

Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat di Jakarta Menggunakan *Pushover Analysis*

Idham Nasution¹, Erizal^{1*}, and Muhammad Fauzan¹

¹ Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB University, Bogor, 16680, Indonesia

* penulis koresponden: erizal@apps.ipb.ac.id

Abstrak: Gempa bumi menjadi bencana yang sering terjadi di Indonesia salah satunya di wilayah DKI Jakarta. Gempa bumi diasumsikan sebagai beban lateral yang nantinya didistribusikan ke semua struktur gedung dan menyebabkan bangunan bergeser. Beban geser yang nilainya melebihi dari nilai beban geser maksimum akan membuat struktur mengalami keruntuhan sehingga perencanaan struktur sangat diperlukan untuk mengantisipasi kerusakan parah yang terjadi di struktur tersebut. Evaluasi diperlukan untuk mengetahui tingkat kinerja struktur gedung eksisting terhadap gempa. Metode yang digunakan dalam mengevaluasi tingkat kinerja struktur terhadap gempa menggunakan acuan ASCE 41-17 yang mengatur cara evaluasi seismik dan *retrofit* bangunan eksisting pragempa dengan tahapan pemodelan struktur (menggunakan ETABS), pembebanan gravitasi, pembebanan respon spektrum, pemodelan sendi plastis, serta evaluasi analisis *pushover*. Hasil evaluasi menghasilkan bahwa gedung masih mampu menahan gaya gempa BSE-1E dan BSE-2E serta masih memiliki kekuatan untuk menahan gaya gempa sampai perpindahan target awal. Hasil simpangan yang dihasilkan memiliki nilai dibawah batas izin untuk arah-X dan Y pada level gempa BSE-1E sebesar 202,504 mm, 196,176 mm dan BSE-2E sebesar 274,352 mm, 266,56 mm. Sendi plastis terbentuk pertama kali pada elemen balok selanjutnya pada kolom. Tingkat kinerja struktur gedung untuk gempa BSE-1E berada pada level *immediate occupancy* (IO) dan gempa BSE-2E berada pada level *Damage control* (DC). Rasio daktilitas struktur gedung berada pada rentang 1,5 sampai 5,3 sehingga dapat dikatakan struktur gedung memiliki daktilitas parsial.

Kata kunci: ASCE 41-17; analisis *pushover*; *performance point*; *target displacement*, BPOE

Diterima: 25 Juli 2024
Diperbaiki: 25 September 2024
Disetujui: 10 Oktober 2024

1. Pendahuluan

Secara geologis Indonesia berada diantara pertemuan 4 lempeng litosferik besar seperti Eurasia, Pasifik, Indo-Australia dan lempeng laut Filipina sehingga menjadikan Indonesia menjadi salah satu negara yang rentan terhadap bencana gempa bumi yang tinggi [1]. Menurut BMKG, gempa bumi di Indonesia tercatat sebanyak 71.628 kejadian dari periode tahun 2009-2019 dari berbagai wilayah yang beragam salah satunya DKI Jakarta [2]. Provinsi DKI Jakarta memiliki tingkat kegempaan yang semakin hari semakin tinggi karena wilayah ini berdekatan dengan sesar Baribis, Lembang, dan Cimandiri. Selain itu, wilayah DKI Jakarta juga dekat dengan zona subduksi M7 dan M8 yang menyebabkan tingkat kegempaan serta akselerasi gempa akan terus bertambah nilainya di kemudian hari [3].

Gempa bumi memiliki beban lateral yang disebabkan oleh getaran secara horizontal, vertikal atau kombinasi keduanya pada arah X, Y dan Z [4]. Beban lateral kemudian didistribusikan ke semua struktur gedung yang

mengakibatkan bangunan bergeser. Beban geser pada struktur jika melebihi dari nilai beban geser maksimum akan membuat struktur mengalami keruntuhan [5]. Oleh karenanya perencanaan struktur gedung bertingkat terhadap beban gempa menjadi sangat penting sebagai antisipasi saat terjadinya gempa bumi yang mana struktur gedung akan mampu memberikan perilaku *non-linier* pada kondisi pasca elastik tanpa struktur tersebut mengalami kerusakan yang signifikan pada level tertentu [6].

Metode analisis kapasitas struktur terhadap beban gempa yang umum digunakan adalah prosedur linear untuk memprediksi perilaku seismik bangunan seperti pada SNI 1726 Tahun 2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Metode tersebut dinilai kurang akurat mengingat beban gempa yang kuat akan mengakibatkan struktur bangunan bersifat inelastik sehingga analisis nonlinear perlu dilakukan [7]. Analisis struktur bangunan yang memperhitungkan beban gempa yang cukup tinggi umumnya menggunakan analisis nonlinear karena komponen struktur cenderung akan berada dalam kondisi inelastis. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk analisis struktur gedung terhadap beban gempa secara nonlinear adalah metode analisis pushover. Berdasarkan penjelasan diatas, evaluasi diperlukan untuk mengetahui tingkat kinerja struktur gedung eksisting terhadap beban gempa. Salah satu ketentuan yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kinerja struktur gedung berupa ketentuan ASCE 41-17. ASCE 41-17 mengatur cara evaluasi seismik dan *retrofit* bangunan eksisting pra gempa dengan melakukan pendekatan komprehensif yang menerima kekurangan yang terdapat pada struktur bangunan seperti mutu material dan dapat dilakukan pengecekan tingkat kinerja struktur saat dikenai tingkat kegempaan tertentu. Tahap evaluasi pada ketentuan ASCE 41-17 terdapat evaluasi dengan tingkatan (*tier*) 1, 2, dan 3. *Tier* 1 untuk tahap *screening*, *tier* 2 untuk memeriksa poin yang *noncompliant* atau *unknown*, dan *tier* 3 untuk evaluasi sistematis dan detail. Penelitian ini akan menggunakan *tier* 3 dengan metode yang digunakan berupa analisis *non-linier pushover* [8]. Hasil Analisis *pushover* dapat digunakan untuk bangunan gedung yang mempunyai ketinggian menengah seperti gedung yang memiliki 5 lantai.

