

ANALISA KINERJA STRUKTUR BETON BERTULANG PRACETAK DENGAN METODE *LEVELLING TIME* *HISTORY* (STUDI KASUS ASRAMA ITERA)

Ahmad Yudi*¹, Nugraha Bintang Wirawan¹, Siska Apriwelni¹, Marudut Sagala²

¹Dosen, Program Studi Teknik Sipil, Jurusan Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan,
Institut Teknologi Sumatera

²Mahasiswa, Program Studi Teknik Sipil, Jurusan Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan,
Institut Teknologi Sumatera.

*Korespondensi: ahmad.yudi.@si.itera.ac.id

ABSTRACT

An earthquake is one of the loads on a structure that must be taken into account when designing a building and makes the writer to calculate the strength or safety of the structure in receiving earthquake loads according to the building location. The author aims to analyze the behavior of the structure and safety performance of the ITERA dormitory building structure against earthquakes that have been designed before, to know the nonlinear maximum value level (Aog level) that can be held by the building structure, and to know the increase in base shear for each leveling time history in reinforced concrete structures. preprinted. Analysis of structural behavior using numerical methods with the help of a structural analysis program. The frame on the structure will be defined as a hinge (hinge) to be able to see the behavior of the structure and with an increase in the load in the form of a matching result between the ITERA spectrum response and the time history gradually until the structure experiences total failure. The process of matching the response spectrum and time history is carried out with the help of a seismomatch program. The earthquake load increases gradually with the initial acceleration of the earthquake multiplied by a coefficient. Improvements continue until the structure fails. The results of the structural analysis will produce output in the form of structural performance and structural strength to withstand the maximum value of the initial acceleration of the earthquake by means of color visual checks, deviation checks, rotational checks of some FEMA356 parameters, and produces a large output increase in base shear for precast concrete structures.

Keywords: *Structural Analysis; Structural Performance; Precast Concrete.*

ABSTRAK

Gempa adalah salah satu beban pada struktur yang harus diperhitungkan saat mendesain suatu gedung dan membuat penulis untuk memperhitungkan kekuatan atau keamanan struktur dalam menerima beban gempa sesuai lokasi bangunan. Penulis bertujuan untuk menganalisis perilaku kinerja struktur dan kemandirian struktur gedung asrama ITERA terhadap gempa yang telah didesain sebelumnya, mengetahui tingkat nilai maksimum nonlinear (tingkat Aog) yang dapat ditahan oleh struktur gedung, serta mengetahui peningkatan base shear setiap levelling time history pada struktur beton bertulang pracetak. Analisa perilaku struktur menggunakan metode numerik dengan bantuan program analisa struktur. Frame pada struktur akan didefinisikan hinge (engsel) untuk dapat melihat perilaku struktur dan dengan peningkatan beban berupa hasil matching antara respon spektrum ITERA dengan time history secara bertahap sampai struktur mengalami kegagalan total. Proses matching respon spektrum dan time history dilakukan dengan bantuan program seismomatch.. Peningkatan beban gempa dilakukan secara bertahap dengan percepatan awal gempa yang dikalikan oleh sebuah koefisien. Peningkatan terus dilakukan sampai mengalami kegagalan pada struktur. Hasil analisis struktur tersebut akan menghasilkan output berupa kinerja struktur dan kekuatan struktur untuk menahan tingkat nilai maksimum percepatan awal gempa secara cek visual warna, cek simpangan, cek rotasi dari beberapa parameter FEMA356, dan menghasilkan output besar peningkatan base shear struktur beton pracetak.

Kata kunci: *Analisa struktur; Kinerja Struktur; Beton Pracetak*

1. PENDAHULUAN

Gempa merupakan beban dinamik yang harus diperhitungkan untuk struktur gedung. Suatu kejadian alam yang unik, sangat tidak bisa ditentukan baik dari waktu kejadian, durasi terjadinya gempa maupun kekuatannya. Hal ini membuat perencana harus mempertimbangkan beban gempa setiap mendesain gedung. Indonesia khususnya provinsi Lampung secara pembagian wilayah gempa merupakan daerah yang rawan dengan terjadinya gempa sehingga ketika merencanakan gedung harus memperhitungkan beban gempa.

Sesuai perkembangan zaman dan kemajuan teknologi, pembangunan bangunan gedung akan sangat padat yang akan mengurangi kebutuhan lahan konstruksi. Oleh karena itu, perlu didesain gedung bertingkat untuk meminimalisir lahan yang dibutuhkan. Dengan kemajuan teknologi membuat waktu pelaksanaan pembangunan infrastruktur lebih efisien. Struktur gedung yang tepat untuk diterapkan pada bangunan adalah struktur beton bertulang pracetak. Hal ini akan membuat proses konstruksi yang cepat dan membutuhkan lahan yang minimalisir, penggunaan bahan material yang ekonomis, dan pemakaian tenaga kerja serta mengurangi limbah konstruksi.

Salah satu gedung yang dapat diaplikasikan pembangunan struktur pracetak adalah gedung asrama ITERA dengan pertimbangan beban gempa. Dalam studi kali ini penulis ingin menganalisa perilaku kinerja struktur dan kemandirian struktur gedung asrama ITERA terhadap gempa yang telah didesain sebelumnya, mengetahui tingkat nilai maksimum *nonlinear* (tingkat Aog) yang dapat ditahan oleh struktur gedung, serta mengetahui peningkatan *base shear* setiap *levelling time history* pada struktur beton bertulang pracetak.

Salah satu cara untuk mendapatkan hasil dari perilaku struktur adalah dengan memberikan gaya-gaya pada struktur gaya gempa yang sangat tidak teratur dan durasinya juga sangat acak. Bentuk penyederhanaan gaya gempa ini dapat berupa respons spektrum dan *time history* analisis (analisis beban gempa dinamik). Pada penelitian ini beban gempa yang digunakan adalah beban *time history* yang telah *dimatching* dengan respons spektrum daerah Lampung. Beban gempa *time history* ini ditingkatkan Aog-nya (percepatan awal gempa) secara bertahap sampai memperoleh semua struktur sudah gagal agar dapat melihat perilaku kinerja struktur secara bertahap. Metode pembebanan ini akan diaplikasikan pada masing-masing struktur beton untuk studi kasus gedung Asrama ITERA berdasarkan standar desain.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Beton Pracetak

Menurut SNI 2847:2013, beton pracetak merupakan elemen beton struktur yang dicetak di tempat lain dari posisi akhirnya dalam struktur. Dalam pembuatannya, beton pracetak hampir sama dengan beton konvensional hanya saja yang membedakannya adalah sistem fabrikasinya. Sistem yang tersebut mencakup kondisi pembebanan dan kekangan dari penggunaan awal sampai penggunaan akhir pada struktur, termasuk pembongkaran bekisting, penyimpanan, transportasi, dan ereksi (pemasangan).

Menurut SNI 03-2847 campuran beton pracetak terdiri dari semend Portland atau semen hidraulik lain, agregat halus (ukuran ≤ 5 mm), agregat kasar (ukuran 5 mm – 40 mm) dan air serta ditambah bahan tambahan yang dapat membentuk massa padat. Disebutkan juga bahwa Beton pracetak dapat berupa beton bertulang ataupun tidak bertulang. Mutu beton yang biasa dipersyaratkan untuk beton pracetak adalah mutu beton $f'c$ 14,53 MPa (K-175) sampai $f'c$ 29,05 MPa (K-350 dengan toleransi slump (12 ± 2) cm.

