



Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Menara Sabilulungan 99 Kabupaten Bandung dengan Metode Analisis Statis Nonlinear *Pushover*

*Erizal, Naufal Rifqi Arrafi, Sekar Mentari

Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknologi Pertanian,
Institut Pertanian Bogor

*)erizal@apps.ipb.ac.id

Received: 18 Juli 2024 Revised: 18 September 2024 Accepted: 15 November 2024

Abstract

One of the regions with high earthquake vulnerability is Java Island. The Sabilulungan 99 Tower, located in Bandung Regency, is a tower with a reinforced concrete structure that features a moment-resisting frame system. The structure's period is 2.6 seconds. The mass participation ratio obtained reaches values above 90% in both the x and y directions in the 9th vibration mode. The base shear force obtained when the performance point is reached in the post-elastic analysis is 10,402.90 kN in the x direction and 10,178.88 kN in the y direction. The lateral displacement of the roof in the x and y directions is 568.53 mm and 602.51 mm, respectively, when the structure's performance point is reached. Based on the structural deformation parameters according to FEMA 356 guidelines, the structure's performance level is Life Safety (LS). The structure's ductility in the x and y directions is 1.7 and 2.4, respectively, classifying the structure as having low ductility in the x direction and moderate ductility in the y direction.

Keywords: Earthquake load, pushover analysis, seismic performance, ductility, Sabilulungan99 tower

Abstrak

Salah satu wilayah dengan kerawanan gempa bumi yang tinggi adalah Pulau Jawa. Menara Sabilulungan 99 yang terletak di Kabupaten Bandung ini merupakan menara dengan struktur beton bertulang yang memiliki sistem rangka pemikul momen. Periode struktur yang dimiliki adalah sebesar 2,6 detik. Rasio partisipasi massa yang diperoleh mencapai nilai di atas 90% baik arah x dan arah y pada ragam getar ke 9. Gaya geser dasar yang diperoleh ketika titik performa tercapai dalam analisis pasca-elastik adalah sebesar 10402,90 kN untuk arah x dan 10178,88 kN untuk arah y. Perpindahan lateral atap pada arah x dan arah y masing-masing adalah sebesar 568,53 mm dan 602,51 mm ketika titik performa struktur tercapai. Berdasarkan parameter deformasi struktur pada acuan ATC 40 dan FEMA 356, tingkat kinerja struktur merupakan Life Safety (LS). Daktilitas yang dimiliki struktur pada arah x dan y masing-masing adalah sebesar 1,7 dan 2,4 sehingga struktur tergolong ke dalam daktilitas rendah pada arah x dan daktilitas sedang pada arah y.

Kata kunci: Beban gempa, analisis pushover, kinerja seismik, daktilitas, Menara Sabilulungan 99

Pendahuluan

Perkembangan ekonomi negara mendorong terbangunnya banyak infrastruktur bangunan seperti bangunan tinggi (*high rise building*). Menurut *The Council on Tall Buildings and Urban Habitat* (2023), Indonesia menempati peringkat ke-9 dunia dengan gedung tinggi terbanyak di dunia. Terdapatnya jalur penunjaman lempeng bumi di wilayah Kepulauan Indonesia menjadi salah satu

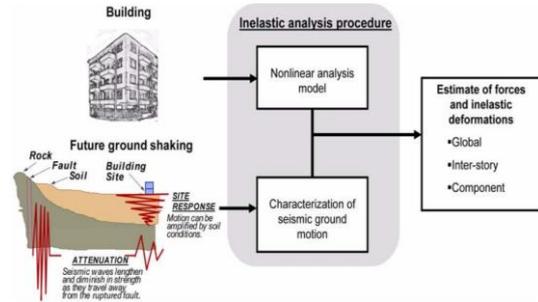
faktor utama terjadinya peristiwa gempa bumi tektonik yang bersifat regional dan umumnya menyebabkan kerusakan yang cukup parah. Salah satu pulau dengan tingkat kerawanan gempa yang tinggi adalah wilayah pulau Jawa. Berdasarkan analisis potensi gempa yang dilakukan oleh Soehaimi (2008) menunjukkan bahwa pulau Jawa termasuk ke dalam wilayah dengan potensi gempa yang memiliki potensi kerusakan dengan kekuatan >5,6 SR. Salah satu peristiwa gempa di pulau Jawa

yang mengakibatkan kerusakan yang cukup besar adalah gempa di wilayah Cianjur pada tahun 2018 dengan kekuatan 5,6 mW. Oleh karena itu, pembangunan gedung tinggi yang dilakukan pada wilayah tersebut harus mempertimbangkan potensi kerusakan akibat gempa bumi sehingga dapat meminimalkan kerusakan akibat kejadian gempa. Salah satu bangunan tinggi di wilayah Jawa Barat adalah Menara Sabilulungan 99.

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 (Suwondo *et al.* 2021). 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*.

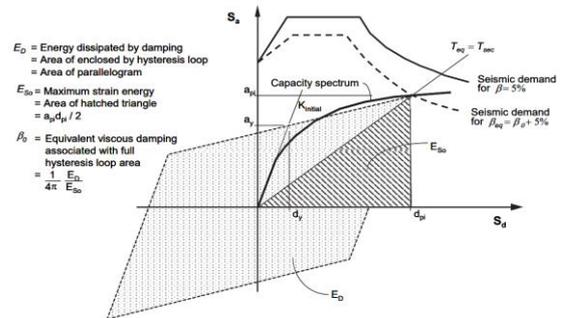
Berdasarkan acuan dari Federal Emergency Management Agency (FEMA) di dalam FEMA 440 (2005), analisis *pushover* merupakan analisis nonlinear statis yang menggunakan konsep *performance-based engineering method* dimana metode tersebut mengandalkan prosedur analisis statis nonlinear untuk memprediksi kebutuhan kekuatan struktural suatu gedung. Analisis *pushover* merupakan analisis statis nonlinear yang di dalam analisisnya pengaruh beban gempa rencana terhadap struktur bangunan dianggap sebagai beban statis pada pusat massa setiap lantai yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur hingga terbentuknya pelelehan pada elemen struktur (sendi plastis) pertama. Peningkatan beban dilanjutkan hingga struktur mengalami perubahan bentuk pasca-elastik yang besar hingga mencapai target peralihan yang diharapkan atau mencapai kondisi plastis (Yanto *et al.* 2019).

