

EVALUASI KINERJA GEDUNG A UNIVERSITAS PEMBANGUNAN JAYA DENGAN *PUSHOVER ANALYSIS* BERDASARKAN FEMA 356

Muhammad Irfan¹, Agustinus Agus Setiawan^{1,2}

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pembangunan Jaya, Jl. Cendrawasih Raya Blok B7/P Bintaro, Banten
Email: muhammad.irfan@student.upj.ac.id

²Center for Urban Studies, Universitas Pembangunan Jaya, Jl. Cendrawasih Raya Blok B7/P Bintaro, Banten
Email: agustinus@upj.ac.id

ABSTRACT

Indonesia is a country with a high potential for earthquake risk, therefore every building must be designed in such a way, so the impact of damage caused by an earthquake can be minimized. Each Existing building structure also needs to be analyzed for its performance against earthquake loads. The main rule in designing an earthquake-resistant building is that structural elements may be damaged but must not fail or collapse during a strong earthquake. This study aims to analyze the performance of building structures based on FEMA 356 standards, by taking a case study of the structure of Tower A of Pembangunan Jaya University. The method used is the pushover analysis method using the Etabs V.16 application. The results of the nonlinear static analysis produce an output value which is then calculated using the FEMA 356 standard. The results of the analysis show that Tower A of Pembangunan Jaya University, which is an open frame structure made of reinforced concrete, has an Immediate Occupancy performance level, which means that if the structure is hitting by an earthquake with return period of 50 years, the building has no significant damage to the structural components. The stiffness and strength of the building is almost the same as before the structure was hit by the earthquake. Meanwhile, the building has a displacement value of 0.383 meters, this value is still smaller than the displacement value based on FEMA 356 calculations which is quite large, namely 0.618 meters in the *x* direction and 0.542 meters in the *y* direction.

Keywords: performance, earthquake, pushover, stiffness, displacement

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara dengan potensi resiko gempa bumi yang cukup tinggi, oleh karena itu setiap bangunan gedung harus direncanakan sedemikian rupa agar dampak kerusakan akibat gempa bumi dapat diminimalisir. Setiap struktur bangunan gedung yang dibangun juga perlu dilakukan analisis kinerja terhadap beban gempa bumi. Kaidah utama dalam perencanaan bangunan tahan gempa ialah bahwa elemen struktural boleh rusak namun tidak boleh gagal atau runtuh saat terjadi gempa kuat. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis kinerja struktur bangunan berdasarkan standar FEMA 356, dengan mengambil studi kasus struktur Gedung A Universitas Pembangunan Jaya. Metode yang digunakan adalah metode analisis *pushover* dengan menggunakan aplikasi Etabs V.16. Hasil dari analisis statik nonlinier tersebut menghasilkan nilai output yang selanjutnya dihitung menggunakan standar FEMA 356. Hasil dari analisis menunjukkan bahwa gedung A Universitas Pembangunan Jaya, yang merupakan struktur portal terbuka dari beton bertulang, memiliki level kinerja *Immediate Occupancy*, yang berarti jika struktur terkena gempa dengan periode ulang 50 tahun, bangunan tidak mengalami kerusakan yang berarti pada komponen struktural. Kekakuan dan kekuatan gedung hampir sama dengan kondisi sebelum struktur terkena gempa. Sedangkan untuk nilai perpindahan gedung ini memiliki nilai perpindahan sebesar 0.383 meter, nilai ini masih lebih kecil dari nilai perpindahan berdasarkan hitungan FEMA 356 yang terbilang cukup besar yaitu sebesar 0.618 meter untuk arah *x* dan 0.542 meter untuk arah *y*.

Kata kunci: kinerja, gempa bumi, pushover, kekakuan, perpindahan

1. PENDAHULUAN

Bencana alam merupakan fenomena alami yang tidak dapat dihindarkan oleh manusia, dan umumnya membawa korban jiwa dalam jumlah besar. Beberapa bentuk bencana alam antara lain seperti letusan gunung berapi, gempa

Corresponding Author

E-mail Address : agustinus@upj.ac.id

bumi, banjir, dan sebagainya. Bencana ini juga membawa dampak bagi lingkungan (Abbot, 2019; Matsuryono, 2010). Gempa Bumi dapat di kategorikan menjadi dua jenis yaitu gempa tektonik dan gempa vulkanik. Gempa vulkanik terjadi akibat letusan gunung berapi dan pada umumnya gempa vulkanik terjadi sebelum letusan gunung berapi. Di Indonesia sendiri banyak gunung berapi yang masih aktif. Namun, dampak dari gempa vulkanik tidak sebesar gempa tektonik. Hal ini dikarenakan energi gempa sudah di lepaskan pada saat terjadi letusan-letusan sebelum letusan besar terjadi. Gempa tektonik adalah gempa yang di akibatkan oleh pergerakan lempeng yang terjadi di darat dan di laut (Husein, 2007).

Perencanaan struktur bangunan gedung tahan gempa sangat penting di Indonesia. Mengingat lokasi negara Indonesia yang di keliling oleh lempeng tektonik dunia. Trend baru perencanaan bangunan tahan gempa saat ini adalah perencanaan berbasis kinerja (*Performance-Based Design*). Konsep perencanaan berbasis kinerja merupakan kombinasi dari aspek tahanan dan aspek kelayakan. Konsep ini mengadopsi perpindahan struktur sebagai pendekatan. Selain itu banyak standar yang dapat dijadikan acuan dalam membuat perencanaan struktur bangunan gedung tahan gempa. Salah satu contohnya adalah FEMA (*Federal Emergency Management Agency*).