2.2. Analisis Kinerja Struktur

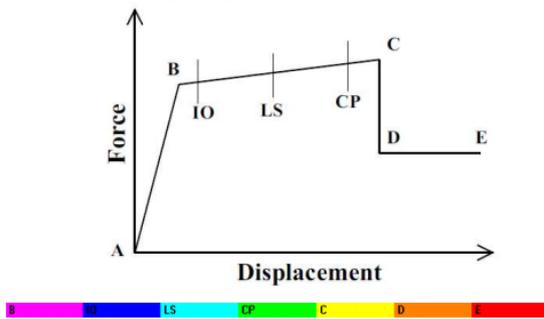
Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan bangunan yang sudah ada dengan pemahaman yang realistis terhadap risiko keselamatan jiwa (*life safety*), kesiapan untuk dihuni setelah kejadian gempa (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa. Proses perencanaan tahan gempa berbasis kinerja dimulai dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan simulasi kinerjanya terhadap berbagai kejadian gempa. Setiap simulasi memberikan informasi tingkat kerusakan (*level of damage*), ketahanan struktur, sehingga dapat memperkirakan berapa besar risikonya terhadap keselamatan jiwa, kesiapan dihuni dan kerugian harta benda.

Berdasarkan FEMA 356 analisa level kinerja struktur dapat dilihat dari pengecekan besar rotasi, partisi massa, desain sendi plastis, momen, simpangan dan parameter lainnya. Pengecekan lebih dari beberapa parameter dapat mewakili hasil perilaku struktur sesuai dengan FEMA 356.

2.3. Sendi Plastis

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 1.



Gambar 1. Tahapan Level Kinerja Struktur.

Tahapan level kinerja struktur dikategorikan menjadi beberapa rentang yaitu:

- B : batas elastis, sendi plastis pertama terbentuk dalam bentuk warna ungu.
- IO : *immediate occupancy*, sendi plastis terbentuk dalam warna biru tua.
- LS : *life safety*, sendi plastis terbentuk dalam warna biru muda.
- CP: *collapse prevention*, sendi plastis terbentuk dalam warna hijau.
- C : *collapse*, sendi plastis terbentuk dalam warna kuning.
- D : *residual point*, sendi plastis terbentuk dalam warna orange.
- E : runtuh total, sendi plastis terbentuk dalam warna merah

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 sebelumnya. *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 non-struktur, kekuatan struktur berkurang banyak dan hampir mengalami keruntuhan.

2.4. Simpangan

Berdasarkan FEMA 356 rasio batasan simpangan untuk ketiga kategori *Immediate Occupancy*, *Life Safety*, dan *Collapse Prevention* seperti yang terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Simpangan (Displacement)

| Sistem Struktur | IO | LS | CP |
|-----------------|-----|-----|-----|
| Beton | 1 % | 2 % | 4 % |

2.5. 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 2.

Tabel 2. Rotasi diizinkan pada Struktur Beton (rad)

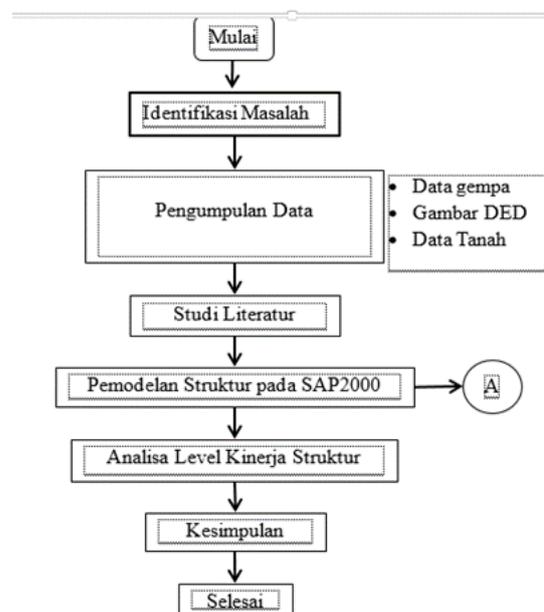
| Bagian Struktur | IO | | LS | | CP | |
|-----------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | (+) | (-) | (+) | (-) | (+) | (-) |
| Kolom | 0,01 | 0,01 | 0,025 | 0,025 | 0,030 | 0,030 |

2.6. Analisa Peningkatan *Base Shear*

Perhitungan *base shear* maksimum pada struktur bangunan dapat dilakukan dengan mensimulasikan akibat gempa yang ada di daerah bangunan baik berupa respon spektrum ataupun *time history*. Perhitungan base bisa dilakukan dengan cara analisis THA, *Complete Quadratic Combination (CQC)* dan *Square Root of the Sum of the Squares (SRSS)*. Perhitungan untuk mendapatkan nilai base shear maksimum struktur dan portal bisa juga secara metode numerik dengan bantuan program analisis struktur menggunakan SAP2000 Perhitungan base shear dengan meninjau gempa arah X saja jika struktur direncanakan berbentuk simetris karena base shear struktur arah X dan Y adalah sama, sementara jika bangunan yang direncanakan tidak simetris maka perhitungan base shear harus ditinjau dari kedua arah gempa baik arah X ataupun arah Y.

3. METODE PENELITIAN

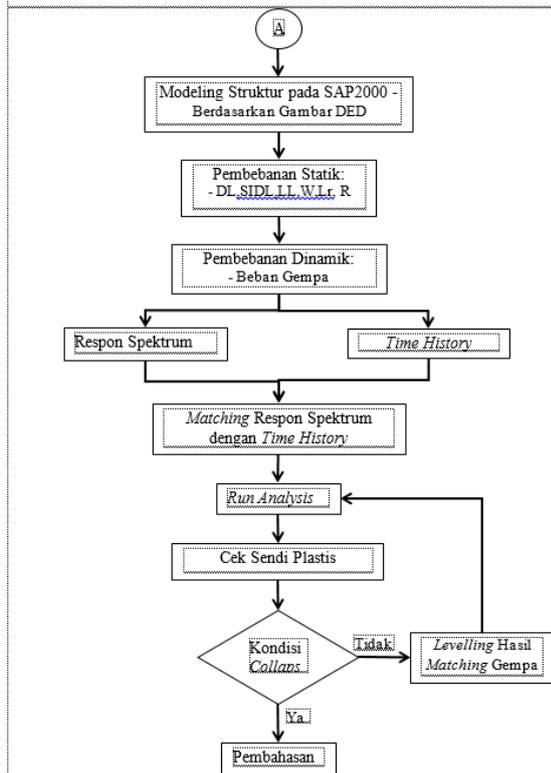
Urutan proses pelaksanaan penelitian tugas akhir ini dapat dilihat pada diagram alir Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Analisa Kinerja Struktur Beton Bertulang Pracetak Dengan Metode *Levelling Time History*
 Ahmad Yudi*¹, Nugraha Bintang Wirawan¹, Siska Apriwelni¹, Marudut Sagala²

Permodelan Struktur Pracetak pada SAP2000 dijelaskan pada diagram alir berikut ini:

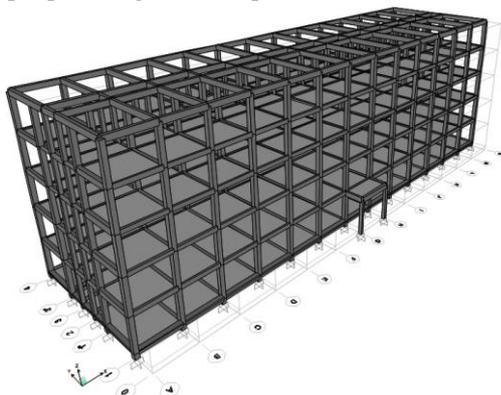


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian Pemodelan Struktur.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Deskripsi Bangunan

Gedung pada penelitian ini memiliki fungsi bangunan sebagai tempat tinggal (Asrama). Struktur gedung asrama akan dibangun dengan struktur beton bertulang pracetak. Struktur gedung Asrama memiliki 6 lantai dari lantai *basement* sampai dengan lantai atap.. Struktur gedung ini memiliki 5 bay untuk arah memendek sumbu Y dengan jarak 2 m dan 4 m serta 13 bay arah memanjang sumbu X dengan jarak 4 m. Untuk tinggi setiap lantai adalah 3,4 dengan total 17 m tepat pada ring balok atap.