Berdasarkan FEMA 440, analisis ini dilakukan dengan melakukan pemodelan analisis nonlinear gedung dan melakukan karakterisasi pergerakan seismik tanah hingga memperoleh parameter gaya dalam elemen struktur dan deformasi elastiknya seperti pada Gambar 1. Analisis *pushover* juga sering disebut sebagai *non-linear static procedure* (NSP). Terdapat dua metode yang dapat dilakukan di dalam NSP yaitu *capacity-spectrum method* dan *coefficient method of displacement*.



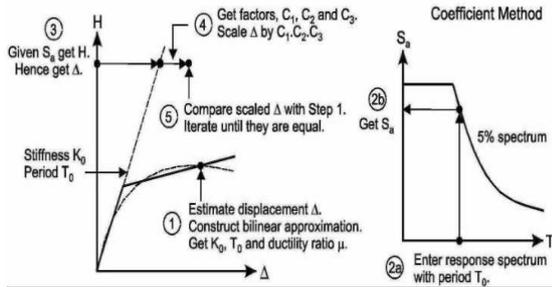
Gambar 1. Skema penggunaan prosedur analisis statis nonlinear *pushover* (FEMA 440)

Analisis *pushover* dengan *capacity spectrum method* dilakukan berdasarkan asumsi bahwa deformasi inelastis maksimum dari sistem SDOF (*Single Degree of Freedom*) nonlinear bisa diperkirakan dari deformasi maksimum sistem SDOF linear-elastis yang memiliki periode dan rasio peredaman yang lebih besar dari nilai-nilai awal sistem nonlinear tersebut. Metode ini diawali dengan pembentukan hubungan antara gaya geser dasar dan deformasi struktur hingga terbentuk kurva *pushover*. Hasil dari metode ini diplotkan dalam format *acceleration-displacement response spectrum* (ADRS) seperti pada Gambar 2 sehingga titik kinerja struktur dapat diketahui.



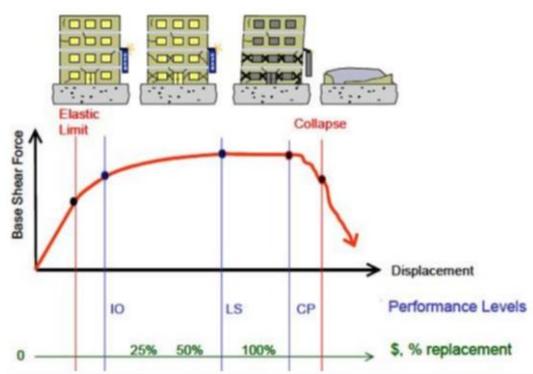
Gambar 2. Representasi grafis dari *Capacity-Spectrum Method* (ATC-40)

Selain *capacity-spectrum method*, analisis *pushover* juga dapat dilakukan dengan *displacement coefficient method* (DCM). Metode ini merupakan pendekatan yang memodifikasi respons linear statis dari yang sama dengan sistem SDOF dengan mengalikannya dengan serangkaian koefisien dari C_0 hingga C_3 untuk menghasilkan perpindahan global (*global displacement*) maksimum di mana nilai tersebut merupakan nilai target perpindahan ketika performa struktur tercapai. Prosedurnya diawali dengan membuat kurva *pushover* yang merupakan kurva hubungan antara parameter gaya geser dasar dengan perpindahan atap. Periode awal dapat diperoleh dari kurva respons spektrum berdasarkan nilai percepatan respons spektrum yang diperoleh seperti tahapan yang dijelaskan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tahapan analisis pushover dengan coefficient method of displacement (FEMA 440)

Kinerja struktur merupakan salah satu parameter yang menggambarkan seberapa baik struktur dapat bertahan dan berfungsi selama gempa bumi terjadi dengan intensitas tertentu. Tingkat kerusakan tiap elemen struktur dilakukan berdasarkan hubungan momen rotasi yang terjadi. Tingkat kinerja struktur merupakan tingkat kerusakan maksimum yang dapat diterima oleh struktur ketika menerima beban gempa. Kerusakan struktur suatu bangunan ditentukan berdasarkan dua parameter struktur yang didapatkan setelah menerima beban gempa yaitu gaya geser dasar seismik (*base shear*) dan perpindahan atap (*roof displacement*) seperti pada Gambar 4. Kinerja struktur diperoleh berdasarkan nilai *performance point* di mana nilai tersebut diperoleh berdasarkan kurva kapasitas (*capacity curve*) dan spektrum kebutuhan (*demand spectrum*).



Gambar 4. Kinerja struktur pada kurva pushover

Berdasarkan ATC-40, tingkat kinerja bangunan dapat diklasifikasikan menjadi seperti berikut:

Immediate Occupancy (IO). Tingkat kinerja yang menjelaskan bahwa setelah terjadinya gempa, kerusakan struktur yang dialami oleh bangunan sangat terbatas. Hampir tidak terdapat perbedaan kondisi pada sistem penahan beban lateral dan vertikal yang dimiliki oleh struktur bangunan.

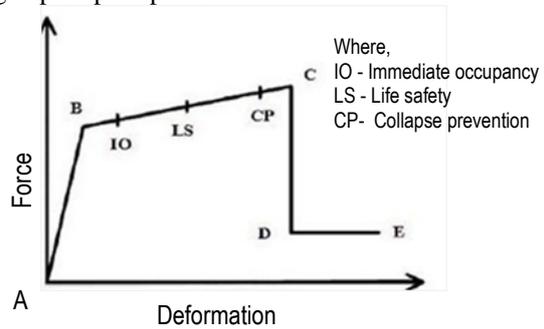
Damage Control (DC). Kondisi di mana kerusakan yang terjadi pada struktur bangunan berada di antara kondisi IO dan LS.

Life Safety (LS). Tingkat kinerja bangunan ketika gempa telah terjadi, kerusakan terhadap elemen struktur terjadi tetapi komponen utama struktur tidak terdislokasi dan runtuh sehingga risiko korban jiwa terhadap kerusakan struktur sangat rendah.

Limited Safety (LdS). Tingkat kinerja dimana keadaan kerusakan setelah gempa terjadi kondisi bangunan berada antara rentang kinerja LS dan CP.

Collapse Prevention (CP). Kondisi ini menunjukkan bahwa bangunan dapat mengalami keruntuhan struktur baik maupun total. Meskipun struktur masih bersifat stabil, kemungkinan terjadinya korban jiwa akibat kerusakan struktur besar.