Universitas Pembangunan Jaya (UPJ) memiliki gedung baru yang dinamakan Gedung A, yang difungsikan sebagai gedung administrasi dan perkuliahan. Seperti diketahui bahwa bangunan bertingkat tinggi sangat berisiko jika terkena gempa bumi. Gedung A UPJ telah beroperasi sejak pertengahan tahun 2020, namun sebagai dampak dari pandemi Covid-19, secara aktual gedung ini baru beroperasi penuh selama kurang lebih 1 tahun. Guna memastikan kinerja struktur gedung terhadap gempa bumi, maka perlu dilakukan evaluasi kinerja struktur bangunan gedung A kampus UPJ, terutama ditinjau dari kinerjanya saat terjadi gempa bumi. Salah satu metode untuk memantau kinerja struktur bangunan gedung adalah dengan menggunakan metode pushover analysis (Daniel, 2016). Metode pushover analysis dapat digunakan pada bangunan struktur beton bertulang (Yosafat, 2006; Ramin 2018), struktur baja (Dewobroto, 2006), serta struktur kombinasi beton dan baja (Prabowo, 2016). Evaluasi kinerja bangunan berlantai banyak dengan menggunakan metode pushover analysis juga dilakukan oleh beberapa peneliti (Yuswanto, 2019; Shinde, 2014; Siswanto, 2023). Selain itu metode ini juga dapat diterapkan pada bangunan eksisting yang sudah beroperasi, seperti pada evaluasi kinerja bangunan rumah sakit (Kadarusman, 2017), bangunan hotel (Purnomo, 2014; Putri, 2021), jembatan (Mahardika, 2021), dan tangki air (Mellati, 2018; Gowriswaran, 2017).

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan parameter kinerja struktur bangunan Gedung A Universitas Pembangunan Jaya berdasarkan standar FEMA 356 yang meliputi target perpindahan, drift aktual, dan level kinerja bangunan dalam arah x dan y , dengan menggunakan metode *pushover analysis*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Untuk keperluan analisis kinerja struktur gedung dalam penelitian ini, digunakan metode analisis beban dorong statik (*pushover analysis*), yang hasilnya dapat digunakan untuk melakukan evaluasi kinerja dari struktur tersebut.

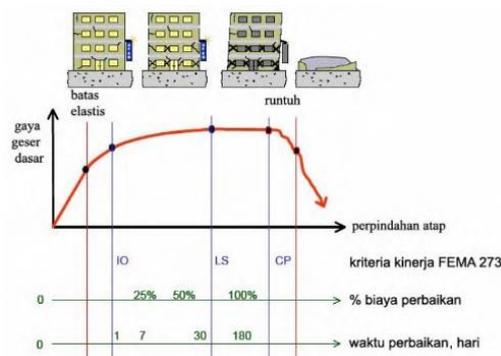
Performance Based Design

Kinerja struktur adalah tingkatan performa suatu struktur terhadap gempa rencana. Tingkat performa struktur dapat diketahui dengan melihat tingkat kerusakan pada struktur saat terkena gempa rencana dengan periode ulang tertentu, oleh karena itu tingkat kinerja struktur akan selalu berhubungan dengan biaya perbaikan gedung tersebut (Tavio, 2018). Pada desain struktur berbasis kinerja terdapat penggolongan berdasarkan kegunaan suatu bangunan. Penggolongan ini berdasarkan pertimbangan faktor ekonomi terhadap biaya perbaikan bangunan tanpa mengesampingkan faktor keselamatan pengguna bangunan pada saat terjadi gempa.

Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru atau bangunan lama yang sudah ada. Proses perencanaan ini dimulai dengan membuat model bangunan kemudian melakukan simulasinya kinerjanya terhadap berbagai kejadian gempa. Setiap simulasi akan memberikan data perkiraan besar keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*Occupancy*), dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang akan terjadi pada saat bangunan terkena gempa rencana.

Gambar 1 menjelaskan kualitatif tingkatan kinerja yang mengacu pada FEMA 356 . Berdasarkan acuan klasik pada perencanaan berbasis kinerja maka urutan kinerja struktur dapat dikategori sebagai : Segera dapat digunakan (IO = *Immediate Occupancy*), keselamatan penghuni terjamin (LS = *Life Safety*), atau terhindar dari keruntuhan Total (CP = *Collapse Prevention*). Berdasarkan urutan kinerja struktur tersebut, kondisi bangunan pasca gempa dan kategori bangunan pada tingkat kinerja struktur dapat dijelaskan sebagai berikut. Yang pertama adalah operational yaitu bangunan tidak ada kerusakan yang berarti pada komponen struktural maupun non-struktural. Yang kedua adalah *Immediate Occupancy* yaitu bangunan tidak ada kerusakan yang berarti pada komponen struktural, namun secara operasional tidak dapat bekerja karena kegagalan mekanik atau kurangnya utilitas. Kategori terakhir adalah *Life*

Safety, dalam kategori ini bangunan pasca gempa terjadi beberapa kerusakan komponen struktur dan kekuatan serta kekakuannya berkurang.



Gambar 1. Tingkat kinerja struktur FEMA 356 (FEMA 356 prestandard)

Analisis Statik non-Linier (*pushover*)

Analisis statik nonlinier merupakan prosedur analisis untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa, dikenal pula sebagai analisis *pushover* atau analisis beban dorong statik (Dewobroto, 2006). Kecuali untuk analisis bangunan yang memiliki struktur sederhana Analisis ini memerlukan bantuan aplikasi komputer komersial seperti SAP 2000 atau Etabs. Analisis ini dilakukan dengan cara memberi beban pada struktur, yang kemudian secara bertahap ditingkatkan hingga suatu titik tercapai. Pada umumnya titik yang dijadikan acuan pada analisis ini adalah titik atap atau sering juga disebut titik pusat massa atap. Seperti dalam Gambar 1 analisis ini memperlihatkan hubungan antara gaya geser dasar (V) dengan titik acuan pada atap (D).

Dalam proses analisis *pushover* suatu struktur atau lebih didorong hingga mengalami leleh yang kemudian kurva kapasitas akan memperlihatkan suatu kondisi linear sebelum struktur tersebut mencapai kondisi leleh yang pada akhirnya struktur akan berperilaku nonlinier. Kurva *pushover* dapat dipengaruhi oleh gaya lateral yang digunakan sebagai beban dorong. Tujuan dari analisis *pushover* adalah mengetahui gaya deformasi maksimum yang terjadi pada struktur untuk mengetahui bagian mana saja yang mengalami kritis. Selanjutnya pada bagian yang kritis dilakukan perlakuan khusus untuk pendetailan dan stabilitasnya.

