

TESIS

**ANALISIS NONLINEAR STRUKTUR BANGUNAN
BETON BERTULANG PADA GEDUNG BERTINGKAT**



FINSENSIUS LALO

No.Mhs : 185102808/PS/MTS

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA

2023



FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

PERSETUJUAN TESIS

Nama : FINSENSIUS LALO
No. Mahasiswa : 185102808/PS/MTS
Konsentrasi : STRUKTUR
Judul Tesis : Analisis Nonlinear Struktur Bangunan Beton Bertulang
Pada Gedung Bertingkat

Nama Pembimbing

Tanggal

Tanda Tangan

Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng., Ph.D.

25/01/2023
.....


.....



PENGESAHAN TESIS

Nama : FINSSENSIUS LALO
No. Mahasiswa : 185102808/PS/MTS
Konsentrasi : STRUKTUR
Judul Tesis : Analisis Nonlinear Struktur Bangunan Beton Bertulang
Pada Gedung Bertingkat

Nama Penguji	Tanggal	Tanda Tangan
Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng., Ph.D.	25/01/2023
Prof. Dr. Ir. AM. Ade Lisantono, M.Eng.	25/01/2023
Dr. Ir. Junaedi Utomo, M.Eng.	25/1/2023

Ketua Program Studi



Dr. Ir. Dwiwijoko Anusanto, M.T

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Laporan Tesis dengan judul :

ANALISIS NONLINEAR PADA STRUKTUR BANGUNAN BETON BERTULANG GEDUNG BERTINGKAT

Benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri dan bukan merupakan hasil plagiasi dari karya orang lain. Ide, data hasil penelitian maupun kutipan baik langsung maupun tidak langsung yang bersumber dari tulisan atau ide orang lain dinyatakan secara tertulis dalam laporan tesis ini. Apabila terbukti dikemudian hari bahwa laporan tesis ini merupakan hasil plagiasi, maka ijazah yang saya peroleh dinyatakan batal dan akan saya kembalikan kepada Rektor Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Yogyakarta, 24 Januari 2023

Yang membuat pernyataan



Finsensius Lalo

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat, rahmat dan perlindungan-Nya, sehingga Tesis yang berjudul **“ANALISIS NONLINEAR STRUKTUR BANGUNAN BETON BERTULANG PADA GEDUNG BERTINGKAT”** ini penulis dapat menyelesaikannya dengan baik. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan jenjang pendidikan Strata-2 pada Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Dengan selesainya penyusunan Tesis ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini.
2. Bapak Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng. Ph.D , selaku rektor Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
3. Bapak Dr. Ir. J. Dwijoko Anusanto, M.T , selaku ketua program studi Magister Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
4. Bapak Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng. Ph.D , selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dan memberikan bimbingan serta arahan sampai penulis menyelesaikan Tesis ini.
5. Bapak Yohanes Don Bosco Lalo (Almarhum) dan Ibu Agnes de Rosari , selaku orang tua dari penulis yang selalu memberikan doanya dan menjadi

penyemangat serta menjadi motivasi untuk penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini.

6. Fransiskus Saverius Lalo (Kakak Pertama) dan Rosalina Wilhelmina Lalo (Kakak kedua), selaku saudara dan saudari dari penulis yang telah memberikan doanya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini.
7. Stepika Lidiani yang telah memberikan doa, semangat dan motivasi kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini.
8. Ona dan Sinda selaku teman yang telah memberikan doanya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini.
9. Rian dan Josua sebagai teman seangkatan dalam program studi Magister Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta yang telah memberikan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna, oleh karena itu dengan penuh kerendahan hati dan keikhlasan penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak. Akhir kata penulis sangat berharap semoga Tesis ini dapat diterima dan bermanfaat bagi semua pihak yang terkait.