Gedung yang akan dievaluasi mempunyai kategori risiko II dengan penggunaan sebagai kantor. Evaluasi seismik struktur gedung yang dilakukan berbasis kinerja dengan level kinerja sesuai *Basic Performance Objective for Existing Buildings* (BPOE). Target kinerja struktur dievaluasi menggunakan metode analisis *pushover* dengan *Basic Safety Earthquake* (BSE) yang digunakan yaitu BSE-1E (periode gempa 250 tahun) dan BSE-2E (periode gempa 1000 tahun). Struktur gedung diharapkan pada BSE-1E memiliki target kinerja minimal pada level *life safety* sehingga saat terjadi gempa penghuni gedung masih dapat menyelamatkan diri dan kondisi kerusakan pasca gempa hanya mengalami kerusakan struktur sebagian.

2. Metode

2.1. Material

Gedung Business Center Research & Technology Center Terintegrasi (RTCT) Pertamina Jakarta menjadi objek penelitian ini. Gedung tersebut merupakan gedung bertingkat 5 lantai. Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah perangkat lunak *AutoCAD 2023*, *Microsoft Excel*, *ETABS V.20.3.0*. Bahan penelitian yang digunakan berupa data sekunder berupa peta periode ulang gempa Indonesia tahun 2017, *shop drawing*, data penyelidikan tanah dan dokumen teknis gedung yang didapat dari kontraktor pelaksana konstruksi. Penelitian ini menggunakan acuan peraturan-peraturan seperti ASCE 41-17 tentang *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung, SNI 1727:2020 tentang Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain, SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan.

Komponen struktur gedung terdiri atas fondasi, kolom, balok, pelat lantai dan atap, dan rangka atap baja. Struktur gedung menggunakan SPRMK (sistem rangka pemikul momen khusus) dan material yang

digunakan beton bertulang dan baja struktural untuk rangka atap. Mutu material beton bernilai f_c' 30 MPa dan mutu baja tulangan BJTS 420B.

2.2. Pemodelan struktur gedung

Pemodelan struktur gedung dilakukan menggunakan *software* ETABS V.20.3 yang mengacu pada gambar *shop drawing*. Modeling dilakukan terhadap struktur atas bangunan gedung seperti balok, kolom, pelat lantai, pelat atap dan rangka atap baja dengan tumpuan sendi yang di *modelling* secara terpisah untuk mempertahankan karakteristik atap dan mencegah struktur atap mengalami keruntuhan terlebih dahulu. Kemudian dilakukan *input* material seperti mutu beton, mutu baja, jumlah tulangan balok dan kolom pada masing-masing elemen struktur atas gedung.

2.3. Pembebanan gravitasi

Beban gravitasi memberikan dampak yang signifikan terhadap beban gempa selama terjadinya gempa. Saat itu beban lateral akibat gempa pada sebuah struktur bekerja sehingga menyebabkan *drift* atau simpangan dan mengakibatkan timbulnya eksentrisitas beban gravitasi yang dalam hal ini berupa efek $P - \Delta$ [9]. Sehingga dalam analisis nonlinier pushover, beban gravitasi diterapkan dahulu sebelum beban pushover mulai bekerja. Beban gravitasi yang diterapkan berupa berat seismik efektif yang ditinjau hanya berupa beban mati, beban mati tambahan (SIDL) dan beban hidup. Ketentuan pembebanan gravitasi (Q_G) untuk prosedur evaluasi analisis non-linier terdapat pada ASCE 41-17 terdapat pada pasal 7.2.2. yang mana beban hidup diperhitungkan dengan faktor skala 25% apapun fungsi bangunannya. Hal ini diasumsikan saat terjadi gempa penghuni gedung melakukan evakuasi dan beban hidup merupakan beban yang dapat bergerak dan bergeser sehingga beban hidup diperhitungkan 25%. Beban mati, beban SIDL (*super imposed dead load*) dan beban hidup termasuk atap pada struktur atas gedung mengacu pada SNI 1727:2020. Pembebanan gravitasi digunakan **persamaan (1)**.

$$Q_G = Q_D + Q_L \quad (1)$$

Keterangan:

Q_D : Beban Mati (termasuk beban mati tambahan)

Q_L : Beban hidup (25% diperhitungkan)

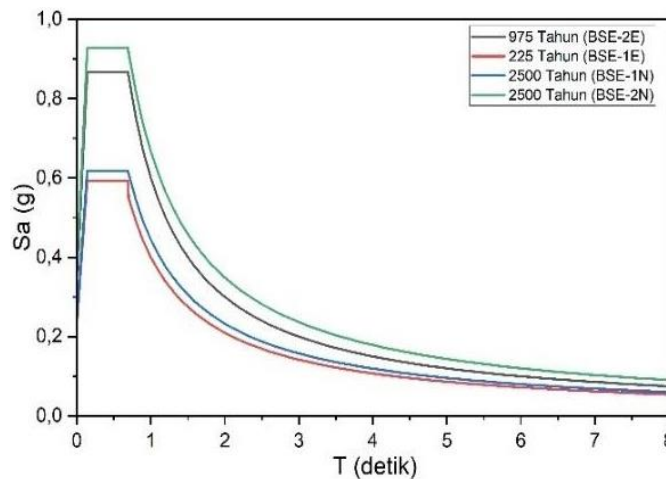
2.4. Respon spektrum berdasarkan ASCE 41-17

Percepatan gempa maksimum pada evaluasi struktur yang ditetapkan ASCE 41-17 tentang *Performance Objectives and Seismic Hazards* digunakan untuk menentukan target kinerja struktur yang dievaluasi. Evaluasi pada *Basic Performance Objective for Existing Buildings* (BPOE) menggunakan *seismic hazard level design* untuk *Basic Safety Earthquake* (BSE) 1-E dan BSE-2E. BSE-1E merupakan desain percepatan puncak gempa jangka pendek untuk probabilitas terlampaui 20% dalam 50 tahun (periode ulang 250 tahun) dan BSE-2E merupakan desain percepatan puncak gempa jangka pendek untuk probabilitas terlampaui 5% dalam 50 tahun (periode ulang 1000 tahun). Nilai percepatan periode untuk 0,2 detik dan 1 detik BSE-1E dan BSE-2E diambil dari peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017. Hasil kurva respon spektrum disajikan pada **Gambar 1**.

