

ANALISIS PERBANDINGAN KINERJA SEISMIK GEDUNG BETON BERTULANG DENGAN *SETBACK*: ANALISIS *PUSHOVER* VS. *TIME HISTORY* NONLINIER

1) Mutia Amalia Safitri, 2*) Eka Juliafad, 3) Fajri Yusmar, 4) Yose Fajar Pratama
1,2,3,4) Jurusan S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
1) mutiamalia04@gmail.com, 2) ekajuliafad@ft.unp.ac.id, 3) fajriyusmar@ft.unp.ac.id,
4) yose@unp.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima : 27 April 2026

Disetujui : 6 Mei 2026

Kata Kunci:

kinerja seismik, struktur *setback*, analisis *pushover*, analisis *time history*, sendi plastis, level kinerja

ABSTRAK

Bangunan berkonfigurasi *setback*, yakni struktur dengan kemunduran dimensi denah pada elevasi tertentu yang memicu diskontinuitas kekakuan vertikal, sangat rentan terhadap efek ragam getar tinggi di daerah rawan gempa seperti Kota Padang. Meskipun pedoman SNI 1726:2019 mensyaratkan analisis dinamik untuk kasus ketidakberaturan ini, praktik di lapangan sering kali masih mengandalkan Analisis *Pushover*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi keandalan Analisis *Pushover* dibandingkan dengan Analisis *Time History* Nonlinier (NTHA) pada struktur eksisting Hotel di Padang. Pemodelan numerik 3D dieksekusi menggunakan perangkat lunak ETABS dengan mengaplikasikan 11 pasang rekaman gempa historis yang diskalakan terhadap spektrum lokal. Parameter evaluasi meliputi perpindahan atap, simpangan antar-lantai (*drift*), dan tingkat kinerja berdasarkan pedoman FEMA 356. Hasil analisis mengungkapkan bahwa Analisis *Pushover* memprediksi perpindahan atap yang ekuivalen dengan respons puncak NTHA, dengan rasio magnitudo sebesar 1,09 pada arah X dan 0,94 pada arah Y. Meskipun selisih perpindahan global relatif kecil, Analisis *Pushover* memberikan evaluasi kinerja yang lebih konservatif dengan menempatkan struktur pada level *Life Safety* (LS). Sebaliknya, NTHA mengonfirmasi bahwa berdasarkan rata-rata respons dinamik, struktur aktual masih memenuhi kriteria level *Immediate Occupancy* (IO) serta mampu memetakan dinamika fluktuasi simpangan antar-lantai secara lebih mendetail. Kesimpulannya, meskipun Analisis *Pushover* mampu mengestimasi target perpindahan global secara memadai, metode ini memiliki keterbatasan dalam mengakomodasi distribusi kerusakan lokal akibat pengaruh ragam getar tinggi. Oleh karena itu, penerapan metode dinamik nonlinier direkomendasikan untuk memperoleh penilaian kinerja seismik yang lebih representatif pada gedung berkonfigurasi *setback*.

ARTICLE INFO

Article History:

Received : Apr 27, 2026

Accepted : May 6, 2026

Keywords:

seismic performance, *setback* structure, *pushover* analysis, *time history* analysis, plastic hinge, performance level

ABSTRACT

Setback buildings, characterized by a reduction in floor plan dimensions at certain elevations that triggers vertical stiffness discontinuity, are highly susceptible to higher mode effects in earthquake-prone areas such as Padang City. Although the SNI 1726:2019 guidelines mandate dynamic analysis for such irregularities, field practices often still rely on static Pushover Analysis. This study aims to evaluate the reliability of Pushover Analysis compared to Nonlinear Time History Analysis (NTHA)

on an existing hotel structure in Padang. 3D numerical modeling was executed using ETABS software by applying 11 pairs of historical earthquake records scaled to the local spectrum. Evaluation parameters include roof displacement, inter-story drift, and performance levels based on FEMA 356 guidelines. The analysis results reveal that Pushover Analysis predicts roof displacements equivalent to the peak NTHA responses, with magnitude ratios of 1.09 in the X-direction and 0.94 in the Y-direction. Despite the comparable global displacements, Pushover Analysis yields a more conservative performance evaluation by categorizing the structure at the Life Safety (LS) level. Conversely, NTHA confirms that based on average dynamic responses, the actual structure still meets the criteria for the Immediate Occupancy (IO) level and is capable of mapping the dynamic fluctuations of inter-story drift in greater detail. In conclusion, while Pushover Analysis can adequately estimate global target displacements, the method has limitations in accommodating local damage distribution due to higher mode effects. Therefore, the application of the nonlinear dynamic method is recommended to obtain a more representative seismic performance assessment for setback buildings.

1. PENDAHULUAN

Kondisi geografis Indonesia yang berada pada lintasan Cincin Api Pasifik (*Pacific Ring of Fire*) menjadikannya sebagai salah satu kawasan dengan aktivitas seismik tertinggi di dunia. Pertemuan lempeng tektonik Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik menyebabkan hampir seluruh wilayah negara ini memiliki risiko gempa yang besar. Oleh sebab itu, merancang bangunan di Indonesia tidak bisa lagi sekadar mengandalkan kekuatan material (*strength*), tetapi juga harus memperhatikan ketersediaan kapasitas disipasi energi (*ductility*) guna menghindari keruntuhan total. Peristiwa gempa di Palu dan Lampung mengindikasikan bahwa bangunan tanpa desain penahan gempa yang baik sangat mudah mengalami kerusakan struktural (Putra Usman dkk., 2021). Hal ini menegaskan bahwa evaluasi level kinerja struktur merupakan fokus utama dalam perencanaan teknik sipil masa kini.

