

RESPON DINAMIS BANGUNAN BERTINGKAT BANYAK DENGAN VARIASI TATA LETAK OUTRIGGER

Estty Rodianti Pesik

Steenie E. Wallah, Banu D. Handono

Universitas Sam Ratulangi Fakultas Teknik Jurusan Sipil Manado

Email: esttypesik@gmail.com

ABSTRAK

Berbagai sistem desain dan metode perencanaan telah dikembangkan untuk meningkatkan kekakuan lateral dalam menahan beban gempa pada bangunan tingkat tinggi seperti, *moment resisting frames, shear wall-frame systems, core and outrigger systems, framed-tubes, tube-in-tube, bundled tubes, truss tubes without interior columns, modular tubes*. Dalam sistem-sistem tersebut dipilih *core and outrigger systems*, karena sistem ini dianggap paling efektif digunakan untuk bangunan dengan ketinggian 40 lantai dibandingkan dengan sistem yang hanya menggunakan *core* atau *shear wall-frame system*.

Pemodelan dimensi bangunan berupa struktur beton bertulang dengan denah 49 m x 49 m, struktur 40 tingkat dengan tinggi 3 meter untuk tiap tingkatnya. Elemen struktur: balok 45 cm x 75 cm, kolom lt. 1-10, 120 cm x 120 cm, kolom lt. 11-20, 110 cm x 110 cm, kolom lt. 21-30, 100 cm x 100 cm, kolom lt. 31-40, 90 cm x 90 cm, tebal pelat 17 cm, tebal *core wall* 50 cm, *outrigger* menggunakan profil baja *H-Beam* 350 mm x 350 mm. Struktur dianalisis dengan pembebanan gempa dinamis menggunakan *Response Spektrum* dan gempa statis menggunakan *Equivalent Static Load*. Struktur dianalisa secara tiga dimensi menggunakan software *ETABS*.

Dari penelitian ini dihasilkan penempatan *outrigger* yang berkontribusi besar terhadap pengurangan simpangan yaitu pada $\frac{1}{2}$ dan $\frac{3}{4}$ dari tinggi bangunan. Dimana lokasi tersebut mampu mereduksi simpangan sebesar 12,27% untuk gempa dinamis.

Kata kunci: *bangunan tingkat tinggi, outrigger, beban gempa, simpangan, ETABS.*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya suatu Negara maka berkembang pula struktur pembangunan di Negara tersebut. Inovasi perencanaan struktur terus menerus dikembangkan dalam mendesain bangunan tingkat tinggi. Pembangunan gedung tingkat tinggi sangat rentan terhadap bahaya lateral seperti angin dan gempa bumi. Sehingga semakin tinggi bangunan maka semakin rawan bangunan tersebut dalam menahan gaya lateral, terutama gaya gempa.

Pada bangunan tingkat tinggi pengaruh gaya gempa sangat signifikan karena dapat menyebabkan deformasi lateral yang berlebihan. Bangunan rangka-dinding geser menjadi tidak efisien lagi di atas ketinggian 40 lantai karena banyak memerlukan bahan untuk membuat bangunan menjadi lebih kaku dan kuat. Berbagai sistem desain dan metode perencanaan terus dikembangkan dalam dunia teknik sipil dan dapat digunakan untuk merencanakan bangunan tingkat tinggi dengan tujuan dapat menahan deformasi lateral yang berlebihan salah satunya dengan

penerapan dan penggunaan sistem *Outrigger* dan *Shear wall* inti (*core wall*) pada bangunan tingkat tinggi.

Outrigger umumnya berupa profil baja (bisa juga dari beton ataupun komposit). Kolom bagian terluar dari bangunan tingkat tinggi terhubung dengan *core wall* yang terdapat di bagian tengah bangunan dengan tujuan untuk menambah kekakuan dan kekuatan struktur bangunan pada satu tingkat atau lebih. Sistem *outrigger* biasanya digunakan sebagai salah satu sistem struktural yang efektif untuk mengontrol beban yang bekerja secara lateral. Ketika beban lateral yang tergolong kecil maupun menengah bekerja pada suatu struktur, baik beban angin ataupun gempa yang menimbulkan respon pada bangunan, maka kerusakan struktur dapat dihindari. Selain itu dengan adanya *core wall* yang bersifat kaku pada bangunan karena dianggap sebagai balok kantilever vertikal yang terjepit di bagian bawah sehingga menjadikan *core wall* sebagai salah satu penahan beban lateral yang bekerja pada bangunan.

Dengan adanya variasi tata letak *outrigger* ini, dapat memberikan kontribusi yang berbeda

terhadap kekakuan bangunan khususnya untuk menahan gaya lateral. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh tata letak *outrigger* terhadap nilai simpangan horisontal yang terjadi akibat beban gempa. Pada studi ini akan dilakukan analisis pengaruh *outrigger* pada portal struktur beton bertulang 40 lantai akibat beban gempa.

Rumusan Masalah

Dengan adanya latar belakang di atas mengenai masalah tata letak *outrigger*, maka akan diteliti lebih lanjut mengenai besar simpangan yang terjadi akibat adanya variasi tata letak *outrigger*. Variasi tata letak *outrigger* yang akan diteliti adalah pemasangan 2 (dua) set *outrigger* pada bangunan beton setinggi 40 lantai.

Batasan Masalah

Pada penelitian ini permasalahan dibatasi pada :

1. Struktur bangunan yang dianalisis adalah struktur bangunan beton bertulang berbentuk persegi sebanyak 40 lantai.
2. Tinggi setiap lantai adalah 3 meter, sehingga menjadikan tinggi bangunan keseluruhan 120 meter.
3. Bangunan memiliki *core wall* 7 m x 7 m dengan ketebalan 50 cm.
4. Menggunakan beban akibat gempa sebagai beban dinamis.
5. Menggunakan data-data gempa untuk wilayah Manado, dengan kelas situs SD (tanah sedang), kategori desain seismik D.
6. *Outrigger* yang digunakan adalah dari baja.
7. *Outrigger* yang dimodelkan berupa penempatan 2 set *outrigger* pada lantai bangunan.
8. Tidak memperhitungkan sambungan.
9. Pemodelan dan analisa struktur menggunakan *software* ETABS

Tujuan Penelitian

Dari penelitian ini penulis ingin mendapatkan beberapa tujuan akhir, diantaranya :

1. Membandingkan simpangan horisontal yang terjadi akibat beban gempa pada struktur bangunan beton bertulang yang menggunakan *outrigger* pada lantai bangunan beton setinggi 40 lantai.
2. Menentukan lokasi optimum penempatan *outrigger* pada bangunan tingkat tinggi.

Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kontribusi dari *outrigger* terhadap

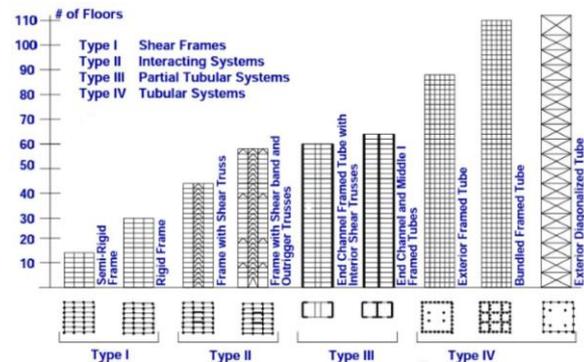
kekuatan dan daya tahan dari bangunan ketika menahan beban lateral berupa beban gempa, dengan membandingkan struktur dengan penempatan 2 set *outrigger* pada lantai bangunan.

LANDASAN TEORI

Sistem Struktur

Sistem struktur adalah kombinasi dari berbagai elemen struktur yang disusun sedemikian rupa membentuk satu kesatuan struktur yang dapat memikul beban-beban yang direncanakan.

Sistem struktur sudah dikembangkan sejak zaman dahulu kala, akan tetapi sistem struktur modern baru mulai berkembang pada abad ke 19. Perkembangan sistem struktur pada saat ini sudah sangat maju, sehingga bangunan gedung dapat mencapai lebih dari 100 tingkat. Berkembangnya evolusi berbagai sistem struktur gedung tinggi dapat dilihat pada Gambar 2.1 dibawah ini. Berbagai sistem struktur tersebut harus mampu memikul berbagai jenis beban, seperti beban gravitasi, beban lateral, beban kejut (*blast* dan *impact loads*) dan suhu, Tumilar (2015).



Gambar 1. Evolusi Sistem pada Gedung Tinggi

Sumber : Tumilar, 2015

Schueller (2001) menjelaskan pertimbangan dalam memilih sistem struktur bergantung pada hal-hal berikut ini :

1. Pertimbangan ekonomis
2. Kondisi tanah
3. Rasio tinggi dengan lebar bangunan
4. Pertimbangan fabrikasi dan pelaksanaan pembangunan
5. Pertimbangan mekanis
6. Pertimbangan tingkat bahaya kebakaran
7. Pertimbangan lokasi
8. Pertimbangan ketersediaan bahan konstruksi utama

Sistem struktur yang umum diklasifikasikan adalah sebagai berikut :

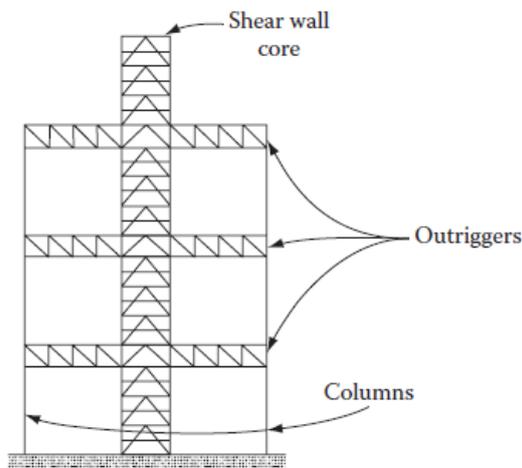
1. Moment Resisting Frames
2. Shear Wall-Frame Systems
3. Shear Truss-Outrigger Braced Systems
4. Framed-Tubes
5. Tube-in-Tube Systems with interior columns
6. Bundled Tubes
7. Truss Tubes without interior columns
8. Modular Tubes

Sistem Outrigger

Inovasi dalam perencanaan sistem struktur terus menerus berkembang, khususnya dalam perencanaan struktur bangunan tingkat tinggi. Tujuannya untuk dapat membatasi simpangan yang terjadi akibat beban gempa dan tekanan angin. Sistem tersebut biasa disebut sebagai sistem *core-and-outrigger*.

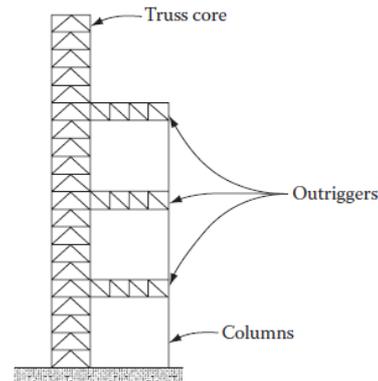
Sistem ini merupakan salah satu sistem pengaku dan penahan beban lateral yang umumnya berupa profil baja, bisa juga dari beton ataupun komposit. Dalam konsep ini, *outrigger* berfungsi sebagai penahan beban lateral yang menghubungkan *core* dengan kolom yang terletak pada bagian terluar dari bangunan tersebut. *Core* yang dimaksud dapat berupa *shear wall* ataupun *braced frame* sesuai perencanaan.

Core wall yang dikombinasikan dengan *outrigger* bisa saja terletak di tengah-tengah dengan *outrigger* di perluas pada kedua sisinya (Gambar 2.2), atau bisa saja terletak di salah satu sisi bangunan dengan *outrigger* yang diperluas ke kolom bangunan pada satu sisi (Gambar 2.3).



Gambar 2. *Outrigger* di perluas pada kedua sisi

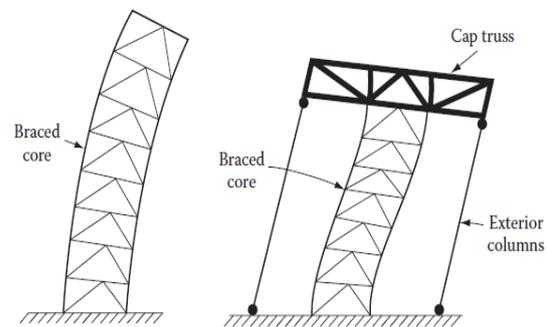
Sumber : Taranath, 2012



Gambar 3. *Outrigger* di perluas pada satu sisi

(Sumber : Taranath, 2012)

Outrigger adalah struktur pengaku berupa lengan yang terikat pada *core wall* hingga kolom terluar dari bangunan. Prinsipnya seperti kapal layar dimana tiang layar adalah intinya, batang-batang silang layarnya adalah *outriggernya*. Dengan kata lain sistem ini memanfaatkan lebar bangunan untuk memaksimalkan kekakuan karena *outrigger* sendiri mampu memberikan ketahanan terhadap momen guling dari beban gempa atau tekanan angin sehingga membuat gedung lebih stabil.