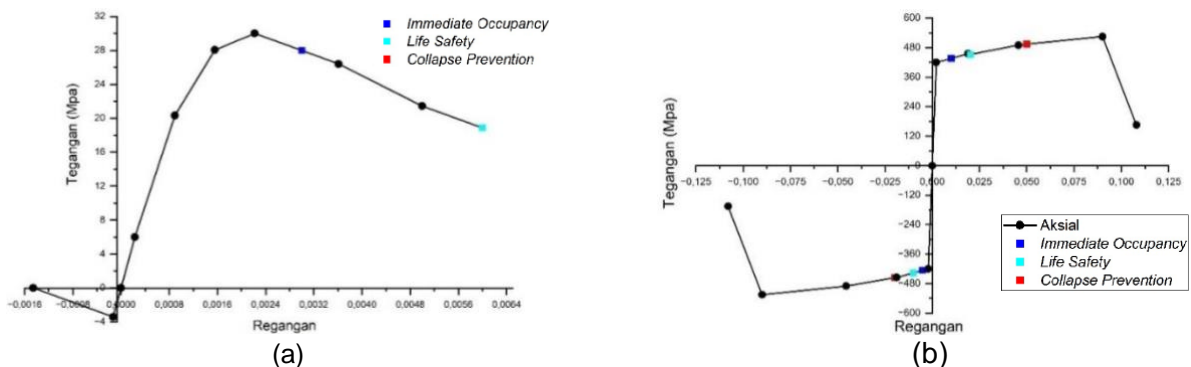
2.5. Pemodelan sendi plastis

Saat struktur menerima beban lateral pada tingkatan tertentu, elemen-elemen struktur akan mengalami kondisi sendi plastis (*hinge*). Sendi plastis merupakan keadaan pada ujung elemen struktur yang semula *rigid* (kaku) berubah menjadi *pinned* (sendi) dikarenakan ketidakmampuan struktur menahan beban lateral. Pada prosedur evaluasi struktur, pemodelan sendi plastis dilakukan pada elemen struktur yang diperkirakan akan mengalami keadaan plastisitas. Pemodelan sendi plastis bertujuan untuk merepresentasikan perilaku *non-linear* pada elemen struktur. Sendi plastis dapat

dimodelkan menggunakan *auto hinges* yang mana kurva *backbone* dibuat mengacu pada ASCE 41-17 Tabel 10-7 pada kolom dengan DOF P-M2-M3 dan balok dengan DOF M2 dan M3. Perilaku Non linier pada material beton yang terkekang menggunakan teori Mander dan material baja tulangan menggunakan teori Park & Paulay. Model teori mander menunjukkan bahwa *confinement* dapat meningkatkan daktilitas dan mutu material beton [10]. Material beton dan baja tulangan memiliki tingkat kinerja struktur masing-masing [11], hubungan tegangan-regangan material beton dan baja disajikan pada **Gambar 2**.



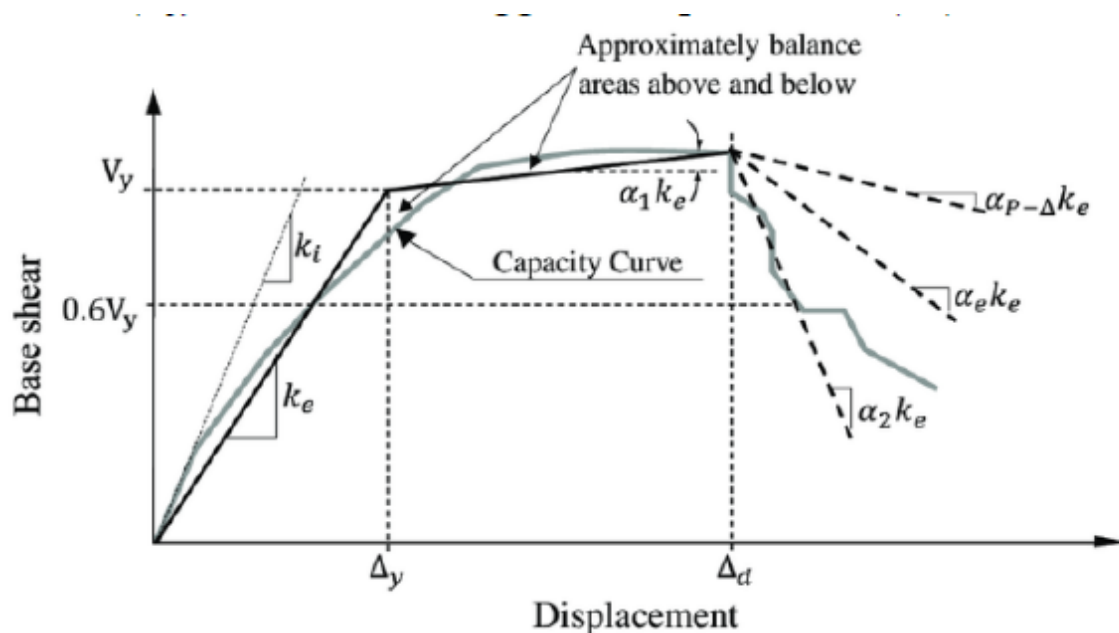
Gambar 1. Repons spektrum kelas situs SD untuk DKI Jakarta



Gambar 2. Hubungan tegangan-regangan perilaku nonlinier teori (a) Mander (1998) beton tidak terkekang f_c' 30 MPa dan (b) Park & Paulay (1975) tulangan BJTS 420-B serta batasan tingkat kinerja struktur

2.6. Analisis Pushover berdasarkan ASCE 41-17

Nonlinear static procedur (NSP) pada ASCE 41-17 menggunakan metode target perpindahan (*displacement coefficient*) yang dimaksudkan untuk merepresentasikan perpindahan maksimum yang terjadi pada tingkat bahaya seismik tertentu [7]. Metode ini menggunakan model matematis yang menggabungkan sifat beban-deformasi nonlinier yang mana beban lateral ditingkatkan secara simultan hingga target perpindahan terlampaui [12]. Beban lateral yang diberikan sesuai proporsi terhadap sebaran massa pada tiap diafragma lantai dan NSP menggunakan redaman sebesar 5% redaman kritis. Hubungan antara perpindahan lateral dan gaya geser dasar harus ditetapkan untuk kontrol perpindahan berkisar antara 0 dan 150% dari target perpindahan [7]. Hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan harus diubah dengan hubungan yang diidealisasikan (**Gambar 3.**) sehingga dapat menghitung nilai kekakuan lateraf efektif (K_e) dan kekuatan leleh efektif (V_y). Target perpindahan (δ_t) ditentukan menggunakan **persamaan (2)**.