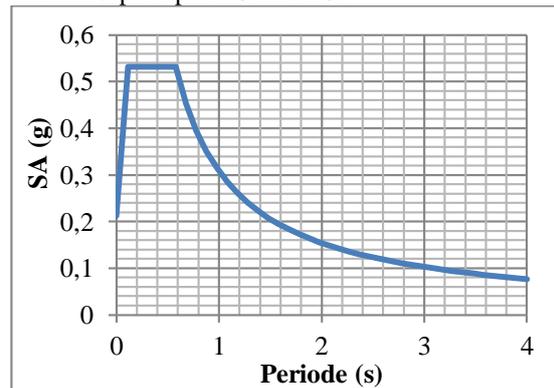
Gambar 4. 3D Gedung Penelitian

4.2. Pemodelan Struktur.

Pemodelan pada penelitian menggunakan software SAP2000 dan sesuai dengan gambar perencanaan DED gedung Asrama ITERA. Gedung ini dimodelkan menggunakan sistem struktur pracetak. Dimensi Pada pemodelan struktur didesain berdasarkan data gambar yang diperoleh saat pengumpulan data. Untuk desain beton pracetak pada SAP2000 sama dengan konsep pemodelan beton konvensional tetapi ada perbedaan saat penginputan diafragma pada setiap sambungan yang diubah menjadi semi *rigid*.

4.3. Desain Respon Spektrum

Desain respon spektrum harus mempertimbangkan data tata letak lokasi bangunan dan data tanah dimana gedung akan dibangun. Dengan data yang telah terkumpul, diketahui bahwa data tanah Asrama ITERA adalah tanah keras atau kelas situs C. Berdasarkan data terpetakan SNI 1726-2012 diperoleh bahwa lokasi asrama ITERA memiliki parameter percepatan batuan dasar pada periode pendek (S_s) adalah 0,7g-0,8g dan parameter percepatan batuan dasar pada perioda 1 detik (S_1) adalah 0,3g-0,4g. Dalam penelitian ini, dengan bantuan puskim didesain bahwa $S_s = 0,716$ dan $S_1 = 0,31$. Dengan tata cara desain berdasarkan SNI 1726-2012 diperoleh bahwa grafik respon spektrum ITERA seperti pada Gambar 5.



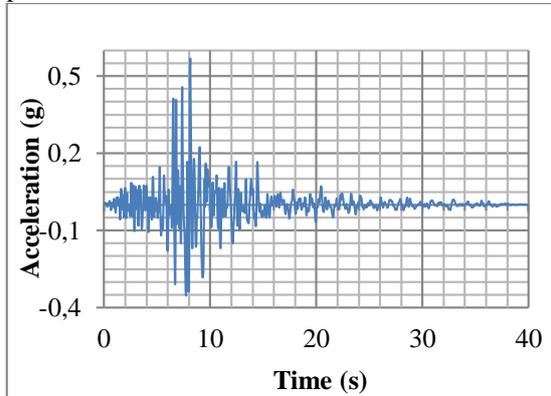
Gambar 5. Respon Spektrum ITERA

Dari gambar respon spektrum di atas dapat dilihat bahwa percepatan gempa maksimum adalah 0,53g yang didesain sesuai dengan peraturan desain SNI-1726 -2012. Percepatan gempa maksimum terjadi ketika perioda lebih besar dari atau sama dengan T_o dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s .

4.4. Time History

Pada penelitian ini, penulis memilih data riwayat waktu (*time history*) gempa yang ada pada software seismosignal. Pemilihan data riwayat gempa berdasarkan pendekatan nilai percepatan gempa maksimum pada respon spektrum ITERA dengan nilai percepatan maksimum *time history*

pada seismosignal. Pada dasarnya bisa memilih *time history* yang lain karena pada penelitian ini pada akhirnya akan dilakukan *matching* antara *time history* dengan respon spektrum untuk pendekatan hasil beban dinamik. Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis memilih data gempa riwayat waktu *Northridge-01* (1994) seperti yang tertera pada Gambar 6.

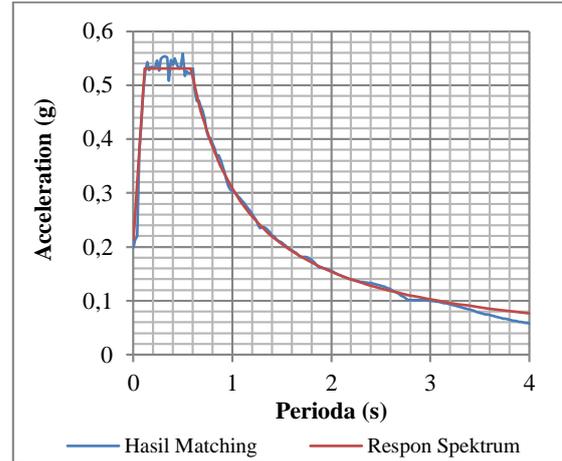


Gambar 6. *Time History Northridge*

Dari Gambar 6. dapat dilihat bahwa percepatan gempa maksimum adalah 0,568g pada perioda 8,14 detik dan percepatan gempa minimum yang terjadi adalah -0,354g pada perioda 7,74 detik. Percepatan gempa maksimum pada *time history* ini hampir sama dengan percepatan gempa maksimum pada respon spektrum ITERA yaitu 0,53g.

4.5. Proses *Matching*

Data gempa riwayat waktu *Northridge-01* (1994) akan *dimatching* dengan respon spektrum untuk memperoleh pendekatan data riwayat waktu pada daerah bangunan gedung asrama. Proses ini *dimatching* (dicocokkan) dengan bantuan software *seismomatch* dari *seismosoft*. Pada software *seismomatch* sudah tersedia riwayat waktu gempa *Northridge* yang kemudian akan ditargetkan dengan data respon spektrum ITERA. Proses *matching* akan menghasilkan data baru berupa riwayat waktu yang menyerupai respon spectrum. Dengan bantuan software *seismomath* tersebut maka didapatkan plot rekaman gempa seperti pada Gambar 7.

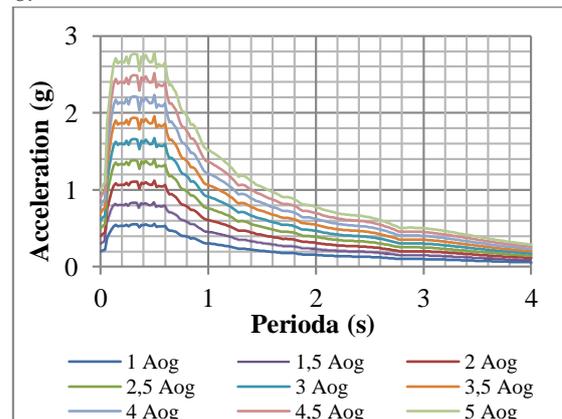


Gambar 7. Hasil *Matching*

Hasil *matching* antara respon spektrum ITERA dengan *Time History Northridge* memperoleh bahwa percepatan gempa maksimum adalah 0,558g pada perioda 0,5 detik. Percepatan gempa ini masih berada antara percepatan gempa maksimum pada respon spektrum ITERA dan percepatan gempa maksimum *Time History Northridge* yaitu diantara 0,530g dan 0,568g. Hasil *matching* ini akan diinputkan ke program SAP2000 dan akan dilakukan proses peningkatan percepatan gempa awal secara bertahap (*levelling*) sampai struktur mengalami keruntuhan.