Gambar 4. *The brace and the brace core, Exterior Column, and Cap Truss*

(Sumber : Taranath, 2012)

Struktur Beton Bertulang

Beton bertulang adalah suatu kombinasi antara beton dan baja dimana tulangan baja berfungsi menyediakan kuat tarik yang tidak dimiliki oleh beton, Setiawan (2016).

Beton itu sendiri memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan tersebut antara lain, yaitu:

1. Beton memiliki kuat tekan yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kebanyakan bahan lain. Beton bertulang mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap api dan air, bahkan merupakan bahan struktur terbaik untuk

- bangunan yang banyak bersentuhan dengan air. Struktur beton bertulang sangat kokoh.
2. Beton biasanya merupakan satu-satunya bahan yang ekonomis untuk pondasi tapak, dinding *basement*, tiang tumpuan jembatan dan bangunan-bangunan semacam itu.
 3. Dibandingkan dengan bahan lain, beton memiliki usia layan yang sangat panjang.
 4. Disebagian besar daerah, beton terbuat dari bahan-bahan lokal yang murah (pasir, kerikil dan air) dan relatif hanya membutuhkan sedikit semen dan tulangan baja, yang mungkin saja harus didatangkan dari daerah lain.
 5. Keahlian buruh yang dibutuhkan untuk membangun konstruksi beton bertulang relatif lebih rendah bila dibandingkan dengan bahan lain seperti baja struktur.

Selain memiliki kelebihan-kelebihan tersebut, beton juga memiliki beberapa kekurangan, yaitu:

1. Beton mempunyai kuat tarik yang sangat rendah sehingga memerlukan penggunaan tulangan tarik.
2. Beton bertulang memerlukan bekisting untuk menahan beton tetap pada tempatnya sampai beton tersebut mengeras.
3. Rendahnya kekuatan per satuan berat dari beton mengakibatkan beton bertulang menjadi berat.
4. Sifat-sifat beton sangat bervariasi karena bervariasi proporsi campuran dan pengadukannya.

Pembebanan Struktur

a. Beban Statis

Beban mati adalah beban yang posisinya tidak berubah-ubah (tetap) biasanya terpengaruh gravitasi sehingga arah kerja gaya searah dengan percepatan gravitasi (vertikal ke bawah). SNI 2847:2013 menjelaskan bahwa beban mati merupakan beban yang berasal dari berat sendiri semua bagian dari gedung yang bersifat tetap termasuk dinding dan sekat pemisah, kolom, balok, lantai, atap, *finishing*, mesin dan peralatan yang tidak dapat dipisahkan dari gedung.

Beban hidup merupakan beban yang dapat berpindah-pindah untuk suatu waktu tertentu, walaupun dapat berpindah-pindah beban hidup bekerja secara perlahan-lahan pada struktur. Beban akibat penggunaan bangunan merupakan beban hidup, termasuk berat manusia, perabot, material yang disimpan, dan sebagainya.

b. Beban Dinamis

Beban gempa adalah semua beban statik ekuivalen yang bekerja pada bangunan atau bagian

bangunan yang menirukan pengaruh dari gerakan tanah akibat gempa itu. Ketika pengaruh gempa pada struktur bangunan ditentukan berdasarkan suatu analisa dinamik, maka yang diartikan dengan beban gempa di sini adalah gaya-gaya di dalam struktur tersebut yang terjadi oleh gerakan tanah akibat gempa itu, Juwana (2005).

Perancangan Ketahanan Gempa

Gempa dalam hal ini gempa bumi adalah suatu fenomena alam yang terjadi berupa getaran yang disebabkan oleh aktifitas vulkanik maupun tektonik yang berasal dari kerak bumi.

Gempa ini merambat dalam bentuk gelombang. Gelombang ini yang apabila sampai ke permukaan bumi, menyebabkan terjadinya getaran yang berpengaruh pada bangunan yang ada di permukaan. Hal inilah yang akan menimbulkan gaya-gaya yang bekerja pada struktur bangunan karena struktur lebih cenderung memiliki sifat mempertahankan diri dari gerakan, Schodek (1999).

Berdasarkan UBC 1997, tujuan dari desain bangunan tahan gempa adalah mencegah terjadinya kegagalan struktur dan terjadinya korban jiwa, dengan 3 kriteria standar yaitu:

1. Tidak terjadi kerusakan sama sekali pada gempa ringan.
2. Ketika terjadi gempa sedang, diizinkan terjadi kerusakan arsitektural tanpa adanya kerusakan struktural.
3. Diizinkan terjadinya kerusakan struktural maupun non-struktural pada gempa kuat, namun kerusakan yang terjadi tidak sampai menyebabkan bangunan runtuh.

Wilayah Gempa dan Spektrum Respons

Parameter S_s (percepatan batuan dasar pada perioda pendek) dan S_1 (percepatan batuan dasar pada perioda 1 detik) harus ditetapkan masing-masing dari respons spektral percepatan 0,2 detik dan 1 detik dalam peta gerak tanah seismik dengan kemungkinan 2 persen terlampaui dalam 50 tahun (MCE_R , 2 persen dalam 50 tahun), dan dinyatakan dalam bilangan desimal terhadap percepatan gravitasi. Bila $S_1 < 0,04g$ dan $S_s < 0,15g$, maka struktur bangunan boleh dimasukkan ke dalam kategori desain seismik A, dan cukup memenuhi persyaratan dalam kategori desain seismik A.

Berdasarkan sifat-sifat tanah pada situs, maka situs harus diklasifikasi sebagai kelas situs SA , SB , SC , SD , SE , atau SF . Bila sifat-sifat tanah tidak teridentifikasi secara jelas sehingga tidak bisa ditentukan kelas situs-nya, maka kelas situs SE dapat digunakan kecuali jika pemerintah/dinas

yang berwenang memiliki data geoteknik yang dapat menentukan kelas situs SF.

Untuk penentuan respons spektral percepatan gempa MCE_R di permukaan tanah, diperlukan suatu faktor amplifikasi seismik pada perioda 0,2 detik dan perioda 1 detik. Faktor amplifikasi meliputi faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran perioda pendek (F_a) dan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran perioda 1 detik (F_v). Parameter spektrum respons percepatan pada perioda pendek (S_{MS}) dan perioda 1 detik (S_{M1}) yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs, harus ditentukan dengan perumusan berikut ini:

$$S_{MS} = F_a S_S \quad (1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2)$$

Keterangan:

S_S = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk perioda pendek;

S_1 = parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk perioda 1,0 detik.