Gambar 3. Hubungan *base shear-displacement*

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

Keterangan:

- δ_t : Target perpindahan (m)
- C_0 : Faktor modifikasi perpindahan spektral terhadap perpindahan atap
- C_1 : Faktor modifikasi perpindahan maksimum inelastik terhadap perpindahan elastik
- C_2 : Faktor modifikasi merepresentasikan efek bentuk *pinched* histerisis
- S_a : Respon spektra percepatan pada periode fundamental efektif
- T_e : Periode fundamental efektif (*detik*)
- g : Percepatan Gravitasi ($m/detik^2$)

ASCE 41-17 mensyaratkan pada evaluasi struktur menggunakan *Basic Performance Objective for Existing Buildings* (BPOE) memiliki tingkat kinerja minimal berdasarkan level tingkat bahaya gempa dan kategori risiko yang dimiliki struktur bangunan. Tingkat kinerja struktur bangunan diklasifikasikan menurut FEMA 356 yaitu *Immediate Occupancy* (IO) berupa kondisi kerusakan pasca gempa dengan kerusakan struktur yang sedikit, *Damage Control* (DC) berupa kondisi yang dapat dilakukan perbaikan dengan biaya yang kecil, *Life Safety* (LS) berupa kondisi kerusakan struktur secara sebagian atau total tetapi risiko cedera terhadap ancaman penghuni gedung sangat rendah sehingga dapat dilakukan perbaikan struktur yang besar sebelum bangunan dihuni kembali, *Limited Safety* (LdS) berupa kerusakan struktur rentang antara *life safety* dengan *collapse prevention*, dan *Collapse Prevention* (CP) berupa kerusakan pada bangunan yang mengalami keruntuhan total dan tidak memungkinkan perbaikan secara ekonomis maupun teknis. Pada evaluasi struktur gedung kategori risiko II dengan level bahaya gempa BSE-1E disyaratkan tingkat kinerja minimal pada level *Life Safety* (LS) dan BSE-2E disyaratkan tingkat kinerja minimal pada level *Collapse Prevention* (CP).

2.7. Perhitungan Daktilitas

Daktilitas suatu struktur gedung harus diperhitungkan untuk mengetahui nilai kemampuan struktur bangunan gedung dalam mempertahankan kekakuan dan kekuatan setelah struktur mengalami simpangan pasca elastis yang signifikan akibat beban gempa. Sehingga memungkinkan struktur tetap berdiri walaupun akibat gempa struktur mengalami kelelahan ataupun berada pada ambang batas keruntuhan. Nilai daktilitas dapat dianalisis menggunakan analisis *pushover* yang dinyatakan sebagai

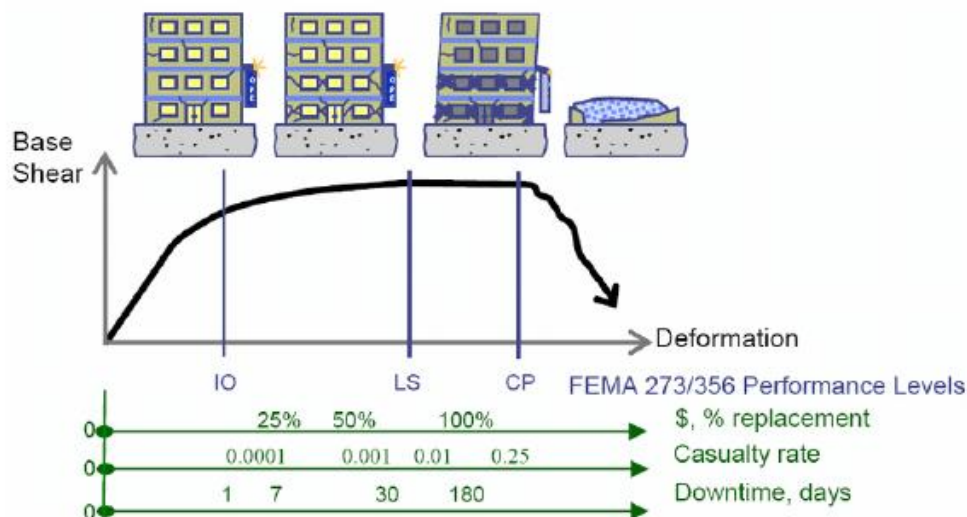
ratio ductility ($\mu\Delta$). *Ratio ductility* merupakan ratio antara perpindahan pasca elastis (Δu) dengan perpindahan saat kondisi leleh pertama (Δy). *Ratio ductility* dapat ditentukan dengan **persamaan (3)**.

$$\mu\Delta = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3)$$

Keterangan:

Δu : rasio perpindahan pasca elastis (mm)

Δy : rasio perpindahan saat kondisi leleh pertama (mm)