Kota Padang merupakan salah satu daerah dengan kerawanan gempa tertinggi di Indonesia karena posisinya yang berbatasan langsung dengan zona subduksi Mentawai di pesisir barat Sumatera. Kajian *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* membuktikan besarnya ancaman tersebut melalui nilai *Peak Ground Acceleration* yang sangat tinggi di area Mentawai (Rajif & Syafriani, 2021). Potensi bahaya ini beresiko meningkat akibat karakteristik tanah lokal

Padang yang rawan mengalami amplifikasi guncangan (Putri dkk., 2023). Fakta historis gempa bumi tahun 2009 telah mengonfirmasi tingginya risiko seismik ini (Juliafad & Gokon, 2022), sehingga menuntut penerapan standar perancangan yang ketat serta prosedur evaluasi struktur yang komprehensif. Berdasarkan catatan Badan Nasional Penanggulangan Bencana pada gempa 30 September 2009 silam, lebih dari 114.000 struktur rusak parah yang melumpuhkan berbagai fasilitas umum maupun komersial (Bappenas, 2009).

Ditinjau dari tipologi strukturnya, keruntuhan yang paling parah pada fasilitas di Padang justru banyak dialami oleh gedung tingkat menengah (*mid-rise building*) dibandingkan gedung pencakar langit. Kondisi ini dipicu oleh periode getar alami struktur tingkat menengah yang sering kali beresonansi dengan periode dominan getaran tanah di wilayah tersebut, sementara perancangannya jarang melibatkan analisis dinamik lanjutan. Mengingat jumlah bangunan tipologi ini sangat mendominasi kawasan perkotaan, kerusakannya dapat memicu kerugian material dan korban yang luar biasa besar. Dengan demikian, penilaian kinerja struktur saat terkena gempa menjadi langkah yang krusial, terlebih lagi dengan maraknya tren arsitektur modern yang memanfaatkan bentuk kemunduran denah

vertikal atau *setback* (Nady dkk., 2022; Zuher dkk., 2023).

Desain bangunan tahan gempa menghadapi tantangan ganda, yaitu dari besarnya gaya seismik itu sendiri serta dari pengaruh dinamik akibat kompleksitas respons dinamik akibat iregularitas arsitektural. Investigasi pasca-gempa oleh *Earthquake Engineering Research Institute* menemukan bahwa sebagian besar keruntuhan gedung komersial di Padang disebabkan oleh ketidakberaturan susunan vertikal (EERI, 2009). Menurut standar SNI 1726:2019, model *setback* masuk ke dalam kategori Ketidakberaturan Geometri Vertikal Tipe 3, di mana dimensi sistem penahan gaya gempa pada suatu lantai melebihi 130% dari dimensi lantai di dekatnya. Lonjakan dimensi ini memicu perbedaan kekakuan lateral antar-lantai yang signifikan, yang membuat perilaku struktur beralih dari dominasi ragam getar pertama menjadi respons dinamik rumit akibat pengaruh ragam getar tingkat tinggi (*higher mode effects*). Dinamika ini berpotensi memicu konsentrasi tegangan dan lonjakan simpangan antar-lantai dan puntiran yang sulit diprediksi jika hanya memakai analisis dasar (Fitrah dkk., 2021; Tarigan dkk., 2024).

Pendekatan linier dinilai tidak memadai dalam mengevaluasi respons gedung *setback* saat terjadi gempa kuat. Oleh karena itu, pendekatan nonlinier seperti Analisis *Pushover* lebih sering dimanfaatkan oleh praktisi karena komputasinya yang efisien. Metode ini mendorong struktur secara bertahap untuk menghasilkan kurva kapasitas (hubungan gaya geser dasar dan simpangan) guna menakar tingkat kekuatan dan daktilitas global struktur (Zuher dkk., 2023). Keunggulan lainnya adalah kemampuannya memetakan urutan pembentukan sendi plastis (*plastic hinges*) guna memverifikasi prinsip desain kapasitas, yaitu kolom kuat balok lemah (*strong column-weak beam*). Walaupun demikian, validitas hasil metode statik ini amat dipengaruhi asumsi distribusi beban lateral yang tetap, sehingga sering kali gagal menangkap distribusi gaya geser pada gedung berkarakteristik dinamik kompleks yang memiliki target perpindahan (*target displacement*) tertentu (Bush dkk., 2022; Tarigan dkk., 2024).

Sebaliknya, Analisis *Time History* dipandang jauh lebih presisi lantaran memperhitungkan respons dinamik struktur terhadap jejak akselerogram riil secara terintegrasi terhadap waktu. Metode dinamik ini secara natural mampu merekam respons siklik bolak-balik serta pengaruh ragam getar tinggi yang umumnya memicu simpangan ekstrem pada lantai transisi *setback* yang umumnya memicu simpangan ekstrem yang tidak terbaca oleh prosedur statik (Askouni & Papagiannopoulos, 2021; Katsimpini & Papagiannopoulos, 2023). Meskipun dinilai sangat andal, Analisis *Time History* menuntut sumber daya komputasi yang masif, waktu eksekusi yang lama, serta proses penyekalaan rekaman gempa (*spectral matching*) yang cermat agar sesuai dengan spektrum lokal. Oleh karena itu, metode dinamik ini amat ideal difungsikan sebagai tolok ukur tolok ukur acuan (*benchmark*) terhadap respons dinamik keseluruhan yang mencakup perpindahan maksimum, mekanisme perambatan kerusakan pada sendi plastis, hingga pola simpangan antar-lantai yang terjadi.

Mengacu pada risiko bahaya Ketidakberaturan Tipe 3, peraturan SNI 1726:2019 telah memberikan batasan tegas terkait pemakaian Analisis Gaya Lateral Ekuivalen dan mengharuskan perencana untuk minimal memakai metode dinamik. Akan tetapi, literatur menunjukkan adanya kesenjangan, di mana banyak desain masih bertumpu pada Analisis *Pushover* dengan alasan efisiensi komputasi (Maulana dkk., 2025; Rodríguez dkk., 2024). Bertolak dari permasalahan tersebut, studi ini dilakukan menggunakan perangkat lunak ETABS untuk mengevaluasi komparasi kinerja struktur eksisting bertingkat menengah yang memiliki bentuk *setback* di wilayah Padang. Studi komparatif antara Analisis *Pushover* dan Analisis *Time History* ini difokuskan pada deviasi target perpindahan, perbedaan pola penyebaran sendi plastis, serta dampaknya terhadap simpangan antar-lantai guna penentuan level kinerja seismik mengacu pada standar FEMA 356.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui metode studi komparatif

berbasis simulasi numerik. Evaluasi difokuskan pada perilaku inelastis struktur gedung beton bertulang yang memiliki ketidakberaturan vertikal atau *setback*. Model struktur dibangun berdasarkan konfigurasi denah Hotel Amaris Padang yang didesain ulang (*redesign*) sebagai bangunan baru guna memenuhi standar peraturan terbaru. Simulasi ini ditujukan untuk membandingkan reliabilitas metode statik nonlinier dengan metode dinamik nonlinier pada model dan parameter penelitian ini.