Bila spektrum respons desain diperlukan oleh tata cara ini dan prosedur gerak tanah dari spesifik-situs tidak digunakan, maka kurva spektrum respons desain harus dikembangkan dengan mengacu Gambar 5. dan mengikuti ketentuan di bawah ini:

1. Untuk perioda yang lebih kecil dari T_0 , spektrum respons percepatan desain, S_a , harus diambil dari persamaan;

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \quad (3)$$

2. Untuk perioda lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_S , spektrum respons percepatan desain, S_a , sama dengan S_{DS} ;
3. Untuk perioda lebih besar dari T_S , spektrum respons percepatan desain, S_a , diambil berdasarkan persamaan:

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \quad (4)$$

Keterangan:

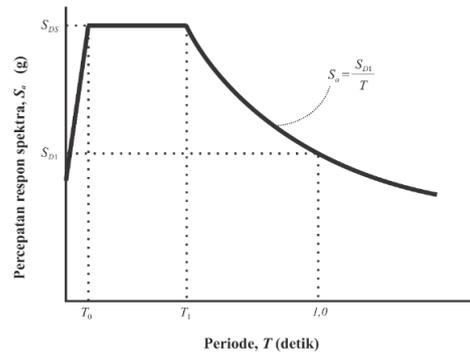
S_{DS} = parameter respons spektral percepatan desain pada perioda pendek;

S_{D1} = parameter respons spektral percepatan desain pada perioda 1 detik;

T = perioda getar fundamental struktur.

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}$$



Gambar 5. Spektrum Respons Desain (Sumber : SNI 1726:2012)

Struktur harus ditetapkan memiliki suatu kategori desain seismik berdasarkan kategori resiko dan parameter respons spektral percepatan. Struktur dengan kategori risiko I, II, atau III yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada perioda 1 detik, S_1 , lebih besar dari atau sama dengan 0,75 harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik E. Struktur yang berkategori risiko IV yang berlokasi di mana parameter respons spektral percepatan terpetakan pada perioda 1 detik, S_1 , lebih besar dari atau sama dengan 0,75, harus ditetapkan sebagai struktur dengan kategori desain seismik F.

Tabel 6. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Perioda Pendek

| Nilai S_{DS} | Kategori Resiko | |
|----------------------------|--------------------|----|
| | I atau II atau III | IV |
| $S_{DS} < 0,167$ | A | A |
| $0,167 \leq S_{DS} < 0,33$ | B | C |
| $0,33 \leq S_{DS} < 0,50$ | C | D |
| $0,50 \leq S_{DS}$ | D | D |

Tabel 7. Kategori Desain Seismik Berdasarkan Parameter Respons Percepatan pada Perioda 1 detik

| Nilai S_{D1} | Kategori Resiko | |
|-----------------------------|--------------------|----|
| | I atau II atau III | IV |
| $S_{D1} < 0,067$ | A | A |
| $0,067 \leq S_{D1} < 0,133$ | B | C |
| $0,133 \leq S_{D1} < 0,20$ | C | D |
| $0,20 \leq S_{D1}$ | D | D |

(Sumber : SNI 1726:2012)

Kriteria Pemodelan

SNI 1726:2012 pasal 7.7.3 menyatakan, model matematika struktur harus dibuat untuk tujuan penentuan gaya elemen struktur dan perpindahan struktur yang dihasilkan dari beban yang diterapkan dan semua perpindahan yang dikenakan atau pengaruh P-delta. Model harus menyertakan kekakuan dan kekuatan elemen yang signifikan terhadap distribusi gaya dan deformasi

dalam struktur dan merepresentasikan distribusi massa dan kekakuan secara spasial pada seluruh struktur.

Sebagai tambahan, model tersebut harus sesuai dengan hal berikut ini:

- Properti kekakuan elemen beton dan batu bata harus memperhitungkan pengaruh penampang retak;
- Untuk sistem rangka baja pemikul momen, kontribusi deformasi daerah panel pada simpangan antar lantai tingkat keseluruhan harus disertakan.

Mengacu pada SNI 1726:2012 pasal 7.7.3 tentang pengaruh penampang retak, SNI 2847:2013 pasal 10.10.4.1 menyatakan tentang properti yang boleh digunakan untuk komponen struktur dalam suatu struktur, yaitu:

- Modulus Elastisitas, E_c
- Momen Inersia, I
 - Komponen Struktur Tekan
 - Kolom : $0,70I_g$
 - Dinding
 - Tak Retak : $0,70I_g$
 - Retak : $0,35I_g$
 - Komponen Struktur Lentur
 - Balok : $0,35I_g$
 - Pelat Datar dan Slab Datar : $0,25I_g$
- Luas, A : $1,0A_g$

Prosedur Gaya Lateral Ekuivalen

Geser dasar seismik, V , dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$V = C_S \cdot W \tag{5}$$

Keterangan:

- C_S = Koefisien respons seismik
- W = Berat seismik efektif

Nilai Koefisien Respons Seismik (C_S) ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$C_S = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \tag{6}$$

Keterangan:

- S_{DS} = Parameter percepatan respons spektral pada periode pendek, redaman 5 persen.
- R = Koefisien modifikasi respons
- I_e = Faktor keutamaan gedung dan non-gedung

Untuk membatasi nilai Koefisien Respons Seismik (C_S), harus ditentukan nilai maksimum dan minimum dari Koefisien Respons Seismik (C_S). Oleh karena itu, nilai C_S tidak perlu melebihi nilai:

$$C_S = \frac{S_{D1}}{T\left(\frac{R}{I_e}\right)} \tag{7}$$

dan tidak kurang dari nilai:

$$C_S = 0,044 \cdot S_{DS} \cdot I_e \geq 0,01 \tag{8}$$

Keterangan:

S_{D1} = Parameter percepatan respons spektral pada periode 1 detik, redaman 5 persen.

