

KINERJA SISTEM STRUKTUR *OUTRIGGER* DAN *BELT WALL* PADA GEDUNG TINGGI AKIBAT PEMBEBANAN GEMPA

Satria Erlangga Hardiman¹⁾, Mukahar²⁾, Agus Setiya Budi³⁾

¹⁾ Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

^{2), 3)} Pengajar Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

Jln. Ir Sutami 36 A, Surakarta 57126

e-mail : satriasipil@gmail.com

Abstract

The building, which is stand on the earth, absolutely have a risk due to earthquake load. An appropriate lateral resisting system is needed to create a good building's stiffness for limiting the lateral displacement and decreasing risk of failure. The shearwall frame system is often implemented for lateral resisting system when the open frame system is less economic and effective. However, on a certain height the shearwall or the corewall will become slender and being not effective to resist the drift. One of many solutions is outrigger and belt wall system. The purpose of this thesis is to analyse the performance of outrigger and belt wall system cause by earthquake load, the specific effect on the applied location, and the level performance of building.

This research is a preliminary design that consist of three steps by implementing dynamic analysis response spectrum method. The steps are input, analysis and output. The structure analysis is done by modelling a 53th story tall building with lateral resisting systems as a computerized three dimension (3D) model on ETABS program as a tool, and the output of this research is a performance comparisons among open frame system that is considered as the beginning system in designing chronology, shearwall frame system that is considered as the existing building, and also outrigger and belt wall system based on displacement's decrease, interstory drift about structure's performance limit requirements, structure's performance level based on ATC – 40, and also an efficiency that related to total weight of structure on showing a benefit in economic aspect.

The conclusion of this research is the outrigger and belt wall system is able to solve the weakness of open frame system and shearwall frame system as shown on the analysed result.

Keywords: performance, open frame, shearwall frame, outrigger and belt wall, response spectrum, displacement, interstory drift, ETABS.

Abstrak

Bangunan yang berada di tanah pasti memiliki risiko akibat beban gempa bumi. Dalam membatasi *displacement* lateral dan memperkecil risiko keruntuhan akibat beban gempa dibutuhkan kekakuan bangunan yang berasal dari sistem penahan lateral yang tepat. Sistem *shearwall frame* sering digunakan sebagai penahan lateral disaat sistem *open frame* menjadi kurang ekonomis dan efektif. Namun, pada ketinggian tertentu *shearwall* atau *corewall* menjadi terlalu langsing dan kurang efektif dalam menahan *drift* (simpangan). Salah satu solusi adalah sistem *outrigger* dan *belt wall*. Tujuan penelitian pada skripsi ini adalah menganalisis kinerja sistem *outrigger* dan *belt wall* akibat beban gempa, dampak pada lokasi pemasangan, dan tingkat kinerja struktur.

Penelitian ini adalah *preliminary design* terdiri dari tiga tahap dengan menggunakan analisis gempa dinamik respons spektrum. Tahapan tersebut adalah tahap input, analisis, dan *output*. Analisis struktur dilakukan dengan pemodelan gedung 53 lantai dengan sistem penahan lateral yang terkomputerisasi secara tiga dimensi (3D) pada program ETABS sebagai alat bantu, dan *output* dari penelitian ini adalah perbandingan kinerja antara sistem *open frame* dianggap sebagai sistem awal kronologi perancangan, sistem *shearwall frame* yang dianggap sebagai gedung eksisting, serta sistem *outrigger* dan *belt wall* berdasarkan pengurangan *displacement*, simpangan antar lantai terkait syarat batas kinerja struktur, tingkat kinerja struktur berdasarkan ATC – 40, serta efisiensi terkait berat total struktur dalam menunjukkan manfaat dalam aspek ekonomi.

Simpulan penelitian ini adalah sistem *outrigger* dan *belt wall* mampu mengatasi kekurangan dari sistem *open frame* dan sistem *shearwall frame* seperti yang tersaji dalam hasil analisis.

Kata kunci: kinerja, *open frame*, *shearwall frame*, *outrigger* dan *belt wall*, respons spektrum, *displacement*, simpangan antar lantai, ETABS.

PENDAHULUAN

Bangunan yang berada di tanah pasti memiliki risiko akibat beban gempa bumi. Dalam membatasi *displacement* lateral dan memperkecil risiko keruntuhan akibat beban gempa dibutuhkan kekakuan bangunan yang berasal dari sistem penahan lateral yang tepat. Sistem *shearwall frame* sering digunakan sebagai penahan lateral disaat sistem *open frame* menjadi kurang ekonomis dan efektif. Namun, pada ketinggian tertentu *shearwall* atau *corewall* menjadi terlalu langsing dan kurang efektif dalam menahan *drift* (simpangan).