4.6. Proses *Levelling*

Untuk mengetahui perilaku struktur ataupun kekuatan struktur terhadap beban yang diterima maka dilakukan peningkatan beban secara bertahap. Pada penelitian ini, beban gempa berupa hasil *matching* respon spektrum dan gempa *time history* akan ditingkatkan Aog-nya (percepatan awal gempa) secara bertahap sampai memperoleh semua struktur sudah gagal agar dapat melihat perilaku struktur ataupun kekuatan struktur secara bertahap. Proses *levelling* dilakukan dengan mengalikan percepatan awal gempa dengan koefisien dan ditingkatkan secara bertahap seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil *Levelling*

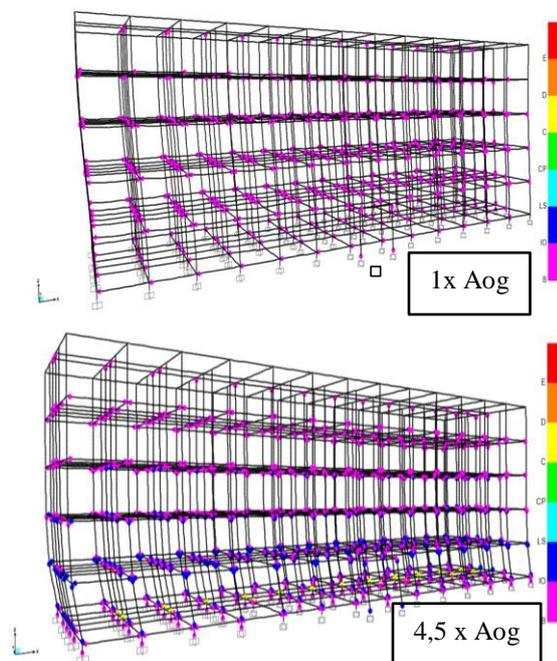
Hasil *levelling* akan menimbulkan percepatan awal gempa berbeda-beda setiap peningkatan Aog dengan peningkatan percepatana awal gempa sebesar 1,5 dari percepatan awal gempa sebelumnya. Dari gambar 4.10 dapat disimpulkan bahwa percepatan awal gempa hasil *matching* adalah 0,199g, percepatan awal gempa pada 1,5 kali Aog adalah 0,299g, pada 2 kali Aog adalah 0,399g, pada 2,5 kali Aog adalah 0,499g, pada 3 kali Aog adalah 0,599g, pada 3,5 kali Aog adalah 0,699g, pada 4 kali Aog adalah 0,799g, pada 4,5 kali Aog adalah 0,899g, pada 5 kali Aog adalah 0,99g. Data hasil *levelling* ini akan diinputkan ke software SAP2000 secara bertahap sampai struktur mengalami kegagalan struktur awal ataupun mengalami kegagalan secara keseluruhan.

4.7. Analisa Perilaku Struktur

Analisis parameter level kinerja struktur ditinjau dari beberapa cara atau metode yang ada. Pada penelitian ini penulis meninjau parameter perilaku struktur dengan mengecek desain sendi plastis, simpangan dan rotasi, peningkatan *base shear* yang terjadi pada struktur.

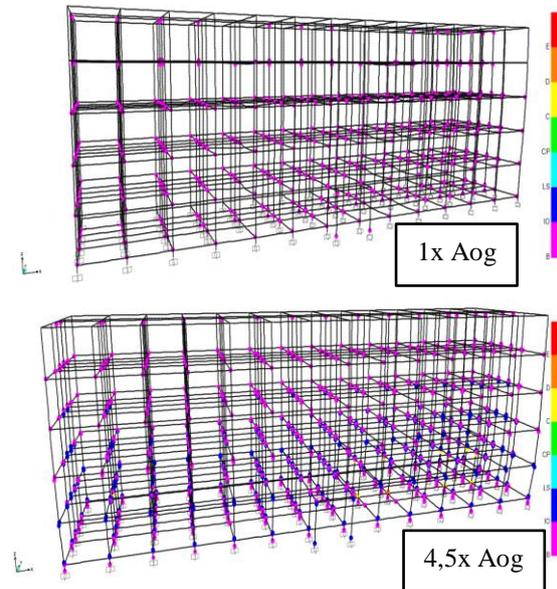
4.7.1. Cek Sendi Plastis

Pengecekan Sendi plastis dilakukan dengan melakukan peningkatan Aog hingga mencapai kondisi di atas CP (*Collapse Prevention*). Dengan menggunakan SAP2000 maka keluaran batasan-batasan tersebut akan terlihat dalam bentuk indikator warna seperti yang akan dijelaskan berikutnya.



Gambar 8. Sendi Plastis Gempa Arah X

Dari hasil output SAP yang tertera seperti pada gambar di atas untuk gempa arah sumbu X dapat diketahui bahwa level kinerja struktur sendi plastis sudah terbentuk pada 1 Aog (0,199g) tetapi masih pada indikator B atau masih dalam batas elastis. Sementara akan melewati level kinerja di atas CP ketika struktur telah menerima beban gempa dengan percepatan 4,5 kali percepatan awal gempa yaitu 0,899g .



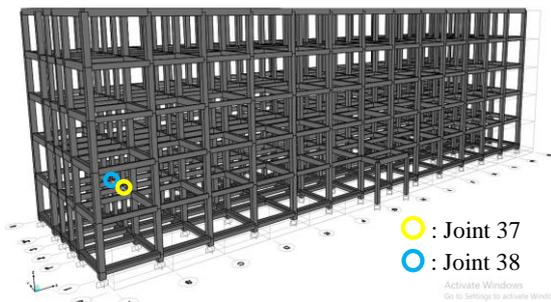
Gambar 9. Sendi Plastis Gempa Arah Y

Dari hasil output SAP yang tertera seperti pada gambar di atas untuk gempa arah sumbu Y dapat diketahui bahwa level kinerja struktur sendi plastis sudah terbentuk pada 1 Aog (0,199g) tetapi masih pada indikator B atau masih dalam batas elastis. Sementara akan melewati level kinerja di atas CP ketika struktur telah menerima beban gempa dengan percepatan 4,5 kali percepatan awal gempa yaitu 0,89g dan dinyatakan runtuh total ketika menerima beban gempa dengan percepatan 5 kali percepatan awal gempa yaitu 0,99g. Dapat dilihat bahwa adanya perbedaan banyak titik kegagalan struktur pada gempa arah X dan gempa arah Y.

4.7.2. Cek Simpangan Maksimum

Pada penelitian ini penulis akan meninjau besar simpangan maksimum yang terjadi hanya pada dua titik sebagai contoh yang merupakan titik pertama kali terbentuknya sendi plastis melewati indikator CP untuk masing-masing arah gempa. Titik tinjauan simpangan untuk gempa arah X dapat dilihat pada Gambar 10.

Analisa Kinerja Struktur Beton Bertulang Pracetak Dengan Metode *Levelling Time History*
 Ahmad Yudi*¹, Nugraha Bintang Wirawan¹, Siska Apriwelni¹, Marudut Sagala²



Gambar 10. Titik Tinjauan untuk Gempa Arah X

Sambungan atau joint 37 dan joint 38 merupakan titik yang menjadi tinjauan terhadap besar simpangan yang diakibatkan beban dan gempa arah X. Joint ini dipilih berdasarkan indikator yang telah melewati batas CP dan merupakan joint pertama yang mengalami kegagalan. Dari gambar 4.19 telah ditampilkan bahwa joint ini sudah melewati batas CP dari visual warna. Secara detail dapat dilihat indikator pola keruntuhan Joint 37 dan joint 38 berdasarkan besarnya simpangan yang terjadi seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Simpangan Maksimum akibat Gempa X