Kurva *pushover* yang merupakan kurva antara deformasi struktur dengan gaya yang diberikan dapat mengidentifikasi karakteristik material komponen struktur dan kriteria penerimaan (*acceptance criteria*) ketika menerima beban gempa seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Klasifikasi kriteria penerimaan (acceptance criteria) pada kurva pushover

Menurut Nahavandi (2015), respons linear komponen struktur tergambar pada kurva *pushover* di antara titik A (kondisi komponen struktur tak terbebani) dan titik leleh efektif B, sementara respons inelastik komponen struktur ditunjukkan pada kurva nonlinear di antara titik B dan titik C di mana titik C merepresentasikan kekuatan maksimum komponen struktur dalam menahan beban sebelum runtuh. Kemiringan (*slope*) antara titik B dan titik C berada pada rentang 0% - 10% kemiringan kurva elastis (A-B). Kurva di antara titik C dan titik D menunjukkan bahwa komponen struktur mengalami degradasi kekuatan struktur yang signifikan. Kurva yang melewati titik D menunjukkan bahwa kekuatan komponen struktur menurun hingga titik E di mana kurva yang melewati titik E adalah kondisi di mana struktur sudah tidak memiliki kekuatan untuk menahan beban.

Perkembangan teknologi yang semakin berkembang memungkinkan prosedur analisis

pushover pada struktur bangunan tinggi dilakukan pada perangkat lunak komputer seperti ETABS. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja seismik struktur Menara Sabilulungan 99 yang terletak di Kabupaten Bandung terhadap beban gempa secara analitis dengan metode analisis *pushover* menggunakan perangkat lunak komputer ETABS.

Metode

Beban gempa diperoleh dari kurva respons spektrum yang dibuat berdasarkan klasifikasi situs, periode panjang, dan parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa 2017 sesuai dengan SNI 1726:2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung.

Analisis modal dilakukan untuk mengetahui rasio partisipasi massa struktur ketika struktur bergetar akibat percepatan spektral tanah. Nilai rasio partisipasi massa *mode shape* ke- i diperoleh berdasarkan matriks *mode shape* ke- i ($\{\Phi\}_i$), matriks massa struktur ($[M]$), dan matriks arah eksitasi ($\{D\}$) seperti pada Persamaan 1.

$$M_{eff,i} = (\{\Phi\}_i^T [M] \{D\})^2 \quad (1)$$

Analisis struktur dilakukan dengan metode analisis nonlinear *pushover* berdasarkan acuan FEMA 440 dan FEMA 356 (2000). Kontrol pembebanan *pushover* dilakukan dengan *deformation-controlled* dengan pembebanan yang diberikan dibatasi hingga perpindahan atap mencapai 2% tinggi struktur. Seluruh komponen struktur yang tergolong ke dalam bagian sistem beban lateral dan beban gravitasi dimodelkan secara analitis pada perangkat lunak ETABS.

Pemodelan analitis dilakukan berdasarkan data gambar *as built drawing* agar struktur dapat direpresentasikan sesuai dengan keadaan sesungguhnya. Target perpindahan dihitung berdasarkan DCM di mana nilainya diperoleh berdasarkan nilai faktor modifikasi domain MDOF menjadi SDOF (C_0), faktor modifikasi untuk

mewakili efek bentuk histeresis pada respons perpindahan maksimum (C_2), faktor modifikasi untuk merepresentasikan peningkatan perpindahan akibat efek dinamis P- Δ (C_3), periode fundamental struktur (T_e), dan percepatan spektral saat periode T_e (S_a), dan percepatan gravitasi seperti pada Persamaan 2.

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

Kinerja struktur ditinjau berdasarkan hasil deformasi yang terjadi dalam analisis *pushover* yang dilakukan. Berdasarkan ATC-40, parameter yang digunakan untuk klasifikasi kinerja struktur adalah *maximum total drift* dan *maksimum inelastic drift*. Tingkat kinerja struktur berdasarkan parameter deformasi struktur dalam ATC-40 dimuat dalam Tabel 1. Berdasarkan FEMA 356, kinerja struktur juga dapat ditentukan berdasarkan nilai simpangan antar lantai (*story drift*) ketika struktur berdeformasi pada titik performanya. Kinerja struktur yang diperoleh kemudian akan disesuaikan pada *basic performance objective for existing buildings* dalam ASCE 41 seperti pada Tabel 2.

Gaya geser dasar akibat pergerakan tanah yang terjadi karena gempa dihitung berdasarkan nilai koefisien respons seismik (C_s) dan berat efektif seismik gedung (W) seperti pada Persamaan 3.

$$V = C_s W \quad (3)$$

Gaya geser dasar yang diperoleh kemudian akan terdistribusi secara merata untuk sehingga gaya geser tingkat (*story shears*) dapat diketahui dengan Persamaan 4.

$$V_j = \sum_{x=j}^n \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V \quad (4)$$

Berdasarkan data deformasi struktur yang diperoleh dari analisis *pushover*, daktilitas struktur dapat diketahui. Nilai daktilitas struktur dihitung berdasarkan rasio antara nilai deformasi ultimit struktur (Δ_u) dengan deformasi leleh struktur (Δ_y) seperti pada Persamaan 5.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (5)$$

Tabel 1. Kinerja struktur berdasarkan deformasi struktur dalam ATC-40

Batas pergeseran antar lantai	Level performa struktur (kinerja)			
	<i>Immidiata occupancy</i> (IO)	<i>Damagec control</i> (DC)	<i>Life safety</i> (LS)	<i>Structural stability</i>
<i>maximum total drift</i>	0,01	0,01 - 0,02	0,02	$0,03 \frac{V_i}{P_i}$
<i>maximum inelastic drift</i>	0,005	0,005 - 0,015	tidak ada batas	tidak ada batas

Total gaya geser lateral pada lantai ke- i (V_i). Total beban gravitasi pada lantai ke- i (P_i).
Sumber: ATC-30 (1996)

Tabel 2. Tujuan kinerja struktur untuk bangunan terbangun (basic performance objective for existing buildings) berdasarkan ASCE 41