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi membantu para ahli teknik sipil dalam mencari solusi. Salah satu solusi adalah sistem *outrigger* dan *belt wall*.

Oleh karena itu, analisis kinerja sistem *outrigger* dan *belt wall* harus dilakukan untuk membuktikan keefektivannya dalam mengatasi kekurangan sistem *open frame* dan sistem *shearwall frame*.

Menurut Yachub Syahriar, M, et al (2012), Hasil penelitian “Analisis Perbandingan Efektifitas Struktur Gedung dengan Menggunakan *Shearwall* dan kombinasi antara *Shearwall – Outrigger*” menunjukkan bahwa pada segi kinerja struktur yaitu *story drift* dan deformasi struktur didapatkan bahwa (1) *Story drift*, dengan pemakaian *outrigger* akan berdampak mengecilkan besar *story drift* pada lantai – lantai sekitar *outrigger* terpasang. (2) Secara keseluruhan, deformasi struktur akan mengecil seiring penggunaan *outrigger*. Kurva deformasi struktur gedung yang memakai *outrigger* sedikit berada di sisi kiri dari kurva struktur yang tidak menggunakan *outrigger*. Hal ini menunjukkan dengan penggunaan *outrigger* mampu memperkecil deformasi maksimum pada struktur gedung.

Sistem *Outrigger* dan *Belt Wall*

Sistem *outrigger* dan *belt wall* terdiri dari dinding dan atau balok tinggi kaku, baik beton, baja, maupun komposit, yang berfungsi sebagai penghubung *corewall* ke kolom perimeter atau eksterior yang dipasang pada satu atau dua lantai, atau lebih, atau lebih untuk meningkatkan kekakuan bangunan dalam mengurangi *displacement* lateral. Respons struktur pada sistem ini akan menghasilkan mode getar yang bervariasi akibat terpengaruhnya karakter dinamik struktur karena bertambahnya massa sekaligus kekakuan pada beberapa lantai yang terpasang *outrigger* dan *belt wall*.

Kinerja Struktur

Berdasarkan SNI 1726 – 2002, persyaratan kinerja batas layan struktur gedung, yaitu simpangan antar lantai tidak boleh melampaui $\frac{0,03}{R}$ kali tinggi tingkat yang bersangkutan atau 30 mm, bergantung mana yang lebih kecil. Berdasarkan SNI 1726-2012 kinerja batas ultimit struktur sebuah gedung ditentukan oleh simpangan antar lantai akibat pengaruh beban lateral rencana, beban gempa, yaitu untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan struktur gedung yang dapat menimbulkan korban jiwa manusia dan untuk mencegah benturan berbahaya antar gedung atau antar bagian struktur gedung yang dipisah dengan sela pemisah (*delatasi*). Berdasarkan *Applied Technology Council – 40* (ATC – 40), tingkat kinerja struktur haruslah dipertimbangkan guna mengetahui keamanan dan kekokohan bangunan terhadap keselamatan penghuni atau pengguna. Cormac (1981) menyatakan bahwa simpangan struktur dapat dinyatakan dalam bentuk *drift indeks*, $s = \frac{\Delta}{h}$, yaitu perbandingan defleksi maksimum yang terjadi terhadap ketinggian struktur, baik kondisi elastik maupun inelastik.

METODE PENELITIAN

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini adalah *preliminary design* menggunakan analisis dinamik respons spektrum berdasarkan peraturan, buku referensi, dan jurnal – jurnal yang dilakukan dengan program ETABS sebagai alat bantu. Metode penelitian yang digunakan memiliki tiga tahap penelitian. Tahap penelitian tersebut adalah tahap input, analisis dan *output*. Pada tahapan input akan dijelaskan tentang sistem *open frame* yang dianggap sebagai sistem awal kronologi perancangan, sistem *shearwall frame* yang dianggap sebagai sistem pada gedung eksisting dan acuan kinerja dalam penelitian ini, serta sistem *composite outrigger* dan *belt wall* yang akan diteliti, geometri struktur, dimensi dan spesifikasi elemen struktur, penentuan beban yang bekerja, serta pemodelan tiga dimensi. Tahapan analisis antara lain pemodelan gedung 53 lantai dengan sistem penahan lateral yang terkomputerisasi secara tiga dimensi pada program ETABS, menghitung berat total struktur, menganalisis gempa dinamik respons spektrum, serta mencari besaran *displacement* dan simpangan antar lantai. Tahap akhir yaitu tahap *output* membahas dan membandingkan kinerja antara sistem *open frame*, sistem *shearwall frame*, serta sistem *outrigger* dan *belt wall* berdasarkan pengurangan *displacement*, simpangan antar lantai terkait syarat batas kinerja struktur, tingkat kinerja struktur berdasarkan ATC – 40, serta efisiensi terkait berat total struktur dalam menunjukkan manfaat dalam aspek ekonomi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi Gedung Hipotetik

