

# **ANALISIS *HUGE SQUARE-HOLLOW BRACING* ANTAR GEDUNG SEBAGAI PENGAKU STRUKTUR**

**M. Fadly Devranda**

**Ahmad Yudi, Siska Apriwelni**

Fakultas Teknologi Infrastruktur dan kewilayahan Jurusan Teknik Sipil

Institut Teknologi Sumatera

Email : fadlydevranda@gmail.com

## **ABSTRAK**

*Pembangunan gedung tinggi harus memenuhi standar agar tidak mengalami kegagalan struktur baik dikarenakan kegagalan struktur itu sendiri maupun akibat gedung yang ada di sekitarnya seperti efek tabrakan ledakan dan lain sebagainya. Melihat kelemahan-kelemahan tersebut *Huge Square Hollow Bracing* yang dipasang antar gedung merupakan salah satu alternatif dikarenakan tidak hanya berperan sebagai pengaku namun struktur tersebut dapat digunakan sebagai akses untuk berpindah dari gedung satu ke gedung lainnya. Pada penelitian ini metoda yang digunakan adalah perbandingan perilaku struktur antar gedung yang dipasang *Huge Square Hollow Bracing* dan tidak. Dan pada pembebanan gempanya adalah meningkatkan beban time history secara bertahap hingga terjadi kegagalan struktur secara keseluruhan. Pada penelitian ini didapatkan bahwa gedung dengan pengaku dapat mengurangi simpangan, rotasi dan gaya geser dasar yang terjadi pada gedung tanpa pengaku rata-rata sebesar dua puluh persen. Penggunaan pengaku pada gedung juga meningkatkan ketahanan gempa yang dapat diterima sebesar dua kali lebih besar dibandingkan gedung yang tidak menggunakan pengaku.*

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Meningkatnya jumlah penduduk di Indonesia dari tahun ke tahun sedangkan lahan yang semakin terbatas membuat jumlah gedung bertingkat semakin bertambah. Tak jarang banyak gedung yang memiliki ukuran yang sangat tinggi (>15 lantai) dan memiliki jarak antar gedung yang tidak jauh (<100 meter). Hal ini membuat ketertarikan penulis dalam menganalisa perilaku dan mengantisipasi dampak kekegagalan dalam pembuatan gedung tersebut. Dikarenakan hal tersebut, menimbulkan keinginan penulis untuk memperkuat struktur tersebut dengan menggunakan *Huge Square-Hollow Bracing* yang dipasang antar gedung. Kegunaan dari struktur tersebut sebagai pengaku bracing yang dipasang pada bagian kolom dan juga sebagai fasilitas penyebrangan gedung seperti skybridge, hanya saja pada bagian hollow dapat digunakan escalator yang tidak hanya berpindah gedung ke level yang sama namun dapat digunakan untuk berpindah ke level yang berbeda. Metoda yang digunakan pada struktur ini adalah perbandingan perilaku struktur antara gedung A & B yang dipasang *Huge Square-Hollow Bracing* dan tidak dan dalam pembebanan gempanya adalah

*leveling time history*, yaitu dengan meningkatkan Aog atau *peak ground activity time history* secara bertahap hingga terjadi kegagalan struktur secara keseluruhan.

### Perumusan Masalah

1. Bagaimana perilaku struktur beton bertulang dengan adanya beban TH pada studi kasus gedung yang menggunakan *Huge Square-Hollow Bracing* antar gedung dan tanpa menggunakan *Huge Square-Hollow Bracing*?
2. Bagian struktur manakah yang terlebih dahulu mengalami kegagalan bila diberikan beban nonlinier TH?
3. Berapa beban maksimum gempa nonlinier yang dapat ditahan struktur gedung?

### Tujuan

1. Menganalisa perilaku struktur bangunan yang menggunakan *Huge Square-Hollow Bracing* antar gedung dan tanpa menggunakan *Huge Square-Hollow Bracing*
2. Menentukan bagian struktur mana yang terlebih dahulu mengalami kegagalan bila diberikan beban *nonlinier time history*

3. Menentukan beban maksimum gempa nonlinier yang dapat ditahan struktur

### **Batasan Masalah**

1. Struktur yang akan dianalisis adalah bangunan beton bertingkat yang berjumlah 20 lantai dimana lantai 1 sampai 13 memiliki luasan sebesar 900 m<sup>2</sup> sedangkan lantai 14 sampai 20 memiliki luasan sebesar 400 m<sup>2</sup>
2. Model yang akan dianalisis berjumlah 2 gedung yaitu gedung A (struktur dengan *Huge Square-Hollow Bracing*) dan B (struktur tanpa *Huge Square-Hollow Bracing*)
3. Analisis gaya gempa yang digunakan adalah analisis gempa dinamis dengan respon spektrum gempa berdasarkan peta hazard gempa di Indonesia tahun 2017 untuk kota Bandar Lampung
4. Analisis permodelan yang akan dilakukan menggunakan software analisa struktur
5. Konektor yang digunakan pada *Huge Square-Hollow Bracing* adalah jepit (tidak diizinkan berotasi dan bertranslasi).
6. Peraturan-peraturan yang digunakan:

- Tata cara perhitungan struktur beton SNI 2847-2013
- Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural SNI 1729-2015
- Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung SNI 1726-2012
- Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain SNI 1727-2013
- Peta hazard gempa Indonesia 2017

### **Maksud Penelitian**

Maksud dari penelitian ini sendiri adalah untuk mengetahui perilaku struktur bangunan yang menggunakan dan tanpa menggunakan *Huge Square-Hollow Bracing*.

## LANDASAN TEORI

### Dasar Dinamika Struktur

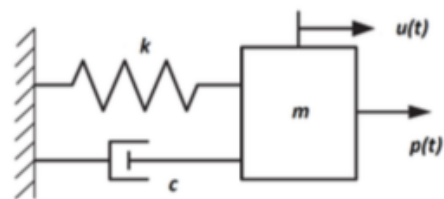
Dinamika struktur berlaku saat subjek menerima beban dinamik. Beban dinamik adalah beban yang berubah-ubah terhadap waktu, seperti angin, pejalan kaki, gempa atau ledakan. Analisis struktur pada suatu sistem bertujuan untuk menentukan *displacement* pada semua lokasi struktur di tiap waktu yang hal ini didapatkan dengan menyelesaikan *equation of motion* (EOM). Penyelesaian EOM menyangkut keseimbangan seluruh gaya yang bersangkutan seperti gaya inersia, gaya redaman, gaya kekakuan dan gaya eksternal.

Tiap struktur memiliki frekuensi natural yang sesuai dengan getaran natural. Getaran natural ini memiliki bentuk yang berubah-ubah mengikuti getaran struktur yang akan terjadi. Frekuensi yang sesuai merupakan jumlah dari getaran per detik yang terjadi saat getaran bebas. Untuk struktur yang sederhana, seperti balok pendukung dengan getaran natural bebas, diilustrasikan pada gambar 2.1 dan getaran natural dapat dihitung dengan mudah. Tapi untuk struktur yang lebih kompleks dibutuhkan *software* untuk menghitung elemen-elemen agar dapat menentukan getaran bebasnya.

### Derajat Kebebasan Tunggal

Sistem derajat kebebasan tunggal (SDOF) merupakan elemen dasar dari analisis struktur dan terdiri dari getaran sederhana. Hal ini merupakan cara termudah untuk mendeskripsikan sebuah struktur dan memberi pemahaman sistem yang lebih kompleks yang akan dijelaskan di subjek selanjutnya.

Jumlah dari kederajatan bebas adalah jumlah dari *displacement* yang berpengaruh untuk menjelaskan pergeseran lokasi masa pada suatu sistem. Sistem SDOF terdiri dari *spring-mass-damper*, Dalam hal ini *mass*,  $m$ , hanya dapat bergerak terhadap satu arah. Dalam sistem terdapat kekakuan linear yaitu  $k$  dan koefisien redaman linear yaitu  $c$ .