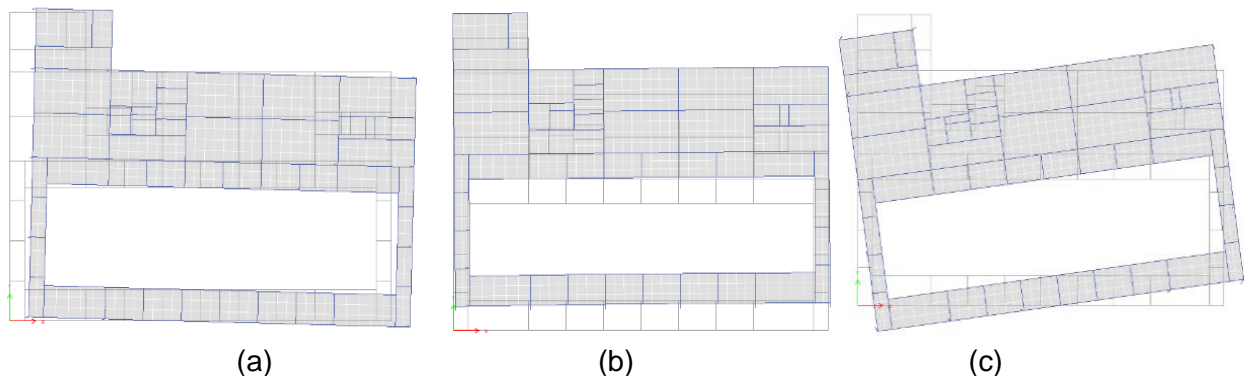


Gambar 4. Tingkat kinerja struktur menurut FEMA 356

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Respon seismik struktur

Respon seismik struktur merepresentasikan respon struktur terhadap getaran gempa bumi sehingga harus di kontrol yang meliputi pola ragam getar dan periode natural struktur. Pola ragam getar pertama pada struktur bangunan mengalami arah sumbu translasi ke arah X, kemudian pola ragam kedua mengalami tranlasi ke arah Y, dan pola ragam ketiga berotasi ke arah Z. Pola ragam getar memiliki nilai getaran alami struktur gedung yang merupakan nilai periode natural struktur. Periode natural struktur menggambarkan lamanya waktu yang dialami struktur gedung ketika menerima getaran akibat beban seismik [12]. Nilai periode natural struktur pada Mode 1 bernilai 1,330 detik, Mode 2 bernilai 1,271 detik dan mode 3 bernilai 1,123 detik. Pola ragam getar pertama dan nilai periode natural mode 1 struktur memberikan informasi bahwa kekakuan struktur arah-X lebih rendah dibandingkan arah-Y. Pola ragam getar dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Pola ragam getar (a) pertama (b) kedua dan (c) Ketiga

3.2. Pengecekan higher mode effect

Pada evaluasi NSP berdasarkan ASCE 41-17 pasal 7.3.2.1 perlu dilakukan pengecekan terhadap *higher mode effect* sebagai syarat penerapan analisis *pushover*. Analisis modal pertama dilakukan dengan mempertimbangkan mode dengan modal partisipasi massa rasio sebesar 90% dan analisis modal kedua dilakukan dengan hanya mempertimbangkan partisipasi mode pertama. *Higher mode effect* yang lebih tinggi dianggap signifikan apabila gaya geser pada setiap lantai yang dihasilkan dari analisis modal yang mempertimbangkan untuk mendapatkan partisipasi massa 90% melebihi 130% dari gaya geser lantai pada mode pertama. Apabila *higher mode effect* signifikan, NSP dapat diizinkan dengan syarat harus dilakukan LDP (*linier dynamic procedur*) untuk menunjang hasil NSP. Hasil pengecekan *higher mode effect* disajikan pada **Tabel 1**. Hasil menunjukkan bahwa rasio gaya geser lantai antara modal 1 dan modal 2 tidak lebih dari 130% sehingga *higher mode effect* pada struktur gedung tidak signifikan [11].

Tabel 1. Hasil pengecekan *higher mode effect*

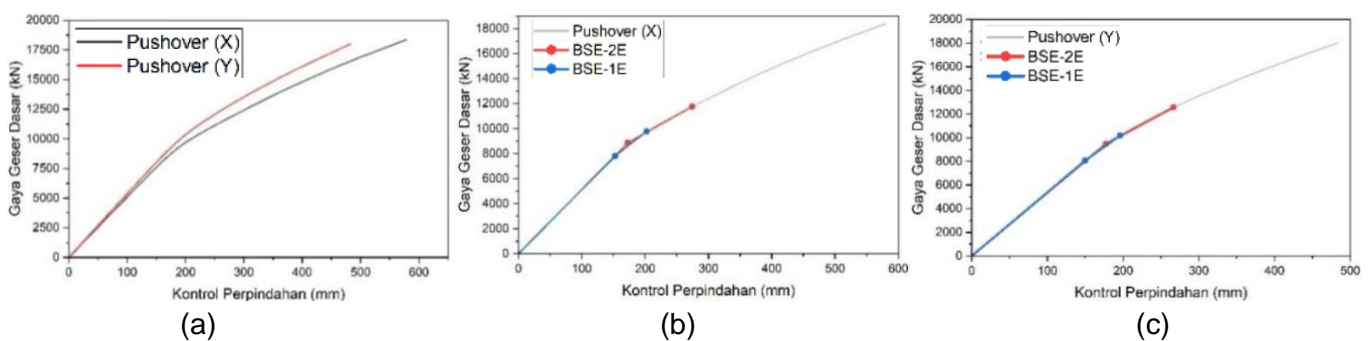
Arah	Lantai	Model 1 mode 12		Model 2 mode 2		Rasio gaya geser antar lantai modal 1 dan 2 (%)
		Modal partisipasi massa rasio (%)	Gaya geser lantai (kN)	Modal partisipasi massa rasio (%)	Gaya geser lantai (kN)	
X	5	98%	950,70	76%	738,63	129%
	4		1758,66		1635,33	108%
	3		2373,65		2328,11	102%
	2		2806,65		2736,93	103%
	1		3028,24		2873,89	105%
Y	5	94%	973,04	76%	769,99	126%
	4		1776,62		1687,73	105%
	3		2399,55		2376,37	101%
	2		2824,96		2768,05	102%
	1		3028,25		2894,19	105%

3.3. Analisis pushover

Hasil analisis *pushover* menghasilkan kurva *pushover* yang memperlihatkan hubungan *base shear* dengan *displacement control* sehingga dapat merepresentasikan kapasitas lateral struktur gedung [14]. Kurva *pushover* disajikan pada gambar **Gambar 6(a)** dengan berdasarkan ASCE 41-17 pasal 7.4.3.2 hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan lateral harus ditetapkan untuk node kontrol target perpindahan nilainya berkisar antara 0 sampai 150% sehingga node kontrol target perpindahan yang digunakan bernilai 150% dengan target perpindahan awal ditentukan 2% dari tinggi total bangunan sebesar 675 mm. Berdasarkan kurva *pushover* untuk kurva arah -Y berada di atas kurva arah-X hal ini menunjukkan kekakuan struktur arah-Y lebih kaku dibandingkan kekakuan struktur arah-X. Pada **Gambar 6(a)** dan **Gambar 6(b)** disajikan kurva kapasitas *pushover* dan *performance point* di pusat massa atap dari masing-masing arah dan memiliki nilai perpindahan target (δ_t) memenuhi persyaratan dari batas kontrol target perpindahan. Nilai perpindahan target diperoleh dari nilai parameter non-linier. Parameter non-linier disajikan pada **Tabel 2**. yang secara berurutan, T_e dan T_i merupakan nilai periode fundamental efektif dan elastis struktur yang pada arah-Y nilainya lebih kecil dibandingkan arah-X, K_e dan K_i merupakan nilai kekakuan lateral efektif dan elastis yang pada arah-Y nilainya lebih besar dibandingkan arah-X. Hal ini dikarenakan kekakuan struktur arah-Y lebih kaku dibandingkan kekakuan struktur arah-X. Nilai kekakuan struktur mempunyai hubungan berbanding terbalik dengan periode struktur [15].