Dalam SNI 1726:2012 pasal 7.8.2 menyatakan bahwa periode fundamental pendekatan T_a , harus ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$T_a = C_t \cdot h_n^x \tag{9}$$

Keterangan:

h_n = ketinggian total struktur, dari dasar hingga tingkat tertinggi (m)

Tabel 8. Koefisien untuk Batas Atas pada Periode yang Dihitung

| Parameter Percepatan Respons Spektral Desain pada 1 detik, S_{D1} | Koefisien C_u |
|---|-----------------|
| $\geq 0,4$ | 1,4 |
| 0,3 | 1,4 |
| 0,2 | 1,5 |
| 0,15 | 1,6 |
| $\leq 0,1$ | 1,7 |

(Sumber : SNI 1726:2012)

Tabel 9. Nilai Parameter Periode Pendekatan C_t dan x

| Sistem rangka pemikul momen di mana rangka memikul 100 persen gaya gempa yang disyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai gaya gempa: | C_t | x |
|---|--------|------|
| Rangka baja pemikul momen | 0,0724 | 0,8 |
| Rangka beton pemikul momen | 0,0466 | 0,9 |
| Rangka baja dengan bresing eksentris | 0,0731 | 0,75 |
| Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk | 0,0731 | 0,76 |
| Semua sistem struktur lainnya | 0,0488 | 0,77 |

(Sumber : SNI 1726:2012)

Gaya gempa lateral (F_x) yang timbul di semua tingkat harus ditentukan dari persamaan:

$$F_x = C_{vx} \cdot V \tag{10}$$

dan

$$C_{vx} = \frac{w_x \cdot h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot h_i^k} \tag{11}$$

Keterangan:

- C_{vx} =Faktor distribusi vertikal
- V =Gaya lateral desain total atau geser di dasar struktur

w_i dan w_x = Bagian berat seismic efektif total struktur (W) yang ditempatkan atau dikenakan pada tingkat i atau x

h_i dan h_x = Tinggi dari dasar sampai tingkat i atau x

k = Eksponen yang terkait dengan perioda struktur, yaitu:

Struktur dengan perioda kurang dari sama dengan 0,5 detik, $k = 1$

Struktur dengan perioda lebih dari sama dengan 2,5 detik, $k = 1$

Struktur dengan perioda antara 0,5 dan 2,5 detik, nilai k harus sebesar 2 atau ditentukan dengan interpolasi linier antara 1 dan 2

Geser tingkat desain gempa di semua tingkat (V_x) ditentukan dari persamaan:

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (12)$$

Keterangan:

F_i = Bagian dari geser dasar seismik (V) yang timbul di tingkat i

Geser tingkat desain gempa (V_x) harus didistribusikan pada berbagai elemen vertikal sistem penahan gaya gempa di tingkat yang ditinjau berdasarkan pada kekakuan lateral relatif elemen penahan vertikal diafragma.

Analisis Spektrum Respons Ragam

SNI 1726:2012 pasal 7.9 menyatakan bahwa, analisis harus dilakukan untuk menentukan ragam getar alami untuk struktur. Analisis harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar paling sedikit 90 persen dari massa aktual dalam masing-masing arah horisontal orthogonal dari respons yang ditinjau oleh model.

Kombinasi respons untuk geser dasar ragam (V_i) lebih kecil 85 persen dari geser dasar yang dihitung (V) menggunakan prosedur gaya lateral ekuivalen, maka gaya harus dikalikan dengan $0,85 \frac{V}{V_t}$.

Tinjauan Terhadap Penelitian Sejenis

Verik Angerik melakukan penelitian Analisis Respon Beban Angin pada Bangunan Beton Tingkat Tinggi yang Menggunakan Sistem *Outrigger Truss*. Pada penelitian ini digunakan *single outrigger* yang di tempatkan pada lantai atas, 3/4, 1/2, dan 1/4 dari ketinggian bangunan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa lokasi penempatan *single outrigger* pada bangunan tinggi adalah di tengah atau 1/2 dari ketinggian gedung.

METODOLOGI PENELITIAN

Data untuk Desain

Material :

- Kuat tekan beton ($f'c$) = 40 Mpa
- Modulus elastisitas beton = 29725,41 Mpa
- Teg. Leleh tulangan, f_y = 400 Mpa
 f_u = 520 Mpa
- Modulus elastisitas (E) = 200000 Mpa

Elemen Struktur :

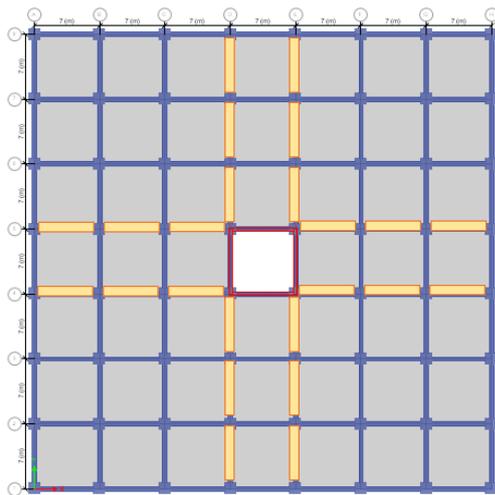
- Jenis struktur = Beton bertulang
- Pondasi = Terjepit, kaku di tanah
- Dimensi balok = 45 x 75 cm²
- Dimensi kolom :
 - Lt. 1-10 = 120 x 120 cm²
 - Lt. 11-20 = 110 x 110 cm²
 - Lt. 21-30 = 100 x 100 cm²
 - Lt. 31-40 = 90 x 90 cm²
- Tebal pelat = 17 cm
- Tebal atap = 10 cm
- *Core wall* = 50 cm
- *Outrigger* yang digunakan :
 - Jenis Baja = BJ 37
 - Profil baja (*H-Beam*) = 350 x 350 mm²

Pembebanan Struktur

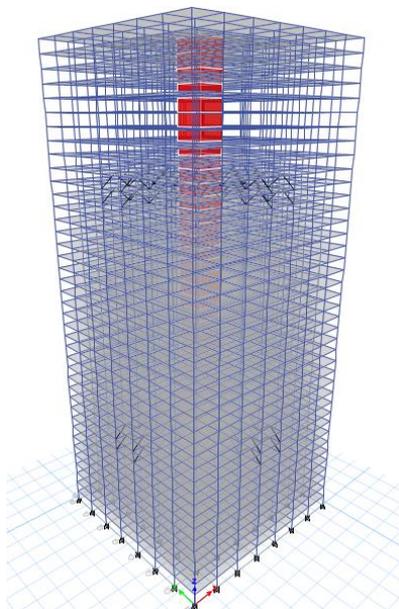
- Fungsi gedung sebagai hotel atau hunian
- Beban Hidup :
 - Lantai gedung = 250 kg/m²
 - Lantai atap = 100 kg/m²
- Beban Mati: *Dead Load* = Berat Struktur
Superimposed Dead Load :
 - Lantai tipikal = 150 kg/m²
 - Lantai atap = 50 kg/m²
 - Cladding* = 20 kg/m²