**Gambar 1 Sistem Spring-Mass-Damper**

Sumber: Juan Amortegui Cuevas, 2014

Gaya inersia pada sistem,  $f_t$ , setara dengan jumlah seluruh gaya yang berpengaruh pada sistem

$$f_t = f_d + f_s + p(t) \quad (1)$$

dimana  $f_d$  adalah gaya redaman,  $f_s$  adalah gaya kekakuan dan  $p(t)$  adalah gaya eksternal yang diaplikasikan terhadap sistem. Gaya inersia adalah percepatan proporsional yang berdasarkan oleh hukum Newton 2 tentang gerak

$$f_t = m\ddot{u} \quad (2)$$

dimana  $m$  dan  $\ddot{u}$  adalah masa dan percepatan terhadap struktur. Gaya redaman adalah gaya yang berpengaruh terhadap kecepatan pada sistem.

$$f_d = -c\dot{u} \quad (3)$$

dimana  $c$  dan  $\dot{u}$  adalah koefisien redaman dan kecepatan terhadap sistem. Gaya kekakuan adalah gaya yang berdasarkan hukum Hooke dimana kekakuan,  $k$ , berhubungan dengan pergeseran pada sistem.

$$f_s = -ku \quad (4)$$

Dengan menggabungkan persamaan sistem diatas maka akan didapatkan persamaan EOM.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (5)$$

### **Derajat Kebebasan Banyak**

Struktur memiliki jumlah DOF yang tidak terbatas namun dapat disederhanakan untuk menganalisis perilaku dinamika struktur. Dengan menyederhanakan jumlah elemen struktur, dengan membagi beberapa elemen sebagai derajat

kederaajatan bebas dan pendekatan terhadap stuktur dapat diperoleh. Seperti namanya yaitu sistem *multi degree of freedom* dimana sistem memiliki kederaajatan bebas terdiri 2 atau lebih. Teori sistem MDOF merupakan penggabungan keseluruhan 1 ke  $N$  kederaajatan bebas diperoleh melalui sistem persamaan EOM.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (6)$$

dimana  $m$ ,  $c$ ,  $k$  adalah matriks  $N \times N$  yang terdiri dari masa, kekakuan dan redaman dari suatu sistem. Pergeseran, kecepatan dan percepatan untuk setiap titik di dapatkan dari vektor  $u$ ,  $\dot{u}$ ,  $\ddot{u}$   $N \times 1$  Gaya eksternal pada setiap titik didapatkan dari vektor beban  $p(t)$   $N \times 1$ .

Pada realisasi suatu struktur, masa didistribusikan secara keseluruhan terhadap struktur sedangkan secara teori, masa pada setiap elemen diasumsikan terkonsentrasi pada titik join. Sebagai hasilnya masa dari tiap member digantikan dengan jumlah masa di tiap ujung elemen. Matriks kekakuan di dapatkan dari penyusunan matriks kekakuan lokal dan redaman di spesifikasikan sebagai jumlah numerik untuk rasio redaman berdasarkan data eksperimen.

### **Gempa**

Gempa adalah getaran yang dirasakan di permukaan bumi yang di sebabkan oleh

gelombang seismic dari sumber gempa di dalam lapisan kulit bumi. Pusat atau sumber gempa bumi yang letaknya di dalam bumi disebut hiposentrum. Daerah permukaan bumi ataupun di dasar laut yang merupakan tempat pusat getaran bumi merambat disebut episentrum.

Gempa adalah getaran bumi atau getaran kulit bumi secara tiba-tiba, bersumber pada lapisan kulit bumi (litosfer) bagian dalam, dirambatkan oleh kulit bumi ke permukaan bumi. Gempa bumi di sebabkan adanya pelepasan energi yang menyebabkan dislokasi (pergeseran) pada bagian dalam kulit bumi secara tiba-tiba. Gempa bumi termasuk bagian dari tenaga endogen yang merusak, menyimpang dari sifat tenaga endogen pada umumnya, yaitu membangun tetapi merupakan gejala sampingan tenaga endogen yaitu tektonisme dan vulkanisme.

### **Kriteria Struktur Tahan Gempa**

Perencanaan bangunan bertingkat tinggi harus memperhitungkan beban-beban yang bekerja pada struktur tersebut, seperti beban gravitasi dan beban lateral. Beban gravitasi adalah beban mati dan beban hidup struktur, sedangkan beban lateral adalah beban angin dan beban gempa. Macam-macam kategori level kinerja struktur antara lain:

#### **1. *Operasional***

Bila terjadi gempa, tidak ada kerusakan berarti pada struktur dan non-struktur (bangunan tetap berfungsi).

#### **2. *Immediate Occupancy***

Bila gempa terjadi, struktur mampu menahan gempat tersebut, struktur tidak dapat mengalami kerusakan structural dan tidak mengalami kerusakan non-struktur. Sehingga dapat langsung dipakai.

#### **3. *Life Safety***

Bila gempa terjadi, struktur mampu menahan gempa, dengan sedikit kerusakan structural, manusia yang tinggal berada pada bangunan tersebut terjaga keselamatannya dari gempa bumi.

#### **4. *Collapse Prevention***

Bila gempa terjadi, struktur mengalami kerusakan structural yang sangat berat, tetapi belum runtuh.

Untuk mendapatkan level kinerja suatu struktur, dilakukan perhitungan maksimum *drift* dan maksimum *inelastic drift*. Rumus yang digunakan untuk menghitung maksimum *drift* dan maksimum *inelastic drift* ditunukan pada persamaan berikut:

$$\text{maksimum drift} = \frac{D_t}{H} \quad (7)$$

$$\text{maksimum inelastic drift} = \frac{D_t - D_1}{H} \quad (8)$$

Dimana:

$D_t$  = displacement saat terjadinya  
performance point (m)

$D_1$  = displacement saat terjadinya  
leleh pertama kalinya (m)

$H$  = tinggi total bangunan (m)

Dari persamaan diatas dilakukan  
perbandingan Batasan *ratio drift* menurut  
ATC-40 yang ditunjukkan pada tabel 1  
berikut ini:

| Parameter                      | Performance Level |                   |          |                      |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|----------|----------------------|
|                                | <i>IO</i>         | Damage Control    | LS       | Structural Stability |
| Maksimum Total Drift           | 0,01              | 0,01 s.d.<br>0,02 | 0,02     | 0,33 $V_1/P_1$       |
| Maksimum Total Inelastik Drift | 0,005             | 0,005             | no limit | no limit             |

**Tabel 1.** Batasan Rasio Drift Atap

Sumber: ATC40 – Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, 2000

dan

### Respon Spektrum

Respon spektrum adalah respons maksimum dari suatu sistem struktur *Single Degree of Freedom* (SDOF) baik percepatan ( $a$ ), kecepatan ( $v$ ), dan perpindahan ( $d$ ) dengan struktur tersebut dibebani oleh gaya luar tertentu. Absis dari respon spektrum adalah periode alami sistem struktur dan ordinat dari respon spektrum adalah respons maksimum. Kurva respon spektrum akan memperlihatkan simpangan relatif maksimum (*spectral displacement*,  $S_D$ ), kecepatan maksimum (*spectral velocity*,  $S_v$ ), dan percepatan maksimum (*spectral acceleration*,  $S_A$ ), (Budiono

Supriatna, 2011:26).

Mengacu pada SNI 1726-2012 respon spektrum dapat ditentukan berdasarkan parameter faktor jenis tanah dan faktor zonasi wilayah gempa. Berikut merupakan tahapan umum tentang cara menentukan respon spektrum sesuai dengan SNI:

- Menentukan parameter percepatan tanah SS da S1
- Menentukan koefisien situs
- Menghitung parameter respon spektrum percepatan gempa maksimum
- Menhitung nilai  $T_0$  dan  $T_s$

- Menghitung  $S_a$
- Plot kurva respons spektrum

### **Analisis *Time History***

Menurut SNI 1726-2012 tentang analisis *time history* (analisis respons riwayat waktu) harus terdiri dari analisis model matematis linear suatu struktur untuk menentukan responsnya melalui metode integrasi numerik terhadap kumpulan riwayat waktu percepatan gerakan tanah yang kompatibel dengan spektrum respons desain untuk situs yang bersangkutan.

### **Akselogram Gempa *Time History***

Beban gempa dinamik dapat dianalisis menggunakan analisis dinamik. Dan untuk beban *time history* menggunakan analisis riwayat waktu yang dijelaskan seperti di bawah ini :

#### **1. Analisis Dinamik**

Analisis dinamik adalah analisis struktur di mana pembagian gaya geser gempa di seluruh tingkat diperoleh dengan memperhitungkan pengaruh dinamis gerakan tanah terhadap struktur. Analisis dinamik terbagi menjadi 2 (Anggen, 2014), yaitu:

1) Analisis ragam respons spektrum di mana total respons didapat melalui superposisi dari respons masing-masing ragam getar.

2) Analisis riwayat waktu adalah analisis dinamis di mana pada model struktur diterapkan percepatan gempa dari masukan berupa akselogram dan respons struktur dihitung langkah demi langkah pada interval tertentu.

#### **2. Analisis Riwayat Waktu**

Menurut Chopra (2011), Analisa Riwayat waktu digunakan untuk menganalisis respons dinamik struktur yang menerima beban yang berubah-ubah terhadap waktu. Persamaan dinamik dari struktur seperti ini dapat dilihat pada persamaan 9.

$$[M] \ddot{u}(t) + [C] \dot{u}(t) + [K] u(t) = \{p(t)\} \quad (9)$$

Di mana  $[M]$  adalah matriks massa struktur;  $[C]$  adalah matriks redaman struktur;  $[K]$  adalah matriks kekakuan struktur;  $u(t)$  adalah simpangan yang berubah terhadap waktu;  $\dot{u}(t)$  adalah kecepatan yang berubah terhadap waktu;  $\ddot{u}(t)$  adalah percepatan dari struktur yang berubah terhadap waktu; dan  $p(t)$  adalah vektor gaya yang bekerja pada struktur yang berubah terhadap waktu. Analisis riwayat waktu dibagi atas dua yaitu analisis riwayat waktu linier dan analisis riwayat waktu nonlinier. Siregar (2010) mengemukakan bahwa, struktur linear

adalah struktur yang tidak mengalami perubahan Massa ( $M$ ), Redaman ( $C$ ), dan Kekakuan ( $K$ ) dalam kondisi apapun. Analisa dalam kondisi ini biasanya digunakan dengan asumsi bahwa struktur direncanakan selalu berada dalam kondisi elastis, atau sifat struktur dapat kembali ke posisi awal setelah diberikan beban tertentu. Struktur yang diberi analisis nonlinear adalah struktur yang mengalami perubahan Redaman ( $C$ ), dan Kekakuan ( $K$ ) pada kondisi tertentu. Analisa seperti ini membantu untuk memahami bagaimana sifat suatu struktur tersebut dapat bertahan. Nilai perbandingan titik hancur pertama kali leleh struktur disebut daktilitas ( $\mu$ ).