Tabel 2. Parameter non-linier

Parameter yang diperhitungkan	BSE-1E		BSE-2E	
	Arah-X	Arah-Y	Arah-X	Arah-Y
Te (detik)	1,336	1,277	1,335	1,277
Ki (kN/m)	51190,858	53843,021	51110,653	53786,422
Ke (kN/m)	51190,858	53843,021	51110,653	53786,422
Ti (detik)	1,336	1,277	1,335	1,277
Perpindahan target (δ_t) (mm)	202,504	196,176	274,352	266,560
Dy (mm)	152,802	149,655	172,615	177,270
Vy (kN)	7822,076	8057,874	8871,326	9484,106
Gaya geser dasar (kN)	9781,668	10195,599	11757,868	12564,109



Gambar 6. (a) Kurva *pushover* struktur gedung (b) kurva kapasitas *pushover* dan *performance point* arah-X dan (c) kurva kapasitas *pushover* dan *performance point* arah-Y

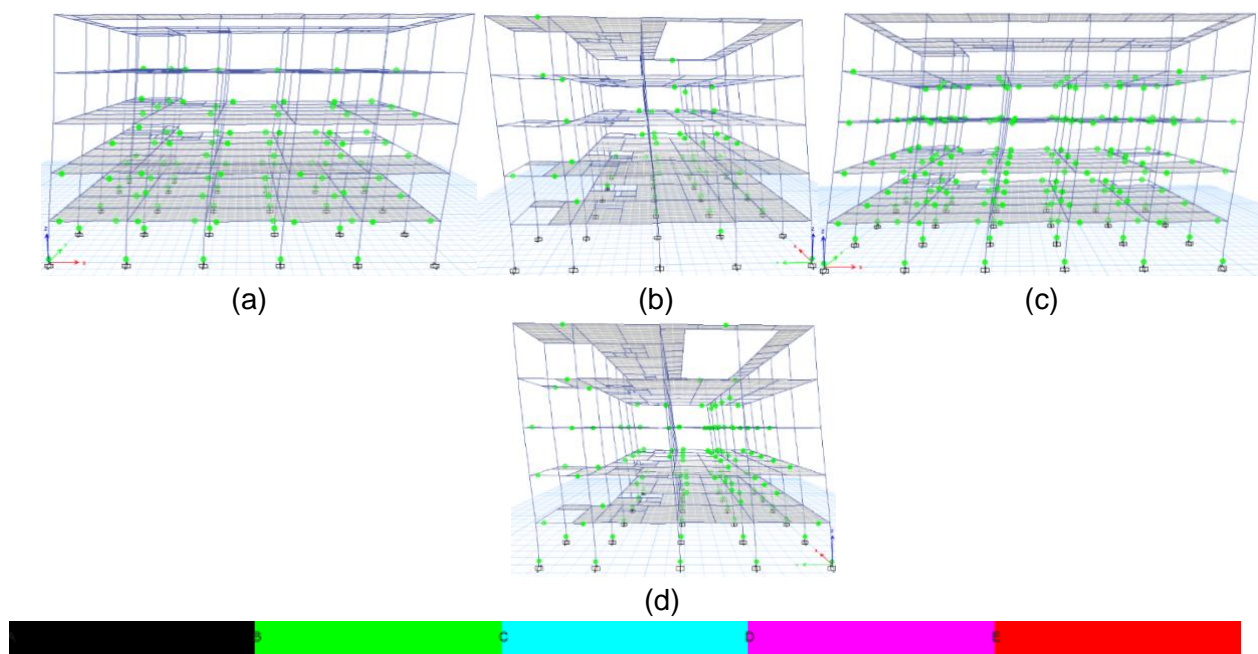
3.4. Pembentukan sendi plastis

Sendi plastis merupakan sebuah kondisi yang mana ujung elemen struktur yang kaku (*rigid*) menjadi sendi (*pinned*) yang dikarenakan material penyusun yaitu baja tulangan mengalami kondisi plastis sehingga mengakibatkan penurunan kemampuan struktur dalam menahan beban [15]. Pembentukan sendi plastis bertujuan sebagai analisis mekanisme keruntuhan yang terjadi saat struktur mencapai batas *ultimate*. Keruntuhan pada kondisi batas *ultimate* dapat menyebabkan kerugian yang besar dan hilangnya nyawa. Pembentukan sendi plastis pertama untuk level gempa BSE-1E terbentuk pada elemen *step* ke-7 saat gaya geser dasar sebesar 4281,4454 kN dengan *displacement* sebesar 83,638 mm pada arah-X, sedangkan pada arah-Y terbentuk pada *step* ke-8 saat gaya geser dasar sebesar 5681,8914 kN dengan *displacement* sebesar 105,532 mm. Pembentukan sendi plastis pertama untuk level gempa BSE-2E terbentuk pada elemen *step* ke-7 saat gaya geser dasar sebesar 4287,1552 kN dengan *displacement* sebesar 83,881 mm pada arah-X, sedangkan pada arah-Y terbentuk pada *step* ke-8 saat gaya geser dasar sebesar 5696,9958 kN dengan *displacement* sebesar 105,922 mm. Pembentukan sendi plastis dimulai pada elemen balok lantai 1 kemudian menyebar pada balok-balok struktur. Sendi plastis yang terbentuk pada perpindahan target struktur yang disajikan pada **Gambar 7**, yang mana untuk BSE-1 pada arah-X dan Y terjadi pada *step* ke-14, untuk BSE-2E pada arah-X terjadi pada *step* ke-18 dan arah-Y terjadi pada *step* ke-19 ditandai dengan titik berwarna hijau pada elemen struktur menandakan elemen struktur masih berada pada kriteria rentang B-C. Menurut ASCE 41-17 titik B merepresentasikan kelelahan pertama, titik C merepresentasikan kapasitas *ultimate*, titik D merepresentasikan kekuatan residual dan titik E merepresentasikan keruntuhan pada elemen struktur.