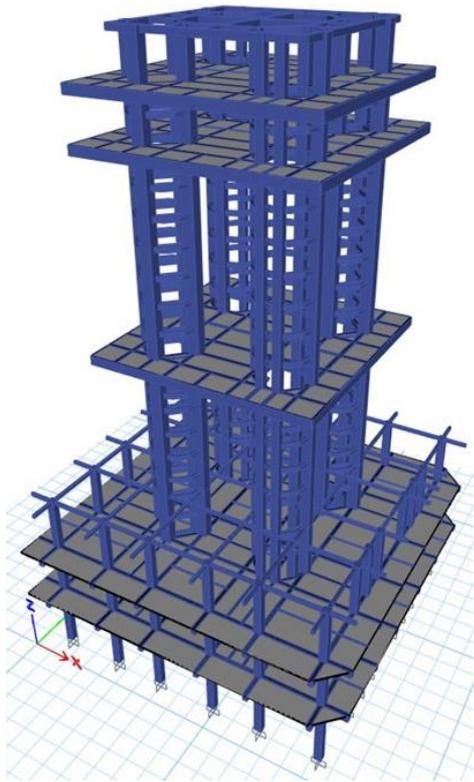
Risk category	BSE-1E	BSE-2E
I and II	Life safety Structural performance Life safety Nonstructural performance (3-C)	Collapse prevention Structural performance Hazards reduced Nonstructural performance ^a (5-D)
III	Damage control Structural performance Position retention Nonstructural performance (2-B)	Limited safety structural performance Hazards reduced Nonstructural performance ^a (4-D)
IV	Immediate occupancy Structural performance Position retention Nonstructural performance (1-B)	Life safety Structural performance Hazards reduced Nonstructural performance ^a (3-D)

^a Mematuhi ketentuan ASCE-7 untuk konstruksi baru dianggap sudah memenuhi syarat.

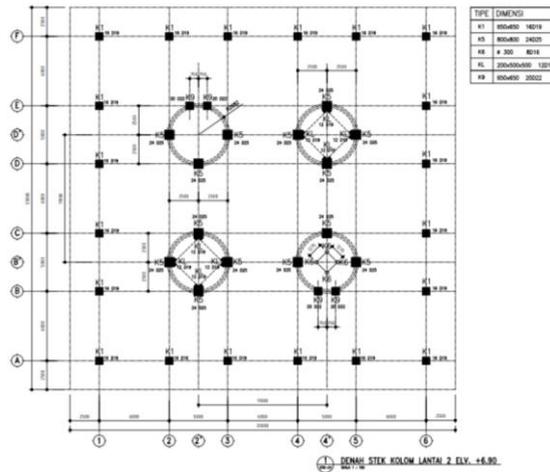
Sumber: ASCE 41 (2017)

Hasil dan Pembahasan

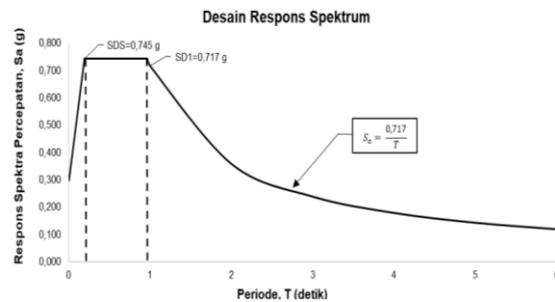
Struktur merupakan struktur simetris seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6. Hasil pemodelan analitis struktur yang dilakukan pada perangkat lunak ETABS dibagi menjadi dua jenis struktur yaitu struktur beton bertulang sebagai struktur utama seperti pada Gambar 6 dan struktur baja untuk struktur rangka atap seperti pada Gambar 7 dan Gambar 8. Reaksi perletakan yang diperoleh pada model analitis struktur atap baja dimasukkan sebagai beban mati tambahan pada model analitis struktur beton bertulang.



Gambar 6. Hasil pemodelan struktur beton



Gambar 7. Denah kolom struktur lantai 2



Gambar 8. Kurva respons spektrum

Bangunan ini memiliki letak koordinat -7.020544° garis lintang selatan dan 107.529557° garis bujur timur. Berdasarkan letak berdirinya struktur dan klasifikasi situs tanah pada lokasi tersebut nilai periode panjang (T_L) dan respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan (S_S) dan (S_1) dapat diketahui. Data SPT tanah yang menunjukkan menunjukkan bahwa klasifikasi situs pada lokasi tersebut adalah tanah lunak (SE) sehingga nilai S_S , S_1 , dan T_L pada lokasi tersebut adalah 1,0694 g, 0,4798 g, dan 20 detik. Berdasarkan

SNI 1726:2019, nilai parameter percepatan gempa wilayah Kabupaten Bandung dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter percepatan gempa

Parameter percepatan gempa		Nilai
Percepatan spektral	S_s	1,0694 g
	S_1	0,4798 g
Koefisien situs	F_a	1,0445
	F_v	2,2404
Percepatan desain	S_{DS}	0,7446 g
	S_{DI}	0,7166 g
Periode	T_0	0,1925 detik
	T_s	0,9624 detik
	T_L	20 detik
Kategori desain seismik		D

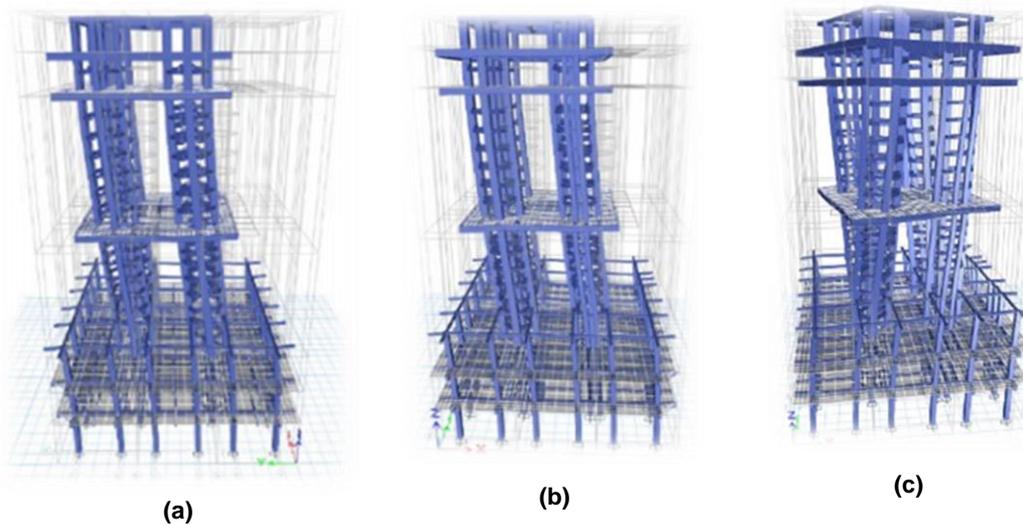
Analisis modal yang dilakukan pada perangkat lunak ETABS akan memberikan gambaran terhadap ragam getar pada struktur yang terbentuk dari beban dinamis gempa yang terjadi pada

struktur. Semakin banyak jumlah ragam getar yang terjadi pada struktur maka jumlah rasio partisipasi massa akan lebih mendekati nilai 100%.