Yogyakarta, Januari 2023

Penulis

Finsensius Lalo

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PERSETUJUAN DOSEN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
INTISARI	xvii
ABSTRACT	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Keaslian Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Tujuan Penelitian	4
1.7. Sistematika Penulisan	4
BAB II LANDASAN TEORI	6
2.1. Uraian Umum	6
2.2. <i>Performance Based Design</i>	7
2.3. Analisis Nonlinear	7
2.3.1. Analisis Statik Nonlinear	7
2.3.2. Analisis Dinamik Nonlinear	9
2.4. Evaluasi Tingkat Kinerja Struktur	9
2.4.1. Metode <i>Displacement Coefficient</i> (FEMA-356)	10
2.4.2. Kurva Gaya-Perpindahan Ideal Menurut FEMA-356	12
2.4.3. Tingkat Kinerja Struktur Menurut FEM-356	13
2.4.4. Metode <i>Capacity Spectrum</i> ATC-40	16
2.4.5. Kurva Kapasitas	17

2.4.6. Kurva Respon Spektrum (<i>Demand Spectrum</i>)	19
2.4.7. Tingkat Kinerja Struktur Menurut ATC-40	20
2.5. <i>OpenSees</i>	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1. Uraian Umum	25
3.2. Rencana Desain Struktur	25
3.3. Metode Analisis	27
3.4. Rencana Bagan Alir	28
3.5. Jadwal Penelitian	
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	31
4.1. Rencana Desain Elemen Struktur	31
4.2. Perhitungan Pembebanan	32
4.3. Rekaman Gerakan Tanah	39
4.4. Pemodelan Struktur Menggunakan Program Komputer <i>OpenSees</i>	57
4.5. Hasil <i>Run OpenSees</i>	
4.6. Titik Kinerja Struktur	80
4.7. Evaluasi Kinerja Struktur	87
4.8. Perbandingan Hasil Analisis Statik <i>Pushover</i> dan Analisis Dinamik <i>Time History</i>	88
BAB V PENUTUP	90
5.1. Kesimpulan	90
5.2. Saran	90
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

- Tabel 2.1. Nilai Untuk Faktor Modifikasi C_1
- Tabel 2.2. Nilai Untuk Faktor Modifikasi C_2
- Tabel 2.3. Tingkat Kinerja Struktur Menurut FEMA – 356
- Tabel 2.4. Tingkat Kinerja Bangunan Gedung Berdasarkan Batas Deformasi (ATC-40)
- Tabel 3.1. Jadwal Penelitian
- Tabel 4.1. Dimensi Struktur Balok Dan Kolom
- Tabel 4.2. Berat Bangunan Setiap Lantai
- Tabel 4.3. Distribusi Gaya Geser Horizontal (F_i) Pada Setiap Lantai
- Tabel 4.4. Daftar Rekaman Gempa Yang Digunakan Untuk Analisis Dinamik *Time History*
- Tabel 4.5. Penskalaan Rekaman Gempa
- Tabel 4.6. *Story Displacement* Analisis Statik *Pushover*
- Tabel 4.7. *Story Displacement* Analisis Statik *Cyclic*
- Tabel 4.8. *Story Displacement* Analisis Dinamik Gempa Chi-Chi
- Tabel 4.9. *Story Displacement* Analisis Dinamik Gempa Denali
- Tabel 4.10. *Story Displacement* Analisis Dinamik Gempa Imperial Valley
- Tabel 4.11. *Story Displacement* Analisis Dinamik Gempa Kobe
- Tabel 4.12. *Story Displacement* Analisis Dinamik Gempa Cina Jiashi
- Tabel 4.13. *Story Displacement* Analisis Dinamik Gempa San Francisco
- Tabel 4.14. *Story Displacement* Analisis Dinamik Skala 0,4 Gempa Chi-Chi
- Tabel 4.15. *Story Displacement* Analisis Dinamik Skala 1,3 Gempa Denali
- Tabel 4.16. *Story Displacement* Analisis Dinamik Skala 0,8 Gempa Imperial Valley
- Tabel 4.17. *Story Displacement* Analisis Dinamik Skala 0,5 Gempa Kobe
- Tabel 4.18. *Story Displacement* Analisis Dinamik Skala 4 Gempa Cina Jiashi