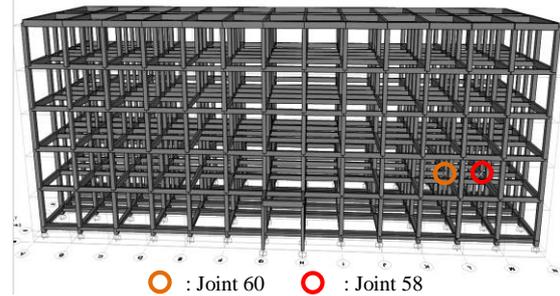
| Tingkat Aog | Simpangan Maksimum arah X | | Simpangan Izin (Δ) | | | | |
|-------------|---------------------------|----------|-----------------------------|---------|------|---------------|---------------|
| | | | FEMA 356 | | | SNI 7833-2012 | SNI 1726-2012 |
| | J37 | J38 | Level Kinerja Struktur | | | IO = 1% | LS = 2% |
| mm | mm | IO = 1% | LS = 2% | CP = 4% | 0,5% | 2% | |
| 1 Aog | 14,09 | 14,09 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 1,5 Aog | 25,79 | 25,80 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 2 Aog | 38,56 | 38,57 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 2,5 Aog | 47,24 | 47,32 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 3 Aog | 69,10 | 69,11 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 3,5 Aog | 99,75 | 99,77 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 4 Aog | 135,34 | 135,78 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 4,5 Aog | 199,54 | 199,55 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 5 Aog | 26321,35 | 25835,72 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |

Dari Tabel Simpangan maksimum akibat gempa arah X dapat dilihat pola keruntuhan pada joint 37 dan joint 38. Ketika percepatan awal gempa 0,199g (1 kali Aog) dapat dilihat bahwa simpangan yang terjadi pada joint 37 adalah 14,09 mm dan joint 38 adalah 14,09 mm. Artinya bahwa joint tersebut masih mengalami level kinerja struktur pada indikator IO dengan besar simpangan izin sama dengan 34 mm. Dilihat dari Gambar 4.12 level kinerja struktur juga masih pada indikator IO. Oleh karena itu dapat dinyatakan bahwa level kinerja struktur pada percepatan awal gempa 0,199g di joint 37 dan joint 38 masih dalam indikator IO berdasarkan hasil visual warna pada SAP2000 dan besar simpangan yang terjadi. Ketika percepatan awal gempa 1-1,5 kali Aog, sendi plastis masih di warna ungu pada tabel yang menunjukkan bahwa sendi plastis dalam batas elastis (B menuju IO). Ketika percepatan awal gempa 1,5 – 2,5 kali Aog, sendi plastis masih di warna biru tua menunjukkan indikator *life safety* (IO menuju LS). Ketika percepatan awal gempa 2,5-4 kali Aog, sendi plastis berada di warna biru muda menunjukkan indikator

LS menuju CP dan pada percepatan awal gempa 4,5 kali Aog, sendi plastis berada di warna kuning yang berarti struktur sudah runtuh.

Struktur akan mengalami kegagalan (CP) ketika percepatan awal gempa 0,899g (4,5 kali Aog). Besar simpangan yang terjadi sama dengan 199,54 mm untuk joint 37 dan 199,55 mm untuk joint 38. Sementara simpangan izin pada level kinerja struktur indikator CP adalah harus lebih kecil atau sama dengan 136 mm. Dari Gambar 4.19 juga ditampilkan bahwa joint ini sudah mengalami kegagalan struktur. Artinya joint ini mengalami kegagalan awal ketika percepatan awal gempa sama dengan 0,899g secara visual warna. Sementara struktur akan mengalami gagal total ketika percepatan awal gempa sama dengan 0,999g dengan besar simpangan sama dengan 25,836 m.

Sementara titik tinjauan simpangan untuk gempa arah Y dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Titik Tinjauan untuk Gempa Arah Y

Gempa arah Y akan menimbulkan perilaku struktur yang berbeda dari gempa arah X. Hal ini disebabkan oleh posisi dan bentuk gedung persegi panjang. Posisi tersebut mengakibatkan kekakuan arah X akan lebih kaku dibanding arah Y. Untuk akibat gempa arah Y, penulis meninjau joint 58 dan joint 60 karena joint ini merupakan joint pertama yang mengalami kegagalan awal pada struktur atau melewati level kinerja struktur pada indikator CP. Secara detail dapat dilihat indikator pola keruntuhan Joint 58 dan joint 60 yang diakibatkan gempa arah Y berdasarkan besarnya simpangan yang terjadi seperti pada Table 4.

Tabel 4. Simpangan Maksimum akibat Gempa Y

| Tingkat Aog | Simpangan Maksimum arah Y | | Simpangan Izin (Δ) | | | | |
|-------------|---------------------------|---------|-----------------------------|---------|-------|---------------|---------------|
| | | | FEMA 356 | | | SNI 7833-2012 | SNI 1726-2012 |
| | J58 | J60 | Level Kinerja Struktur | | | IO = 1% | LS = 2% |
| mm | mm | IO = 1% | LS = 2% | CP = 4% | 0,50% | 2% | |
| 1 Aog | 11,49 | 11,50 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 1,5 Aog | 21,85 | 21,87 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 2 Aog | 30,93 | 30,96 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 2,5 Aog | 42,32 | 42,35 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 3 Aog | 56,92 | 57,03 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 3,5 Aog | 86,04 | 86,14 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 4 Aog | 129,97 | 130,25 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 4,5 Aog | 190,65 | 191,10 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |
| 5 Aog | 52942,73 | 53111 | 34 | 68 | 136 | 13,1 | 68 |

Dari hasil simpangan struktur di atas dapat dilihat bahwa ketika beban gempa 1 kali Aog, besar simpangan yang terjadi pada kedua titik adalah 11,50 mm dan 11,51 mm lebih kecil dari 34 mm (1% dari tinggi posisi joint) yang berarti masih

Analisa Kinerja Struktur Beton Bertulang Pracetak Dengan Metode *Levelling Time History*
 Ahmad Yudi*¹, Nugraha Bintang Wirawan¹, Siska Apriwelni¹, Marudut Sagala²

dalam level kinerja struktur indikator B (batas elastis). Ketika percepatan gempa 4,5 kali Aog, besar simpangan yang terjadi adalah 190,65 mm pada joint 58 dan 191,1 mm pada joint 60 yang berarti sudah melewati level kinerja indikator CP atau berdasarkan cek desain plastis pada Gambar 4.28 sudah pada indikator C (runtuh) secara visual warna. Struktur dinyatakan runtuh total ketika menerima beban gempa 5 kali Aog atau 0,99g dengan besar simpangan yang terjadi adalah 52,94 m pada joint 58 dan 53,11 m pada joint 60. Kondisi ini sudah mencapai level kinerja struktur pada indikator E menurut FEMA 356.

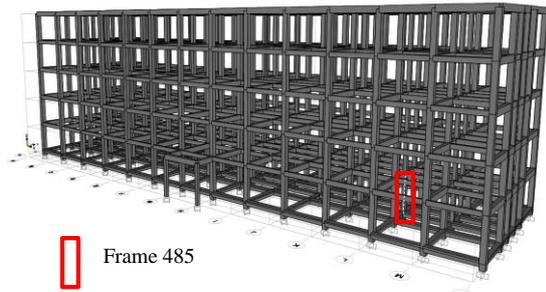
Ketika percepatan awal gempa 1-2 kali Aog, sendi plastis masih di warna ungu pada tabel yang menunjukkan bahwa sendi plastis dalam batas elastis (B menuju IO). Ketika percepatan awal gempa 2-3 kali Aog, sendi plastis masih di warna biru tua menunjukkan indikator *life safety* (IO menuju LS). Ketika percepatan awal gempa 3-4 kali Aog, sendi plastis berada di warna biru muda menunjukkan indikator LS menuju CP dan pada percepatan awal gempa 4,5 kali Aog, sendi plastis berada di warna kuning yang berarti struktur sudah runtuh.