Ragam getar pertama pada analisis modal menunjukkan bahwa struktur bertranslasi arah y, ragam getar kedua menyebabkan translasi arah x, dan ragam getar ketiga menyebabkan rotasi pada arah z. Sedang parameter rasio partisipasi massa menggambarkan seberapa besar massa struktur dapat mempengaruhi hasil analisis yang dilakukan sehingga semakin besar nilainya akan semakin baik (Suntoko 2019). Berdasarkan data pada Tabel 5, rasio partisipasi massa sudah mencapai nilai 90% pada mode ragam getar (*mode shape*) nomor 9 di mana pada *mode shape* tersebut jumlah rasio partisipasi massa pada arah x dan y adalah sebesar 94,6% dan untuk rotasi arah z memiliki jumlah rasio partisipasi massa sebesar 93,1%. Data pada *mode shape* pertama menunjukkan bahwa struktur dominan bergetar pada arah y. Selain itu, analisis modal pada struktur ini menunjukkan bahwa struktur memiliki periode sebesar 3,69 detik.

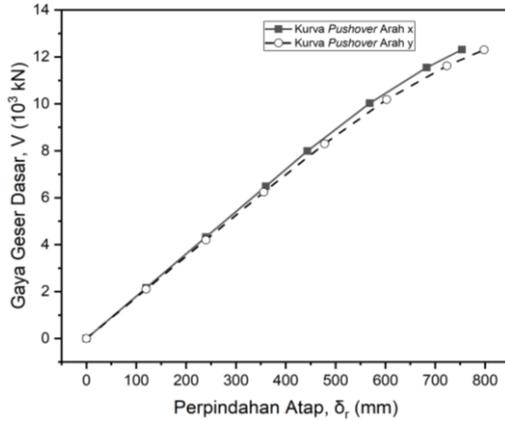
Tabel 4. Rasio partisipasi massa analisis modal

Mode	Periode (detik)	U_x	U_y	R_z	$\sum U_x$	$\sum U_y$	$\sum R_z$
1	3,6900	0,0001	0,5807	0,0007	0,0001	0,5807	0,0007
2	3,5750	0,5873	0,0001	0,0000	0,5874	0,5807	0,0007
3	2,6460	0,0000	0,0002	0,3994	0,5874	0,5810	0,4002
4	0,9990	0,0004	0,1830	0,0045	0,5878	0,7639	0,4047
5	0,9780	0,1901	0,0004	0,0004	0,7779	0,7643	0,4051
6	0,8400	0,0000	0,0013	0,3526	0,7779	0,7657	0,7577
7	0,6100	0,0029	0,0091	0,1511	0,7808	0,7748	0,9087
8	0,5880	0,0067	0,1666	0,0145	0,7875	0,9414	0,9233
9	0,5830	0,1584	0,0051	0,0080	0,9459	0,9465	0,9312
10	0,2500	0,0003	0,0018	0,0435	0,9462	0,9483	0,9747
11	0,2380	0,0187	0,0001	0,0004	0,9648	0,9484	0,9751
12	0,2360	0,0000	0,0049	0,0002	0,9649	0,9532	0,9753



Gambar 9. Mode getar translasi arah y (a) Mode getar translasi arah x (b) Mode getar rotasi arah z (c)

Hasil analisis *pushover* yang dilakukan dapat direpresentasikan sebagai suatu kurva antara gaya geser dasar (V) dan perpindahan atap (δ_r) pada arah x dan arah y. Kurva *pushover* arah x dan y dapat dilihat pada Gambar 11. Berdasarkan kurva tersebut dapat dilihat bahwa struktur tersebut memiliki nilai perpindahan atap (δ_r) yang lebih kecil pada arah x dibandingkan dengan arah y. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pembebanan yang sama, struktur dapat berdeformasi lebih jauh pada arah y.



Gambar 10. Kurva *Pushover*

Data hasil analisis *pushover* arah x pada Tabel 5 menunjukkan bahwa terdapat 4568 total sendi (*hinge*) yang tersebar pada komponen struktur. Data pada Tabel 5 menunjukkan bahwa sendi plastis yang terbentuk di mana terdapat 6 di antaranya merupakan sendi plastis yang terbentuk pertama kali yaitu ketika struktur mengalami perpindahan atap (δ_r) sejauh 443,29 mm. Selain itu, hasil analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa sendi yang terdapat pada komponen struktur belum melewati batas titik C.

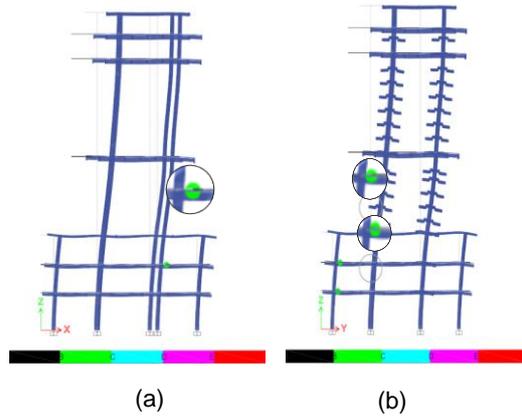
Di samping itu, data hasil *pushover* pada arah y seperti pada Tabel 6 menunjukkan bahwa sendi plastis pertama kali terbentuk ketika struktur mengalami perpindahan atap sejauh 355,94 mm. Jumlah sendi plastis yang dihasilkan dari analisis *pushover* arah y memiliki jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan arah x. Hal ini dikarenakan kekakuan pada arah y yang memiliki nilai yang lebih rendah sehingga menyebabkan struktur mengalami perpindahan atap yang lebih besar dan menyebabkan terbentuknya sendi plastis yang lebih banyak pada komponen struktur. Pembentukan sendi plastis *pushover* arah x dan y pada struktur dapat dilihat pada Gambar 12.