Geometri Struktur Bangunan

- Jumlah lantai = 40 lantai
- Tinggi antar lantai = 3 m
- Tinggi bangunan = 120 m
- Jumlah bentang arah x = 7 bentang
- Jarak bentang arah x = 7 m
- Jumlah bentang arah y = 7 bentang
- Jarak bentang arah y = 7 m



Gambar 6. Denah 2D



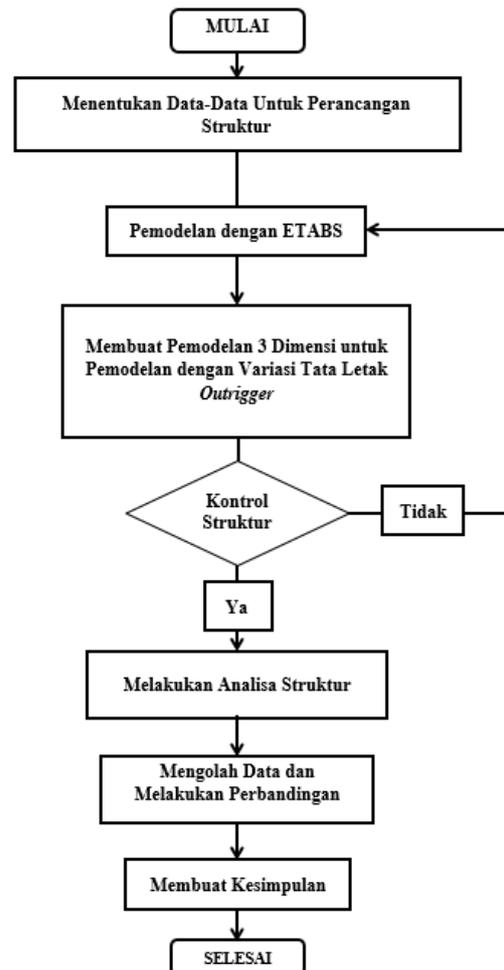
Gambar 7. Denah 3D

Data untuk Analisa

Data-data yang digunakan untuk analisa adalah sebagai berikut:

- Analisa Pembebanan :
 1. Pembebanan gempa dinamis menggunakan *Response Spectrum*
 2. Pembebanan gempa statis menggunakan *Equivalent Static Load (ELF)*
 3. Menggunakan data gempa kota Manado, kelas situs *SD*, dan kategori desain seismik *D*.
- Kombinasi Pembebanan:
 1. $1,4D$
 2. $1,2D + 1,6L$
 3. $1,2D + 1,0E + 1,0L$
 4. $0,9D + 1,0E$

Langkah-Langkah Penelitian



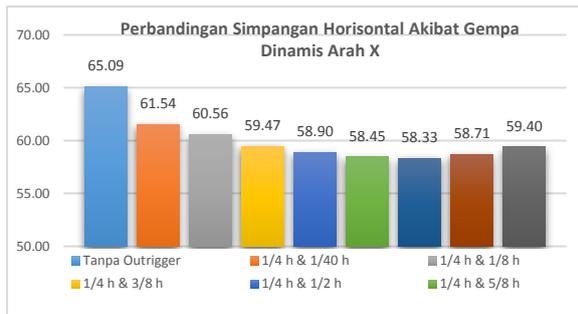
Gambar 8. Diagram Alir Proses Penelitian

HASIL ANALISA DAN PEMBAHASAN

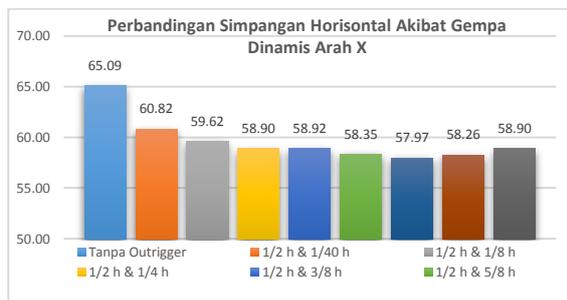
Hasil Penelitian

Untuk menentukan lokasi optimum dari penempatan *outrigger* dan membandingkan hasil simpangan pada bangunan 40 lantai, maka dibuatlah model struktur sebagai berikut :

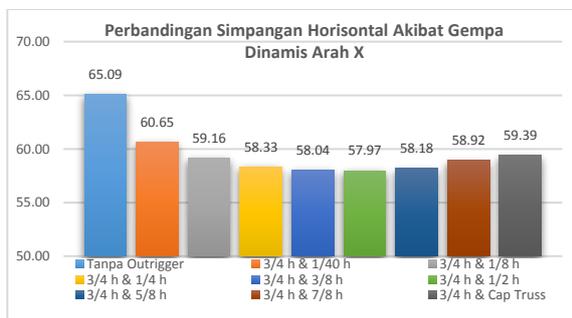
1. Model struktur tanpa *outrigger*
2. Model struktur dengan *outrigger* ditahan pada $1/4$ dari ketinggian bangunan kemudian di variasikan
3. Model struktur dengan *outrigger* ditahan pada $1/2$ dari ketinggian bangunan kemudian di variasikan
4. Model struktur dengan *outrigger* ditahan pada $3/4$ dari ketinggian bangunan kemudian di variasikan
5. Model struktur dengan *outrigger* ditahan pada lantai atas (*cap truss*) kemudian di variasikan.



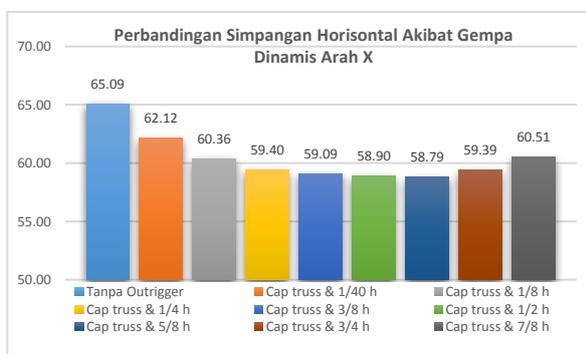
Gambar 9. Grafik Perbandingan Simpangan Horizontal Akibat Gempa Statis Arah X dengan *Outrigger* di Tahan pada 1/4 dari Tinggi Bangunan



Gambar 10. Grafik Perbandingan Simpangan Horizontal Akibat Gempa Dinamis Arah X dengan *Outrigger* di Tahan pada 1/2 dari Tinggi Bangunan



Gambar 11. Grafik Perbandingan Simpangan Horizontal Akibat Gempa Dinamis Arah X dengan *Outrigger* di Tahan pada 3/4 dari Tinggi Bangunan



Gambar 12. Grafik Perbandingan Simpangan Horizontal Akibat Gempa Dinamis Arah X dengan *Outrigger* di Tahan pada Lantai Atas (*Cap Truss*)

Pembahasan Hasil Analisa Struktur

Dari setiap pemodelan, bangunan didesain memiliki denah struktur yang simetris terhadap dua arah ortogonal. Hal tersebut menyebabkan simpangan horizontal yang terjadi memiliki nilai yang sama untuk setiap arah gempa yang terjadi, baik gempa arah x maupun gempa arah y. Sehingga data hasil analisa struktur hanya diambil berdasarkan pengaruh gempa statis dan gempa dinamis dari salah satu arah saja.