Pada joint 379 diperoleh besar displacement maksimum 378,56 mm bersasarkan hasil output SAP2000 atau lebih besar dari 2% tinggi gedung tetapi pada sendi plastis belum menunjukkan adanya indikator kinerja struktur. Hal ini terjadi karena displacement pada joint 37 (lantai 2) sudah mencapai 199,55 mm yang pastinya semakin ke tingkat atas maka displacement semakin besar karena adanya penambahan simpangan setiap lantai sedangkan momen plastis masih kecil. Artinya secara sendi plastis atau akibat momen plastis belum melewati batas persyaratan (FEMA 356 2000) sedangkan secara pengecekan simpangan sudah melewati batas persyaratan.

Berdasarkan SNI 7833-2012 tentang tata cara perencanaan beton pracetak dan beton prategang untuk bangunan gedung ditentukan bahwa simpangan pada struktur tidak boleh lebih besar dari $\frac{0,5\% \times h}{1,3}$ yaitu 13,1 mm. Oleh karena itu struktur beton pracetak pada gedung penelitian ini hanya mampu menerima beban gempa dengan beban gempa lebih kecil dari 1,5 kali Aog atau lebih tepatnya pada beban gempa 1,2 kali Aog dengan percepatan awal gempa 0,278g.

4.7.3. Cek Rotasi

Pada penelitian ini penulis akan meninjau rotasi pada bagian frame yang mengalami indikator lebih dari CP. Salah satu frame yang melewati indikator CP adalah frame 485 atau kolom 400x400. Posisi frame 485 dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Frame Tinjauan Rotasi

Untuk mengecek rotasi yang terjadi, penulis meninjau frame 485 karena frame ini merupakan salah satu frame pertama yang mengalami kegagalan awal pada struktur atau melewati level kinerja struktur pada indikator CP dan frame ini berada diantara joint 58 yang sebelumnya menjadi tinjauan pada simpangan maksimum. Rotasi maksimum dan minimum yang terjadi pada struktur dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rotasi yang terjadi pada gedung gempa X

| Percepatan Awal Gempa | Rotasi (θ) | | | | Rotasi Izin (θi) | | | | | |
|-----------------------|---------------|----------|---------------|----------|------------------------|------|-----------|------|-----------|------|
| | Distance 0,05 | | Distance 0,95 | | Level Kinerja Struktur | | | | | |
| | min | max | min | max | IO = 1% | | LS = 2,5% | | CP = 3,0% | |
| (g) | radian | | | | | | | | | |
| 1 Aog | -0,001129 | 0,00 | 0,00 | 0,000034 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,03 | -0,03 | 0,03 |
| 1,5 Aog | -0,002149 | 0,00 | 0,00 | 0,000066 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,03 | -0,03 | 0,03 |
| 2 Aog | -0,004233 | 0,000001 | 0,00 | 0,00246 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,03 | -0,03 | 0,03 |
| 2,5 Aog | -0,007233 | 0,000009 | 0,00 | 0,00529 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,03 | -0,03 | 0,03 |
| 3 Aog | -0,009215 | 0,000044 | 0,00 | 0,00712 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,03 | -0,03 | 0,03 |
| 3,5 Aog | -0,014264 | 0,000066 | -0,000024 | 0,01229 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,03 | -0,03 | 0,03 |
| 4 Aog | -0,021427 | 0,000096 | -0,000003 | 0,0196 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,03 | -0,03 | 0,03 |
| 4,5 Aog | -0,031773 | 0,000050 | -0,000035 | 0,0282 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,03 | -0,03 | 0,03 |
| 5 Aog | -0,053448 | 0,000349 | -0,000268 | 0,05391 | -0,01 | 0,01 | -0,03 | 0,03 | -0,03 | 0,03 |

Besar rotasi yang terjadi pada kolom masih sangat kecil ketika percepatan awal gempa 0,199g. Menurut FEMA 356 bahwa rotasi tersebut masih pada level kinerja struktur indikator IO (kerusakan yang tidak berarti). Sehingga akan dilakukan peningkatan percepatan awal secara bertahap. Struktur gedung akan mengalami kegagalan akibat gempa arah X secara rotasi pada percepatan awal gempa sama dengan 0,899g (4,5 kali Aog) dengan level kinerja struktur melewati indikator CP berdasarkan FEMA 356.

Besar rotasi yang terjadi akibat gempa arah Y memiliki perbedaan dengan gempa arah X. Secara detail dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Rotasi yang terjadi pada gedung gempa Y

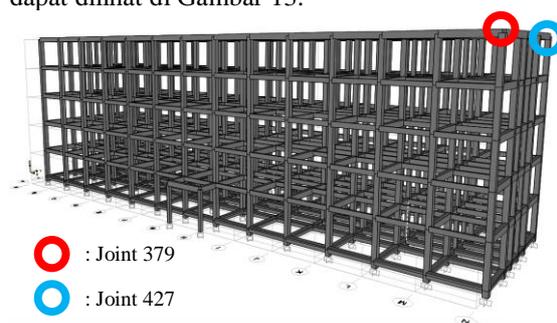
| Percepatan Awal Gempa | Rotasi | | | | Rotasi Izin (θi) | | | | | |
|-----------------------|---------------|----------|---------------|--------|------------------------|------|-----------|------|-----------|------|
| | Distance 0,05 | | Distance 0,95 | | Level Kinerja Struktur | | | | | |
| | min | max | min | max | IO = 1% | | LS = 2,5% | | CP = 3,0% | |
| (g) | radian | | | | | | | | | |
| 1 Aog | -0,0011 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,03 | 0,03 |
| 1,5 Aog | -0,0021 | 0,00 | 0,00 | 0,0027 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,03 | 0,03 |
| 2 Aog | -0,0039 | 0,000006 | -0,000005 | 0,0047 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,03 | 0,03 |
| 2,5 Aog | -0,0058 | 0,000050 | 0,000026 | 0,0067 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,03 | 0,03 |
| 3 Aog | -0,0087 | 0,000024 | -0,000069 | 0,0095 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,03 | 0,03 |
| 3,5 Aog | -0,0136 | 0,000042 | -0,000010 | 0,0143 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,03 | 0,03 |
| 4 Aog | -0,0192 | 0,000045 | -0,000025 | 0,0214 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,03 | 0,03 |
| 4,5 Aog | -0,0306 | 0,000056 | -0,000024 | 0,0312 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,03 | 0,03 |
| 5 Aog | -0,0553 | 0,000125 | -0,000028 | 0,0556 | -0,01 | 0,01 | -0,02 | 0,02 | -0,03 | 0,03 |

Besar rotasi yang terjadi pada kolom masih juga sangat kecil dengan level kinerja struktur indikator IO (kerusakan yang tidak berarti) ketika percepatan awal gempa 0,199 g. Tetapi bisa dilihat adanya perbedaan besar rotasi antara gempa arah X dan gempa arah Y. Oleh karena itu dapat dinyatakan bahwa pola keruntuhan struktur akibat gempa arah X dengan gempa arah Y memiliki pola keruntuhan yang berbeda. Perbedaan ini juga bisa dilihat secara visual warna dari cek disain plastis di subbab sebelumnya. Untuk gempa arah Y, struktur gedung akan mengalami kegagalan secara rotasi pada percepatan awal gempa sama dengan 0,899g (4,5x Aog) dengan level kinerja struktur melewati indikator CP.

Dapat dilihat ketika percepatan awal gempa 1-3 Aog kali, sendi plastis masih di warna ungu pada Tabel 4.3 yang menunjukkan bahwa sendi plastis dalam batas elastis (B menuju IO). Ketika percepatan awal gempa 3 – 3,5 kali Aog sendi plastis masih di warna biru tua menunjukkan indikator *life safety* (IO menuju LS). Ketika percepatan awal gempa 3,5-4 kali sendi plastis berada di warna biru muda menunjukkan indikator LS menuju CP dan pada percepatan awal gempa 45 kali Aog, sendi plastis berada di warna kuning yang berarti struktur sudah runtuh. Terdapat perbedaan pemforma perilaku struktur pada pengecekan displacement dan rotasi yang artinya bahwa struktur akan mencapai indikator sendi plastis maksimum jika salah satu dari parameter perilaku struktur telah melampauinya.