Tabel 5. Distribusi sendi plastis hasil *pushover* arah x

Tahapan	Perpindahan Atap, δ_r (mm)	Gaya Geser Dasar, V (kN)	Fase Sendi (<i>Hinge</i>)					Total
			A-B	B-C	A-IO	IO-LS	>CP	
0	0	0,00	4568	0	4568	0	0	4568
1	120	2162,66	4568	0	4568	0	0	4568
2	240	4325,31	4568	0	4568	0	0	4568
3	360	6487,97	4568	0	4568	0	0	4568
4	443,285	7988,94	4562	6	4568	0	0	4568
5	568,533	10033,53	4172	396	4566	0	2	4568
6	682,862	11551,25	3789	779	4561	1	6	4568

Tabel 6. Distribusi sendi plastis hasil *pushover* arah y

Tahapan	Perpindahan Atap, δ_r (mm)	Gaya Geser Dasar, V (kN)	Fase Sendi (<i>Hinge</i>)					Total
			A-B	B-C	A-IO	IO-LS	>CP	
0	0	0	4568	0	4568	0	0	4568
1	120,00	2102,11	4568	0	4568	0	0	4568
2	240,00	4204,22	4568	0	4568	0	0	4568
3	355,94	6235,13	4564	4	4568	0	0	4568
4	478,28	8304,30	4476	92	4568	0	0	4568
5	491,15	8510,20	4454	114	4568	0	0	4568
6	602,51	10189,15	4108	460	4568	0	0	4568
7	625,247	10489,34	3956	612	4568	0	0	4568
8	643,389	10716,98	3900	668	3900	0	0	4568
9	662,078	10946,15	3858	710	3858	0	0	4568
10	680,768	11167,32	3822	746	3822	0	0	4568
11	723,31	11617,02	3651	917	4568	0	0	4568
12	798,00	12303,08	3544	1024	4557	7	4	4568



Gambar 11. Sendi plastis pertama yang terbentuk pada *pushover* arah x (a) pada *pushover* arah y (b)

Sendi plastis yang terbentuk pada model analitis umumnya terjadi pada komponen struktur balok sehingga dapat diketahui bahwa komponen struktur kolom tersebut memiliki kekuatan nominal yang relatif lebih kuat dibandingkan dengan komponen balok. Menurut Wongpakdee dan Leelataviwat (2017), struktur didesain dengan komponen kolom yang lebih kuat dibandingkan dengan komponen balok dengan tujuan untuk mencegah terbentuknya sendi plastis pada komponen kolom sehingga struktur dapat berdeformasi inelastis lebih jauh. Sifat struktur tersebut dapat meningkatkan performa seismik struktur.

Hasil analisis *pushover* seperti yang terlihat pada Tabel 7 menunjukkan bahwa nilai target perpindahan pada masing - masing arah x dan arah y dapat diketahui. Target perpindahan yang diperoleh pada arah x adalah sebesar 596,36 mm dengan gaya geser dasar sebesar 10402,90 kN, sementara untuk arah y target perpindahan adalah sebesar 601,83 mm dengan gaya geser dasar sebesar 10178,88 kN.

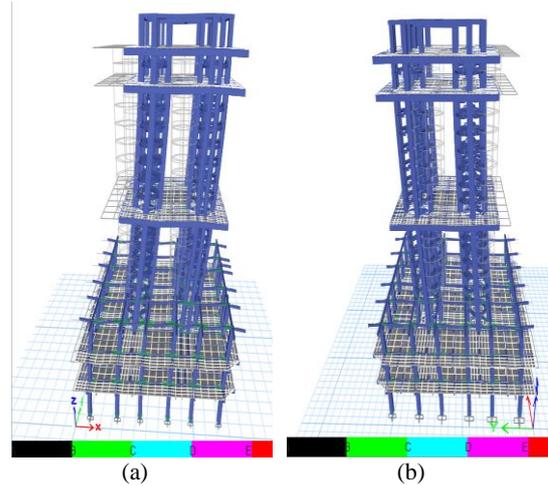
Tabel 7. Target perpindahan dengan metode DCM

Arah	Faktor Modifikasi			Periode Fundamental Efektif, T_e (detik)	Percepatan Spektra, S_a (g)	Gaya Geser Dasar, V (kN)	Target Perpindahan, δ_T (mm)
	C_0	C_1	C_2				
x	1,29	1	1	2,59	0,28	10402,89	596,36
y	1,29	1	1	2,63	0,27	10178,88	601,83

Tabel 8. Kinerja struktur berdasarkan ATC-40

Arah	Perpindahan Atap Inelastic, δ_y (mm)	Target Perpindahan Atap, δ_T (mm)	Maximum Inelastic Drift	Maximum Total Drift	Kinerja Struktur
x	443,29	596,36	0,006	0,01	LS
y	355,94	601,83	0,007	0,01	LS

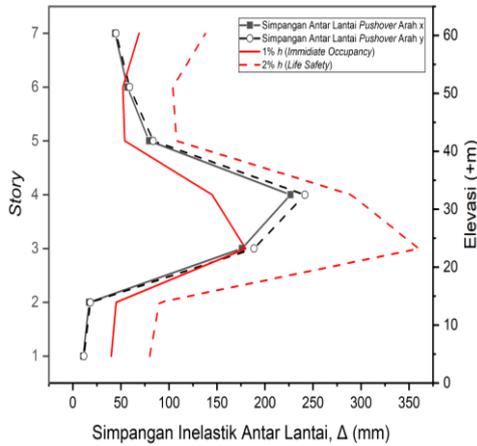
Kinerja struktur *Life Safety* (LS).



Gambar 12. Kondisi struktur pada target perpindahan atap arah x (a) Kondisi struktur pada target perpindahan atap arah y (b)

Data menunjukkan bahwa target perpindahan yang diperoleh pada arah x memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai target perpindahan pada arah y. Hal ini menunjukkan bahwa struktur ini memiliki kekakuan yang lebih baik pada arah dibandingkan dengan arah y sehingga target perpindahan pada arah x memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan target perpindahan arah y (Ruiz dan Gonzales 2014). Deformasi struktur pada arah x dan y pada target perpindahan atap dapat dilihat pada Gambar 13.

Struktur beton bertulang yang dianalisis memiliki elevasi maksimum atau ketinggian sebesar 58,5 m. Analisis *pushover* pada arah x dan y menunjukkan bahwa struktur mengalami titik leleh (*yield*) saat perpindahan atap struktur sebesar 443,29 mm pada arah x dan sebesar 355,94 mm pada arah y sehingga dapat diketahui masing-masing nilai maximum *inelastic drift* pada arah x dan y adalah sebesar 0,006 dan 0,007.