2.1 Pengumpulan data dan validasi model

Berdasarkan alur penelitian tersebut, tahapan operasional diawali dengan studi literatur dan dilanjutkan dengan pengumpulan data. Data yang dihimpun berfokus pada tiga komponen utama, yaitu data geometri (berbasis denah Hotel Amaris 9 lantai dengan total tinggi 32,2 meter), properti material struktural, serta parameter gempa spesifik lokasi berupa Kelas Situs SE (Tanah Lunak) dengan parameter spektrum desain $S_s = 1,19$ g dan $S_1 = 0,57$ g. Seluruh data tersebut kemudian diinput ke dalam perangkat lunak CSI ETABS untuk membangun model struktur 3D bangunan eksisting. Dalam pemodelan ini, elemen struktur didesain ulang mengikuti ketentuan SNI 2847:2019 guna mendapatkan konfigurasi penulangan yang sesuai untuk bangunan baru. Setelah model selesai dibangun, tahapan krusial yang harus dilewati adalah validasi model untuk memastikan perilaku awal struktur telah representatif.

2.2. Permodelan sendi plastis dan prosedur analisis

Begitu model memenuhi kriteria validasi, langkah berikutnya adalah permodelan sendi plastis pada elemen struktur. Tahapan ini sangat penting untuk mendefinisikan batas perilaku inelastis material, di mana sendi plastis dimodelkan secara diskrit menggunakan tipe Auto-Hinge yang ditempatkan pada jarak relatif 0,1 dan 0,9 dari panjang elemen berdasarkan pedoman FEMA 356 (tipe M3 untuk elemen lentur balok dan P-M2-M3 untuk interaksi aksial-lentur kolom). Selanjutnya, prosedur analisis dipecah menjadi dua jalur yang dieksekusi secara paralel. Pada jalur pertama, Analisis *Pushover* dilakukan secara langsung pada model yang telah memiliki sendi plastis.

Sementara itu pada jalur kedua, peneliti melakukan pemilihan 11 pasang rekaman gempa historis. Rekaman akselerogram tersebut diselaraskan menggunakan perangkat lunak SeismoMatch melalui metode *Time-Domain Spectral Matching* pada rentang periode 0,2T hingga 1,5T sesuai kriteria penskalaan SNI 1726:2019. Beban dinamik ini kemudian diaplikasikan dalam eksekusi Analisis *Time History* dengan asumsi redaman sebesar 5% pada ragam dominan.

2.3. Ekstraksi hasil dan komparasi kinerja

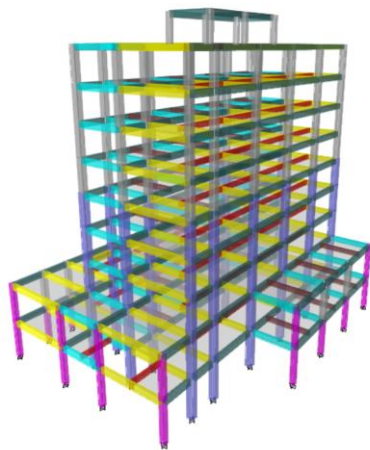
Pelaksanaan kedua analisis nonlinier tersebut dilanjutkan dengan ekstraksi data yang menitikberatkan pada tiga parameter evaluasi utama. Ketiga parameter tersebut mencakup perpindahan atap, mekanisme sendi plastis, serta penentuan level kinerja struktur berdasarkan batasan simpangan antar-lantai (*drift*) menurut FEMA 356, yaitu *Immediate Occupancy* (IO) untuk *drift* < 1%, *Life Safety* (LS) untuk *drift* < 2%, dan *Collapse Prevention* (CP) untuk *drift* < 4%. Seluruh data respons struktur tersebut kemudian dikaji secara komprehensif guna mengukur tingkat akurasi masing-masing metode analisis. Tahapan paling akhir dari alur penelitian ini adalah penarikan kesimpulan dan saran berdasarkan sintesis komparasi yang telah diuraikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil simulasi numerik kinerja seismik model gedung berbasis denah Hotel Amaris Padang yang memiliki ketidakberaturan vertikal tipe *setback*. Sesuai dengan tujuan penelitian, pembahasan difokuskan pada interpretasi respons inelastis struktur serta komparasi antara metode statik dan dinamik pada parameter penelitian ini

3.1. Karakteristik dan Validasi Model Struktur

Pemodelan struktur 3D Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dieksekusi menggunakan perangkat lunak ETABS. Visualisasi pemodelan numerik tersebut, yang secara jelas memperlihatkan konfigurasi ketidakberaturan vertikal (*setback*) bangunan, disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pemodelan numerik 3D model gedung berbasis denah Hotel Amaris

Berdasarkan evaluasi awal terhadap model tersebut, dilakukan penetapan dimensi penampang dan perhitungan kebutuhan tulangan (*redesign*) sesuai dengan prosedur desain kapasitas guna memenuhi kriteria bangunan tahan gempa baru menurut SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Spesifikasi akhir elemen struktur yang digunakan sebagai input analisis disajikan pada Tabel 1.