Gedung hipotetik dalam penelitian ini ditentukan berada di Kota Semarang dan merupakan bangunan gedung dengan fungsi hunian/apartemen. Tinggi struktur bangunan tersebut mencapai 212 m dengan 53 lantai terdiri dari lantai dasar, lantai 1-*skyview1* (tipikal), lantai 21-*skyview2* (tipikal), lantai 51 (*observatorium*), lantai 52 dan 53 (atap). Struktur bangunan menggunakan struktur beton bertulang dengan sistem ganda, yaitu menggunakan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus dan Sistem Penahan Lateral.

Elemen *outrigger* dan *belt wall* dipasang pada tiga lokasi (tipe *triple*), yaitu pada $\frac{1}{3} H$ (Lantai 17), $\frac{2}{3} H$ (Lantai 34), dan $\frac{3}{3} H$ (*Observatorium*) setinggi satu lantai.

Beban mati berat sendiri (*Dead*) menggunakan faktor pengali yang terdapat pada ETABS sebesar 1.

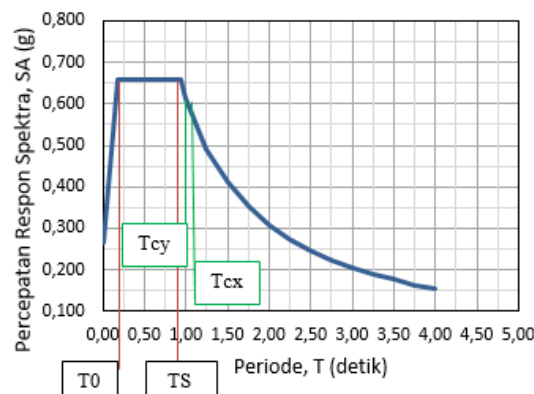
Beban mati tambahan (*Superimpose*) mengacu pada Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung (PPIUG 1983) dan didapat nilai sebagai berikut:

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Beton bertulang | = 24,0 kN/m ³ |
| Pasir | = 16,0 kN/m ³ |
| Mortar/spesi | = 22,0 kN/m ³ |
| Finishing lantai (keramik) | = 22,0 kN/m ³ |
| Langit – langit dan penggantung | = 0,20 kN/m ² |
| Instalasi Mekanikal Elektrikal (ME) | = 0,25 kN/m ² |
| Dinding pasangan bata ringan (habel) | = 0,75 kN/m ² |
| Dinding partisi (<i>cladding</i>) | = 0,20 kN/m ² |
| Waterproofing (Aspal) | = 14,0 kN/m ² |
| Beban hidup (<i>Live</i>) yang dimasukkan kedalam analisis ETABS mengacu pada SNI 1727 - 2013 dan didapat nilai-nilai sebagai berikut: | |
| Atap datar | = 0,96 kN/m ² |
| Koridor/ Ruang Publik/ Pertemuan | = 4,79 kN/m ² |
| Kamar – kamar pada hotel | = 1,92 kN/m ² |

Data Gempa

Data gempa (*Seismic*) didapat dari perhitungan yang telah disediakan oleh *website* <http://puskim.pu.go.id> dengan menyesuaikan lokasi spektra dibutuhkan berdasarkan SNI 1726 – 2012, yaitu sebagai berikut:

- 1) Kategori resiko gempa : II
- 2) Faktor Keutamaan gempa (I_e) : 1,0
- 3) Parameter percepatan tanah
 - Periode pendek (S_s) : 1,098g
 - Periode 1 detik (S_1) : 0,364g
- 4) Kelas situs : Tanah Lunak (SE)
- 5) Koefisien situs
 - Periode pendek (F_a) : 0,900
 - Periode 1 detik (F_v) : 2,543
- 6) Parameter respon spektra
 - Periode pendek (S_{MS}) : $F_a S_s = 0,900 \times 1,098 = 0,988$
 - Periode 1 detik (S_{M1}) : $F_v S_1 = 2,543 \times 0,364 = 0,926$
- 7) Parameter respon spektra desain
 - Periode pendek (S_{DS}) : $\frac{2}{3} S_{MS} = 0,660$
 - Periode 1 detik (S_{D1}) : $\frac{2}{3} S_{M1} = 0,617$
- 8) Kategori Desain Seismik : D
- 9) Grafik Respon Spektrum Gempa Rencana