Tujuan dilakukannya analisis *pushover* hingga mencapai gaya geser dasar dalam dan perpindahan lateral titik kontrol dalam kurva mencapai 150% adalah untuk mengetahui perilaku struktur bangunan pasca keruntuhan serta untuk melihat perilaku bangunan yang melebihi kondisi rencana. Target perpindahan hanya rata-rata dari nilai gempa rencana. Metode target perpindahan rencana tidak akan bisa dilakukan apabila kekuatan bangunan lebih rendah dari spektrum elastis rencana. Analisis *pushover* dilakukan dengan cara memberikan beban lateral dengan pola tertentu yang dilakukan bersamaan dengan pemberian beban mati dengan syarat kombinasi beban tidak boleh kurang dari 25% dari beban hidup yang disyaratkan.

Metode Displacement FEMA 356

Dalam metode ini semua gaya dan deformasi komponen dihitung terhadap suatu perpindahan titik kontrol atau yang disebut sebagai perpindahan maksimum yang terjadi pada saat bangunan mengalami gempa rencana. Penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi respon elastis linier dari system SDOF ekuivalen dengan faktor koefisien C_0 , C_1 , C_2 dan C_3 sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis) yang disebut "target perpindahan", δ_T (Tavio, 2018:46). Pada awal proses analisis dilakukan terlebih dahulu dengan mencari waktu getar alami efektif, T_e dihitung menggunakan persamaan 1 :

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (1)$$

dimana T_i dan K_i adalah perioda alami awal elastis (dalam detik) dan kekakuan awal bangunan pada arah yang ditinjau. Kekakuan lateral ditentukan dari perilaku struktur. Kekakuan ini sangat tergantung pada penggambaran kurva bilinear dari kurva kapasitasnya. Kekakuan lateral efektif dapat dihitung menggunakan persamaan 2 :

$$K_e = \frac{0,6V_y}{0,6\Delta_V} \quad (2)$$

dimana V_y adalah gaya geser dasar pada saat leleh, dari idealisasi kurva *pushover* menjadi bilinear. Target perpindahan selanjutnya dapat dimodifikasi dari respon elastik linier dari sistem SDOF ekuivalen beberapa faktor koefisien sehingga dapat dihitung dengan persamaan 3.

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (3)$$

Dengan :

T_e : waktu getar efektif

δ_T : target perpindahan

C_0 : faktor modifikasi untuk perpindahan spektral menjadi perpindahan atap/puncak

C_1 : faktor modifikasi untuk menghubungkan perpindahan inelastik maksimum Dengan perpindahan yang dihitung dari respon elastik

untuk $T_e > T_s$, $C_1 = 1,0$

(4)

untuk $T_e < T_s$, $C_1 = [1,0 + (R-1)T_s/T_e]/R$

(5)

T_s : waktu getar karakteristik yang diperoleh dari kurva respon spektrum pada titik dimana terdapat transisi bagian akselerasi konstan ke bagian konstan.

R : Rasio kuat elastik perlu terhadap kuat leleh, dapat dilihat dalam persamaan 6.

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} C_m \quad (6)$$

C_2 : faktor modifikasi yang mewakili efek dari bentuk histeresis pada perpindahan maksimum, diambil dari Tabel 1 yang mengacu pada FEMA 356 .

C_3 : koefisien untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat efek P- Δ

$$C_3 = 1,0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{2/3}}{T_e} \quad (7)$$

g : Percepatan gravitasi, 9,81 m/dt²

C_m : Rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekuatan elastik

Tabel 1. Faktor modifikasi perpindahan maksimum, C_2

Level Kinerja Struktur	$T \leq 0,1$ detik ³		$T > T_s$ detik ³	
	Rangka Tipe 1 ¹	Rangka Tipe 2 ²	Rangka Tipe 1 ¹	Rangka Tipe 2 ²
<i>Immediate Occupancy</i>	1,0	1,0	1,0	1,0
<i>Life Safety</i>	1,3	1,0	1,1	1,0
<i>Collapse Prevention</i>	1,5	1,0	1,2	1,0

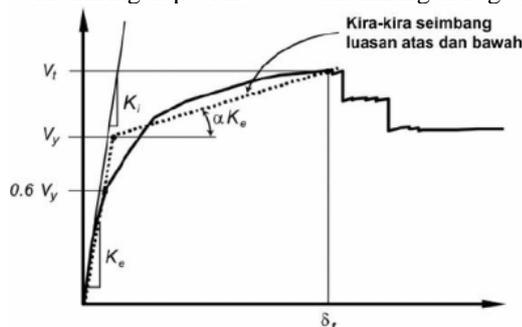
¹ Struktur di mana lebih dari 30% dari gaya geser tingkat pada tingkat mana pun dipikul oleh kombinasi dari komponen, elemen atau rangka berikut: rangka penahan momen biasa, rangka dengan breis konsentris, rangka dengan koneksi yang dikekang sebagian, breis tarik saja, dinding pasangan bata tanpa perkuatan, geser-kritis, pier, dan spandrel beton bertulang atau pasangan bata.

² Semua rangka yang tidak masuk kategori 1

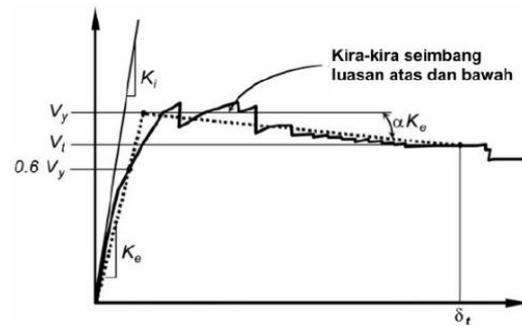
³ Interpolasi linear dapat digunakan untuk T antara 0,1 dan T_s

Sumber: FEMA 356 prestandar.

Parameter-parameter koefisien perpindahan FEMA 356 diambil dari idealisasi kurva kapasitas struktur atau kurva bilinear struktur, seperti pada Gambar 2 dan 3. Kurva kapasitas tersebut biasanya memiliki dua kemungkinan yaitu berkemiringan positif atau berkemiringan negatif.



Gambar 2. Perilaku pasca leleh struktur – positif (FEMA 356 prestandar)



Gambar 3. Perilaku pasca leleh struktur – negatif (FEMA 356 prestandar)

3. METODE PENELITIAN

Pembuatan Model Struktur

Denah struktur dari bangunan gedung yang ditinjau diperlihatkan dalam Gambar 4. Selanjutnya struktur gedung tersebut dibuat pemodelan sistem strukturnya menggunakan aplikasi Etabs V.16, untuk kemudian dilakukan analisis *pushover* untuk menentukan level kinerja struktur.