### 3. Percepatan Gempa Masukan

Sebelum menerapkan rangkaian akselogram dalam analisis struktural, data harus diskalakan untuk mengurangi ketidakcocokan antara karakteristik dan parameter desain di suatu wilayah berdasarkan standar atau dari situs *hazard* tertentu. Hal yang perlu diingat bahwa akselogram digunakan mewakili gerakan gempa. Periode alami (*natural period*) dari getaran struktur selalu ditentukan dengan tingkat ketidakpastian (*degree of uncertainty*). Penggunaan hanya satu akselogram dalam analisis struktural dapat dengan

mudah diremehkan (*underestimation*). Untuk alasan ini, jumlah minimum variasi karakteristik dari suatu akselogram lain yang mungkin dianggap akan mengurangi pengaruh fluktuasi periode ke periode dalam *spectra*. Maka dari itu analisis riwayat waktu harus dilakukan dengan tidak kurang dari tiga set data (masing-masing berisi dua komponen horizontal atau, jika gerakan vertikal dipertimbangkan, dua komponen horizontal dan satu komponen vertikal) dari gerakan tanah (*ground motion*) yang harus dipilih dan skala tidak kurang dari tiga catatan gempa (FEMA356). Akselogram yang dipilih dalam analisis *time history* pada level gempa rencana harus memenuhi persyaratan seperti yang ditetapkan dalam Pasal 11.1.3.2, SNI-1726-2012 yaitu respons spektrum dari gempa aktual (redaman 5%) yang dipilih sebagai gerak tanah masukan, rata-rata nilai percepatannya harus berdekatan dengan respons spektrum dari gempa rencana (redaman 5%) pada periode  $0,2T - 1,5T$ .

### Simpangan Antar Lantai

Berdasarkan SNI 1726-2012 terkait penentuan simpangan antar lantai tingkat desain ( $\Delta$ ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di

tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau. Defleksi pusat massa di tingkat ( $\delta_x$ ) (mm) harus ditentukan sesuai dengan persamaan 10 berikut :

$$\delta_x = \frac{C_d \Delta_x}{I_e} \quad (10)$$

Keterangan :

$C_d$  : faktor pembesaran defleksi

$\Delta_x$  : defleksi pada lokasi yang disyaratkan yang ditentukan dengan analisis elastis.

$I_e$  : faktor keutamaan gempa.

Sumber: SNI 1726-2012

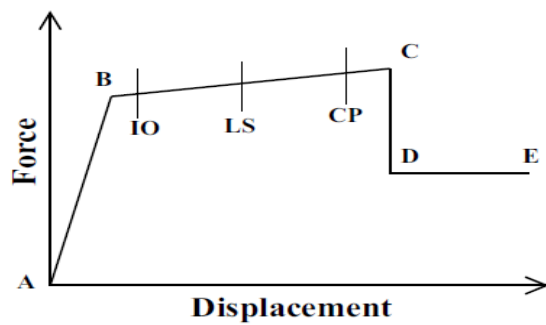
### **Sendi Plastis**

Mekanisme sendi plastis terbentuk di ujung-ujung dan di dasar kolom bawah menghasilkan perilaku histeresis yang stabil, pembentukan sendi plastis haruslah didominasi oleh perilaku lentur. Sendi plastis dapat terjadi pada suatu portal berderajat kebebasan banyak (MDOF). Gedung saat dilanda gempa yang cukup besar akan timbul momen-momen pada balok atau kolomnya, apabila besar dari momen-momen tersebut melampaui besar momen kapasitas balok atau kolom portal maka terjadi sendi plastis pada balok atau kolom ditandai dengan melelehnya tulangan baja pada beton bertulang. Sendi plastis terjadi secara bertahap

sampai bangunan gedung tersebut runtuh ( Ulfah, 2011).

Struktur didesain untuk mengalami kerusakan atau berperilaku inelastik melalui pembentukan sendi-sendi plastis pada elemen-elemen strukturnya, pada saat menahan beban gempa rencana. Perilaku inelastik atau plastis tersebut pada dasarnya memberikan mekanisme disipasi energi pada struktur sehingga dapat membatasi gaya gempa yang masuk ke struktur bangunan. Walaupun struktur bangunan berperilaku inelastik, struktur bangunan tidak boleh mengalami keruntuhan pada saat menerima beban gempa rencana atau bahkan beban gempa yang lebih besar (Imran dan Hendrik, 2010:35).

Berdasarkan FEMA 356 hubungan gaya dan perpindahan dapat dikategorikan ke dalam beberapa kriteria yang menunjukkan perilaku sendi plastis. Hubungan gaya dan perpindahan dalam bentuk grafik adalah seperti pada gambar 2 :



**Gambar 2 Tahapan Performa Struktur**

*Structural performance level* dikategorikan menjadi 3 rentang yaitu :

IO : *Immediate Occupancy*

LS : *Life Safety*

CP : *Collapse Prevention*

*Immediate Occupancy* berarti kondisi ketika tidak ada kerusakan yang berarti pada struktur di mana kekuatan dan kekakuannya kira-kira hampir sama dengan kondisi sebelum gempa. *Life Safety* berarti kondisi ketika terjadi kerusakan komponen struktur, kekakuan berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup terhadap keruntuhan, komponen nonstruktur masih ada tetapi tidak berfungsi dan dapat dipakai lagi jika sudah dilakukan perbaikan. *Collapse Prevention* berarti kondisi di mana kerusakan yang berarti pada komponen struktur dan

nonstruktur, kekuatan struktur berkurang banyak dan hampir mengalami keruntuhan.

Berdasarkan FEMA 356 rasio batasan simpangan untuk ketiga kategori *Immediate Occupancy*, *Life Safety*, dan *Collapse Prevention* seperti yang terdapat pada Tabel 2 :

| Sistem Struktur | IO    | LS    | CP  |
|-----------------|-------|-------|-----|
| Beton           | 1 %   | 2 %   | 4 % |
| Baja            | 0,7 % | 2,5 % | 5 % |

**Tabel 2** Kriteria Simpangan

*Sumber: FEMA 356*

### Rotasi

Berdasarkan FEMA 356 batasan rotasi pada struktur beton yang diizinkan untuk kondisi *Immediate Occupancy*, *Life Safety*, dan *Collapse Prevention* adalah seperti yang terdapat pada Tabel 3 :

| Sistem Struktur | IO   |       | LS   |       | CP    |        |
|-----------------|------|-------|------|-------|-------|--------|
|                 | (+)  | (-)   | (+)  | (-)   | (+)   | (-)    |
| Balok           | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |

**Table 3** Rotasi Diizinkan pada Struktur Beton (dalam radian)

*Sumber: FEMA 356*

Sedangkan untuk struktur baja, batasan rotasi yang diizinkan untuk masing-masing kondisi *Immediate Occupancy*, *Life Safety*,

dan *Collapse Prevention* adalah seperti yang terdapat pada Tabel 4 :

| Sistem Struktur | IO      |         | LS    |        | CP    |        |
|-----------------|---------|---------|-------|--------|-------|--------|
|                 | (+)     | (-)     | (+)   | (-)    | (+)   | (-)    |
| Balok           | 0,00175 | -0,0017 | 0,014 | -0,014 | 0,021 | -0,021 |

**Tabel 4** Rotasi Diizinkan pada Struktur Baja (dalam radian)

*Sumber: FEMA 356*

## METODOLOGI PENELITIAN

Metoda yang digunakan pada struktur ini adalah perbandingan perilaku struktur antar gedung dengan dan tanpa pengaplikasian *Huge Square-Hollow Bracing* menggunakan analisis pembebanan gempa *Leveling Time History*, yaitu dengan meningkatkan *Aog* atau *Peak Ground Activity Time History* secara bertahap hingga terjadi kegagalan struktur secara keseluruhan.