Tabel 4.19. *Story Displacement* Analisis Dinamik Skala 14 Gempa San Francisco

Tabel 4.20. *Story Drift* Analisis Statik *Pushover*

Tabel 4.21. *Story Drift* Analisis Statik *Cyclic*

Tabel 4.22. *Story Drift* Analisis Dinamik Gempa Chi-Chi

Tabel 4.23. *Story Drift* Analisis Dinamik Gempa Denali

Tabel 4.24. *Story Drift* Analisis Dinamik Gempa Imperial Valley

Tabel 4.25. *Story Drift* Analisis Dinamik Gempa Kobe

Tabel 4.26. *Story Drift* Analisis Dinamik Gempa Cina Jiashi

Tabel 4.27. *Story Drift* Analisis Dinamik Gempa San Francisco

Tabel 4.28. *Story Drift* Analisis Dinamik Skala 0,4 Gempa Chi-Chi

Tabel 4.29. *Story Drift* Analisis Dinamik Skala 1,3 Gempa Denali

Tabel 4.30. *Story Drift* Analisis Dinamik Skala 0,8 Gempa Imperial Valley

Tabel 4.31. *Story Drift* Analisis Dinamik Skala 0,5 Gempa Kobe

Tabel 4.32. *Story Drift* Analisis Dinamik Skala 4 Gempa Cina Jiashi

Tabel 4.33. *Story Drift* Analisis Dinamik Skala 14 Gempa San Francisco

Tabel 4.34. Nilai Gaya Geser Dasar dan *Displacement* Atap

Tabel 4.35. Sambungan Nilai Gaya Geser Dasar dan *Displacement* Atap

Tabel 4.36. Nilai Target Perpindahan

Tabel 4.37. Nilai *Drift Ratio*

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1. Kurva Kapasitas
- Gambar 2.2. PEER *Ground Motion Database* – PEER Center
- Gambar 2.3. Kurva Gaya – Perpindahan Ideal Menurut FEMA – 356
- Gambar 2.4. Tingkat Kinerja Struktur Menurut FEMA – 356
- Gambar 2.5. *Performance Point* pada *Capacity Spectrum Method*
- Gambar 2.6. Kurva Kapasitas
- Gambar 2.7. Modifikasi *Capacity Curve* menjadi *Capacity Spectrum*
- Gambar 2.8. *Capacity Spectrum*
- Gambar 2.9. Spektrum Respon Desain Kabupaten Sleman
- Gambar 2.10. Spektra Kapasitas (ATC-40)
- Gambar 2.11. Tampilan Program *OpenSees*
- Gambar 3.1. Rencana Denah Gedung Perkantoran lantai 1 – lantai 10 (Atap)
- Gambar 3.2. Potongan A – A
- Gambar 3.3. Potongan B – B
- Gambar 3.4. Bagan Alir Analisis Nonlinear
- Gambar 4.1. Spektrum Respon Desain Kabupaten Sleman
- Gambar 4.2. Akselogram Gempa Kobe Takatori Arah X
- Gambar 4.3. Akselogram Gempa Kobe Takatori Arah Y
- Gambar 4.4. Akselogram Gempa Chi-Chi (CHY080) Arah X
- Gambar 4.5. Akselogram Gempa Chi-Chi (CHY080) Arah Y
- Gambar 4.6. Akselogram Gempa Imperial Valley-06 BCR Arah X
- Gambar 4.7. Akselogram Gempa Imperial Valley-06 BCR Arah Y
- Gambar 4.8. Akselogram Gempa Denali Arah X
- Gambar 4.9. Akselogram Gempa Denali Arah Y
- Gambar 4.10. Akselogram Gempa San Francisco Arah X
- Gambar 4.11. Akselogram Gempa San Francisco Arah Y