Gambar 1. Grafik respon spektrum

Tabel 1. Faktor Skala Respon Spektrum Gempa Rencana (Awal)

| Percepatan Gempa | Arah | Faktor Skala ($\frac{I}{R} \cdot g$) | | |
|------------------|----------|----------------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| | | <i>Open Frame</i> | <i>Shearwall Frame</i> | <i>Outrigger dan Belt Wall</i> |
| | R | | 7 | 7 |
| RSX | U1(100%) | 1,2263 | 1,401 | 1,401 |
| | U2(30%) | 0,3679 | 0,420 | 0,420 |
| RSY | U1(100%) | 0,3679 | 0,420 | 0,420 |
| | U2(30%) | 1,2263 | 1,401 | 1,401 |

Penentuan Periode Fundamental Struktur (T)

Berdasarkan SNI 1726 – 2012 periode fundamental struktur, T, tidak boleh melebihi hasil koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (Cu) dan periode fundamental pendekatan, Ta.

Tabel 2. Rekapitulasi Periode Fundamental Struktur (T)

| <i>Open Frame</i> | <i>Shearwall Frame</i> | <i>Outrigger dan Belt Wall</i> |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Gedung 53 Lantai; Semarang; Wilayah Gempa 2; $\zeta = 0,19$ | | |
| $T_{ijin} = 0,19 \times 53 = 10,07$ detik | | |
| | $T_{c\ x} = 5,670$ detik | $T_{c\ x} = 4,748$ detik |
| | $T_{c\ y} = 5,640$ detik | $T_{c\ y} = 4,712$ detik |
| $T_1 = T_c < T_{ijin}$ (OK), Struktur gedung 53 Lantai tidak terlalu fleksibel | | |
| $h_a = 212,00$ m ; $S_{D1} = 0,617$ ($> 0,4$), maka $C_u = 1,4$ | | |
| $C_t = 0,00466$; $\alpha = 0,9$ | | $C_t = 0,0488$; $\alpha = 0,75$ |
| $T_a = 5,782$ detik | $T_a = 2,711$ detik | $T_a = 2,711$ detik |
| $T_{max} = 8,094$ detik | $T_{max} = 3,795$ detik | $T_{max} = 3,795$ detik |
| Berdasarkan syarat, maka T (dalam detik) yang digunakan adalah | | |
| T = 8,094 | T = 3,795 | T = 3,795 |

Gaya Geser Dasar Seismik (V)

Geser dasar seismik (V) dalam arah yang ditetapkan harus ditentukan dengan perkalian koefisien respons seismik (Cs) dengan berat seismik efektif struktur (W) sesuai dengan Pasal 7.8.1 SNI 1726 – 2012.

Tabel 3. Rekapitulasi Geser Dasar Seismik (V)

| <i>Open Frame</i> | <i>Shearwall Frame</i> | <i>Outrigger dan Belt Wall</i> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|
| Semarang; Kelas Situs = SE (Tanah Lunak); $S_{DS} = 0,660$; $S_{D1} = 0,617$ | | |
| $R = 8$; $I_e = 1,0$; $T = 8,094$ detik | $R = 7$; $I_e = 1,0$; $T = 3,795$ detik | |
| $C_s = 0,0825$ | $C_s = 0,0942$ | |
| $C_{s\ max} = 0,010$ | $C_{s\ max} = 0,0232$ | |
| $C_{s\ min} = 0,0232 > 0,01$ (OK) | | |
| Syarat : $C_{s\ min} < C_s < C_{s\ max}$, karena $C_s > C_{s\ max}$ dan $C_s < C_{s\ min}$, maka gunakan $C_{s\ min}$ | | |
| $C_{s\ min} = 0,0232$ | | |
| W (Berat seismik efektif struktur) (kN) | | |
| 1379243,08 | 1638530,51 | 1517649,02 |
| V (Gaya Geser Dasar Seismik) (kN) | | |
| 31998,44 | 38013,91 | 35209,46 |

Hasil Gaya Geser Dasar Seismik

Setelah dilakukan analisis berdasarkan nilai faktor skala awal dengan program ETABS didapatkan gaya geser seismik dinamik ($V_{dinamik}$) sebagai berikut:

