan jumlah **Minimum** dan **Maximum Number of Saved States**. Parameter ini digunakan untuk mengontrol jumlah titik yang akan disimpan dalam analisis. Jika langkah minimum (*minimum steps*) dari terlalu kecil, titik yang tersedia untuk merepresentasikan kurva *pushover* tidak akan cukup. Sebaliknya, jika jumlah

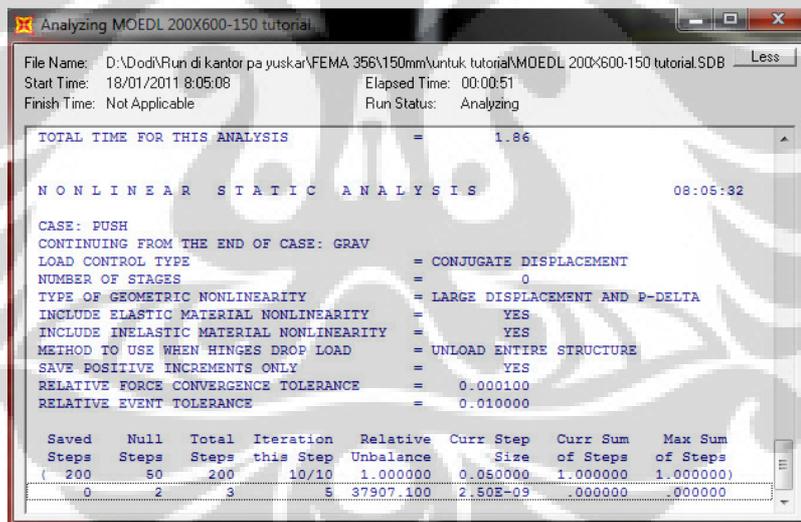
langkah yang tersimpan semakin besar, analisis akan memakan waktu dan membutuhkan kapasitas penyimpanan data yang besar.



Gambar A13. Form Results Saved

#### **Tutorial 4 Memulai Proses Analisis Statik Nonlinier Pushover**

1. Pilih Menu **Analyze > Run Analysis > Run Now** atau tekan F5 pada *keyboard* untuk melakukan proses analisis.

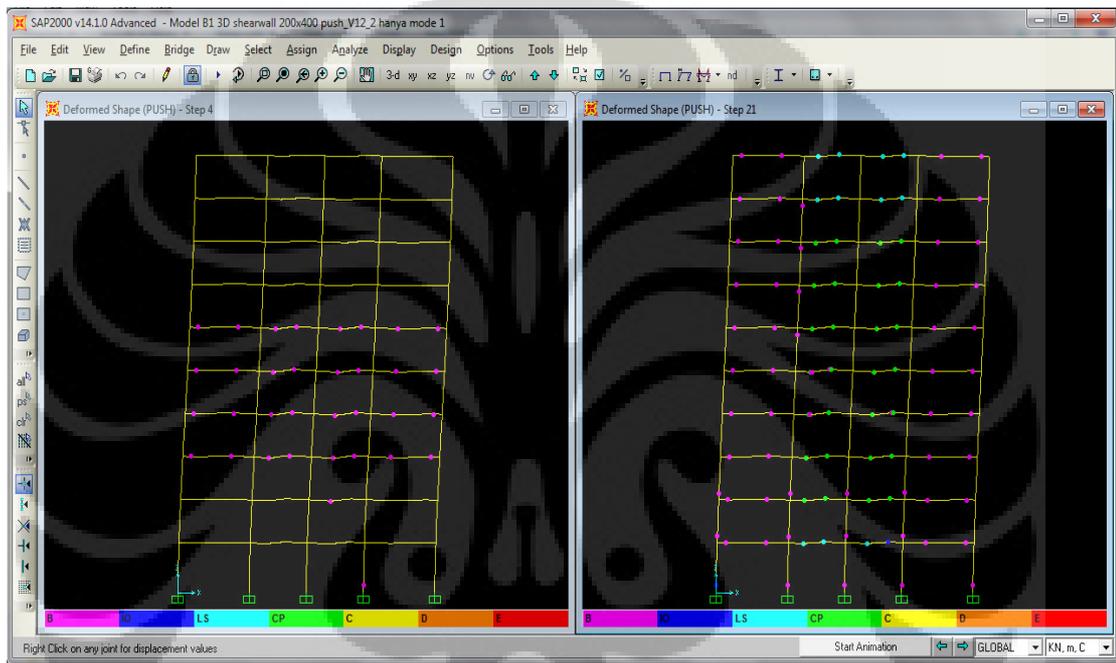


Gambar A14. Proses Analisis Statik Nonlinier Pushover

2. Jendela seperti pada Gambar A.14 diatas akan muncul selama proses analisis statik nonlinier *pushover* berlangsung. Setelah proses selesai, gunakan *scroll bar* untuk mereview proses analisis dan memeriksa apakah terjadi *error* atau tidak.
3. Klik **OK**.