Gambar 4.12. Akselogram Gempa NorthWest China-02 (Jiashi) Arah X
Gambar 4.13. Akselogram Gempa NorthWest China-02 (Jiashi) Arah Y
Gambar 4.14. Respon Spektra Gempa Kobe (Japan) Arah X
Gambar 4.15. Respon Spektra Gempa Kobe (Japan) Arah Y
Gambar 4.16. Respon Spektra Gempa Chi-Chi (Taiwan) Arah X
Gambar 4.17. Respon Spektra Gempa Chi-Chi (Taiwan) Arah Y
Gambar 4.18. Respon Spektra Gempa Imperial Valley-06 Arah X
Gambar 4.19. Respon Spektra Gempa Imperial Valley-06 Arah Y
Gambar 4.20. Respon Spektra Gempa Denali (Alaska) Arah X
Gambar 4.21. Respon Spektra Gempa Denali (Alaska) Arah Y
Gambar 4.22. Respon Spektra Gempa San Francisco Arah X
Gambar 4.23. Respon Spektra Gempa San Francisco Arah Y
Gambar 4.24. Respon Spektra Gempa NorthWest China-02 Arah X
Gambar 4.25. Respon Spektra Gempa NorthWest China-02 Arah Y
Gambar 4.26. Penskalaan Gempa Kobe Japan Arah X
Gambar 4.27. Penskalaan Gempa Kobe Japan Arah Y
Gambar 4.28. Penskalaan Gempa Chi-Chi Arah X
Gambar 4.29. Penskalaan Gempa Chi-Chi Arah Y
Gambar 4.30. Penskalaan Gempa Imperial Valley-06 Arah X
Gambar 4.31. Penskalaan Gempa Imperial Valley-06 Arah Y
Gambar 4.32. Penskalaan Gempa Denali Arah X
Gambar 4.33. Penskalaan Gempa Denali Arah Y
Gambar 4.34. Penskalaan Gempa San Francisco Arah X
Gambar 4.35. Penskalaan Gempa San Francisco Arah Y
Gambar 4.36. Penskalaan Gempa NorthWest China-02 Arah X
Gambar 4.37. Penskalaan Gempa NorthWest China-02 Arah Y
Gambar 4.38. Akselogram Skala 0,5 Gempa Kobe Japan Arah X
Gambar 4.39. Akselogram Skala 0,5 Gempa Kobe Japan Arah Y

- Gambar 4.40. Akselogram Skala 0,5 Gempa Chi-Chi Taiwan Arah X
- Gambar 4.41. Akselogram Skala 0,5 Gempa Chi-Chi Taiwan Arah Y
- Gambar 4.42. Akselogram Skala 0,8 Gempa Imperial Valley-06 Arah X
- Gambar 4.43. Akselogram Skala 0,8 Gempa Imperial Valley-06 Arah Y
- Gambar 4.44. Akselogram Skala 1,3 Gempa Denali Alaska Arah X
- Gambar 4.45. Akselogram Skala 1,3 Gempa Denali Alaska Arah Y
- Gambar 4.46. Akselogram Skala 14 Gempa San Francisco Arah X
- Gambar 4.47. Akselogram Skala 14 Gempa San Francisco Arah Y
- Gambar 4.48. Akselogram Skala 4 Gempa NorthWest China-02 Arah X
- Gambar 4.49. Akselogram Skala 4 Gempa NorthWest China-02 Arah Y
- Gambar 4.50. Perintah Node Pada *OpenSees*
- Gambar 4.51. Perintah Fix Pada *OpenSees*
- Gambar 4.52. *Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures Under Monotonic and Cycling Loads*
- Gambar 4.53. *Comparason of Histeretic Stress-Strain Relation for Concrete01 versus Concrete02 Materials*
- Gambar 4.54. *Stee02-Material-Hysteretic Behavior of model w/o Isotropic Hardening*
- Gambar 4.55. *Story Displacement* Arah X Akibat Analisis Statik Dan Dinamik
- Gambar 4.56. *Story Displacement* Arah Y Akibat Analisis Statik Dan Dinamik
- Gambar 4.57. *Story Displacement* Arah X Akibat Analisis Statik dan Dinamik Dengan menggunakan Skala Gempa
- Gambar 4.58. *Story Displacement* Arah Y Akibat Analisis Statik dan Dinamik Dengan menggunakan Skala Gempa
- Gambar 4.59. *Story Drift* Arah X Akibat Analisis Statik dan Dinamik
- Gambar 4.60. *Story Drift* Arah Y Akibat Analisis Statik dan Dinamik
- Gambar 4.61. *Story Drift* Arah X Akibat Analisis Statik dan Dinamik Skala Gempa
- Gambar 4.62. *Story Drift* Arah Y Akibat Analisis Statik dan Dinamik Skala Gempa