Tabel 4. Gaya Geser Dasar Seismik Dinamik Awal

| Percepatan Gempa | $V_{dinamik}$ | | | | | |
|------------------|-------------------|----------|------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| | <i>Open Frame</i> | | <i>Shearwall Frame</i> | | <i>Outrigger dan Belt Wall</i> | |
| | Vx (kN) | Vy (kN) | Vx (kN) | Vy (kN) | Vx (kN) | Vy (kN) |
| RSX | 20936,80 | 6336,12 | 21281,61 | 19433,23 | 19543,16 | 18607,57 |
| RSY | 6340,49 | 20922,01 | 20374,53 | 20803,40 | 19363,23 | 18682,99 |

Kontrol Gaya Geser Dasar Seismik Awal

Berdasarkan Pasal 11.1.4 SNI 1726 – 2012, gaya geser dasar maksimum hasil analisis yang telah diskala, V_i ($V_{dinamik}$), adalah tidak boleh kurang dari 85% nilai V yang ditentukan menggunakan nilai minimum C_s ($0,85 \cdot V_{statik}$).

Tabel 5. Gaya Geser Dasar Seismik Statik 85%

| Percepatan Gempa | $0,85 \cdot V_{statik}$ | | | | | |
|------------------|-------------------------|----------|------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| | <i>Open Frame</i> | | <i>Shearwall Frame</i> | | <i>Outrigger dan Belt Wall</i> | |
| | Vx (kN) | Vy (kN) | Vx (kN) | Vy (kN) | Vx (kN) | Vy (kN) |
| StaX | 27198,67 | 8159,60 | 32311,82 | 9693,55 | 29928,04 | 8978,41 |
| StaY | 8159,60 | 27198,67 | 9693,55 | 32311,82 | 8978,41 | 29928,04 |

Setelah diperbandingkan, ternyata $V_{dinamik}$ tidak memenuhi syarat 85% V_{statik} , maka $V_{dinamik}$ harus dikalikan faktor skala baru.

Tabel 6. Rekapitulasi Faktor Skala Baru

| Percepatan Gempa | $V_{dinamik}$ | | | | | |
|------------------|---------------|------------|-----------------|------------|-------------------------|------------|
| | Open Frame | | Shearwall Frame | | Outrigger dan Belt Wall | |
| | V_x (kN) | V_y (kN) | V_x (kN) | V_y (kN) | V_x (kN) | V_y (kN) |
| RSX | 1,598 | 0,479 | 2,127 | 0,638 | 2,106 | 0,632 |
| RSY | 0,480 | 1,600 | 0,653 | 2,176 | 0,661 | 2,203 |

Setelah dianalisis ulang dengan dikalikan faktor skala baru maka $V_{dinamik}$ memenuhi syarat lebih besar dari atau sama dengan 85% V_{statik} .

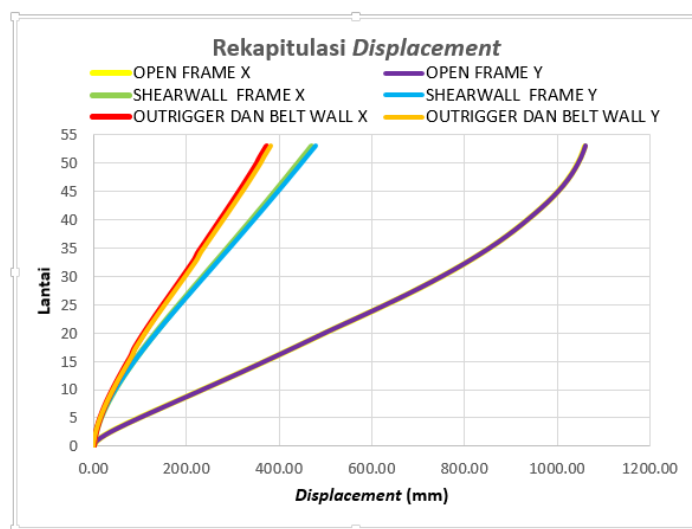
Kontrol Kinerja Struktur

Hasil Displacement

Setelah dilakukan analisis dengan program ETABS didapatkan nilai *displacement* yang diwakilkan sebagai berikut:

Tabel 7. Rekapitulasi Displacement

| Lantai | h (mm) | Displacement (mm) | | | | | |
|--------|--------|-------------------|------|-----------------|-------|-------------------------|-------|
| | | Open Frame | | Shearwall Frame | | Outrigger dan Belt Wall | |
| | | x | y | x | y | x | y |
| Atap 2 | 4000 | 1058 | 1062 | 470,5 | 478,1 | 372,9 | 381,3 |
| Atap 1 | 4000 | 1054 | 1058 | 460,7 | 468,1 | 365,6 | 373,8 |
| Obser | 4000 | 1049 | 1053 | 450,9 | 458,1 | 358,2 | 366,4 |
| 34 | 4000 | 834 | 836 | 278,8 | 282,6 | 223,8 | 229,5 |
| 17 | 4000 | 422 | 422 | 105,1 | 106,5 | 86,0 | 88,8 |
| 1 | 4000 | 8 | 8 | 1,5 | 1,5 | 1,3 | 1,4 |
| BASE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