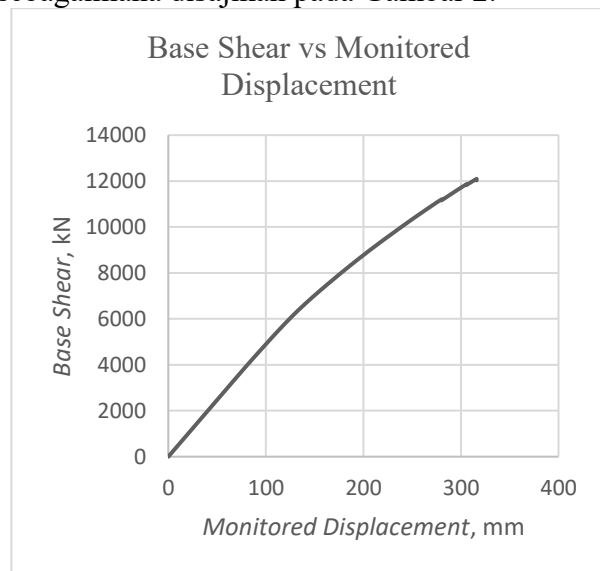
Tabel 1. Spesifikasi material dan dimensi elemen struktur utama gedung

Elemen Struktur	Dimensi
Mutu Beton (f_c)	30 MPa
Mutu Baja (f_y)	420 MPa
Kolom	K1 (700 x 700 mm)
	K2 (600 x 600 mm)
	K3 (500 x 500 mm)
Balok	B1 (400 x 600 mm)
	B2 (400 x 600 mm)
	B3 (400 x 600 mm)
	BA1 (300 x 500 mm)
	BA2(300 x 500 mm)
Pelat	L 1-9 (120 mm)
	L atap (100 mm)

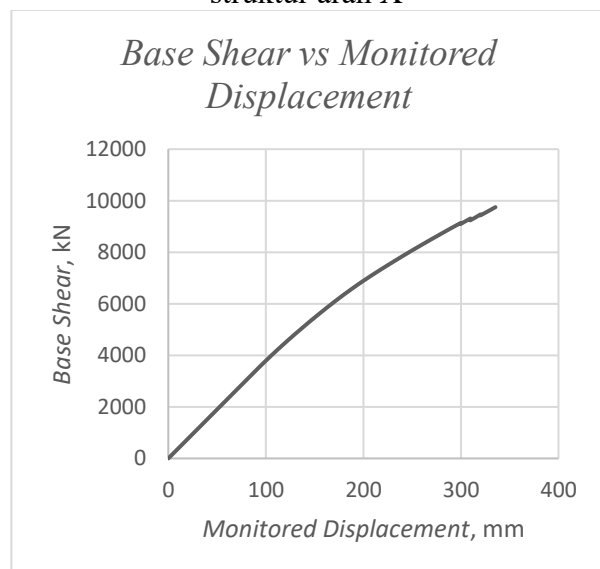
Sebelum analisis nonlinier dilakukan, model telah divalidasi secara linier berdasarkan persyaratan SNI 1726:2019 Hal ini dilakukan untuk menjamin bahwa model telah stabil dan representatif terhadap perilaku struktur rencana. Hasil analisis modal mengonfirmasi bahwa partisipasi massa telah melampaui 90%, dengan translasi dominan pada ragam-ragam awal, memastikan model terhindar dari mode torsi prematur.

3.2. Analisis *Pushover* Nonlinier

Analisis *Pushover* dilakukan dengan memberikan beban lateral monotonik bertahap hingga mencapai target perpindahan yang ditetapkan. Output utama dari analisis ini adalah Kurva Kapasitas yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan perpindahan titik kontrol (*monitored displacement*) yang terekam pada setiap tahapan pembebanan (*step analysis*). Mengingat konfigurasi denah yang asimetris akibat *setback*, dorongan monotonik dieksekusi pada dua arah ortogonal (X dan Y) secara terpisah untuk memetakan perbedaan kekakuan lateral struktur, sebagaimana disajikan pada Gambar 2.

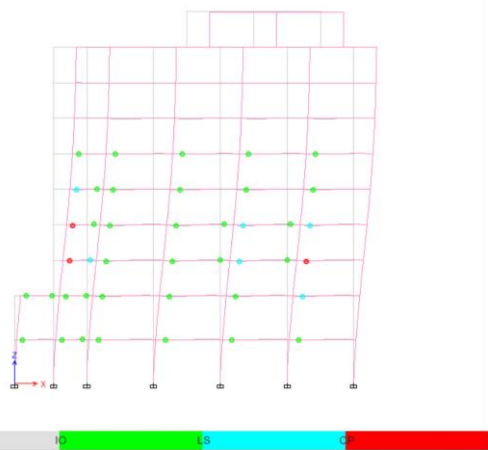


Gambar 2. Kurva kapasitas (*capacity curve*) struktur arah X



Gambar 3. Kurva kapasitas (*capacity curve*) struktur arah Y

Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3, model struktur rencana menunjukkan perilaku daktail pada kedua arah sebelum mencapai batas keruntuhan. Kurva kapasitas tersebut merekam peningkatan gaya dan deformasi secara bertahap, di mana perpindahan maksimum pada titik kontrol tercatat sebesar 347,625 mm untuk arah X dan 335,373 mm untuk arah Y pada tahapan (*step*) terakhir. Saat struktur mencapai target perpindahan tersebut, sebaran kerusakan dipantau melalui mekanisme sendi plastis yang terbentuk pada elemen rangka sebagaimana ditampilkan secara visual pada Gambar 4.



Gambar 4. Pola distribusi dan level kinerja sendi plastis pada simpangan target *Pushover*

3.3. Analisis *Time History Nonlinear*

Struktur dievaluasi menggunakan sebelas pasang rekaman akselerogram gempa historis. Pemilihan gempa didasarkan pada parameter deagregasi Kota Padang yang mencakup magnitudo target (M_w), jarak ke sumber (R), dan kecepatan gelombang geser tanah (V_s) merujuk pada Buku Peta Deagregasi Bahaya Gempa Indonesia (Pusgen). Kondisi situs pada lokasi penelitian diklasifikasikan sebagai Tanah Lunak (SE) dengan nilai $V_s < 175$ m/s untuk periode ulang 2500 tahun. Berdasarkan hasil analisis deagregasi pada spektrum desain target, parameter pemilihan gempa ditetapkan sesuai dengan tiga sumber ancaman utama sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Target Deagregasi Pemilihan Gempa untuk Kota Padang

Sumber Gempa	Magnitudo (M_w)	Jarak (R) (km)
Shallow Crustal	6,4 – 6,6	30 - 40
Benioff	7,2 – 7,4	80 - 100
Megathrust	8,6 – 8,8	80 - 100

Berdasarkan hasil deagregasi tersebut, terpilih 11 rekaman gempa historis yang dinilai representatif terhadap karakteristik seismik di lokasi penelitian. Mengingat rincian data yang cukup komprehensif, informasi rekaman gempa disajikan secara sistematis dalam dua bagian guna menjaga keterbacaan pada naskah. Tabel 3 memuat identitas dan sumber rekaman gempa, sedangkan parameter seismik spesifik yang menjadi dasar input pemodelan dirangkum dalam Tabel 4.