Gambar 4.63. Kurva Kapasitas *Pushover* Arah X

Gambar 4.64. Kurva Kapasitas *Pushover* Arah Y

Gambar 4.65. Spektrum Kapasitas *Pushover* Arah X

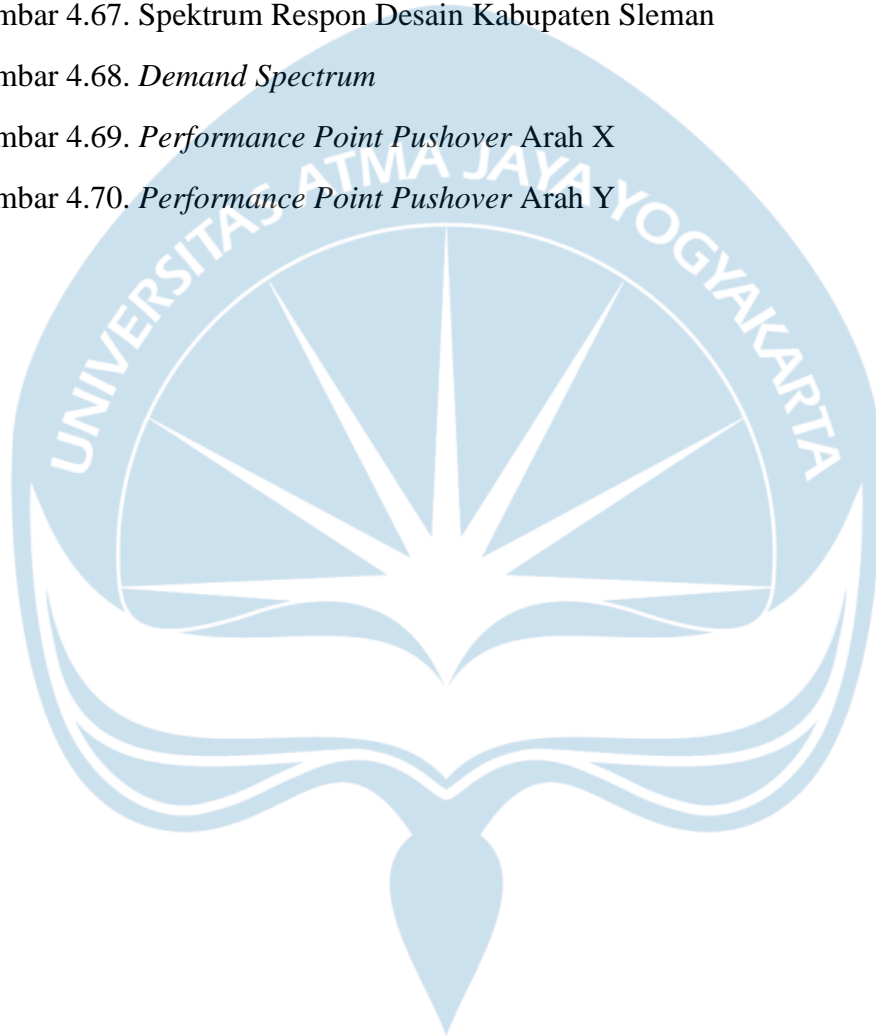
Gambar 4.66. Spektrum Kapasitas *Pushover* Arah Y

Gambar 4.67. Spektrum Respon Desain Kabupaten Sleman

Gambar 4.68. *Demand Spectrum*

Gambar 4.69. *Performance Point Pushover* Arah X

Gambar 4.70. *Performance Point Pushover* Arah Y



INTISARI

ANALISIS NONLINEAR STRUKTUR BANGUNAN BETON BERTULANG PADA GEDUNG BERTINGKAT, Finsensius Lalo, NPM 185102808, Tahun 2023, Bidang Peminatan Struktur, Program Studi Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Bangunan bertingkat tinggi cenderung mengalami goyangan yang lebih besar saat terjadinya gempa, sehingga struktur bangunan tersebut rentan mengalami kerusakan yang menyebabkan terjadinya keruntuhan pada bangunan tersebut sehingga sangat membahayakan penghuni yang ada di dalamnya. Dengan menggunakan *Performance Based Design*, kinerja dari suatu struktur bangunan akibat gempa rencana dapat diketahui dan dilihat dari kurva yang terbentuk setelah dilakukan analisis nonlinear.