3.5. Evaluasi Kinerja Struktur

Pengecekan tingkat kinerja struktur sesuai ASCE 41-17 menggunakan *performance objectives* yang dijelaskan pada pasal 2.2.1 tentang *Basic Performance Objective for Existing Buildings* (BPOE)

yang mana untuk bangunan dengan kategori risiko II pada tingkat bahaya gempa BSE-1E struktur harus memenuhi tingkat kinerja struktur pada level *life safety* dan BSE-2E pada level *collapse prevention*. Tingkat kinerja struktur disajikan pada **Tabel 3**. Berdasarkan tingkat kinerja struktur yang disajikan struktur sudah mencapai syarat untuk level gempa BSE-1E dan BSE-2E. Nilai rasio tingkat kinerja struktur yang diperoleh pada level gempa BSE-1E untuk arah-X dan arah-Y sebesar 0,00900 dan 0,00872, nilai tersebut lebih kecil dari 0,0100 sehingga dikatakan tingkat kinerja struktur yaitu pada level *Immediate Occupancy* dan pada level gempa BSE-2E untuk arah-X dan arah-Y sebesar 0,01219 dan 0,01185, nilai tersebut berada pada rentang 0,0100 sampai 0,0200 sehingga dikatakan tingkat kinerja struktur yaitu pada level *Damage Control*. Pengecekan juga dilakukan pada rasio daktilitas dan simpangan (*drift*). Rasio daktilitas adalah nilai antara simpangan maksimum yang diakibatkan beban lateral gempa pada saat mencapai kondisi ambang keruntuhan dan simpangan saat struktur terjadi pelepasan pertama. Simpangan maksimum pada saat struktur mencapai kondisi ambang keruntuhan yang terjadi ketika dimulainya pembentukan sendi plastis yang terbentuk pada elemen kolom struktur. Nilai rasio daktilitas disajikan pada **Tabel 4**. Nilai rasio daktilitas struktur yang disajikan menunjukkan bahwa struktur memiliki perilaku daktilitas parsial yang mana nilai dari rasio daktilitas berada pada rentang 1,5 sampai 5,3 [16]. Batas simpangan pada gedung dengan fungsi kategori risiko II untuk bahaya gempa BSE-1E memiliki batas 2% dari ketinggian struktur sebesar 450 mm dan bahaya gempa BSE-2E memiliki batas 4% dari total ketinggian struktur sebesar 900 mm. Nilai simpangan yang dimiliki struktur memenuhi syarat yaitu berada dibawah batas yang ditetapkan. ASCE 41-17 mengatur kriteria *acceptance force controlled* untuk NSP. Hasil dari *acceptance ratio* elemen struktur terhadap aksi geser sumbu lokal V2 dan V3 disajikan pada **Gambar 8**. Elemen struktur dengan nilai rasio melebihi 1 maka dilakukan *retrofit* untuk meningkatkan kekuatan gaya geser elemen struktur. Berdasarkan hasil dari *acceptance ratio* pada semua elemen struktur gedung tidak melebihi 1 sehingga tidak diperlukan *retrofit*.



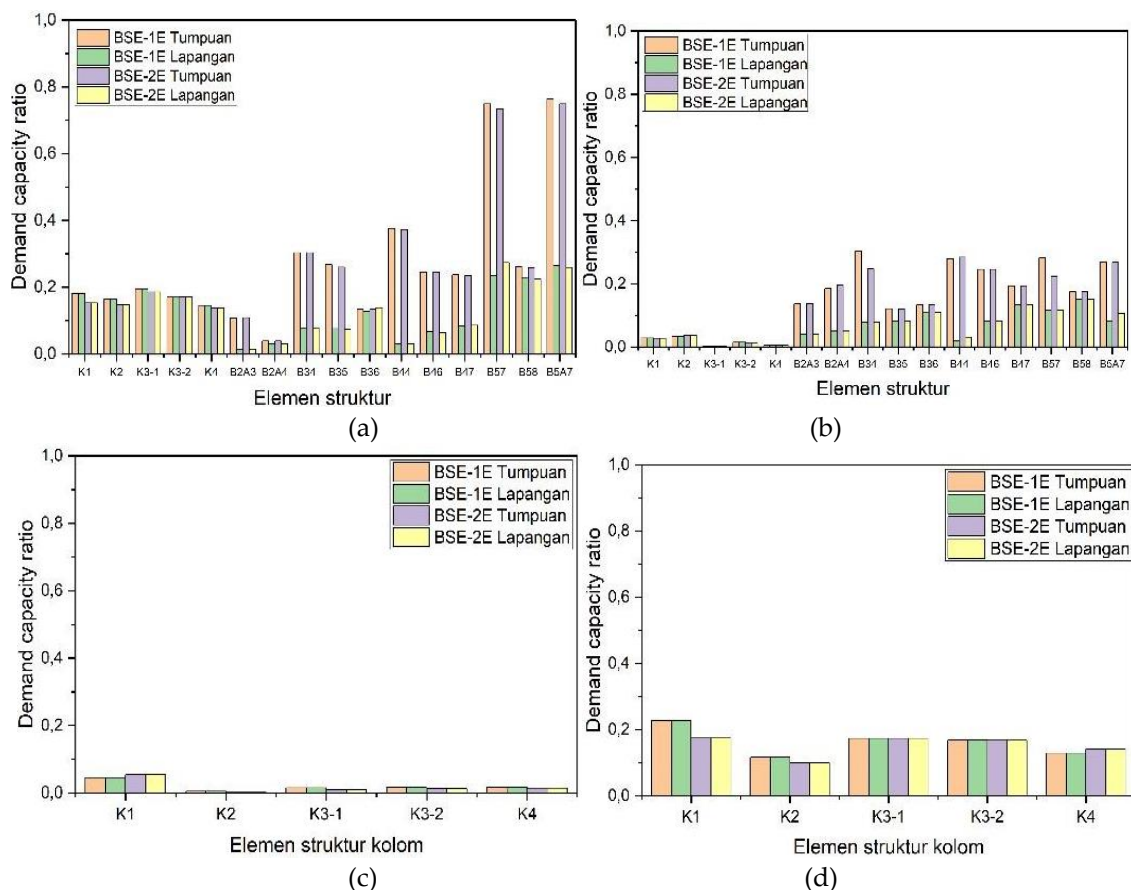
Gambar 7. Pembentukan sendi plastis saat perpindahan target (a) BSE-1E Arah-X (b) BSE-1E Arah-Y (c) BSE-2E Arah-X dan (d) BSE-2E Arah-Y