Tabel 3. Nama 11 Rekaman Gempa Historis yang Digunakan

No	Sumber Gempa	Nama Gempa	RSN	Tahun
1	Shallow Crustal	Coalinga 01	326	1983
2	Shallow Crustal	Northridge 01	962	1994
3	Shallow Crustal	Tottori	3962	2000
4	Shallow Crustal	Niiigata 01	4204	2004
5	Shallow Crustal	Niiigata 02	4215	2004
6	Benioff	Iwate	4012 457	2011
7	Benioff	Miyagi Pre 01	4017 056	2011
8	Benioff	Miyagi Pre 02	4017 065	2011
9	Megathrust	Tokachi-oki 01	4022 855	2003
10	Megathrust	Tokachi-oki 02	4022 934	2003
11	Megathrust	Tokachi-oki 03	4028 562	2003

Tabel 4. Parameter Seismik Rekaman Gempa Terpilih

No	Nama Gempa	Magnitudo (M_w)	Jarak (R)	V_s
1	Coalinga 01	6,36	44,72	173,02
2	Northridge 01	6,69	49,81	160,58
3	Tottori	6,61	45,98	169,16
4	Niiigata 01	6,63	28,42	128,12
5	Niiigata 02	6,63	48,79	134,50
6	Iwate	7,4	96,55	149,50
7	Miyagi Pre 01	7,15	88,08	172,20
8	Miyagi Pre 02	7,15	94,38	173,30

9	Tokachi-oki 01	8,29	121,74	111,10
10	Tokachi-oki 02	8,29	117,91	168,10
11	Tokachi-oki 03	8,29	88,82	160,00

Sebelum diaplikasikan ke dalam model, seluruh rekaman gempa tersebut melalui proses *spectral matching* menggunakan perangkat lunak *SeismoMatch*. Prosedur penyelarasan ini dilakukan dengan merujuk pada standar SNI 8899:2020 tentang Tata Cara Pemilihan dan Penyelarasan Rekaman Gempa untuk Analisis Respons Situs. Rentang periode penyelarasan ditentukan berdasarkan hasil analisis modal struktur guna menangkap seluruh respons ragam yang berkontribusi pada massa partisipasi > 90%, sebagaimana dirangkum pada Tabel 5.

Tabel 5. Parameter Rentang Periode Penyelarasan (*Spectral Matching*)

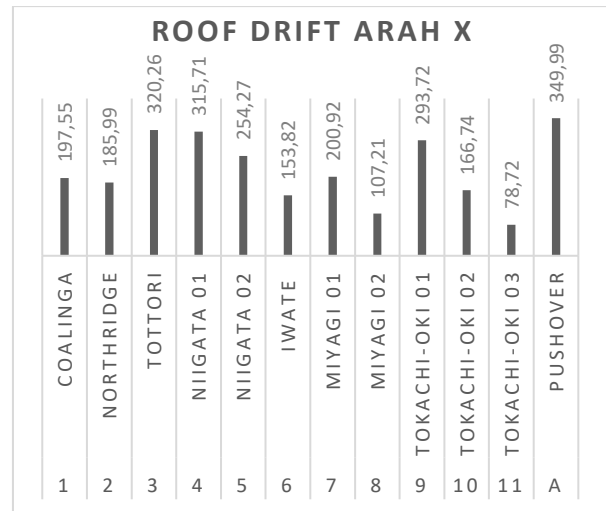
Parameter Periode	Nilai (detik)	Keterangan
$T_{mode\ 1}$	1,618	Periode Fundamental
$T_{mode\ 2}$	1,431	Periode Ragam Kedua
$T_{MPMR\ 90\%}$	0,271	Batas Bawah (0,2T)
Batas Atas	3,236	$2 \times T_{mode\ 1}$

3.4. Evaluasi Kinerja Gedung *Setback*

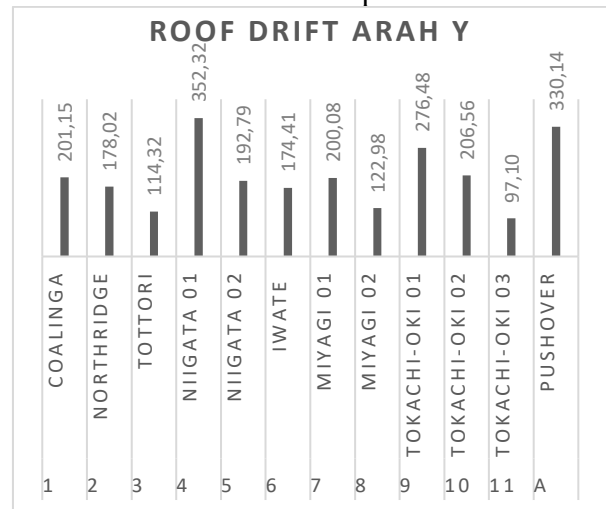
3.4.1. Perbandingan Perpindahan Atap dan Mekanisme Kerusakan

Tahapan ini mengevaluasi reliabilitas Analisis *Pushover* terhadap Analisis *Time History* sebagai acuan metode dinamik yang lebih presisi untuk gedung ireguler.