Hasil perbandingan simpangan horizontal diatas pada Grafik 4.68 menunjukkan bahwa, untuk model struktur *outrigger* di tahan pada 1/4 dari tinggi bangunan, simpangan horizontal akibat gempa dinamis terkecilnya berada pada 1/4 h dan 3/4 h. Model struktur *outrigger* di tahan pada 1/2 dari tinggi bangunan, dalam Grafik 4.69 simpangan horizontal akibat gempa dinamis terkecil berada pada 1/2 h dan 3/4 h. Model struktur *outrigger* di tahan pada 3/4 dari tinggi bangunan, menunjukkan hasil yang sama dengan model struktur *outrigger* yang di tahan pada 1/2 dari tinggi bangunan, dimana dalam Grafik 4.70 simpangan horizontal akibat gempa dinamis terkecil berada pada 1/2 h dan 3/4 h. Model struktur *outrigger* di tahan pada lantai atas (*cap truss*), dalam Grafik 4.71 simpangan horizontal akibat gempa dinamis terkecil yaitu penempatan *outrigger* pada *cap truss* dan 5/8 h.

Dalam hasil perbandingan tersebut dapat di lihat bahwa bangunan tingkat tinggi yang menggunakan *outrigger* mengalami pengurangan simpangan daripada bangunan yang tidak menggunakan *outrigger*.

Kontrol Hasil Analisa Struktur

Setelah dilakukan pemodelan struktur 3 dimensi dengan program bantuan ETABS, hasil analisis struktur harus dikontrol terhadap suatu batasan-batasan tertentu sesuai dengan peraturan SNI 1726:2012 untuk menentukan kelayakan sistem struktur tersebut. Adapun hal-hal yang harus dikontrol sebagai berikut :

- Kontrol partisipasi massa
- Kontrol periode getar struktur
- Kontrol nilai akhir respon spektrum
- Kontrol batas simpangan

Kontrol partisipasi massa

SNI 1726:2012 pasal 7.9.1 menentukan bahwa perhitungan respons dinamis struktur harus dibuat hingga menghasilkan partisipasi massa lebih dari 90 persen massa total struktur. Berikut adalah hasil dari Modal Participating Mass Ratios

(Partisipasi Massa) dari hasil analisis perhitungan respons dinamik struktur dengan ETABS.

Tabel 10. Partisipasi Massa Struktur dengan *Outtrigger* di Tahan pada 1/2 dari Tinggi Bangunan

| Model Struktur | Mode | Sum UX | Sum UZ | Sum UY |
|---------------------|------|--------|--------|--------|
| 1/2 h dan 1/40 h | 13 | 92,04 | 92,04 | 0 |
| 1/2 h dan 1/8 h | 13 | 92,93 | 92,93 | 0 |
| 1/2 h dan 1/4 h | 9 | 90,31 | 90,31 | 0 |
| 1/2 h dan 3/8 h | 12 | 90,78 | 91,58 | 0 |
| 1/2 h dan 5/8 h | 12 | 92,47 | 90,26 | 0 |
| 1/2 h dan 3/4 h | 13 | 92,73 | 92,73 | 0 |
| 1/2 h dan 7/8 h | 9 | 90,16 | 90,16 | 0 |
| 1/2 h dan cap truss | 9 | 90,02 | 90,02 | 0 |

Dari tabel modal participating mass ratios diatas menunjukkan bahwa dengan modes 13 saja (sudah melebihi 90%) sudah mampu memenuhi syarat partisipasi massa sesuai SNI 1726:2012.

Kontrol periode getar struktur

Untuk mencegah penggunaan struktur yang terlalu fleksibel, nilai waktu getar alami fundamental (T) dari struktur gedung harus dibatasi. Berdasarkan SNI 1726:2012, periode fundamental struktur harus ditentukan dari :

$$T = C_t \cdot h_n^x \tag{13}$$

Nilai T diatas adalah batas bawah periode struktur yang ditinjau. Untuk batas atasnya dikalikan dengan koefisien batas. Besarnya koefisien tersebut diambil berdasarkan nilai S_{D1} . Pada struktur ini digunakan sistem rangka beton pemikul momen khusus sehingga pada tabel 15 SNI 1726:2012 diperoleh nilai :

$$\begin{aligned} C_t &= 0,0466 \\ x &= 0,9 \\ h_n &= 120 \text{ m} \end{aligned}$$

maka :

$$\begin{aligned} T &= 0,0466 \cdot 120^{0,9} \\ &= 3,465 \text{ s} \end{aligned}$$

Nilai C_u didapat dari tabel 15 SNI 1726:2012, untuk nilai $S_{D1} = 0,459$, maka:

$$C_u \cdot T = 1,4 \times 3,465 = 4,451 \text{ s.}$$

Dari hasil analisis ETABS diperoleh nilai terbesar $T = 3,21 \text{ s}$. Maka berdasarkan kontrol waktu getar alami fundamental nilai T lebih kecil dari $C_u \cdot T$. Jadi struktur masih memenuhi syarat SNI 1726:2012 Pasal 7.8.2.

Kontrol nilai akhir respon spectrum

Berdasarkan SNI 1726:2012 pasal 7.9.4.1, nilai geser dasar (*base shear*) yang dihasilkan oleh beban gempa dinamis harus lebih besar dari 85 persen nilai geser dasar yang dihasilkan oleh beban gempa statis.