Dalam penelitian kali ini akan direncanakan bangunan gedung bertingkat yang memiliki 10 lantai dengan ketinggian setiap lantai adalah 4 m. Untuk panjang (arah Y) dan lebar (arah X) gedung di rencanakan memiliki panjang yang sama yaitu 30 m, di mana jarak antara kolom pada arah X adalah 6 m, sedangkan jarak antara kolom pada arah Y adalah 5 m. Lokasi bangunan gedung bertingkat akan direncanakan berada di atas tanah sedang yang terletak di kabupaten Sleman Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

Dalam analisis nonlinear ini baik analisis *Static Pushover* dan *Dynamic Tyme History* akan dilakukan dengan menggunakan bantuan program komputer *OpenSees*, yang diharapkan dapat membantu untuk mempermudah dan memepersingkat waktu dalam mengevaluasi kinerja dari suatu struktur bangunan. Untuk mengevaluasi kinerja dari struktur bangunan tersebut, akan menggunakan dua metode yaitu *Displacement Coefficient Method* (FEMA-356) dan *Capacity Spectrum Method* (ATC-40).

Berdasarkan hasil analisis diperoleh nilai target perpindahan menurut FEMA-356 pada arah x dan y sebesar 0,2737 m, sedangkan menurut ATC-40 pada arah x sebesar 0,2301 m dan pada arah y sebesar 0,1401 m. Evaluasi kinerja struktur menurut ATC-40 diperoleh nilai *maximum total drft* pada arah x sebesar 0,00575 dan pada arah y sebesar 0,003503 sedangkan untuk nilai *maximum inelastic drift* pada arah x sebesar 0,00475 dan pada arah y sebesar 0,00325, sehingga berdasarkan kriteria evaluasi kinerja menurut ATC-40, maka level kinerja struktur yang direncanakan tergolong dalam *IO (Immediate Occupancy)*

Kata Kunci : Analisis Nonlinear, OpenSees, Static Pushover, Dynamic Tyme History, FEMA-356, ATC-40

ABSTRACT

NONLINEAR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BUILDING STRUCTURES IN HIGH-RISE BUILDINGS, Finsensius Lalo, NPM 185102808, 2023, Field of Specialization in Structures, Master of Civil Engineering Study Program, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Atma Jaya University Yogyakarta.

High-rise buildings tend to experience greater shaking during an earthquake, so the structure of the building is prone to damage that causes a collapse in the building so that it is very dangerous for the residents inside. Using *Performance Based Design*, the performance of a building structure due to a planned earthquake can be known and seen from the curves formed after a nonlinear analysis.

In this study, a multi-storey building will be planned which has 10 floors with the height of each floor is 4 m. For the length (direction Y) and width (direction X) the building is planned to have the same length of 30 m, where the distance between the columns in the X direction is 6 m, while the distance between the columns in the Y direction is 5 m. Lokasi of high-rise buildings will be planned is on medium land located in Sleman regency, Yogyakarta Special Region Province.

In this nonlinear analysis both *Static Pushover* and *Dynamic Time History* analysis will be performed using the help of the *OpenSees* computer program, which is expected to help to simplify and shorten the time in evaluating the performance of a building structure. To evaluate the performance of the building structure, it will use two methods, namely *the Displacement Coefficient Method* (FEMA-356) and *the Capacity Spectrum Method* (ATC-40).

Based on the results of the analysis, the target value of displacement according to FEMA-356 in the x and y directions was 0.2737 m, while according to ATC-40 in the x direction of 0.2301 m and in the y direction of 0.1401 m. E structural performance valuation according to ATC-40 obtained the maximum *total drift* value in the x direction of 0.00575 and in the y direction of 0.003503 while for the *maximum inelastic drift* value in the x direction of 0.00475 and in the y direction of 0.00325, so based on the performance evaluation criteria according to ATC-40, the planned structural performance level is classified as *IO (Immediate Occupancy)*

Kata Kunci : Analisis Nonlinear, OpenSees, Static Pushover, Dynamic Time History, FEMA-356, ATC-40