Gedung Universitas Pembangunan Jaya Tower A terdiri dari 11 lantai dengan ketinggian perantai 3,5 meter. Namun, untuk lantai *rooftop* dan ruang mesin memiliki ketinggian yang berbeda. Untuk denah gedung ini memiliki denah tipikal pada lantai 6 sampai 8. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Bangunan terdiri dari dua komponen struktur utama yaitu kolom dan balok. Kolom dan balok memiliki fungsi sangat penting dalam bangunan. Ukuran dari kolom dan balok juga berperan aktif dalam menentukan kekuatan bangunan itu sendiri.

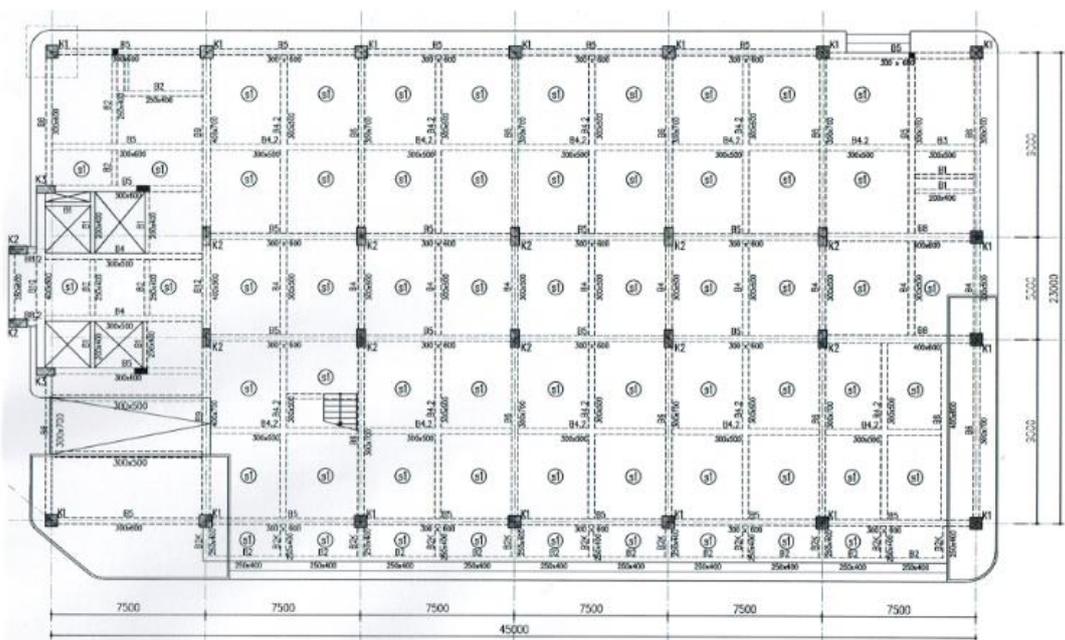
Oleh karena itu dalam analisis kinerja struktur dibutuhkan ukuran kolom dan balok untuk kemudian di gambarkan pada aplikasi etabs sebagai alat bantu hitung dalam analisis ini. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan 3 adalah ukuran kolom dan balok struktur yang digunakan sebagai struktur pada gedung Universitas Pembangunan Jaya Tower A.

Tabel 2. Dimensi kolom struktur

Lantai	f'_c	K1	K2	K3	K4	K5	KT
1-3	35 MPa	600/600	400/900	400/900	300/600	400/400	300/300
4-7	30 MPa	500/500	400/800	400/900	300/600	400/400	300/300
8-roof	30 MPa	400/400	400/700	400/900	300/600	400/400	300/300

Tabel 3. Dimensi balok

Notasi balok : dimensi balok (lebar, b /tinggi, h (dalam mm))					
B1:200/400	B4:300/500	B8:400/600	B12:400/500	B15 400/600	B19 500/700
B2:250/400	B5:300/600	B9:400/700	B13:350/600	B16 300/800	B21 350/850
B3:300/400	B6:300/700	B10:400/800	B14:500/600	B18 500/500	B22 250/800



Gambar 4. Denah struktur bangunan Tower A Universitas Pembangunan Jaya

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

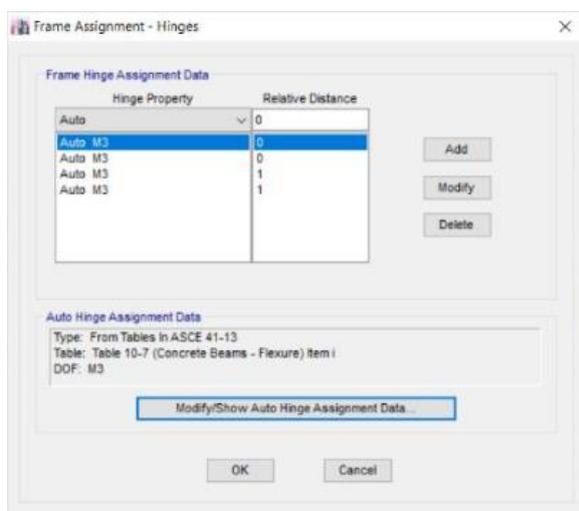
Berat Bangunan

Beban bangunan sendiri terdiri atas beban mati dan beban hidup. Beban mati terdiri dari beban kolom, balok, keramik, pelat lantai. Sedangkan untuk beban hidup beban yang dapat dipindahkan setiap waktu. Untuk beban mati dibagi menjadi 3 yaitu untuk lantai 2, lantai 3 – 8 dan yang terakhir lantai atap yang digunakan sebagai ruang mesin. Sehingga didapatkan untuk lantai 2 total berat mati adalah 5219,5 kN, untuk lantai 3 – 8 adalah 5825.7 kN dan untuk lantai atap hingga ruang mesin sebesar 3970.3 kN. Untuk beban hidup lantai 2 – 8 adalah sebesar 1314.4 kN dan untuk lantai atap sebesar 477.96 kN. Tabulasi beban mati dan beban hidup tiap lantai ditampilkan pada Tabel 4.