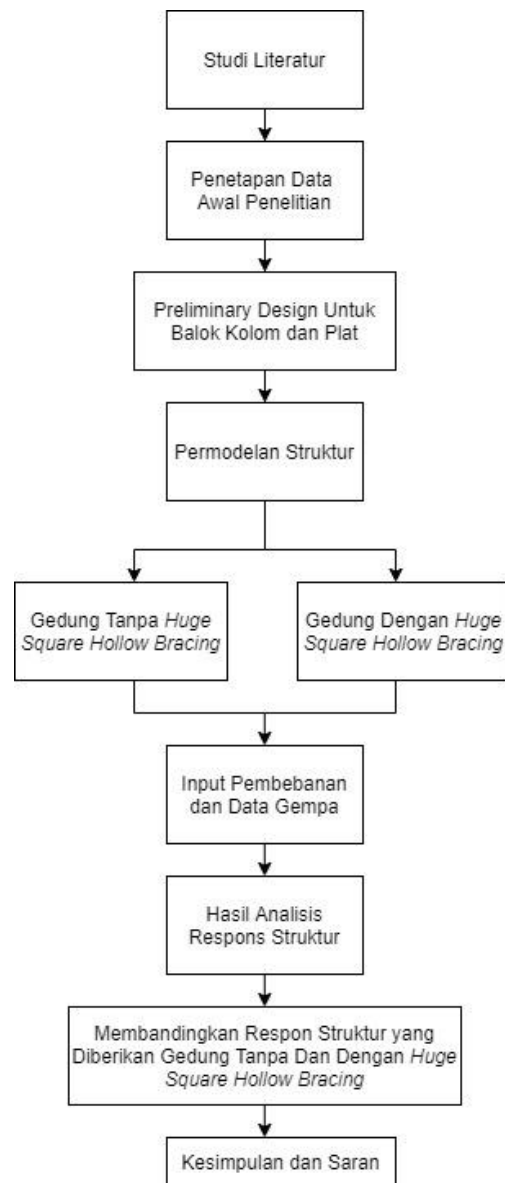
### Metode Pengambilan Data Penelitian

Metode pengumpulan data dalam penelitian ini terbagi menjadi dua cara yaitu: Data yang diperoleh dari hasil perhitungan berdasarkan *trial and error* dan data yang di dapat dari gempa *Time History* yang diasumsikan sebagai gempa real time.

### Analisis Pengolahan Data

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Leveling Time History* dengan cara meningkatkan *Aog* atau *Peak Ground Activity Time History* secara bertahap hingga struktur mulai mengalami kegagalan sampai mengalami kegagalan struktur secara keseluruhan.

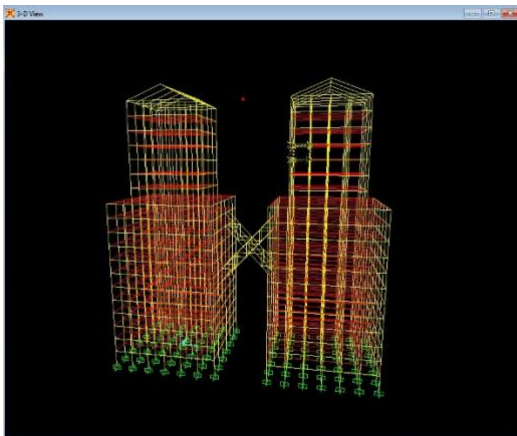
## Diagram Alir



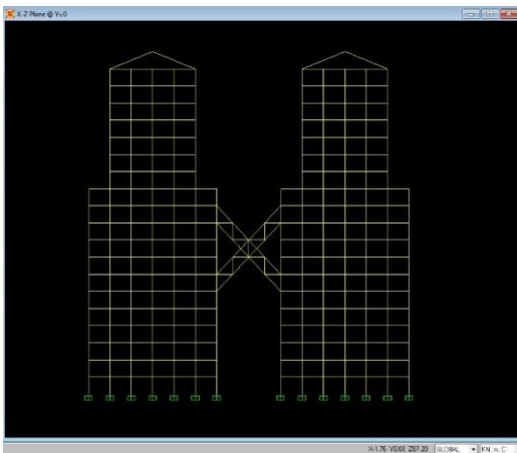
**Gambar 3.** Diagram Alir Permodelan

## Permodelan Struktur

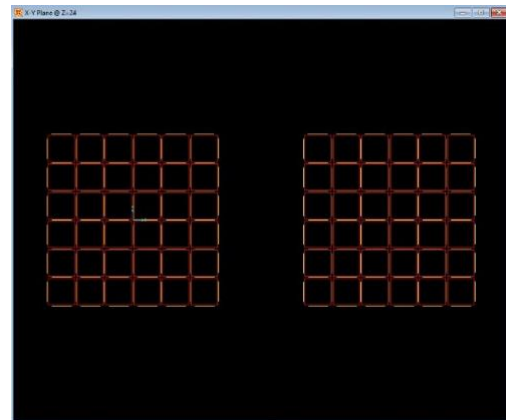
Permodelan struktur terbagi menjadi 2 model tipikal dengan jumlah lantai sebanyak 20 lantai. Berikut merupakan gambar-gambar dari permodelan struktur yang akan dianalisis:



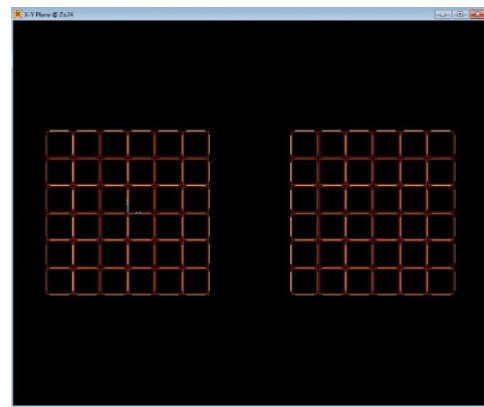
**Gambar 4.** Permodelan Struktur



**Gambar 5.** Tampak Samping



**Gambar 6.** Tampak Atas Lantai 1-13



**Gambar 7.** Tampak Atas Lantai 14-20

## Data Bangunan

Bangunan yang digunakan merupakan gedung imajinatif dengan lokasi bangunan di Lampung Selatan yang berfungsi sebagai bangunan perkantoran. Jenis tanah yang di pakai yaitu tanah sedang (SD) dengan jumlah lantai 20 dan tinggi dari tiap kolom 4 meter.

### Mutu Bahan

Mutu material beton yang akan digunakan pada permodelan struktur adalah seperti pada tabel berikut:

Dimana nilai modulu elstisitas untuk beton normal,  $E_c$  diizinkan diambil sebesar  $4700 \sqrt{f_c'}$ .

| Material        |       | Mutu             | Modulus Elastisitas | Modulus Geser |
|-----------------|-------|------------------|---------------------|---------------|
| Beton Bertulang | K-300 | $F_c = 29$ Mpa   | 23500 Mpa           | 9038,4615 Mpa |
| Beton Bertulang | K-500 | $F_c = 41,5$ MPa | 30277,632 Mpa       | 11645,243 Mpa |

**Tabel 5 Material Properties Beton**

Dan untuk material struktur baja dapat dilihat seperti pada tabel berikut:

| Material |       | Yield Stress<br>(Fy) | Tensile Stress<br>(Fu) | Modulus Elastisitas |
|----------|-------|----------------------|------------------------|---------------------|
| Baja     | BJ 50 | 290 MPa              | 500 MPa                | 200.000 MPa         |

**Tabel 6 Material Properties Baja**

### Preliminery Desain

Pada permodelan struktur dibutuhkan dimensi awal (*prelimenery* desain) dari struktur utama (balok dan kolom). Dimensi awal untuk rangka pemikul momen beton bertulang didapat dari hasil *trial and error* (coba-salah) dengan melakukan perhitungan berulang-ulang hingga didapatkan dimensi balok dan kolom yang aman dan memenuhi syarat.

| Elemen Struktur |    | Dimensi (mm) |
|-----------------|----|--------------|
| Kolom           | K1 | 1500 x1500   |
| Balok           | B1 | 1000 x 1000  |
| Balok           | B2 | 1000 x 1000  |

**Tabel 7 Dimensi Elemen Struktur Beton Bertulang**

| Elemen Struktur | Mutu  | Dimensi (mm) |
|-----------------|-------|--------------|
| Balok IWF       | BJ 50 | 400 x 400    |

**Tabel 8 Dimensi Elemen Struktur Pengaku**

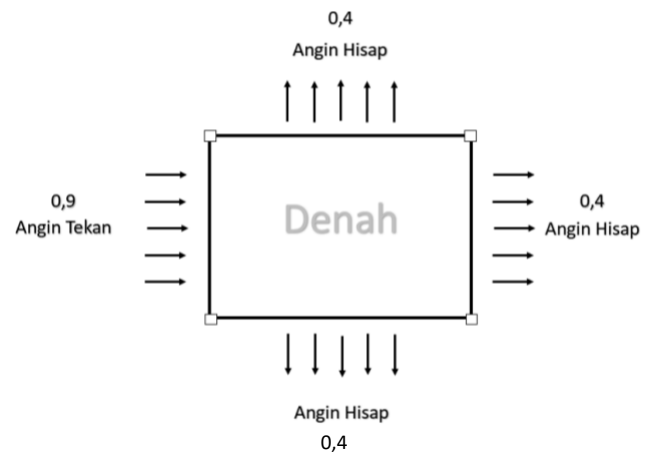
### Pembebanan Struktur

Beban yang di-assign ke plat (beban plat) merupakan beban SIDL (*superimposed dead load*) dan beban hidup yang berada pada wilayah pelat tersebut. Beban hidup pada lantai gedung harus diambil sesuai dengan fungsi gedung tersebut. Kedalam beban hidup tersebut sudah termasuk perlengkapan ruang sesuai dengan kegunaan lantai ruang yang bersangkutan. Mengacu pada SNI 1727-2013 beban hidup yang digunakan pada plat adalah  $2,4 \text{ kN/m}^2$  dan SIDL  $288 \text{ Kg/m}^2$ .