Tabel 11. Kontrol Nilai *Base Shear* Gempa Statis dan Gempa Dinamis untuk *Outtrigger* di Tahan pada 1/2 h

| Model Struktur | Arah | Base Shear (kg) | | | Kontrol 0,85.Vt < V |
|---------------------|------|-----------------|------------|---------------|------------------------|
| | | Gempa Statis | 0,85 . Vt | Gempa Dinamis | |
| | | (Vt) | | (V) | |
| 1/2 h dan 1/40 h | X | 1645780,81 | 1398913,69 | 1426567,39 | OK |
| | Y | 1645780,81 | 1398913,69 | 1426567,39 | OK |
| 1/2 h dan 1/8 h | X | 1645871,64 | 1398990,89 | 1499456,20 | OK |
| | Y | 1645871,64 | 1398990,89 | 1499456,20 | OK |
| 1/2 h dan 1/4 h | X | 1645871,64 | 1398990,89 | 1530520,21 | OK |
| | Y | 1645871,64 | 1398990,89 | 1530520,21 | OK |
| 1/2 h dan 3/8 h | X | 1645871,64 | 1398990,89 | 1497445,37 | OK |
| | Y | 1645871,64 | 1398990,89 | 1497445,37 | OK |
| 1/2 h dan 5/8 h | X | 1645871,64 | 1398990,89 | 1469824,02 | OK |
| | Y | 1645871,64 | 1398990,89 | 1469824,02 | OK |
| 1/2 h dan 3/4 h | X | 1645871,64 | 1398990,89 | 1461981,50 | OK |
| | Y | 1645871,64 | 1398990,89 | 1461981,50 | OK |
| 1/2 h dan 7/8 h | X | 1645871,64 | 1398990,89 | 1455069,42 | OK |
| | Y | 1645871,64 | 1398990,89 | 1455069,42 | OK |
| 1/2 h dan cap truss | X | 1645871,64 | 1398990,89 | 1444286,05 | OK |
| | Y | 1645871,64 | 1398990,89 | 1444286,05 | OK |

Kontrol batas simpangan

Berdasarkan SNI 1726:2012 Pasal 7.9.3 untuk memenuhi persyaratan simpangan digunakan rumus :

$$\Delta_i \leq \Delta_a \tag{14}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} \Delta_i &= \text{Simpangan yang terjadi} \\ \Delta_a &= \text{Simpangan ijin} \end{aligned}$$

Dari tabel 16 SNI 1726:2012 untuk sistem struktur yang lain simpangan antar tingkat ijinnya adalah :

$$\Delta_a = 0,020 \times h_{sx} \tag{15}$$

Dimana :

$$h_{sx} = \text{Tinggi tingkat}$$

Dari analisis akibat beban lateral (beban gempa) dengan program ETABS, diperoleh nilai simpanga yang terjadi pada struktur yaitu sebagai berikut :

Tabel 12. Kontrol Simpangan Akibat Beban Gempa Arah X untuk *Outrigger* di Tahan pada 1/2 h

| Model Struktur | Δ_i | Δ_a | Kontrol |
|---------------------|------------|------------|---------|
| | (mm) | (mm) | |
| 1/2 h dan 1/40 h | 60,82 | 60 | NOT OK |
| 1/2 h dan 1/8 h | 59,62 | 60 | OK |
| 1/2 h dan 1/4 h | 58,90 | 60 | OK |
| 1/2 h dan 3/8 h | 58,92 | 60 | OK |
| 1/2 h dan 5/8 h | 58,35 | 60 | OK |
| 1/2 h dan 3/4 h | 57,97 | 60 | OK |
| 1/2 h dan 7/8 h | 58,26 | 60 | OK |
| 1/2 h dan cap truss | 58,90 | 60 | OK |

Catatan : Simpangan Arah X = Arah Y karena struktur simetris

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa struktur yang telah dilakukan menggunakan bantuan *software* ETABS, dengan memvariasikan tata letak dari sistem *outrigger*, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa:

- Sistem *outrigger* dapat memberikan kontribusi terhadap struktur bangunan bertingkat banyak dalam menahan gaya lateral seperti beban gempa. Namun penempatan sistem *outrigger* yang tidak tepat pada struktur bangunan akan membuat kinerja dari sistem *outrigger* itu sendiri tidak efektif.

- Setelah melakukan perbandingan simpangan, untuk *outrigger* di tahan pada 1/4 h, simpangan terkecil berada pada model struktur 1/4 h dan 3/4 h yang mereduksi simpangan sebesar 11,58%. *Outrigger* di tahan pada 1/2 h dan 3/4 h memiliki hasil yang sama yaitu simpangan terkecil berada pada model struktur 1/2 h dan 3/4 h yang mereduksi simpangan sebesar 12,27%. *Outrigger* di tahan pada lantai atas (*cap truss*), simpangan terkecil berada pada model struktur dengan penempatan *outrigger* pada *cap truss* dan 5/8 h yang mereduksi simpangan sebesar 10,72%.
- Lokasi optimum dari penempatan 2 (dua) set *outrigger* pada bangunan setinggi 40 lantai adalah penempatan *outrigger* pada 1/2 dan 3/4 dari tinggi bangunan.

Saran

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa hal yang patut diperhatikan, yaitu:

- Dalam memodelkan struktur menggunakan *software* ETABS, dapat dibuat lebih banyak variasi, dengan memodelkan bangunan dengan bentuk yang berbeda, penggunaan sistem *outrigger* yang berbeda dan lain sebagainya.
- Agar penggunaan *outrigger* menjadi efisien penempatan *outrigger* sebaiknya pada 1/2 dan 3/4 dari tinggi bangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Angerik, Verik. 2009. *Analisis Respon Beban Angin pada Bangunan Beton Tingkat Tinggi yang Menggunakan Sistem Outrigger Truss*. Departemen Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Badan Standarisasi Nasional. 2012., *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-gedung (SNI 1726:2012)*. Bandung.
- Badan Standarisasi Nasional. 2013., *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 2847:2013)*. Jakarta.
- Juwana, J. S. 2005., *Panduan Sistem Bangunan Tinggi*. Jakarta: Erlangga.
- Riza, M, M. 2010., *Aplikasi Perencanaan Struktur Gedung dengan ETABS*. Yogyakarta: ARS GROUP.
- Schodek, Daniel. L. 1999, *Struktur Edisi kedua*. Jakarta : Erlangga.
- Schueller, Wolfgang. 2001., *Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi*. Bandung: Eresco.
- Setiawan, Agus. 2016., *Perencanaan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2013*. Jakarta: Erlangga

Taranath B. S. 2012., *Structural Analysis and Design of Tall Buildings*. London: Taylor & Francis Group.

Tumilar, Steffie. 2015., *Perilaku dan Sistem Struktur pada Perencanaan Gedung Tinggi*.

Uniform Building Code (UBC) 1997, *Structural Engineering Design Provisions*, Volume 2, ICBO, U.S.A.