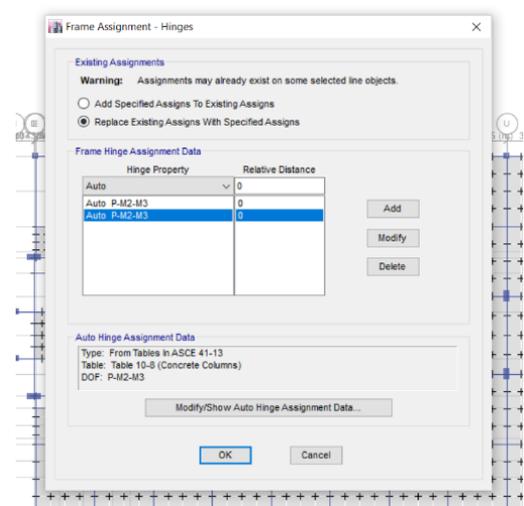
Tabel 4. Berat Bangunan

Lantai	DL (ton)	LL (ton)	Total berat bangunan (ton)
Base	0	0	
2	521,9	131,44	
3	582,5	131,44	
4	582,5	131,44	
5	582,5	131,44	
6	582,5	131,44	
7	582,5	131,44	
8	582,5	131,44	
roof top	397,0	47,796	
R.mesin	397,0	47,796	
Atap.R.Mesin	397,0	47,796	
Total	5208,5	1063,5	6271.93

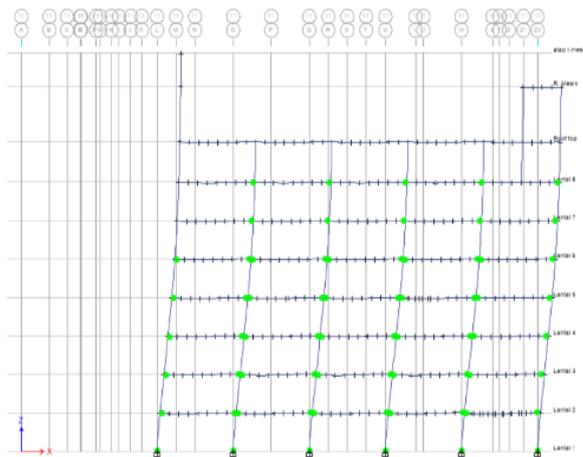
Untuk melakukan analisis *pushover* hal yang perlu diperhatikan adalah pemodelan sendi plastis (*plastic Hinges*) pada elemen struktur yang dibuat. Pemodelan sendi plastis pada elemen balok dan kolom dilakukan untuk mengetahui titik titik leleh yang terjadi pada bangunan ketika struktur terkena beban lateral. Pemodelan sendi plastis pada balok ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan pemodelan sendi plastis pada elemen kolom ditunjukkan dalam Gambar 6. Setelah analisis *pushover* selesai dilakukan oleh program, maka riwayat terbentuknya sendi plastis pada balok dan kolom akan ditampilkan seperti dapat terlihat pada Gambar 7 untuk portal arah-X, dan Gambar 8 untuk portal arah-Y.



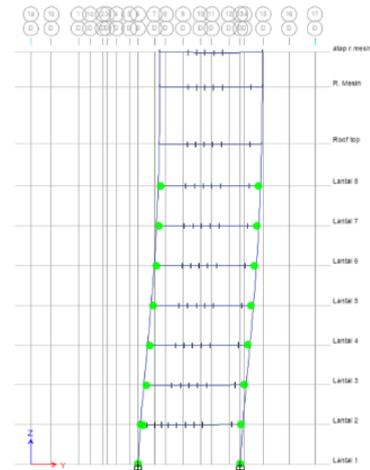
Gambar 5. Pemodelan sendi plastis balok



Gambar 6. Pemodelan sendi plastis kolom



Gambar 7. Sendi plastis arah X



Gambar 8. Sendi plastis arah X

Menentukan Level Kinerja Bangunan

Hasil *running* analisis *pushover* oleh Etabs menghasilkan tabel kurva *pushover analysis* untuk arah-X (Tabel 5) serta untuk arah-Y (Tabel 6). Berdasarkan Tabel 5 dapat disimpulkan pada setiap step beban dorong yang diberikan, dari total 4238 joint pada arah X sebagian besar berada dalam daerah IO (*Immediately Occupancy*) dan LS (*Life Safety*). Hal ini membuktikan bahwa level kinerja gedung Universitas Pembangunan Jaya tower A berada dalam kategori IO (*Immediately Occupancy*).

Tabel 5. Tabel Kurva *Pushover* arah X

Step	AI-IO	IO-LS	LS-CP	CP	Total
1	4238	0	0	0	4238
2	4238	0	0	0	4238
3	4238	0	0	0	4238
4	4228	4	2	4	4238
5	4166	57	4	11	4238

Sedangkan berdasarkan Tabel 6 dapat disimpulkan pada setiap step dari total 4238 joint pada arah Y sebagian besar berada dalam kolom IO (*Immediately Operation*) dan LS (*Life Safety*).

Berdasarkan analisis *pushover* dengan menggunakan bantuan aplikasi etabs dari Tabel 5 (arah-X) dan 6 (arah-Y) maka level kinerja gedung Universitas Pembangunan Jaya tower A berada dalam kategori IO (*Immediately Occupancy*).

Tabel 6. Tabel Kurva *Pushover* arah Y

Step	AI-IO	IO-LS	LS-CP	CP	Total
1	4238	0	0	0	4238
2	4238	0	0	0	4238
3	4238	0	0	0	4238
4	4238	0	0	0	4238
5	4238	0	0	0	4238
6	4226	10	0	2	4238
7	4221	12	0	5	4238
8	4212	12	0	14	4238
9	4208	14	0	16	4238
10	4204	16	0	18	4238
11	4196	16	0	18	4238
12	4190	18	8	22	4238
13	4176	22	16	24	4238
14	4172	26	16	24	4238
15	4170	28	14	26	4238

Perhitungan Nilai *Displacement* Rencana

Setelah didapatkan beban seismik selanjutnya akan akan dihitung nilai profil perpindahannya dengan menggunakan metode *Direct Displacement Based Design* (DDBD). Karena bangunan memiliki lantai lebih dari 4, maka perhitungan inelastik *mode shape* dihitung menggunakan persamaan 8 :

$$\delta_i = \frac{4}{3} \left(\frac{H_i}{H_n} \right) \left(1 - \frac{H_i}{4H_n} \right) \quad (8)$$

Bersarnya desain perpindahan atau profil perpindahan rencana dihitung dengan persamaan 9 dan 10. Untuk lantai pertama :

$$\Delta_i = \theta \times H_i \quad (9)$$

Untuk lantai berikutnya :

$$\Delta_i = \delta_i \frac{\Delta_i}{\delta_1} \quad (10)$$

Dan selanjutnya nilai perhitungan profil perpindahan rencana dari sistem berderajat kebebasan banyak (MDoF) tersebut dikonversi ke dalam sistem berderajat kebebasan tunggal (SDoF), dengan menggunakan persamaan :

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (11)$$

Perhitungan profil perpindahan rencana untuk sistem MDoF ditampilkan pada Tabel 7 .