Gambar 13. Kurva simpangan inelastik antar lantai pada titik performa struktur

Di samping itu, target perpindahan pada arah x dan y yang sebesar 596,36 mm dan 601,83 mm menghasilkan nilai *maximum total drift* sebesar 0,01. Maka dari itu, dapat diketahui bahwa kinerja struktur ketika gempa terjadi adalah *life safety* (LS). Data untuk menentukan tingkat kinerja struktur dapat dilihat pada Tabel 8. Selain berdasarkan parameter simpangan maksimum struktur, menurut FEMA 356 kinerja struktur juga dapat dievaluasi berdasarkan batas deformasi simpangan inelastik

untuk setiap lantai pada struktur. Berdasarkan acuan tersebut untuk struktur beton bertulang, batas untuk kinerja *immediate occupancy* adalah sebesar 1% dari tinggi lantai, 2% dari tinggi lantai untuk kinerja *life safety*, dan 4% untuk kinerja *collapse prevention*.

Data simpangan antar lantai inelastik berdasarkan hasil analisis *pushover* arah x dan y pada saat titik performa struktur yang terdapat pada Tabel 9 menunjukkan bahwa pada lantai 3 hingga lantai 6 simpangan antar lantai telah melewati batas kinerja *immediate occupancy*. Di samping itu, simpangan antar lantai pada lantai 2, lantai 7, dan lantai 8 masih berada di bawah batas kinerja *immediate occupancy*. Maka dari itu, dapat diketahui bahwa struktur memiliki kinerja struktur *life safety* berdasarkan parameter deformasi struktur simpangan inelastik antar lantai yang terdapat pada FEMA 356. Kurva simpangan antar lantai dapat dilihat pada Gambar 15. Berdasarkan kurva yang diperoleh dapat diketahui bahwa simpangan antar lantai baik arah x ataupun arah y tidak ada yang melewati batas simpangan antar lantai *life safety* (2%) sehingga struktur memiliki kinerja *life safety*. Tingkat kinerja struktur dapat menunjukkan representatif kerusakan pada komponen struktur. Berdasarkan ATC-40, kerusakan komponen struktur pada kinerja *life safety* dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 9. Kinerja struktur berdasarkan FEMA 356

Story	h (mm)	Perpindahan		Simpangan		Drift limit (FEMA 356:2000)			
		δ_x	δ_y	Δ_x	Δ_y	IO, 1%	LS, 2%		
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
7	4000	609,99	647,23	10,68	11,4	40	✓	80	✓
6	4500	599,31	635,79	16,86	18,2	45	✓	90	✓
5	18000	582,45	617,56	175,91	188,5	180	×	360	✓
4	14500	406,55	429,06	226,56	241,5	145	×	290	✓
3	5400	179,99	187,52	79,29	83,5	54	×	108	✓
2	5200	100,70	103,99	56,75	59,1	52	×	104	✓
1	6900	43,94	44,87	43,94	44,9	69	✓	138	✓

✓: nilai simpangan di bawah batas *drift limit*. ×: nilai simpangan melebihi batas *drift limit*.

Ketinggian setiap lantai (h). Tingkat kinerja *immediate occupancy* (IO). Tingkat kinerja *life safety* (LS).

Tabel 10. Deskripsi kerusakan pada komponen struktur pada kinerja life safety

Komponen struktur	Deskripsi kerusakan (Life safety performance)
Kolom	Sendi plastis telah terbentuk di bagian bawah bangunan, menyebabkan keretakan di atas dan di bawah sambungan balok-kolom. Perpindahan horizontal permanen mendekati 2,0% simpangan antar lantai dengan area kecil sedikit lebih tinggi. Kapasitas untuk menahan beban gravitasi tetap terjaga.
Balok	Kerusakan permukaan di sekitar daerah sendi plastis dan sambungan balok kolom. Retak lentu dan geser di daerah sendi plastis berkembang menuju sambungan balok kolom. Perpanjangan sengkang geser di sekitar sambungan. Defleksi permanen mendekati L/175. Kapasitas untuk menahan beban gravitasi tetap terjaga.
Slab	Retakan di sekitar sambungan balok-kolom atau penyangga lainnya. Kapasitas gravitasi tetap terjaga.

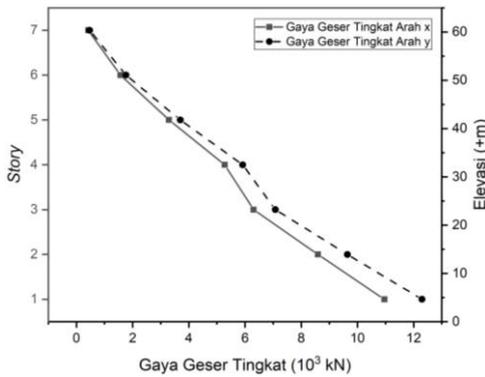
Sumber: dimodifikasi dari ATC-40 (1996).

Tabel 11. Gaya geser tingkat ketika struktur mulai mengalami keruntuhan (>CP)

No.	Tingkat Struktur	Elevasi FFC (m)	Gaya Geser Tingkat (kN)	
			Arah x	Arah y
1	top ringbalk	+58,5	422,18	473,67
2	balkon BTS	+54,5	1572,28	1764,05
3	ruang pantau	+50,0	3297,61	3699,82
4	lantai <i>refugee</i>	+32,0	5276,96	5920,59
5	ringbalk	+17,5	6306,75	7078,92
6	lantai 3	+12,0	8594,19	9645,37
7	lantai 2	+6,9	10961,01	12300,87

Kerusakan pada komponen struktur umumnya ditunjukkan pada sendi plastis yang terbentuk berdasarkan hasil analisis nonlinear yang dilakukan pada perangkat lunak ETABS.

Analisis *pushover* dilakukan dengan memberikan beban lateral yang terdistribusi seperti pada pusat massa setiap lantai sehingga perpindahan atap dapat diketahui pada setiap peningkatan gaya lateral yang diberikan. Beban lateral yang diberikan akan menghasilkan gaya geser pada setiap lantai (gaya geser tingkat). Hasil analisis *pushover* menunjukkan bahwa gaya geser dasar ketika struktur mulai mengalami keruntuhan adalah ketika struktur telah melewati batas *collapse prevention* (CP). Hasil analisis *pushover* pada arah x memiliki nilai gaya geser dasar sebesar 10033,53 kN, sedangkan pada analisis *pushover* arah y adalah sebesar 12303,08 kN. Distribusi gaya geser antar tingkat dimuat pada Gambar 15.