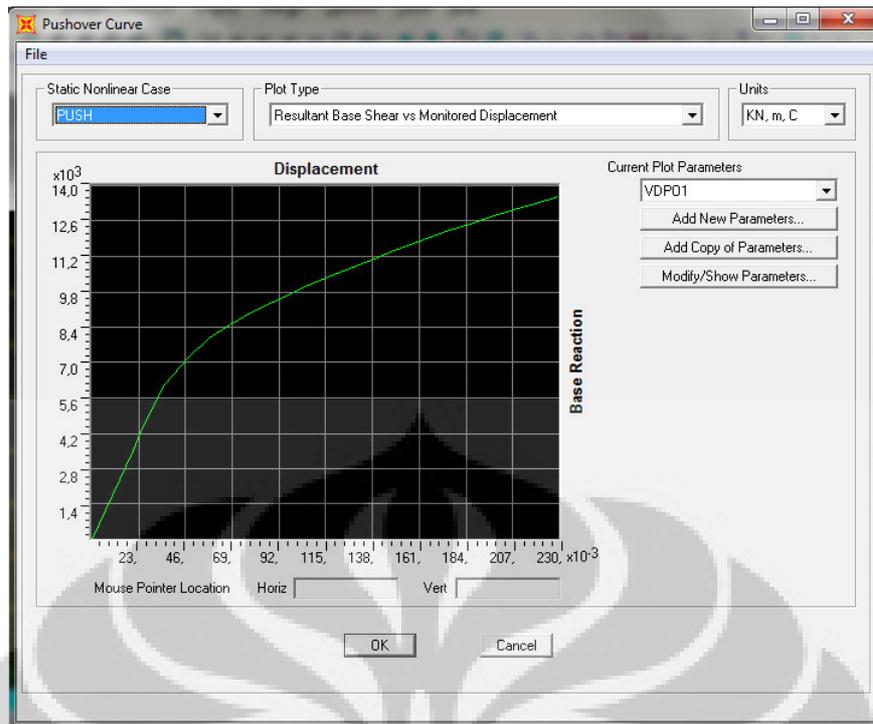
## **Tutorial 5 Menampilkan Hasil Analisis Statik Nonlinier *Pushover***

1. Pilih menu **Display>Show Deformed Shape** atau klik . Pilih nama beban statik nonlinier *pushover*, misalnya PUSH, pada **Case/Combo Name**.
2. Pilih **Step** untuk menampilkan hasil analisis secara bertahap.
3. Klik  pada pojok kanan bawah layar untuk melihat hasil analisis pada langkah selanjutnya.
4. Klik  untuk menampilkan animasi dari deformasi yang dialami struktur.



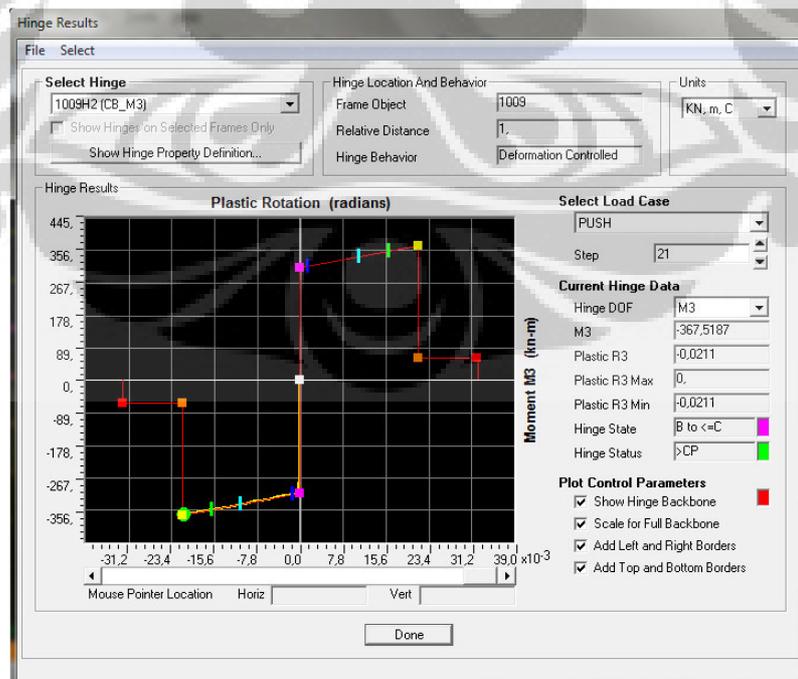
Gambar A15. Deformasi Akibat Beban Statik Nonlinier *Pushover*

5. Pilih menu **Display>Show Static Pushover Curve** untuk mengakses form **Pushover Curve**.



Gambar A16. Kurva *Pushover*

6. Klik **File>Display Table** untuk menampilkan tabulasi hasil analisis statik nonlinier *pushover*.
7. Pilih menu **Display>Show Hinge Results** untuk mengakses form **Hinge Results** dimana perilaku inelastis dari setiap hinge dapat dievaluasi.



Gambar A17. Form Hinge Results