Tabel 3. Tingkat kinerja struktur

Bahaya Seismik	Arah dorong beban	Tingkat Kinerja (Jumlah Titik Kerusakan)				Rasio tingkat kinerja struktur	Tingkat Kinerja Struktur	Tingkat kinerja yang diizinkan
		A-IO	Damage Control	Limited Safety	Collapse Prevention			
BSE-1E	X	3336	0	0	0	0,00900	IO	Life safety
	Y	3336	0	0	0	0,00872	IO	
BSE-2E	X	3336	0	0	0	0,01219	DC	Collapse Prevention
	Y	3334	0	0	2	0,01185	DC	

Tabel 4. Rasio daktilitas struktur

Bahaya Seismik	arah dorong beban	Displacement Maksimum(Δ_u)	Displacement leleh pertama(Δ_y)	Rasio Daktilitas (μ)
BSE-1E	X	202,50	83,63	2,42
	Y	196,17	105,53	1,86
BSE-2E	X	274,35	83,88	3,27
	Y	266,56	105,92	2,52



Gambar 8. Acceptance ratio geser elemen struktur (a) V2 arah-X (b) V2 arah-Y (c) V3 Arah-X (d) V3 Arah-Y

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil evaluasi yang dilakukan bahwa struktur gedung dapat menahan gaya gempa dengan level bahaya gempa yang digunakan yaitu BSE-1E dan BSE-2E. Kurva *pushover* pada arah-Y berada diatas kurva arah-X yang menyatakan bahwa kekakuan struktur memiliki nilai yang besar pada

arah-Y dibandingkan arah-X dengan nilai periode struktur pada arah-X memiliki nilai yang lebih lama dibandingkan arah-Y dikarenakan perbedaan nilai kekakuan yang memiliki hubungan terbalik dengan periode struktur. Sendi plastis yang terbentuk pertama kali berada pada elemen balok yang kemudian menjalar pada elemen struktur kolom. Tingkat kinerja struktur yang dihasilkan pada bahaya level gempa BSE-1E memiliki nilai *Immediate Occupancy* dan BSE-2E memiliki nilai *Damage Control* yang mana tingkat kinerja struktur telah memenuhi syarat BPOE yang ditetapkan ASCE 41-17. Rasio daktilitas yang dimiliki struktur berada pada rentang 1,5 sampai 5,3 yang menunjukkan bahwa struktur memiliki perilaku daktilitas parsial dengan *drift* struktur memenuhi syarat berada dibawah batas yang ditetapkan.

Daftar Pustaka

- [1] Hadi H, Agustina S, Subhani A. Penguatan kesiapsiagaan stakeholder dalam pengurangan risiko bencana alam gempabumi. *Geodika: Jurnal Kajian Ilmu dan Pendidikan Geografi*. 2019;3(1):30–40.
- [2] Sabtaji A. Statistik kejadian gempa bumi tektonik tiap provinsi di wilayah Indonesia selama 11 tahun pengamatan (2009-2019). *Buletin Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika*. 2020;1(7):31–46.
- [3] Nurusyifa A, Valeri M, Rahman AS. PEMETAAN INDEKS BAHAYA GEMPA BUMI DAN PEMBUATAN SHAKEMAP GEMPA BUMI DKI JAKARTA. *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*. 2023;3(6):8–19.
- [4] Faizah R. Studi Perbandingan Pembebanan Gempa Statik Ekuivalen dan Dinamik Time History pada Gedung Bertingkat di Yogyakarta. *Semesta Teknik*. 2015;18(2):190–9.
- [5] Imani R, Nasmirayanti R, Arman UD, Sari A. Analisa Beban Lateral Akibat Gempa Dengan Metode Statik Ekuivalen. *Rang Teknik Journal*. 2021;4(1):11–6.
- [6] Utami TP, Warastuti N. Analisis Kekuatan Bangunan Terhadap Gaya Gempa Dengan Metode Pushover Studi Kasus Gedung Asrama Pusdiklat Ppatk, Depok. *Jurnal Infrastruktur*. 2017;3(2):99–106.
- [7] Suwondo, R., Mangindaan, D., Cunningham, L., & Alama, S. Non-linear analysis of seismic performance of low-rise concrete buildings in Indonesia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. 794(1):12-24.
- [8] American Society of Civil Engineers. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, [Internet]. American Society of Civil Engineers; 2017. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784414859>
- [9] Istiono H, Ramadhan AY. Analisis pengaruh p-delta effect terhadap perbedaan ketinggian struktur gedung tahan gempa (studi kasus: non-highrise building). *Rekayasa Sipil*. 2020;14(3):218–26.
- [10] Mander JB, Priestley MJN, Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*. 1988;114(8):1804–26.
- [11] Paulay T, Park R, Priestley MJN. Reinforced concrete beam-column joints under seismic actions. In: *Journal Proceedings*. 1978. p. 585–93.
- [11] Adhitama YA, Supriyadi B, Suhendro B. Evaluasi Seismik Gedung Bertingkat Eksisting Menggunakan Prosedur ASCE 41-17. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil Universitas Sebelas Maret*. 2022;6(1):2–10.
- [12] Nuranita B, Desimaliana E, Sobana NAS. Analisis Pushover terhadap Variasi Penampang Kolom pada Struktur Gedung Special Plate Shear Wall. *Journal of Sustainable Construction*. 2022;1(2):1–9.
- [13] Lagaros ND, Fragiadakis M. Evaluation of ASCE-41, ATC-40 and N2 static pushover methods based on optimally designed buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2011;31(1):77–90. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726110002113>
- [14] Handayani EM, Jamal AU. Perilaku Struktur Bangunan Ireguler L Bertingkat Banyak Akibat Penempatan Arah Kolom. In: *Seminar Nasional Infrastruktur Berkelanjutan*. 2018. p. 1–8.
- [15] Asmoro SH, Suswanto B. Studi Analisis Sambungan Semi Rigid Balok-Kolom Baja dengan Modifikasi Friction Damper dengan Metode elemen Hingga. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*. 2020;18(1):61–72.

-
- [16] Niken C. Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Tinggi dengan Analisis Pushover Menggunakan Aplikasi Pemodelan Struktur (Studi Kasus: The Venetian Tower). *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain (JRSDD)*. 2021;9(1):177–88.