Pada permodelan ini beban angin yang diassign terbagi menjadi 4 arah. Angin yang bekerja pada arah x positif (WX+), angin yang bekerja pada arah x negatif (WX-), angin yang bekerja pada arah y positif(WY+), dan angin yang bekerja pada arah y negatif(WY-). Keempat arah angin ini bekerja pada masing-masing sisi struktur gedung . Beban angin yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebesar  $40 \text{ kg/m}^2$ .

Pada permodelan beban angin, untuk setiap beban angin dianggap adanya angin tekan dan angin hisap yang bekerja tegak lurus pada bidang-bidang yang ditinjau. Besarnya angin hisap dan tiup yang bekerja pada bidang struktur

ditentukan dengan mengalikan beban angin dengan koefisien-koefisien angin seperti yang diatur dalam PPIUG 1983. Koefisien-koefisien angin yang bekerja pada bidang struktur adalah seperti gambar berikut ini:



**Gambar 8** Koefisien Angin

Koefisien-koefisien tersebut juga berlaku untuk arah setiap arah angin positif atau negatif yang bekerja pada struktur.

### Beban Gempa

Beban gempa yang digunakan pada penelitian ini adalah beban gempa dinamik analisis *time history* (riwayat waktu). Rekaman catatan gempa yang digunakan merupakan hasil dari rekaman gempa *time history* di California Utara yaitu Gempa Loma Prieta E-W (1989)

### Kombinasi Pembebanan pada Permodelan Struktur

Untuk beban angin dan beban gempa memiliki arah datang yang bervariasi sehingga menciptakan kombinasi-kombinasi yang lebih banyak. Adapun kombinasi pembebanannya adalah sebagai berikut :

1.  $1,4DL$
2.  $1,2DL + 1,2 SIDL + 1,6 LL + 0,5 (Lr \text{ atau } H)$
3.  $1,2DL + 1,2SIDL + 1,6 (Lr \text{ atau } H) + LL$
4.  $1,2DL + 1,2SIDL + LL + W + 0,5(Lr \text{ atau } H)$
5.  $1,2DL + 1,2SIDL + E + LL$
6.  $0,9DL + W$
7.  $0,9DL + E$

Untuk kombinasi 4-6 menjadi :

1.  $1,2DL + 1,2SIDL + LL + (WX+) + 0,5Lr$
2.  $1,2DL + 1,2SIDL + LL + (WX-) + 0,5Lr$
3.  $1,2DL + 1,2SIDL + LL + (WY+) + 0,5Lr$
4.  $1,2DL + 1,2SIDL + LL + (WY-) + 0,5Lr$
5.  $1,2DL + 1,2SIDL + 1ExH + 0,3EyH + 1EV + LL$
6.  $1,2DL + 1,2SIDL + 1ExH - 0,3EyH + 1EV + LL$
7.  $1,2DL + 1,2SIDL - 1ExH + 0,3EyH + 1EV + LL$

8.  $1,2DL + 1,2SIDL + 1EyH + 0,3ExH + 1EV + LL$
9.  $1,2DL + 1,2SIDL + 1EyH - 0,3ExH + 1EV + LL$
10.  $1,2DL + 1,2SIDL - 1EyH + 0,3ExH + 1EV + LL$
11.  $0,9D + (WX+)$
12.  $0,9D + (WX-)$
13.  $0,9D + (WY+)$
14.  $0,9D + (WY-)$
15.  $0,9D + 1ExH + 0,3EyH + 1EV$
16.  $0,9D + 1ExH - 0,3EyH + 1EV$
17.  $0,9D - 1ExH + 0,3EyH + 1EV$
18.  $0,9D + 1EyH + 0,3ExH + 1EV$
19.  $0,9D + 1EyH - 0,3ExH + 1EV$
20.  $0,9D - 1EyH + 0,3ExH + 1EV$

### Analisis Struktur

Dalam melakukan analisis struktur pada tugas akhir ini digunakan *software* struktur. Tahap awalnya adalah memasukkan data-data struktur gedung yang berupa model struktur, dimensi dari elemen struktur serta mutu dari masing-masing material yang digunakan. Kombinasi pembebanan seperti yang telah dijelaskan di atas akan dimasukkan ke dalam program struktur. Permodelan ini dilakukan untuk dua jenis material struktur yang berbeda yakni beton dan baja. Berikut adalah langkah-langkah permodelan pada *software*:

1. Permodelan
2. Pembebanan
3. Analisis respons dinamik

Analisis pada tugas akhir ini sangat erat kaitannya dengan beban gempa dinamik yang akan dimasukkan pada saat permodelan di *software*. Pada akhirnya hasil dari analisis ini akan digunakan sebagai acuan terhadap parameter yang akan ditinjau pada struktur.

### **Parameter Perilaku Struktur**

Analisis respons dinamik riwayat waktu dengan menggunakan beban *time history* yang akan ditingkatkan  $A_0$  (percepatan awal gempa) beberapa kali hingga struktur mencapai *collapse* agar dapat melihat perilaku strukturnya secara bertahap. Adapun perilaku struktur yang akan ditinjau sebagai parameter untuk membandingkan kedua jenis struktur beton dan baja adalah sebagai berikut :

1. Cek Partisipasi Massa

Pada pengecekan partisipasi massa bertujuan untuk mengetahui *mode shape* (ragam getar) dari struktur yang mengalami partisipasi mencapai 90 % dari ketiga arah pola gerak (translasi-x, translasi-y, dan rotasi-z) struktur.

2. Cek Desain Plastis

Setelah diketahui bagian struktur mana yang akan digunakan sebagai acuan

dalam pengecekan desain plastis maka akan dilakukan peningkatan  $A_0$  (percepatan gempa awal) hingga kondisi struktur mencapai runtuh (*collapse*).

3. Simpangan

*Displacement* (simpangan) dari puncak sistem struktur yang merupakan *output* dari SAP akan dicek bersamaan dengan peningkatan  $A_0$  (percepatan gempa) dengan membandingkan terhadap batas simpangan sesuai dengan aturan pada SNI. Pada desain plastis juga akan dilakukan pengecekan simpangan yang sesuai dengan FEMA 356.

4. Rotasi

Nilai rotasi akan dilihat pada *output* SAP dan kemudian dibandingkan dengan batas kondisi sendi plastis yang mengacu pada FEMA 356 seperti yang sudah dijelaskan pada bab 2.

5. Cek *Base Shear* Struktur

Pengecekan *base shear* yang didapat dari *output* SAP juga akan membandingkan nilai gaya geser pada kedua jenis struktur beton dan baja sesuai dengan peningkatan percepatan gempa.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Deskripsi Struktur

Struktur ini memiliki 2 struktur yang terdiri dari gedung dan pengaku gedung. Pada struktur gedung struktur ini menggunakan jenis struktur beton bertulang dengan desain struktur yang didapatkan dari hasil *trial and error*. Sedangkan pengaku menggunakan jenis struktur baja yang juga merupakan hasil *trial dan error*.

### Deskripsi Struktur Gedung

Model terbagi menjadi 2 yaitu struktur yang menggunakan *big hollow square* sebagai pengaku dengan gedung yang tanpa menggunakan pengaku. Struktur terdiri dari 2 bagian yang memiliki 20 lantai (termasuk lantai atap). Bagian pertama terletak di bagian bawah dan memiliki luasan yang lebih besar sedangkan bagian kedua terletak di bagian atas dan memiliki luasan yang lebih kecil. Struktur bagian pertama memiliki 13 lantai dengan pembagian 6 bay arah sumbu x yang masing-masing memiliki 6 balok dengan panjang 5 meter dan 6 bay arah sumbu y yang masing-masing memiliki 6 balok dengan panjang 5 meter. Sedangkan jumlah kolom tiap lantai nya berjumlah 49 dengan tinggi untuk masing-masing

kolom sebesar 4 meter. Sedangkan bagian struktur kedua memiliki 6 lantai dengan pembagian 4 bay arah sumbu x yang masing-masing memiliki jumlah 4 balok dengan panjang 5 meter dan 4 bay arah sumbu y yang masing-masing memiliki jumlah 4 balok dengan panjang 5 meter.

### Deskripsi Struktur Pengaku

Desain struktur baja pada pengaku merupakan hasil dari perhitungan *trial and error*. Struktur ini terdiri dari 68 balok baja dengan profil baja yang masing-masing jembatannya terdiri dari 34 balok. Penghubung diasumsikan sebagai sambungan jepit karena tidak diizinkan untuk bertranslasi dan berotasi. Pada penelitian ini pengaku yang digunakan merupakan *diagonal braced CBF*.