Gambar 2. Rekapitulasi displacement arah X dan arah Y

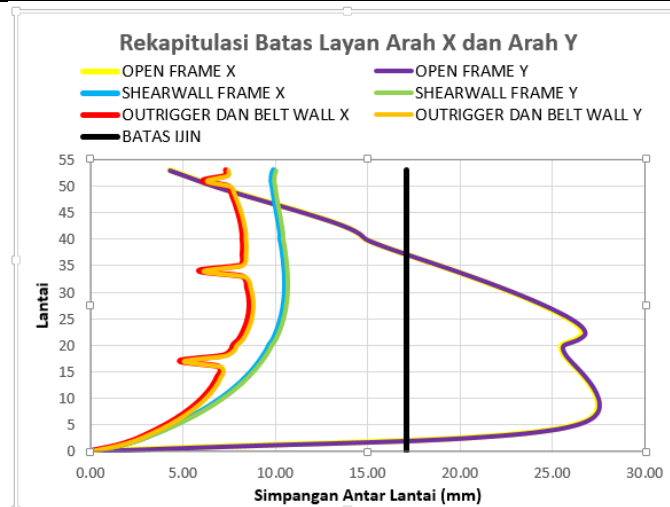
Kontrol Kinerja Batas Layan

Kinerja batas layan struktur ditentukan oleh simpangan antar lantai akibat gempa rencana dengan persyaratan $\Delta < \frac{0,03}{R} \times H$ atau < 30 mm sesuai Pasal 8.1.1 SNI 1726 – 2002. Dari hasil *displacement* didapatkan kinerja batas layan struktur yang diwakilkan sebagai berikut:

Tabel 8. Rekapitulasi Kontrol Kinerja Batas Layan

| Lantai | h (mm) | Open Frame | | Shearwall Frame | | Outrigger dan Belt Wall | | Ijin (mm) |
|--------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------|
| | | Δ_x (mm) | Δ_y (mm) | Δ_x (mm) | Δ_y (mm) | Δ_x (mm) | Δ_y (mm) | |
| Atap 2 | 4000 | 4,27 | 4,29 | 9,9 | 10,1 | 7,3 | 7,5 | 17,1 |
| Atap 1 | 4000 | 5,06 | 5,10 | 9,8 | 10,0 | 7,3 | 7,4 | 17,1 |

| | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|
| Obser | 4000 | 5,85 | 5,88 | 9,8 | 10,0 | 6,1 | 6,3 | 17,1 |
| 34 | 4000 | 19,7 | 19,8 | 10,5 | 10,7 | 5,9 | 6,1 | 17,1 |
| 17 | 4000 | 25,9 | 25,7 | 9,1 | 9,3 | 4,8 | 5,0 | 17,1 |
| 1 | 4000 | 8,2 | 8,2 | 1,5 | 1,5 | 1,3 | 1,4 | 17,1 |
| BASE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



Gambar 3. Rekapitulasi kinerja batas layan arah X dan arah Y

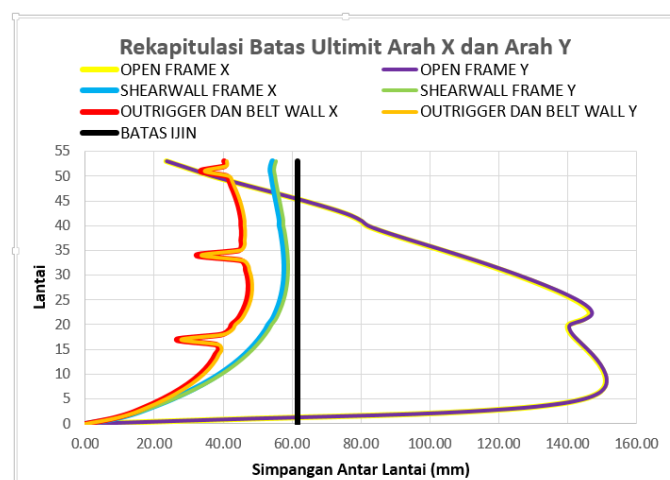
Berdasarkan grafik diatas, sistem *outrigger* dan *belt wall* memenuhi syarat kontrol kinerja batas layan dan lebih aman dengan efektivitas sebesar 17,70 persen dibandingkan sistem *shearwall frame*. Selanjutnya dilakukan kontrol terhadap kinerja batas ultimit.