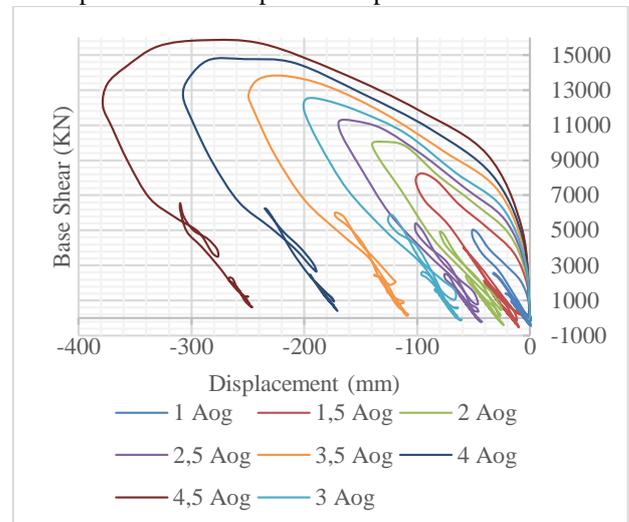
4.8. Peningkatan *Base Shear*

Analisa peningkatan base shear ditinjau pada sambungan yang mengalami *displacement* maksium. Untuk gempa arah X, titik 379 menjadi titik yang mengalami displacement maksimum karena pada percepatan awal gempa 0,898g (4,5x Aog) pertama kali mengalami kondisi *collaps* joint 379 mengalami *displacement* sebesar 378,56 mm. Oleh karena itu, penulis meninjau titik 379 untuk melihat peningkatan base shear setiap peningkatan percepatan awal gempa arah X. Letak titik tinjauan displacement maksimum pada struktur dapat dilihat di Gambar 13.



Gambar 13. *Frame* Tinjauan Rotasi

Joint 379 adalah joint yang mengalami displacement maksimum yang terjadi akibat gempa arah X dan joint 427 adalah joint yang mengalami displacement maksimum akibat gempa arah Y. Besar base shear akan diplot dengan displacement maksimum karena base shear adalah gaya geser dasar tanah total dari bangunan. Peningkatan *base shear* pada struktur dapat dilihat pada Tabel 7.



Gambar 14. Kurva Displacement Maksimum Vs *Base Shear* Gempa X

Pada Gambar 14 dapat dilihat bahwa adanya peningkatan *base shear* setiap dilakukan peningkatan percepatan awal gempa arah X. Tetapi pada perioda 0 detik, base shear yang terjadi setiap peningkatan percepatan awal gempa adalah sama yaitu sebesar 3,200 KN. Peningkatan *base shear* pada struktur dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Peningkatan *Base Shear* pada Gempa X

| Tingkat Aog | Base Shear | Displacement Maksimum mm | Peningkatan <i>Base Shear</i> | |
|-------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------|-----|
| | KN | | (KN) | % |
| 1 Aog | 5021,04277 | -50,80057 | - | - |
| 1,5 Aog | 8240,92646 | -101,11728 | 3219,884 | 64% |
| 2 Aog | 10047,7485 | -139,90313 | 1806,822 | 22% |
| 2,5 Aog | 11249,29175 | -169,106195 | 1201,543 | 12% |
| 3 Aog | 12511,4595 | -200,20722 | 1262,168 | 11% |
| 3,5 Aog | 13819,3079 | -249,54035 | 1307,848 | 10% |
| 4 Aog | 14768,5246 | -307,23358 | 949,2167 | 7% |
| 4,5 Aog | 15852,3688 | -378,5642 | 1083,844 | 7% |

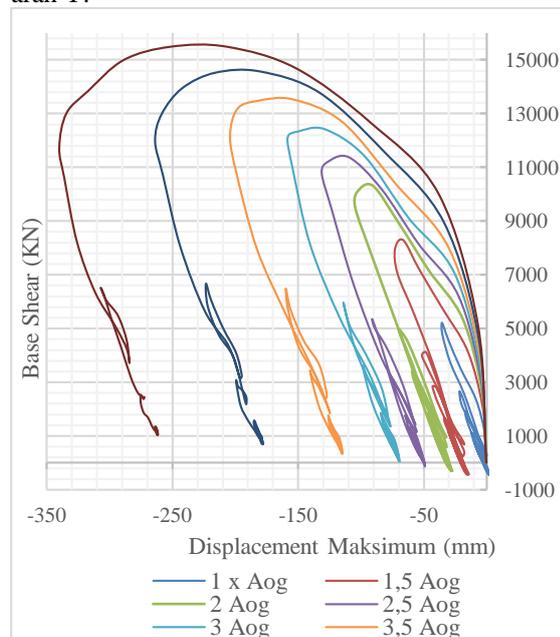
Dari Tabel 7 dapat dinyatakan bahwa semakin besar tingkat *levelling* hasil *matching time history* dengan respon spektrum maka akan semakin besar base shear yang terjadi. Dari persen peningkatan base shear dapat dilihat bahwa semakin besar peningkatan percepatan awal gempa maka peningkatan base shear semakin kecil yaitu 7% dari sebelumnya yang artinya struktur akan runtuh total.

Sedangkan untuk gempa arah Y, titik 427 menjadi titik yang mengalami displacement maksimum pada saat percepatan awal gempa 0,899g (4,5 x Aog) atau pada saat pertama kali struktur membentuk sendi plastis melewati

Analisa Kinerja Struktur Beton Bertulang Pracetak Dengan Metode *Levelling Time History*

Ahmad Yudi*¹, Nugraha Bintang Wirawan¹, Siska Apriwelni¹, Marudut Sagala²

indikator collaps dengan displacement maksimum sebesar 378,56 mm. Oleh karena itu, penulis meninjau titik 427 untuk melihat peningkatan base shear setiap peningkatan percepatan awal gempa arah Y.



Gambar 8. Kurva Displacement Maksimum Vs Base Shear Gempa Y

Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa adanya peningkatan *base shear* setiap dilakukan peningkatan percepatan awal gempa arah Y. Tetapi pada perioda 0 detik, *base shear* yang terjadi setiap peningkatan percepatan awal gempa adalah sama yaitu sebesar 0,00138 KN. Pada perioda nol detik, *base shear* memiliki perbedaan nilai dengan gempa arah X akibat posisi gedung dan kekuan struktur. Peningkatan *base shear* pada struktur dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Peningkatan *Base Shear* pada Gempa Y

| Tingkat Aog | Base Shear | Displacement Maksimum | Peningkatan Base Shear | |
|-------------|-------------|-----------------------|------------------------|-----|
| | KN | mm | (KN) | % |
| 1 Aog | 5221,29628 | -35,42666 | - | - |
| 1,5 Aog | 8285,32361 | -72,84752 | 3064,027 | 59% |
| 2 Aog | 10315,275 | -104,6254 | 2029,951 | 25% |
| 2,5 Aog | 11366,81385 | -131,418505 | 1051,539 | 10% |
| 3 Aog | 12418,3527 | -158,21161 | 1051,539 | 9% |
| 3,5 Aog | 13540,0806 | -204,24927 | 1121,728 | 9% |
| 4 Aog | 14565,3062 | -263,96654 | 1025,226 | 8% |
| 4,5 Aog | 15493,9193 | -339,92078 | 928,6131 | 6% |

Base shear juga mengalami peningkatan seperti yang terjadi akibat gempa arah X. Pada gempa arah Y, *base shear* yang terjadi lebih kecil dari *base shear* akibat gempa arah X seperti yang tertera pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Artinya bahwa gedung lebih kuat menahan gempa arah X daripada gempa arah Y. Hal ini disebabkan bentuk bangunan dan kekakuan pada struktur yang lebih besar arah X. Besar kekakuan pada struktur dapat dilihat dari perbandingan antara *base shear* dengan simpangan

yang terjadi. Artinya besar kekakuan berbanding lurus dengan besar *base shear*. Dilihat dari persen peningkatan *base shear* akibat gempa Y, semakin tinggi peningkatan percepatan awal gempa maka peningkatan *base shear* semakin kecil. Misalnya ketika percepatan awal gempa 1,5 kali Aog maka peningkatan *base shear* meningkat 59% dari sebelumnya, ketika percepatan awal gempa 2 kali Aog maka persen *base shear* menurun 25% dari sebelumnya, ketika percepatan awal gempa 2,5 kali Aog maka persen *base shear* menurun 10% dari sebelumnya. Artinya setiap peningkatan percepatan awal gempa, maka *base shear* yang terjadi semakin besar tetapi persen peningkatannya akan semakin kecil.

5. KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Struktur Asrama ITERA aman terhadap gempa dengan percepatan awal gempa hasil *matching time history* dan respon spektrum ITERA berdasarkan pengecekan sendi plastis, cek simpangan dan cek rotasi dengan level kinerja struktur yang masih indikator IO baik akibat gempa arah X ataupun gempa arah Y.
2. Gempa maksimum yang dapat ditahan struktur beton pracetak gedung Asrama ITERA adalah sebesar 4,5 Aog (0,899g), dengan level kinerja struktur melewati indikator CP dan struktur gedung Asrama ITERA akan runtuh total ketika menerima gempa 5 Aog (0,999g).
3. Level kinerja struktur pada gempa 1 Aog (0,199g) masih dalam level kinerja indikator B menuju IO, pada 1,5 Aog (0,299g) juga masih dalam level kinerja indikator B menuju IO, pada 2 Aog (0,399g) masih dalam level kinerja indikator IO menuju LS, pada 2,5 Aog (0,499g) masih dalam level kinerja indikator IO menuju LS, pada 3 Aog (0,599g) masih dalam level kinerja indikator LS menuju CP, pada 3,5 Aog (0,699g) masih dalam level kinerja indikator LS menuju CP, dan pada 4,5 Aog (0,899g) struktur sudah melewati level kinerja *collaps* (runtuh).
4. Besar *base shear* maksimum pada 1 Aog adalah 5021,04 KN, pada 1,5 Aog bertambah menjadi 8240,63 KN atau meningkat 64% dari 1 Aog, pada 2 Aog besar *base shear* bertambah menjadi 10047,75 KN atau meningkat 22% dari 1,5 Aog, pada 2,5 Aog besar *base shear* bertambah menjadi 11249,291 KN atau meningkat 12% dari 2 Aog, pada 3 Aog besar *base shear* bertambah menjadi 12511,46 KN atau meningkat 11% dari 2,5 Aog, pada 3,5 Aog besar *base shear* bertambah menjadi 13819,31 KN atau meningkat 10% dari 3 Aog, pada 4 Aog

Analisa Kinerja Struktur Beton Bertulang Pracetak Dengan Metode *Levelling Time History*

Ahmad Yudi*¹, Nugraha Bintang Wirawan¹, Siska Apriwelni¹, Marudut Sagala²

besar *base shear* bertambah menjadi 14768,52 KN atau meningkat 7% dari 3,5 Aog, pada 4,5 Aog besar *base shear* bertambah menjadi 15852,37 KN atau meningkat 7% dari 4 Aog, Artinya, semakin besar *levelling time history* yang dilakukan maka besar *base shear* yang terjadi juga semakin besar tetapi persen tingkat kenaikannya akan semakin kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggen, Wandrianto S. 2014. *Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat Dengan Analisis Dinamik Time History Menggunakan Etabs Studi Kasus: Hotel Di Karanganyar [skripsi]*. Teknik Sipil, F. Teknik, Universitas Sebelas Maret.
- Anonim. 1991. Standar SK SNI T-15-1991-03. *Tata Cara Rencana Penghitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Bandung: LPMB Dep. Pekerjaan Umum RI.
- Aziz, A., 2014, *Perilaku Sambungan Balok Kolom Exterior Tipe Tanpa dan dengan Bekisting Bataton*, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Budiono, Bambang dan Lucky Supriatna. 2011. *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa*. Bandung : Institut Teknologi Bandung, ISBN.
- Chopra, A. K. 2011. *Dynamic of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*: Pearson.
- Cullus, Bobby, Iman S, Bambang . 2017. *Performance Based Design Bangunan Gedung Untuk Level Kinerja Operasional*. Yogyakarta : Universitas Gajah Mada, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1983. *Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Bangunan Gedung (PPIUG 1983)*, Bandung: Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan.
- Elliot Kim, S., 2002. *Pracetak Concrete Structures*. Butterworth Heinemann. Woburn. England.
- Faisal N, Eka, Mohammad T. 2018. *Kinerja Seismik Struktur Pada Tipe Gedung Dengan Ketidakteraturan Ketinggian Dan Denah*. Yogyakarta: Universitas Teknologi Yogyakarta.
- FEMA-356. 2000. *Prestandard and Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings*. Virginia. American Society of Civil Engineers.
- Imran, I. dan Hendrik, F. 2010. *Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa*. Bandung: Penerbit ITB.
- Marpaung, Raja, Djaka S, Lina. 2018. *Perilaku Struktur Beton Bertulang Akibat Pembebanan Siklik*. Palembang: Polsri, ISSN.
- Nadeak, Rijuli. 2018. *analisis perilaku struktur beton dan baja dengan metode levelling time history (studi kasus gedung E ITERA), Tugas Akhir*. Teknik Sipil, Institut Teknologi Sumatera.
- Pustlibang, 2010. *Sistem Sambungan Pracetak*. Bandung.
- Riyanto, Hery, 2010. *Perilaku Statis Struktur Beton Pracetak dengan system Sambungan Basah*, Lampung: Universitas Lampung.
- Siddiq, S., 1995. *Struktur Bangunan Sistem Rangka Diaktail Tahanan Gempa dengan Komponen Precast*, Bandung: Pusat penelitian dan Pengembangan Pemukiman Departemen Pekerjaan Umum.
- Siregar, Y. A. N. (2010). *Efek dinding pengisi bata pada respons gempa struktur beton bertulang*, Jakarta: Universitas Indonesia.
- SNI 1726:2012, 2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Badan Standarisasi Indonesia, Jakarta.
- SNI 1727:2013, 2013, *Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. Badan Standarisasi Indonesia, Jakarta.
- SNI 7833:2012, 2012, *Tata cara perencanaan dan pelaksanaan beton pracetak*. Badan Standarisasi Indonesia, Jakarta.
- SNI 2847: 2013, 2013. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Indonesia, Jakarta.
- Supriyanto, Edi. 2013. *Analisa Ragam Riwayat Waktu (Time History)*, Kalimantan Timur.
- Surana, Mitesh. *Non-Linear Static Analysis using SAP 2000*. India: IIT Roorkee, Department of Earthquake Engineering.
- Ulfah, Atika. 2011. *Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Kuliah Umum Sardjito*. Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Yudi, Ahmad. 2018. *Perencanaan Sistem Struktur Balok Beton Pracetak Hibrida*. Bengkulu : JRS-UNAND, ISSN.
- Yudi, Ahmad, Nugraha B, Bayzoni, Rijuli. 2019. *Analisis Perilaku Struktur Beton Dan Baja Dengan Metode Levelling Time History*. Lampung : Institut Teknologi Sumatera.
- Zhao, Guifeng, Meng Z, Yoaliang L, Dawang. 2016. *The Hysteresis Performance and Restoring Force Model for Corroded Reinforced Concrete Frame Columns*. China: Zhengzhou University, School of Civil Engineering.