Dengan menggunakan persamaan (11), maka nilai desain perpindahan dari Sistem MDoF yang telah dikonversi ke sistem SDoF dapat dihitung :

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} = \frac{686,88}{189,58} = 0,383 \text{ m}$$

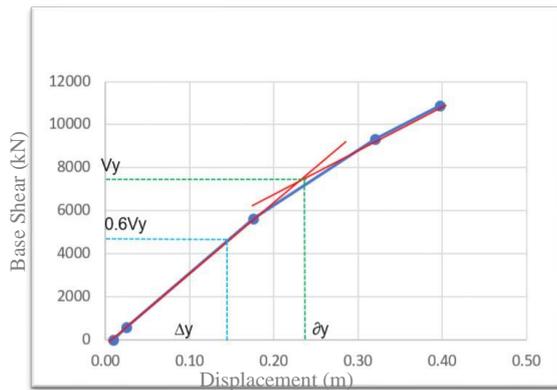
Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan 11 didapatkan nilai desain perpindahan rencana sebesar 0.383 meter.

Tabel 7. Perhitungan profil perpindahan rencana

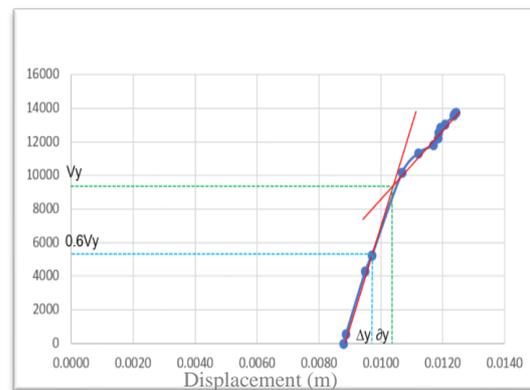
Lantai	Mass	Hi	Hi(m)	δ	Δ	$m_i \Delta_i$	$m_i \Delta_i^2$
Base	0.0	0,0	0,00	0,0000	0,000	0,00	0,00
2	587,67	3,5	36,24	0,1257	0,070	41,14	2,88
3	648,29	7,0	36,24	0,2451	0,137	88,51	12,09
4	648,29	10,5	36,24	0,3584	0,200	129,40	25,83
5	648,29	14,0	36,24	0,4654	0,259	168,05	43,56
6	648,29	17,5	36,24	0,5662	0,315	204,44	64,47
7	648,29	21,0	36,24	0,6608	0,368	238,59	87,81
8	648,29	24,5	36,24	0,7491	0,417	270,50	112,86
roof top	420,93	28,2	36,24	0,8352	0,465	195,81	91,09
R.mesin	420,93	33,2	36,24	0,9413	0,524	220,69	115,71
Atap.R.Mesin	420,93	36,2	36,24	1,0000	0,557	234,45	130,58
total						1.791,	686,88

Perhitungan Nilai Perpindahan FEMA 356

Selanjutnya nilai perpindahan yang telah dihitung akan dibandingkan dengan standar nilai perpindahan yang dihitung berdasarkan aturan FEMA 356. Untuk menghitung nilai perpindahan berdasarkan FEMA 356 maka kurva analisis *pushover* hasil dari Etabs dikonversi dahulu menjadi kurva bilinier *pushover*. Hasil konversi kurva bilinier *pushover* antara perpindahan (dalam meter) dan gaya geser dasar (dalam kN) untuk arah-X dan Y ditunjukkan dalam Gambar 9 dan 10.



Gambar 9. Kurva bilinear pushover Arah-X



Gambar 10. Kurva bilinear pushover Arah-Y

Setelah grafik bilinear *pushover* terbentuk maka selanjutnya dapat dihitung nilai perpindahan berdasarkan FEMA 356 dengan menggunakan persamaan 3. Namun terlebih dahulu harus mencari variabel yang diperlukan. Untuk tinjauan arah-X, dari Gambar 9 dapat diketahui nilai perpindahan leleh, $\delta_y = 0.24$ m, gaya geser saat leleh, $V_y = 7900$ kN. Nilai kekakuan efektif k_e diasumsikan sama dengan $k_i =$ nilai kekakuan awal, yang dihitung sebagai berikut :

$$k_e = \frac{0,6V_y}{0,6\Delta_y} = \frac{0,6 \times 4.740}{0,6 \times 0,14} = 33.857 \text{ kN/m}$$

Selanjutnya nilai periode efektif, T_e diperoleh berdasarkan nilai periode efektif awal, T_1 , yang diperoleh dari hasil output respon spektrum kapasitas yang diperoleh dari Etabs. Nilai ini ditabelkan dalam Tabel 8.