Kontrol Kinerja Batas Ultimit

Kinerja batas ultimit ditentukan oleh simpangan antar lantai maksimum struktur gedung akibat pengaruh gempa rencana dalam kondisi gedung diambang keruntuhan dengan persyaratan $\Delta \leq \Delta_c/p$ sesuai Pasal 7.8.6 SNI 1726 – 2012. Dari hasil *displacement* didapatkan kinerja batas ultimit struktur yang diwakilkan sebagai berikut:

Tabel 9. Rekapitulasi Kontrol Kinerja Batas Ultimit

| Lantai | h (mm) | Open Frame | | Shearwall Frame | | Outrigger dan Belt Wall | | Ijin (mm) |
|--------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------|
| | | Δ_x (mm) | Δ_y (mm) | Δ_x (mm) | Δ_y (mm) | Δ_x (mm) | Δ_y (mm) | |
| Atap 2 | 4000 | 23,5 | 23,6 | 54,4 | 55,3 | 40,2 | 41,0 | 61,5 |
| Atap 1 | 4000 | 27,8 | 28,0 | 53,9 | 54,9 | 40,4 | 40,7 | 61,5 |
| Obser | 4000 | 32,2 | 32,4 | 53,8 | 54,7 | 33,4 | 34,6 | 61,5 |
| 34 | 4000 | 108 | 109 | 54,4 | 55,3 | 40,2 | 41,0 | 61,5 |
| 17 | 4000 | 142 | 143 | 50,3 | 51,1 | 26,5 | 27,7 | 61,5 |
| 1 | 4000 | 45,2 | 45,0 | 8,1 | 8,2 | 7,4 | 7,8 | 61,5 |
| BASE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



Gambar 4. Rekapitulasi kinerja batas ultimit arah X dan arah Y

Berdasarkan grafik kinerja batas ultimit arah X dan arah Y diatas, dihasilkan bahwa sistem *outrigger* dan *belt wall* yang memenuhi syarat kinerja batas ultimit dan lebih aman dengan efektivitas sebesar 17,70 persen dibandingkan sistem *shearwall frame*.

Kontrol Tingkat Kinerja Struktur Berdasarkan ATC – 40

Tabel 10. Kontrol Tingkat Kinerja Struktur Berdasarkan ATC – 40

| Sistem <i>Open Frame</i> | | |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Parameter | Arah X | Arah Y |
| Total Drift Maksimum | 0,004994 | 0,00500 |
| Performance Level | <i>Immediate Occupancy</i> | <i>Immediate Occupancy</i> |
| In – Elastic Drift Maksimum | 0,004955 | 0,004973 |
| Performance Level | <i>Immediate Occupancy</i> | <i>Immediate Occupancy</i> |
| Sistem <i>Shearwall Frame</i> | | |
| Parameter | Arah X | Arah Y |
| Total Drift Maksimum | 0,002537 | 0,002578 |
| Performance Level | <i>Immediate Occupancy</i> | <i>Immediate Occupancy</i> |
| In – Elastic Drift Maksimum | 0,002529 | 0,002570 |
| Performance Level | <i>Immediate Occupancy</i> | <i>Immediate Occupancy</i> |
| Sistem <i>Outrigger dan Belt Wall</i> | | |
| Parameter | Arah X | Arah Y |
| Total Drift Maksimum | 0,002010 | 0,002055 |
| Performance Level | <i>Immediate Occupancy</i> | <i>Immediate Occupancy</i> |
| In – Elastic Drift Maksimum | 0,002002 | 0,0020048 |
| Performance Level | <i>Immediate Occupancy</i> | <i>Immediate Occupancy</i> |

Hasil kontrol tingkat kinerja struktur berdasarkan *Applied Technology Council – 40* (ATC – 40) menjelaskan bahwa tingkat kinerja struktur setiap model dengan sistem diatas termasuk kategori *Immediate Occupancy*, yaitu apabila terkena gempa maka struktur bangunan aman, risiko korban jiwa dari kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti, dan dapat segera difungsikan/ beroperasi kembali. Namun, apabila dilihat dari nilai hasil perhitungan, sistem *open frame* berada pada kondisi kritis atau mendekati batas antara *Immediate Occupancy* dan *Damage Control*.