Gambar 14. Distribusi gaya geser tingkat ketika struktur mulai runtuh (>CP)

Gaya geser dasar tersebut kemudian akan terdistribusikan pada komponen struktur pada setiap lantainya. Menurut Oh dan Jeon (2014), nilai gaya geser dasar yang terdistribusikan pada setiap lantai akan memiliki nilai yang lebih rendah seiring bertambahnya tinggi lantai dikarenakan jumlah energi yang diserap oleh komponen struktur akan semakin besar pada bagian bawah struktur. Nilai gaya geser tingkat dimuat pada Tabel 11. Nilai daktilitas struktur diperoleh berdasarkan nilai rasio

perbandingan antara perpindahan maksimum (*ultimit limit state*) dan perpindahan yang terjadi ketika titik leleh (*yield limit state*). Menurut (Yahya *et al.* 2022), suatu struktur dengan daktilitas yang baik maka struktur tersebut dapat mencegah keruntuhan dengan berdeformasi lebih jauh.

Data hasil *pushover* menunjukkan bahwa struktur mengalami titik leleh ketika perpindahan telah mencapai 443,28 mm pada arah x dan 355,94 mm pada arah y. Di samping itu, struktur mengalami perpindahan ultimit pada arah x sebesar 753,78 mm pada arah x dan 798 mm pada arah y. Nilai daktilitas struktur memiliki korelasi dengan parameter kekakuan serta kekuatan nominal struktur. Struktur yang memiliki kekuatan nominal yang baik dan memiliki kekakuan yang optimal dapat memiliki nilai daktilitas yang semakin besar (Zhou *et al.* 2014). Perhitungan daktilitas struktur ditampilkan sebagai berikut:

Daktilitas Arah x

$$\mu = \frac{\Delta u_x}{\Delta y_x} = \frac{753,78 \text{ mm}}{443,28 \text{ mm}} = 1,70 \quad (12)$$

Daktilitas Arah y

$$\mu = \frac{\Delta u_y}{\Delta y_y} = \frac{798,00 \text{ mm}}{355,94 \text{ mm}} = 2,24 \quad (13)$$

Berdasarkan FEMA 356, tingkat daktilitas struktur dapat diklasifikasikan menjadi 3 kategori yaitu *low ductility demand*, *moderate ductility demand*, dan *high ductility demand*. Klasifikasi nilai daktilitas struktur berdasarkan FEMA 356 dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Klasifikasi tingkat daktilitas struktur

Displacement ductility, μ	Deskripsi
< 2	<i>low ductility demand</i>
2-4	<i>moderate ductility demand</i>
> 4	<i>high ductility demand</i>

Sumber: FEMA 356 (2000)

Berdasarkan Tabel 12 dapat diketahui bahwa struktur memiliki daktilitas yang rendah pada arah

x dan daktilitas yang sedang pada arah y. Hal ini dikarenakan struktur memiliki kekakuan yang lebih baik pada arah x sehingga deformasi yang terjadi semakin rendah dan nilai daktilitasnya juga semakin rendah.

Kesimpulan

Analisis modal berdasarkan SNI 1726:2019 menunjukkan bahwa struktur telah mencapai jumlah rasio partisipasi massa di atas 90% pada ragam getar ke 9 dengan jumlah rasio partisipasi massa pada translasi arah x dan y sebesar 94,6%, sementara rotasi arah z sebesar 93%. Berdasarkan analisis *pushover* nilai target perpindahan dengan metode DCM diperoleh pada arah x sebesar 596,36 mm dengan gaya geser dasar sebesar 10402,90 kN, sementara untuk arah y target perpindahan adalah sebesar 601,83 mm dengan gaya geser dasar sebesar 10178,88 kN. Berdasarkan batas deformasi dalam ATC-40 dan FEMA 365 dengan menggunakan parameter deformasi struktur, tingkat kinerja struktur yang diperoleh merupakan *Life Safety* dan masih sesuai dalam *Basic Performance Objective for Existing Buildings* ASCE 41 di mana struktur dengan kategori risiko II harus memiliki kinerja *Life Safety*. Nilai daktilitas pada arah x 1,70 dan arah y 2,24 sehingga berdasarkan FEMA 440 struktur memiliki daktilitas yang rendah pada arah x dan daktilitas sedang pada arah y.

Daftar Pustaka

ASCE 41. (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers, Virginia.

ATC-40. (1997). *Seismic evaluation and retrofit of concrete building (Volume 1)*. Applied Technology Council, California.

Badan Standarisasi Nasional. (2019). *SNI 1726-2019 : Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung*. BSN, Jakarta.

FEMA 356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

FEMA 440. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

Nahavandi, H. (2015). Pushover analysis of retrofitted reinforced concrete buildings. *Civil and Environmental Engineering Master's Project Reports*. 21.

Oh S. H., & Jeon, J. (2014). A study on optimum distribution of story shear force coefficient for seismic design of multi-story structure. *International journal of high-rise buildings*. 3(2):121-145.

Ruiz-García, J., & González, E.J. (2014). Implementation of Displacement Coefficient method for seismic assessment of buildings built on soft soil sites. *Engineering structures*. 59:1-12.

Soehaimi, A. (2008). Seismotektonik dan potensi kegempaan wilayah Jawa. *Indonesian Journal on Geoscience*. 3(4):227-240.

Suntoko, H. (2019). Analisis Spektrum Respon Desain Gedung Reaktor RDE Menggunakan SAP2000. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*. 21(1):1-7.

Suwondo, R., Mangindaan, D., Cunningham, L., & Alama, S. (2021). Non-linear analysis of seismic performance of low-rise concrete buildings in Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 794(1):12-24.

The Council on Tall Buildings and Urban Habitat (2023). *Countries by Number of 150m+ Buildings Database*. Retrieved Des 21, 2023, <https://www.skyscrapercenter.com/countries>

Tim Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.

Wongpakdee, N. and Leelataviwat, S. (2017). Influence of column strength and stiffness on the inelastic behavior of strong-column-weak-beam frames. *Journal of Structural Engineering*. 143(9): 1-11.

Yahya P.A.E., Faizal A.B.P., & Setiyawan P. (2022). Asesmen dan analisa gedung eksisting (Studi Kasus Bangunan Johar Shopping Center Semarang). *J. Ilm. Sultan Agung*. 1(1):176-204.

Yanto, N., Imani, R. & Andika, Z. (2019). Evaluasi kinerja struktur gedung Rumah Sakit Paru Sumatera Barat dengan pushover analysis. *Civil Engineering Collaboration*, 4(2):1-9.

Zhou J., He, F., Liu, T. (2014). Curvature ductility of columns and structural displacement ductility in RC frame structures subjected to ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 63:174-183.