Tabel 8. Output Spektrum Kapasitas

Step	S_d , m	S_a , g	Periode, detik
1	0,01148	0,012426	1,929
2	0,12387	0,119548	2,042
3	0,23476	0,195932	2,196
4	0,29498	0,225593	2,294

Dari Tabel 8 dapat diketahui nilai periode efektif awal adalah sebesar 1,929 detik. Selanjutnya nilai periode efektif dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$T_e = T_1 \sqrt{\frac{k_i}{k_e}} = 1,929 \sqrt{\frac{33857}{33857}} = 1,929 \text{ detik}$$

Nilai faktor modifikasi C_0 dihitung menurut Tabel 3-2 dalam FEMA 356, karena bangunan memiliki total lantai lebih dari 10 lantai dan juga bangunan bukan termasuk jenis shear building maka $C_0 = 1.5$. Faktor modifikasi C_1 ditentukan berdasarkan nilai T_s , yaitu :

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{D5}} = \frac{0,58}{0,60} = 0,96 \text{ detik}$$

Nilai periode efektif, $T_e = 1,929$, sehingga nilai $T_e > T_s$, oleh karena itu berdasarkan persamaan 4 jika nilai $T_e > T_s$ maka nilai $C_1 = 1$. Untuk nilai S_{D1} dan S_{D5} diperoleh dari peta gempa percepatan puncak batuan dasar (PGA) 2% dalam 50 tahun untuk wilayah daerah Tangerang Selatan dengan menggunakan jenis tanah lunak. Hal tersebut dikarenakan gedung baru Universitas Pembangunan Jaya ini terletak dikota Tangerang Selatan. Nilai faktor modifikasi C_2 diperoleh dari Tabel 1, karena level kinerja desain adalah *Immediate Occupancy* dan nilai T_e lebih besar dari T_s maka nilai $C_2 = 1$.

Untuk menghitung C_3 terlebih dahulu harus dicari parameter-parameter lainnya terlebih dahulu. Yang pertama adalah menentukan nilai akselerasi respon spektrum yang berhubungan dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau (S_a).

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T_e} = \frac{0,58}{1,929} = 0,30g$$

Dari Tabel 3-1 FEMA 356 untuk bangunan lebih dari 3 lantai dengan menggunakan sistem rangka beton, maka nilai $C_m = 0.9$. Setelah nilai S_a dan C_m diketahui maka dapat dihitung besarnya rasio kuat elastik perlu terhadap kuat leleh terhitung (R).

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} \times C_m = \frac{0,30}{7,90057402} \times 1,0 = 1,960$$

Nilai α pada persamaan 7 adalah 1, karena kemiringan paska leleh adalah positif. Setelah semua parameter diketahui maka nilai C_3 dapat dihitung.

$$C_3 = 1 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e} = 1 + \frac{1(1,960-1)^{3/2}}{1,929} = 1,49$$

Setelah semua parameter dihitung, maka nilai target perpindahan berdasarkan FEMA 356 dapat ditentukan berdasarkan persamaan 3.

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

$$\delta_{T,x} = (1,5)(1)(1)(1,49) \frac{1,929^2}{4\pi^2} (9,81) = 0,618 \text{ m}$$

Untuk arah-Y dengan menggunakan cara perhitungan yang sama maka didapatkan nilai target perpindahan sebesar $\delta_{T,y} = 0,542 \text{ m}$.

Nilai Story Drift Rencana dan Hasil *Pushover*

Pushover

Setelah mendapatkan nilai *Displacement* atau perpindahan bangunan, selanjutnya perlu untuk menentukan dan membandingkan nilai perpindahan yang terjadi pada setiap lantai. Hal ini berguna untuk mengetahui perilaku akhir dari struktur yang didesain. Untuk nilai *drift* desain dapat dihitung menggunakan persamaan

$$\theta_i = \left(1 - 0,5 \frac{H_i}{H_n} \right) \times \theta_0 \quad (12)$$

Dengan :

θ_0 = Desain drift limit rencana (0,02)

θ_i = Desain drift lantai ke- i

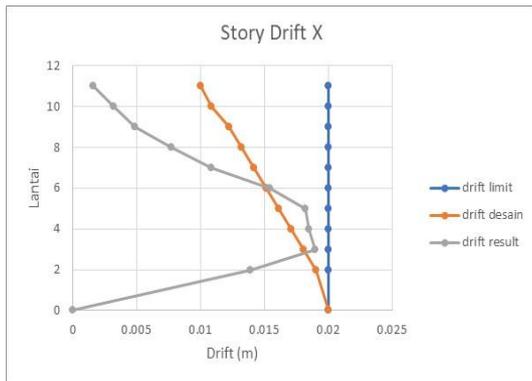
H_i = ketinggian pada lantai ke- i

H_n = ketinggian puncak

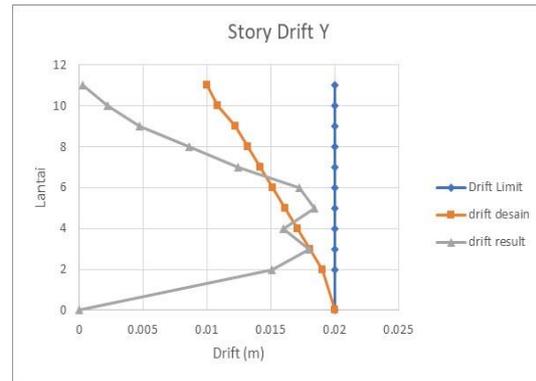
Untuk perhitungan nilai *drift* desain dihitung pada arah-X dan Y sama, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 9, setelah itu nilainya akan dibandingkan apakah nilai *drift* desain tidak ada yang melebihi nilai *drift* limit. Selain itu juga dibandingkan dengan nilai *story drift* analisis *pushover*. Gambar 11 dan 12 menunjukkan perbandingan nilai *story drift* rencana dan *story drift* hasil analisis *pushover*.

Tabel 9. Story Drift Rencana dan *Story Drift* Hasil Analisis *Pushover*

Lantai	H_i	Desain drift limit	Rencana	Story drift Rencana	Perpindahan hasil <i>push over</i>		Story drift hasil <i>pushover</i>	
					Arah - X	Arah-Y	Arah-X	Arah-Y
0	0	0,02	0	0,02	0	0	0	0
2	3,5	0,02	0,070	0,019	0,049	0,053	0,014	0,015
3	7	0,02	0,137	0,018	0,115	0,116	0,019	0,018
4	10,5	0,02	0,200	0,017	0,180	0,172	0,018	0,016
5	14	0,02	0,259	0,016	0,243	0,236	0,018	0,018
6	17,5	0,02	0,315	0,015	0,297	0,296	0,015	0,017
7	21	0,02	0,368	0,014	0,335	0,340	0,011	0,012
8	24,5	0,02	0,417	0,013	0,362	0,370	0,008	0,009
9	28,17	0,02	0,465	0,012	0,380	0,388	0,005	0,005
10	33,17	0,02	0,524	0,011	0,396	0,399	0,003	0,002
11	36,23	0,02	0,557	0,010	0,401	0,400	0,002	0,000