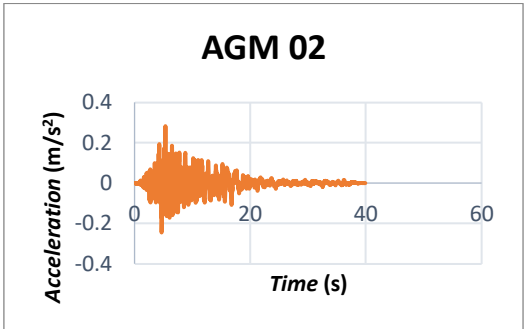
### Deskripsi Pembebanan

Kombinasi pembebanan paling dominan pada penelitian ini adalah beban gempa. Beban gempa yang akan diterima oleh struktur adalah beban gempa *time history*. Untuk kombinasi beban gempa yang digunakan merupakan *time history* kombinasi (TH Kombinasi) yang merupakan kombinasi non linier dari fungsi riwayat waktu. Dapat dinyatakan dalam bentuk TH kombinasi = 1E (E adalah beban gempa *nonlinier time*

history). Selain beban gempa, kombinasi pembebanan yang digunakan dalam studi kasus gedung merupakan pembebanan yang diatur pada peraturan pembebanan yang berlaku di Indonesia

### Time History

Data *time history* atau riwayat waktu didapat dari catatan akselogram gempa saat gempa terjadi di suatu wilayah. Dalam hal ini akselogram Loma Prieta E-W yang terekam pada 17 Oktober 1989 di bagian utara kota California.

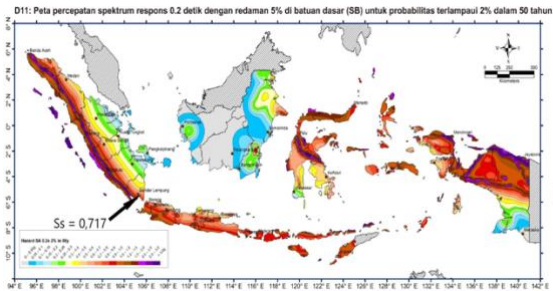


**Gambar 8.** Aselogram AGM02 (Loma Prieta E-W,17 Oktober 1989)

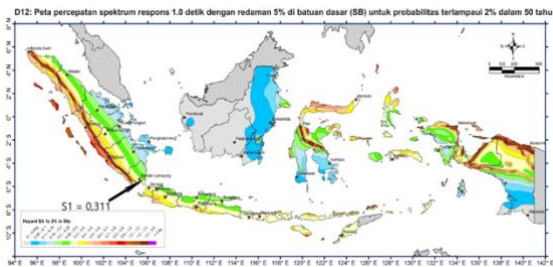
### Respon Spektrum

Analisa perhitungan respon spektrum didapatkan dari *website* kementrian PUPR yang kemudian setelah dilakukan perhitungan sesuai dengan SNI-1726-2012 dengan peta sumber dan bahaya gempa 2017 akan menghasilkan kurva respons spektrum. Berikut adalah perhitungan respons spektrum tersebut dengan kemungkinan terlewati selama

umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2% untuk jenis tanah lunak (SD).



**Gambar 9.** Peta Ss



**Gambar 10.** Peta S1

Dari peta dan sumber bahaya gempa 2017 pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 dapat dilihat nilai percepatan batuan dasar periode pendek 0,2 detik (Ss) dan percepatan batuan dasar periode 1 detik (S1) masing-masing 0,716 dan 0,31.

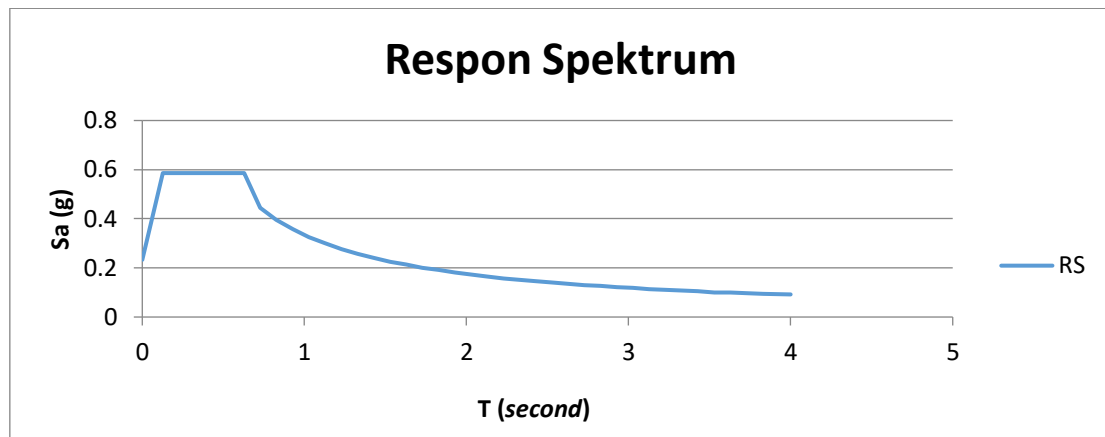
| T<br>(detik) | Sa<br>(g) | T<br>(detik) | Sa<br>(g) |
|--------------|-----------|--------------|-----------|
| 0            | 0,234     | 1,028        | 0,358     |
| 0,126        | 0,586     | 1,1          | 0,334     |
| 0,628        | 0,586     | 1,75         | 0,210     |
| 0,728        | 0,506     | 2            | 0,184     |
| 0,828        | 0,445     | 3            | 0,123     |
| 0,928        | 0,397     | 4            | 0,092     |

**Tabel 9.** Data Respons Spektrum

Desain

Hasil dari perhitungan respons spektrum desain dapat dilihat pada Gambar 4.7

yaitu kurva respons spektrum dengan absis waktu dan ordinat percepatan.



**Gambar 9.** Kurva Respon Spektrum

### Analisis Struktur

Analisis struktur dilakukan dengan menggunakan *software* untuk mendapatkan simpangan, rotasi, partisipasi dan juga sendi plastis pada struktur bangunan beton. Setelah dilakukan permodelan lalu akan dilakukan peningkatan percepatan awal gempa *time history*. Analisis yang digunakan dalam analisis ini adalah analisis dinamik *nonlinier* riwayat waktu.

### Cek Partisipasi Massa

Pengecekan partisipasi massa dilakukan untuk mengetahui pada kondisi *mode* (ragam getar) berapa struktur mengalami partisipasi massa mencapai 90 % (sesuai dengan SNI 1726-2012). Di mana *mode* tersebut digunakan sebagai acuan penentuan pola gerak yang dominan.

## Partisipasi Massa Struktur Dengan Pengaku

Hasil dari ragam getar untuk struktur gedung dimuat seperti yang ada pada tabel berikut.

| Mode | T<br>(Detik) | Partisipasi Massa (%) |        |             |         |         |             |        |        |            |
|------|--------------|-----------------------|--------|-------------|---------|---------|-------------|--------|--------|------------|
|      |              | ix                    | UX     | Pola Gerak  | iy      | UY      | Pola Gerak  | iz     | UZ     | Pola Gerak |
| 1    | 1,52993      | 0                     | 0      |             | 72,4473 | 72,4473 | Translasi Y | 78,497 | 78,497 |            |
| 2    | 1,47992      | 72,79                 | 72,79  |             | 1E-06   | 72,4473 |             | 2,117  | 80,614 |            |
| 3    | 1,15585      | 0,3058                | 73,096 |             | 0,00012 | 72,4474 |             | 1,772  | 82,386 |            |
| 4    | 0,64647      | 0,0005                | 73,096 |             | 12,4752 | 84,9226 |             | 0,403  | 82,789 |            |
| 5    | 0,64597      | 12,431                | 85,528 |             | 0,00039 | 84,923  |             | 2,5    | 85,289 |            |
| 6    | 0,58483      | 0,0061                | 85,534 |             | 0,01413 | 84,9371 |             | 0,172  | 85,461 |            |
| 7    | 0,34227      | 0,0001                | 85,534 | Translasi X | 6,01604 | 90,9531 | Translasi Y | 1,985  | 87,446 | Rotasi Z   |
| 8    | 0,3348       | 5,3467                | 90,88  |             | 0,00017 | 90,9533 |             | 1,866  | 89,312 |            |
| 9    | 0,2216       | 0,6433                | 91,524 |             | 2,25812 | 93,2114 |             | 0,7    | 90,012 |            |
| 10   | 0,22073      | 2,3271                | 93,851 |             | 0,64631 | 93,8577 |             | 0,133  | 90,145 |            |
| 11   | 0,11771      | 3,7062                | 97,557 |             | 0,77678 | 94,6345 |             | 1,959  | 92,104 |            |
| 12   | 0,11632      | 0,7672                | 98,324 |             | 3,72123 | 98,3557 |             | 0,698  | 92,802 |            |