Tahapan ini mengevaluasi reliabilitas Analisis *Pushover* terhadap Analisis *Time History* sebagai acuan metode dinamik yang lebih presisi untuk gedung ireguler. Untuk memberikan visualisasi yang komprehensif mengenai sebaran data perpindahan atap pada masing-masing rekaman gempa dibandingkan dengan beban statik monotonik, grafik perbandingan respons untuk kedua arah disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Perbandingan Perpindahan Atap X antara 11 Rekaman Gempa dan Pushover X



Gambar 6. Perbandingan Perpindahan Atap Y antara 11 Rekaman Gempa dan Pushover Y

Visualisasi pada grafik batang tersebut menunjukkan bahwa respons dinamik memiliki magnitudo yang relatif sebanding dengan target perpindahan analisis statik. Untuk merinci perbandingan nilai perpindahan maksimum serta mengkuantifikasi rasio deviasi antara kedua metode tersebut, datanya disajikan secara berurutan pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6. Perbandingan Respons Perpindahan Atap Maksimum

Metode Analisis	Arah Pembebanan	Nilai Perpindahan (mm)
<i>Pushover</i>	Arah X	349,99
<i>Time History</i>	Arah X	320,26
Selisih	Arah X	-29,74
<i>Pushover</i>	Arah Y	330,14
<i>Time History</i>	Arah Y	352,32
Selisih	Arah Y	22,18

Tabel 7. Rasio Respons *Pushover* terhadap *Time History*

Parameter	Arah	Rasio	Ket.
Perpindahan Atap	Arah X	1,09	<i>Overestimate</i>
Perpindahan Atap	Arah Y	0,94	<i>Underestimate</i>

Berdasarkan pemaparan Tabel 6 dan Tabel 7, respons perpindahan atap secara global menunjukkan nilai yang relatif ekuivalen. Pada parameter penelitian ini, Analisis *Pushover* memprediksi magnitudo respons dengan rasio berkisar antara 0,94 hingga 1,09 dibandingkan *Time History*. Secara teoretis, karakteristik respons ini terjadi karena Analisis *Pushover* membebani struktur secara statik berdasarkan asumsi distribusi gaya pada ragam getar fundamental (Mode 1) semata. Pada gedung *setback*, asumsi ini cenderung memberikan estimasi perpindahan global yang memadai namun kurang sensitif terhadap pengaruh dinamik ragam tinggi. Sebaliknya, Analisis *Time History* mengakomodasi efek getaran siklik bolak-balik yang melibatkan mekanisme disipasi energi seiring waktu, sehingga respons yang dihasilkan lebih merepresentasikan perilaku struktur rencana terhadap guncangan gempa aktual.

Untuk memahami dampak hasil analisis tersebut terhadap tingkat kerusakan struktur rencana, dilakukan evaluasi level kinerja menggunakan standar FEMA 356 yang disajikan pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Perbandingan Level Kinerja 11 Gempa Arah X Terhadap *Pushover* Arah X Berdasarkan FEMA 356

No	Nama	Roof Drift X (%)	Level Kinerja
<i>Time History</i>			
1	Coalinga 01	0,613	IO
2	Northridge 01	0,578	IO
3	Tottori	0,995	IO
4	Niigata 01	0,980	IO
5	Niigata 02	0,790	IO
6	Iwate	0,478	IO
7	Miyagi Pre 01	0,624	IO
8	Miyagi Pre 02	0,333	IO
9	Tokachi-oki 01	0,912	IO
10	Tokachi-oki 02	0,290	IO
11	Tokachi-oki 03	0,518	IO
Rata Rata <i>Time History</i>		0,646	IO

<i>Pushover</i>			
1	<i>Pushover X</i>	1,087	LS

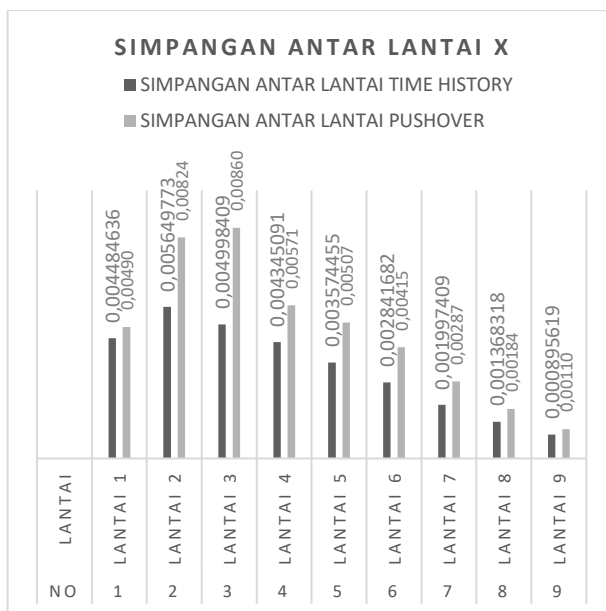
Tabel 9. Perbandingan Level Kinerja 11 Gempa Arah Y Terhadap *Pushover* Arah Y Berdasarkan FEMA 356

No	Nama	Roof Drift Y (%)	Level Kinerja
<i>Time History</i>			
1	Coalinga 01	0,625	IO
2	Northridge 01	0,553	IO
3	Tottori	0,355	IO
4	Niigata 01	1,094	LS
5	Niigata 02	0,599	IO
6	Iwate	0,542	IO
7	Miyagi Pre 01	0,621	IO
8	Miyagi Pre 02	0,382	IO
9	Tokachi-oki 01	0,859	IO
10	Tokachi-oki 02	0,306	IO
11	Tokachi-oki 03	0,641	IO
Rata Rata <i>Time History</i>		0,598	IO
<i>Pushover</i>			
1	<i>Pushover Y</i>	1,025	LS