Gambar 11. *Story drift* Arah-X



Gambar 12. *Story drift* Arah-Y

Perbandingan Nilai Target Perpindahan

Dari perhitungan diatas maka dapat ditabelkan nilai target perpindahan rencana dan FEMA 356, dan dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 1. Perbandingan nilai target perpindahan dan level kinerja

Arah	Perpindahan Rencana	Target FEMA 356	Level Kinerja
x	0,383	0,618	IO
y	0,383	0,542	IO

Pada Tabel 10 di atas, nilai rencana didapatkan dari perhitungan menggunakan persamaan 11. Dapat dilihat bahwa nilai target perpindahan rencana lebih kecil dibandingkan dengan nilai perpindahan berdasarkan perhitungan FEMA 356. Sedangkan untuk level kinerja bangunan setelah dianalisis menggunakan metode *pushover*, disimpulkan bahwa tower A dari kampus UPJ masuk dalam kategori IO (*Immediate Occupancy*). Sehingga bangunan aman untuk digunakan ketika pasca terjadi gempa.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis *pushover* dan perhitungan desain rencana serta perbandingan dengan metode FEMA 356. Gedung Universitas Pembangunan Jaya dengan jumlah lantai terdiri dari 11 lantai, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. komponen struktural. kekakuan dan kekuatan gedung hampir sama dengan kondisi sebelum struktur dilanda gempa. Tapi, secara operasional tidak dapat bekerja karena kegagalan mekanik atau kurangnya utilitas.
2. berdasarkan hasil perhitungan nilai perpindahan rencana gedung Universitas Pembangunan Jaya Tower A memiliki nilai perpindahan yang kecil yaitu sebesar 0.383 m. yang berarti bangunan aman karena nilai hasil perpindahan rencana kecil, lebih kecil dari acuan FEMA 356 yaitu sebesar 0.618 m untuk arah X dan 0.542 untuk arah Y.
3. berdasarkan grafik perbandingan nilai drift pada setiap lantai. Gedung Universitas Pembangunan Jaya Tower A memiliki nilai drift desain dan nilai drift hasil yang tidak melebihi nilai drift limit yang berarti bangunan aman untuk digunakan pasca terjadi gempa.

DAFTAR PUSTAKA (DAN PENULISAN PUSTAKA)

Abbott, Patrick L. (2019). *Natural Disasters 11th edition*. McGraw-Hill, New York.
 Daniel, D.M., John, S.T. (2016). "Pushover Analysis of RC Building". *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 7(10), 88 – 92.
 Dewobroto, W. (2006). "Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa Dengan Analisis Pushover". *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 3(1), 7-24.
 FEMA 356. (2000). *Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings*. Washington, D.C . Federal Emergency Management Agency.

- FEMA 356. (2000). *Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- Gowriswaran, A., Ramakrishna, G. (2017). Pushover Analysis of Twin Tub Reinforced Concrete Overhead Water Tank. *International Journal for Trends in Engineering & Technology*, Vol. 23(1), 34-38.
- Husein, S. (2007). *Tinjauan Aspek Kegempaan Pegunungan Selatan*. *Prosiding Seminar Potensi Geologi Pegunungan Selatan dalam Pengembangan Wilayah*.
- Kadarusman, Rizky, A., et.al. (2017). "Kajian Analisis Pushover Untuk Performance Based Design Pada Gedung A Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Kertosono". *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya*, Vol. 1(3), 1400-1408.
- Mahardika, K.M. (2021). *Evaluasi Kinerja Struktur Atas Jembatan Sardjito 1 Dengan Metode Pushover Analysis*. Tugas Akhir, Universitas Islam Indonesia.
- Matsuryono, G.M., Taufik, Pribadi S. (2010). *Gempa Bumi Edisi Populer*. Penerbit Badan Meteorology Klimatologi Dan Geofisika, Indonesia: Kemayoran.
- Mellati, A. (2018). "Predicting Dynamic Capacity Curve of Elevated Water Tanks: A Pushover Procedure". *Civil Engineering Journal*. Vol. 4(11):2513.
- Prabowo, A., Lase, Y. (2016). "Tinjauan Nilai Faktor Modifikasi Respon (R) dan Faktor Kuat Lebih (Ω_0) Pada Struktur Gabungan Rangka Baja dan Rangka Beton Bertulang Dengan Analisis Pushover". *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 23(1), 75 – 88.
- Purnomo, E., Purwanto, E. dan Supriyadi, A. (2014). "Analisis Kinerja Struktur Pada Gedung Bertingkat Dengan Analisis Dinamik Respon Spektrum Menggunakan Software Etabs (Studi Kasus: Bangunan Hotel Di Semarang)." *Matriks Teknik Sipil*, Vol. 2(4), 569-576.
- Putri, A., Herdinata, S., Khala, C.C..S., Sari, O.L. (2021). "Analisis Kinerja Seismik Struktur 10 Lantai Beton Bertulang dengan Metode Pushover Analysis". *Indonesian Journal of Civil Engineering Education*, Vol. 8(1), 15 – 22.
- Ramin, T. (2018). "Evaluation of Story Drift under Pushover Analysis in Reinforced Concrete Moment Frames". *International Journal of Research and Engineering*, Vol. 5(1), 296-302.
- Shinde, D.N., Veena, N., Yojana, P. (2014). "Pushover Analysis of Multy Story Building". *International Journal of Research in Engineering and Technology*, Vol. 3(3), 691 – 693.
- Siswanto, S., Prijasambada. (2023). "Analisis Kinerja Struktur Gedung Bertingkat Menggunakan Metode Pushover". *Jurnal IKRAITH-Teknologi*, Vol. 7 (1), 46 – 52.
- Tavio, dan Usman, W. (2018). *Desain Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja*. Penerbit andi Yogyakarta, Indonesia: Jakarta.
- Yosafat, A.P. (2006). "Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa Dengan Pushover Analisis". *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 3(1), 41-52.
- Yuswanto, L.A., Putri, A.P. (2019). "Analisis Pushover Pada Struktur Gedung Beraturan Delapan Lantai". *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, Vol. 4(1), 30-34.