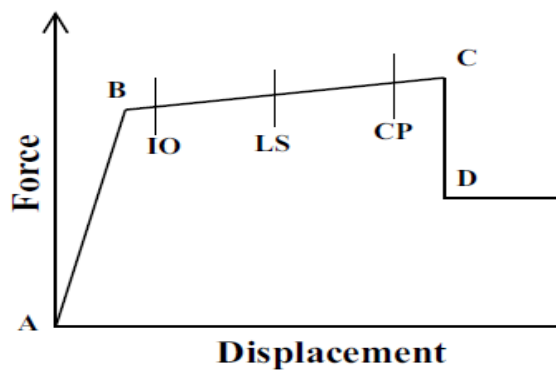
**Tabel 10.** Partisipasi Massa Struktur Gedung Dengan Pengaku

| Mode | T<br>(Detik) | Partisipasi Massa (%) |         |             |         |         |             |        |        |            |
|------|--------------|-----------------------|---------|-------------|---------|---------|-------------|--------|--------|------------|
|      |              | ix                    | UX      | Pola Gerak  | iy      | UY      | Pola Gerak  | iz     | UZ     | Pola Gerak |
| 1    | 1,52738      | 72,32538              | 72,3254 |             | 0,00122 | 0,00122 |             | 80,537 | 80,537 |            |
| 2    | 1,52701      | 0,001223              | 72,3266 |             | 72,3188 | 72,32   |             | 1,648  | 82,185 |            |
| 3    | 1,17511      | 2,41E-09              | 72,3266 |             | 7E-05   | 72,3201 |             | 0,031  | 82,216 |            |
| 4    | 0,64385      | 12,49153              | 84,8181 |             | 0,00184 | 72,3219 |             | 0,328  | 82,544 |            |
| 5    | 0,64379      | 0,001839              | 84,82   | Translasi X | 12,5027 | 84,8246 | Translasi Y | 2,201  | 84,745 |            |
| 6    | 0,34109      | 6,014628              | 90,8346 |             | 0,00175 | 84,8264 |             | 0,716  | 85,461 |            |
| 7    | 0,34101      | 0,00176               | 90,8364 |             | 6,03561 | 90,862  |             | 0,091  | 85,552 | Rotasi Z   |
| 8    | 0,23375      | 1,975666              | 92,812  |             | 0,00038 | 90,8624 |             | 1,849  | 87,401 |            |
| 9    | 0,22208      | 0,000544              | 92,8126 |             | 2,89872 | 93,7611 |             | 2,334  | 89,735 |            |
| 10   | 0,16714      | 2,657156              | 95,4697 |             | 0,00046 | 93,7615 |             | 0,41   | 90,145 |            |
| 11   | 0,11837      | 0,000736              | 95,4705 |             | 4,5238  | 98,2853 |             | 2,059  | 92,204 |            |
| 12   | 0,08651      | 3,558236              | 99,0287 |             | 0,00057 | 98,2859 |             | 0,448  | 92,652 |            |

**Tabel 11.** Partisipasi Massa Struktur Gedung Dengan Pengaku

### Cek Sendi Plastis

Pengecekan sendi plastis dilakukan dengan melakukan peningkatan Aog hingga mencapai kondisi di atas CP (*Collapse Prevention*). Sebelum mencapai kondisi runtuh, sendi plastis akan melewati beberapa tahap batasan seperti yang ada pada kurva pada Gambar 4.8.



Gambar 10 Sendi Plastis

B : batas elastis

IO : *immediate occupancy*

LS: *life safety*

CP: *collapse prevention*

### Desain Plastis Struktur Dengan Pengaku

Sendi plastis terbentuk pada ujung-ujung *member* baik itu balok ataupun kolom. Proses terbentuknya sendi plastis bersamaan dengan ditingkatkannya beban gempa yang diterima oleh struktur

beton (dalam hal ini beban gempa *time history*). Beban gempa yang diterima oleh *member* struktur akan mengakibatkan setiap *member* mengalami peningkatan nilai rotasi dan momen. Ketika suatu *member* struktur beton sudah mengalami nilai rotasi dan momen tertentu maka sendi plastis akan terbentuk. Pada struktur berikut kondisi saat sendi plastis terbentuk sudah melampaui *collapse prevention* (CP) mulai tercapai pada *member* 76 ketika struktur menerima gempa dengan percepatan awal 12 kali dari percepatan awal gempa (2,808 g). *Member* ditentukan berdasarkan rotasi maksimum dari tinjauan *output*.

### Desain Plastis Struktur Tanpa Pengaku

Proses terbentuknya sendi plastis bersamaan dengan peningkatan beban gempa yang diterima oleh struktur beton tanpa pengaku. Beban gempa yang diterima oleh *member* struktur akan mengakibatkan setiap *member* mengalami peningkatan nilai rotasi dan momen. Dan pada struktur gedung beton tanpa pengaku kondisi ketika sendi plastis telah mencapai kondisi di atas CP berada pada saat struktur beton menerima beban gempa dengan

percepatan awal 6 kali percepatan awal gempa (1,404g).

### Simpangan

Pengecekan *displacement* (simpangan) arah horizontal dari puncak sistem struktur dilihat dari *output* SAP yang sebelumnya sudah di-*running* dengan beban gempa lalu dibandingkan dengan batas simpangan yang diatur dalam SNI 1726-2012 dan FEMA 356.

### Simpangan Struktur Dengan Pengaku

Berdasarkan SNI 1726-2012 simpangan izin antar lantai (*interstory*) yaitu sebesar 1,5 % dari tinggi tingkat di bawah tingkat yang ditinjau. Pada struktur gedung ada 1 titik *joint* yang ditinjau yang ditentukan berdasarkan simpangan terbesar yang dialami *joint* pada struktur.

| PGA (g) | Displacement (m) | X ijin (m) |
|---------|------------------|------------|
|         | J3562            |            |
| 0,347   | 0,0084           | 0,06       |
| 1,404   | 0,0504           | 0,06       |
| 2,808   | 0,1008           | 0,06       |
| 3,51    | 0,1260           | 0,06       |
| 7,02    | 0,2520           | 0,06       |

**Tabel 12.** Simpangan Struktur Beton  
(SNI 1726-2012)

| PGA (g) | Displacement (m) | IO 1% | LS 2% | CP 4% |
|---------|------------------|-------|-------|-------|
|         | J3562            |       |       |       |
| 0,234   | 0,0084           | 0,04  | 0,08  | 0,16  |
| 1,404   | 0,0504           | 0,04  | 0,08  | 0,16  |
| 2,808   | 0,1008           | 0,04  | 0,08  | 0,16  |
| 3,51    | 0,1260           | 0,04  | 0,08  | 0,16  |
| 7,02    | 0,2520           | 0,04  | 0,08  | 0,16  |

**Tabel 13.** Simpangan Stukur beton  
(FEMA 356)

Dapat dilihat bahwa dengan getaran pada periode 0,2116 detik dan akselerasi yang mencapai 0,00196 m/detik pada standar SNI peningkatan hingga 2 kali awal gempa tidak mengantarkan struktur melewati simpangan izin. Dan dengan menggunakan FEMA 356 struktur beton dengan pengaku belum ada yang mencapai kondisi *collapse prevention* ketika dilakukan peningkatan hingga 30 kali awal gempa.

### Simpangan Struktur Tanpa Pengaku

| PGA (g) | Displacement (m) | X ijin (m) |
|---------|------------------|------------|
|         | J1128            |            |
| 0,234   | 0,0095           | 0,06       |
| 1,404   | 0,0567           | 0,06       |
| 2,808   | 0,1135           | 0,06       |
| 3,51    | 0,1418           | 0,06       |
| 7,02    | 0,2837           | 0,06       |

**Tabel 13.** Simpangan Struktur Beton  
(SNI 1726-2012)

| PGA<br>(g) | Displacement<br>(m) | IO<br>1% | LS<br>2% | CP<br>4% |
|------------|---------------------|----------|----------|----------|
|            | 3562                |          |          |          |
| 0,234      | 0,0095              | 0,04     | 0,08     | 0,16     |
| 1,404      | 0,0567              | 0,04     | 0,08     | 0,16     |
| 2,808      | 0,1135              | 0,04     | 0,08     | 0,16     |
| 3,51       | 0,1418              | 0,04     | 0,08     | 0,16     |
| 7,02       | 0,2837              | 0,04     | 0,08     | 0,16     |

**Tabel 14.** Simpangan Stukur beton  
(FEMA 356)

*prevention* tercapai saat peningkatan gempa hingga 30 kali awal gempa.

Dilihat dari Tabel dengan menggunakan FEMA 356, strutkur beton gedung tanpa pengaku masih memenuhi nilai simpangan izin. Dan kondisi *joint* masih berada pada batas aman. Namun pada saat percepatan mencapai 1,404g kondisi telah mencapai *immediate occupancy*. Dan pada percepatan 2,808g kondisi sudah mencapai *life safety*. Pada saat percepatan ditingkatkan sebesar 7,02g kondisi sudah melalui batas aman yaitu *collapse preventation*.