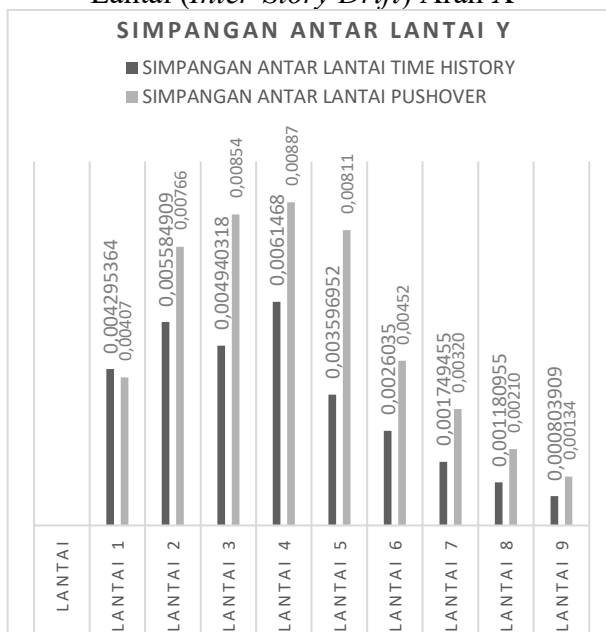
Berdasarkan Tabel 8 dan 9, terlihat bahwa rata-rata respons rekaman gempa Analisis *Time History* nonlinier menghasilkan nilai simpangan yang menempatkan struktur pada kondisi *Immediate Occupancy* (IO). Di sisi lain, Analisis *Pushover* menghasilkan nilai yang berada di ambang batas kategori berikutnya, yaitu *Life Safety* (LS). Meskipun rasio perpindahan global antara kedua metode menunjukkan hasil yang relatif konsisten dengan selisih yang minimal, terdapat perbedaan dalam klasifikasi level kinerja akhir. Hal ini mengindikasikan bahwa pada struktur rencana, kedua metode memberikan gambaran respons yang serupa secara magnitudo, namun memiliki sensitivitas yang berbeda terhadap batasan kriteria FEMA 356. Perbedaan label kinerja ini lebih disebabkan oleh posisi nilai perpindahan yang berada di sekitar ambang batas klasifikasi IO dan LS, sehingga sedikit variasi pada hasil analisis mengakibatkan perbedaan kategori kinerja yang ditetapkan.

3.4.2. Profil Simpangan Antar Lantai

Profil simpangan antar-lantai secara vertikal disajikan melalui grafik untuk meninjau distribusi deformasi pada area transisi *setback*.



Gambar 7. Perbandingan Simpangan Antar-Lantai (*Inter-Story Drift*) Arah X



Gambar 8. Perbandingan Simpangan Antar-Lantai (*Inter-Story Drift*) Arah Y

Meskipun nilai perpindahan atap pada kedua metode analisis menunjukkan hasil yang relatif ekuivalen, distribusi simpangan pada setiap tingkat lantai menunjukkan pola yang berbeda. Berdasarkan Gambar 7 dan Gambar 8, konsentrasi simpangan maksimum teramati pada Lantai 3 dan Lantai 4 yang merupakan area transisi pada model struktur ini. Lokasi tersebut merupakan zona di mana diskontinuitas kekakuan vertikal memengaruhi respons struktur akibat kontribusi ragam getar tinggi (*higher mode effects*).

Perbedaan intensitas respons terlihat pada hasil kedua analisis tersebut. Sebagai contoh pada arah Y, Analisis *Pushover* mencatat simpangan antar-lantai pada Lantai 4 sebesar 0,00887 m. Sementara itu, Analisis *Time History* menghasilkan nilai rata-rata pada lantai yang sama sebesar 0,00615 m. Hal ini mengindikasikan bahwa pada model dan parameter penelitian ini, Analisis *Pushover* memberikan estimasi simpangan lokal yang lebih tinggi dibandingkan rata-rata respons dinamik pada area transisi tersebut saat menerima beban gempa rencana.

3.5. Diskusi dan Verifikasi Studi Terdahulu

Temuan pada penelitian ini, di mana Analisis *Pushover* menunjukkan hasil perpindahan global yang relatif ekuivalen dengan respons puncak dinamik pada model gedung rencana, sejalan dengan teori dinamika struktur tingkat lanjut. Literatur sebelumnya oleh Tarigan dkk. (2024) serta Askouni & Papagiannopoulos (2021) juga menegaskan bahwa prosedur statik nonlinier sangat bergantung pada pola distribusi beban yang diasumsikan, sehingga akurasi hasil dapat bervariasi ketika diterapkan pada struktur dengan kekakuan vertikal yang diskontinu.

Penelitian ini mengonfirmasi bahwa SNI 1726:2019 secara tepat membatasi penggunaan analisis statik (seperti *Pushover* dan gaya lateral ekuivalen) untuk gedung ketidakberaturan vertikal Tipe 3. Pada lingkup penelitian ini, penggunaan *Time History* terbukti memberikan basis evaluasi yang lebih rasional karena mampu merepresentasikan tingkat kerusakan yang lebih representatif (level IO) dibandingkan *Pushover* yang memprediksi struktur hingga level LS akibat sensitivitas terhadap ambang batas kriteria kinerja secara statik. Perbedaan kategori kinerja ini menegaskan bahwa meskipun perpindahan atap yang dihasilkan ekuivalen, distribusi kerusakan lokal pada area *setback* lebih akurat dipetakan melalui prosedur dinamik.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik dan evaluasi kinerja seismik pada model struktur gedung beton bertulang berkonfigurasi *setback*

di Padang, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Analisis *Pushover* menunjukkan kecenderungan memprediksi nilai perpindahan atap yang relatif ekuivalen dengan respons puncak Analisis *Time History*. Nilai perpindahan atap pada Analisis *Pushover* mencapai 349,99 mm (Arah X) dan 330,14 mm (Arah Y), sementara respons maksimum Analisis *Time History* tercatat sebesar 320,26 mm (Arah X) dan 352,32 mm (Arah Y).
2. Deviasi prediksi perpindahan tersebut menghasilkan rasio sebesar 1,09 pada arah X dan 0,94 pada arah Y. Hasil ini mengindikasikan bahwa Analisis *Pushover* mampu mengestimasi besarnya perpindahan global secara memadai, namun memiliki variasi akurasi terhadap respons dinamik puncak pada arah pembebanan yang berbeda.
3. Perbedaan respons perpindahan ini berdampak pada penentuan level kinerja struktur (FEMA 356). Analisis *Pushover* mengategorikan struktur pada level *Life Safety* (LS), sedangkan rata-rata Analisis *Time History* mengonfirmasi bahwa struktur rencana cenderung memenuhi kriteria level *Immediate Occupancy* (IO). Analisis *Time History* dinilai lebih representatif dalam menangkap distribusi simpangan antar-lantai pada area transisi *setback* akibat pengaruh ragam getar tinggi (*higher mode effects*).
4. Secara keseluruhan, penggunaan Analisis *Pushover* semata pada gedung berkonfigurasi *setback* cenderung memberikan penilaian kinerja yang lebih konservatif. Oleh karena itu, penggunaan metode dinamik nonlinier seperti Analisis *Time History* direkomendasikan untuk memperoleh hasil evaluasi struktur yang lebih proporsional dan representatif.