Efisiensi Sistem *Outrigger dan Belt Wall*

Kinerja sistem *outrigger* dan *belt wall* tidak hanya menghasilkan efektivitas, yaitu menambah kekakuan struktur, serta mengurangi *interstory drift* atau simpangan antar lantai struktur sesuai syarat dan peraturan, tetapi juga harus menghasilkan efisiensi, yaitu mengurangi massa struktur atau berat struktur yang akan berdampak pada efisiensi material struktur sehingga bermuara pada perancangan yang tidak hanya memenuhi syarat aman kinerja struktur, tetapi juga perancangan struktur yang ekonomis. Dengan begitu sistem *outrigger* dan *belt wall* layak dan tepat untuk diterapkan.

Efisiensi disini adalah selisih berat total struktur antara sistem *outrigger* dan *belt wall* dengan sistem *shearwall frame* dibandingkan terhadap berat total struktur sistem *shearwall frame*.

Tabel 11. Efisiensi Sistem *Outrigger dan Belt Wall*

| Sistem Penahan Lateral | Berat Total Struktur | Efisiensi (%W) |
|--------------------------------|----------------------|----------------|
| | (kN) | (%) |
| <i>Shearwall Frame</i> | 1638530,51 | 9,07 |
| <i>Outrigger dan Belt Wall</i> | 1489859,88 | |

catatan : sistem *open frame* tidak diperhitungkan karena dinyatakan tidak aman berdasarkan hasil kontrol batas layan dan batas ultimit.

Tabel di atas menunjukkan bahwa efisiensi berdasarkan pengurangan berat total struktur akibat penerapan sistem *outrigger* dan *belt wall* yang terjadi adalah sebesar 9,07 persen.

SIMPULAN

Dari penelitian ini dapat ditarik simpulan sebagai berikut:

1. Sistem *outrigger* dan *belt wall* menghasilkan efektivitas kinerja yang baik sebesar 17,70 persen, serta memenuhi syarat kontrol kinerja struktur dan dinyatakan aman terhadap gempa.
2. Tingkat kinerja struktur sistem *outrigger* dan *belt wall* berdasarkan *Applied Technology Council – 40* termasuk kategori *Immediate Occupancy*.

3. Sistem *outrigger* dan *belt wall* menghasilkan efisiensi sebesar 9,07 persen yang terwujud pada berkurangnya massa struktur atau berat total struktur terhadap sistem *shearwall frame* sehingga bermuara pada perancangan struktur yang ekonomis.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih saya ucapkan kepada Bapak Ir. Mukahar, MSCE. dan Agus Setiya Budi, S.T., M.T. yang telah membimbing, memberi arahan dan masukan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- Anonim, SNI 1726-2002, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, BSN, Jakarta, Indonesia.
- Anonim, SNI 1726-2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, BSN, Jakarta, Indonesia.
- Anonim, SNI 2847-2013, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, BSN, Jakarta, Indonesia.
- Anonim, SNI 1727-2013, *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur lain*, BSN, Jakarta, Indonesia.
- Anonim, PPIUG 1983, *Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung*, Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Bandung, Indonesia.
- Budio, Sugeng P., *Dinamika*, Malang, Universitas Brawijaya.
- Dewobroto, Wiryanto., 2012, *Menyongsong Era Bangunan Tinggi dan Bentang Panjang (Bagian I : Tinggi, Super-tinggi dan Mega-tinggi)*, Tangerang, Universitas Pelita Harapan.
- Gazali, Mohamad dan Data Iranata, 2012, *Studi Perbandingan Perilaku Bangunan menggunakan SRPM, SRBK, dan SRBK menggunakan Outrigger terhadap Variasi Tinggi Gedung, Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Riza, Muhammad Miftakhur., 2012, *Ebook Aplikasi Perencanaan Gedung dengan ETABS*, ARS Group.
- Sukamta, Davy., *Core dan Outrigger sebagai Sistem Lateral pada Apartemen The Peak*, HAKI, Indonesia.
- Sukamta, Davy., 2016, *Inovasi dalam Desain Struktur dan Konstruksi Gedung Super - Tinggi*, HAKI, Indonesia.
- Syariar, Yachub., M. Faishal Mukarrom dan Trijoko Wahyu Adi., 2012, *Analisis Perbandingan Efektifitas Struktur Gedung dengan Menggunakan Shearwall dan kombinasi antara Shearwall-Outrigger*, Surabaya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Taranath, Bungale S., 2010, *Reinforced Concrete Design of Tall Building*, CRC Press, New York, USA
- Tumilar, Steffie., 2015, *Perilaku dan Sistem Struktur pada Perencanaan Gedung Tinggi*, HAKI, Indonesia.