Dapat dilihat bahwa dengan getaran pada periode 0,16174 detik dan akselerasi yang mencapai 0,00176 m/detik pada standar SNI peningkatan hingga 2 kali awal gempa tidak mengantarkan struktur melewati simpangan izin. Dan dengan menggunakan FEMA 356 struktur beton dengan pengaku belum ada yang mencapai kondisi *collapse prevention* ketika dilakukan peningkatan hingga 15 kali awal gempa. Kondisi *collapse*

## Rotasi

Untuk kondisi nilai rotasi pada struktur beton dengan pengaku dapat dilihat di Tabel 15. *Member* yang digunakan untuk meninjau nilai rotasi pada struktur adalah *member 76*.

Peningkatan percepatan awal gempa pada struktur beton dengan pengaku struktur dilakukan hingga 7,02g (30 kali Aog) pada periode 0,2216 detik dan akselerasi mencapai 0,00196 m/detik.

Dari Tabel 15 dapat dilihat bahwa pada gempa 2,808 (12 kali Aog) kondisi CP baru tercapai. Kondisi ini dapat terjadi karena nilai yang terjadi pada ujung *frame* sudah melebihi batas nilai-nilai rotasi yang ada pada FEMA 356.

| PGA (g) | 0,05                  |                       | 0,95                  |                       | IO   |       | LS   |       | CP    |        |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|-------|------|-------|-------|--------|
|         | $\theta_{\max}$ (rad) | $\theta_{\min}$ (rad) | $\theta_{\max}$ (rad) | $\theta_{\min}$ (rad) |      |       |      |       |       |        |
|         |                       |                       |                       |                       | (+)  | (-)   | (+)  | (-)   | (+)   | (-)    |
| 0,234   | 0,0010                | -0,0045               | 0,0027                | -0,0028               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 0,351   | 0,0016                | -0,0067               | 0,0040                | -0,0042               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 0,702   | 0,0031                | -0,0134               | 0,0081                | -0,0083               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 1,404   | 0,0062                | -0,0239               | 0,0162                | -0,0166               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 2,808   | 0,0124                | -0,0538               | 0,0323                | -0,0333               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 3,51    | 0,0155                | -0,0672               | 0,0404                | -0,0416               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 7,02    | 0,0310                | -0,1344               | 0,0808                | -0,0832               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |

**Tabel 15** Rotasi Struktur Beton Dengan Pengaku

Untuk struktur tanpa pengaku kondisi nilai rotasi yang ditinjau dapat dilihat pada Tabel 16 berikut. *Member* yang digunakan untuk meninjau nilai rotasi

pada struktur ini merukan *member 76* yang sebelumnya juga digunakan untuk meninjau struktur beton dengan pengaku.

| PGA (g) | 0,05                  |                       | 0,95                  |                       | IO   |       | LS   |       | CP    |        |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|-------|------|-------|-------|--------|
|         | $\theta_{\max}$ (rad) | $\theta_{\min}$ (rad) | $\theta_{\max}$ (rad) | $\theta_{\min}$ (rad) |      |       |      |       |       |        |
|         |                       |                       |                       |                       | (+)  | (-)   | (+)  | (-)   | (+)   | (-)    |
| 0,234   | 0,0013                | -0,0057               | 0,0035                | -0,0036               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 0,351   | 0,0020                | -0,0086               | 0,0052                | -0,0053               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 0,702   | 0,0040                | -0,0172               | 0,0104                | -0,0107               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 1,404   | 0,0080                | -0,0345               | 0,0207                | -0,0213               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 2,808   | 0,0159                | -0,0689               | 0,0414                | -0,0426               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 3,51    | 0,0199                | -0,0862               | 0,0518                | -0,0533               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |
| 7,02    | 0,0398                | -0,1723               | 0,1036                | -0,1066               | 0,01 | -0,01 | 0,02 | -0,02 | 0,025 | -0,025 |

**Tabel 16** Rotasi Struktur Beton Tanpa Pengaku

Peningkatan percepatan gempa dilakukan dari satu kali percepatan gempa hingga 30 kali percepatan gempa pada periode 0,16714 detik dan akselerasi mencapai 0,00176 m/detik. Pada percepatan gempa 0,234g kondisi seluruh struktur masih ada di kondisi aman sampai percepatan 0,702g. Namun setelah percepatan gempa ditingkatkan sebesar 6 kali percepatan gempa (1,404g) sudah mencapai kondisi *collapse prevention*. Hal ini sesuai dengan batasan-batasan nilai yang ada pada di Tabel 16.

### Hasil Base Shear

Gaya geser dasar (*base shear*) ini merupakan hasil analisis gaya geser dinamik dengan kombinasi pembebanan yang paling dominan yaitu *time history* kombinasi.

Untuk struktur dengan pengaku nilai gaya geser dasar (*base shear*) untuk beban gempa dinamik non linier *time history* seperti yang ada pada Tabel 17 dan untuk struktur beton tanpa pengaku nilai *base shear* untuk kasus beban gempa yang sama ditampilkan pada Tabel 18

| PGA (g) | T (Detik) | Nilai Base Shear (kN) |
|---------|-----------|-----------------------|
| 0,234   | 0,2216    | 152279,2827           |
| 0,351   |           | 222091,7198           |
| 0,702   |           | 444183,4396           |
| 1,404   |           | 888366,8792           |
| 2,808   |           | 1776733,758           |
| 3,51    |           | 2220917,198           |
| 7,02    |           | 4441834,396           |

**Tabel 17** Base Shear Struktur Beton Dengan Pengaku

Dari data diatas dapat dilihat bahwa nilai *base shear* untuk beban gempa dinamik *nonlinier time history* dengan percepatan awal gempa 0,234g pada periode 0,2216 adalah sebesar 155279,287 KN. Dan meningkat seiring dengan peningkatan percepatan gempa.

Untuk struktur tanpa pengaku, nilai *base shear* yang didapatkan bersamaan peningkatan percepatan beban gempa dapat dilihat pada Tabel 4.11 berikut.

**Tabel 18** Base Shear Struktur Beton Tanpa Pengaku

| PGA (g) | T (Detik) | Nilai Base Shear (kN) |
|---------|-----------|-----------------------|
| 0,234   | 0,16714   | 129050,2395           |
| 0,351   |           | 188213,3219           |
| 0,702   |           | 376426,6437           |
| 1,404   |           | 752853,2874           |
| 2,808   |           | 1505706,575           |
| 3,51    |           | 1882133,219           |
| 7,02    |           | 3764266,437           |

Pada struktur beton gedung tanpa pengaku untuk beban gempa dinamik *non linier time history* dengan percepatan awal gempa 0,234g pada periode 0,16714 adalah 12950,2395 KN. Dan meningkat seiring dengan peningkatan percepatan gempa.

Gaya geser dasar ini merupakan hasil analisis gaya geser dinamik dengan kombinasi pembebanan yang paling dominan yaitu *time history* kombinasi. Dan dari kedua data diatas dapat disimpulkan bahwa *base shear* dinamik struktur beton yang menggunakan pengaku dan tanpa menggunakan pengaku dipengaruhi oleh adanya peningkatan percepatan awal gempa (Aog). Lalu, nilai *base shear* struktur yang tanpa menggunakan pengaku lebih besar dibandingkan dengan struktur yang menggunakan pengaku yang menyebabkan biaya struktur bawah yang lebih mahal karna dibutuhkan struktur bawah yang lebih kuat untuk kondisi tanah yang sama.

## KESIMPULAN

### Simpulan

Perilaku struktur yang dievaluasi terhadap beban gempa *time history* yang ditingkatkan percepatan awal gempanya adalah sebagai berikut,

#### Partisipasi massa

Pada struktur beton gedung dengan pengaku, pola gerak yang dominan adalah pola gerak rotasi z dikarenakan terjadi pada mode 9. Dan pada struktur beton gedung tanpa pengaku, pola gerak yang dominan adalah pola gerak rotasi z dikarenakan terjadi pada mode 10.

#### Sendi plastis

Pada struktur beton gedung dengan pengaku, ketahanan sendi plastis mencapai kondisi di atas *collapse prevention* 2 kali lebih kuat dibandingkan struktur beton gedung tanpa pengaku.

#### Simpangan

Pada struktur beton dengan pengaku dengan representasi 1 titik (*joint*), simpangan yang terjadi 13% lebih kecil dibandingkan struktur beton tanpa pengaku.

## Rotasi

Pada struktur beton dengan pengaku, rotasi yang terjadi 26,6% lebih kecil dibandingkan struktur beton tanpa pengaku. Mengacu kepada FEMA 356 struktur beton dengan pengaku yang dianalisis 2 kali lebih aman dibandingkan struktur beton tanpa pengaku.

## Base Shear

Nilai *base shear* pada struktur beton dengan pengaku dengan beban gempa dinamik *nonlinier* lebih kecil 18% dari struktur beton tanpa pengaku.

Struktur yang terlebih dahulu mengalami kegagalan ketika diberikan beban gempa dinamik *nonlinier* pada struktur adalah balok arah y dengan nomor 76.

Gempa maksimum yang dapat ditahan struktur beton gedung dengan pengaku adalah sebesar 6 kali percepatan gempa awal (1,404g). Dan pada struktur beton tanpa pengaku beban gempa maksimum yang dapat ditahan adalah sebesar 3 kali percepatan gempa awal (0,702g).