4.2. Saran

Berdasarkan temuan penelitian ini, beberapa saran yang dapat diajukan adalah:

1. Bagi para praktisi perencana struktur, disarankan untuk mempertimbangkan penggunaan Analisis *Time History* Nonlinier (NTHA) sebagai prosedur verifikasi lanjutan pada gedung dengan konfigurasi *setback*,

terutama di wilayah dengan risiko gempa tinggi, guna memperoleh estimasi respons dinamik yang lebih representatif.

2. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan variasi tipe *setback*, variasi nilai redaman (*damping*), atau menggunakan model sendi plastis serat (*fiber hinge*) guna mendapatkan perilaku inelastis penampang yang lebih komprehensif dan presisi.
3. Mengingat kondisi tanah di Kota Padang yang memiliki potensi amplifikasi kegempaan yang tinggi, penelitian lanjutan perlu mempertimbangkan efek interaksi tanah-struktur (*Soil-Structure Interaction*) untuk melihat pengaruh fleksibilitas pondasi terhadap respons dinamik struktur dengan ketidakberaturan vertikal.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Applied Technology Council. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings (ATC-40)*. Redwood City, CA: Applied Technology Council.
- Askouni, P. K., & Papagiannopoulos, G. A. (2021). *Seismic Behavior of a Class of Mixed Reinforced Concrete-Steel Buildings Subjected to Near-Fault Motions. Infrastructures*, 6(12). <https://doi.org/10.3390/infrastructures6120172>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan (SNI 2847:2019)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung (SNI 1726:2019)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain (SNI 1727:2020)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Tata cara pemilihan dan modifikasi gerak tanah permukaan untuk perencanaan gedung*

- tahan gempa (SNI 8899:2020)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Bappenas. (2009). *Rencana Aksi Rehabilitasi dan Rekonstruksi Wilayah Pascabencana Gempa Bumi di Provinsi Sumatera Barat Tahun 2010-2011*.
- Bush, R. C., Shirkol, A., & Sruthi, J. S. (2022). *Seismic Analysis of RCC Building with Different Shape of Shear Wall and Without Shear Wall. ASPS Conference Proceedings, 1(1)*, 983–989. <https://doi.org/10.38208/acp.v1.610>
- EERI. (2009). *The Mw 7.6 Western Sumatra Earthquake of September 30, 2009 (Learning from Earthquakes Project)*.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356)*. Washington, D.C.: American Society of Civil Engineers.
- Fitrah, R. A., Masrilayanti, M., Putri, G. Z., & Al Jauhari, Z. (2021). *Assessment of Seismic Responses Toward Multi-story Buildings of Steel Special Moment Resisting Frame by Considering the Setback Irregularities. E3S Web of Conferences, 331*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133105007>
- Juliafad, E., & Gokon, H. (2022). *Seismic Fragility Function for Single-Storey Masonry Wall RC Building in Padang City, Indonesia. International Journal of GEOMATE, 22(94)*, 39–46. <https://doi.org/10.21660/2022.94.3160>
- Katsimpini, P. S., & Papagiannopoulos, G. A. (2023). *Effectiveness of the Seesaw System as a Means of Seismic Upgrading in Older, Non-Ductile Reinforced Concrete Buildings. Vibration, 6(1)*, 102–112. <https://doi.org/10.3390/vibration6010008>
- Maulana, T. I., Prayuda, H., Paudel, S., Syamsi, M. I., & Afriandini, B. (2025). *Nonlinear Static and Dynamic Analyses Equipped for Seismic Performance Assessment of RC Frame Buildings: A Comprehensive Review. Journal of Physics: Conference Series, 2989(1)*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2989/1/012021>
- Nady, O., Mahfouz, S. Y., & Taher, S. E. D. F. (2022). *Quantification of Vertical Irregularities for Earthquake Resistant Reinforced Concrete Buildings. Buildings, 12(8)*. <https://doi.org/10.3390/buildings12081160>
- Putra Usman, A., Rosidawani, & Palta Mutmainna, S. (2021). *Analisis Respons dan Kinerja Struktur Bangunan Gedung Menggunakan Pushover Analysis. Saintis, 21(02)*, 7585. [https://doi.org/10.25299/saintis2021.vol21\(02\).7585](https://doi.org/10.25299/saintis2021.vol21(02).7585)
- Putri, W. T., Syafriani, Fauzi, A., & Dwiridal, L. (2023). *Amplification Analysis and Seismic Vulnerability Index of Air Tawar Barat Village of Padang City Using HVSR Method. Journal of Physics: Conference Series, 2582(1)*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2582/1/012038>
- Rajif, M., & Syafriani. (2021). *Hazard Seismic Zonation Analysis of West Sumatra Region Using Probabilistic Hazard Seismic Analysis (PHSA) Method (Vol. 8, Nomor 1)*.
- Rodríguez, C. A., Rodríguez Pérez, Á. M., López, R., & Caparrós Mancera, J. J. (2024). *Comparative Analysis and Evaluation of Seismic Response in Structures: Perspectives from Non-Linear Dynamic Analysis to Pushover Analysis. Applied Sciences (Switzerland), 14(6)*. <https://doi.org/10.3390/app14062504>
- Tarigan, J., Nursyamsi, & Alfitra, T. M. R. (2024). *Seismic Performance Analysis of Regular and Irregular Buildings Based on SNI 1726:2019 Standards. International Journal of Architecture and Urbanism, 8(3)*, 463–478. <https://doi.org/10.32734/ijau.v8i3.18258>
- Zuher, M. H., Nasution, A. P., Sidiq, Z. N., Masrilayanti, M., & Tanjung, J. (2023). *Fragility Assesment of Mid-Rise RC Building using HAZUS Method in High Seismic Zone. Jurnal Bangunan, Konstruksi & Desain, 1(2)*, 79–89. <https://doi.org/10.25077/jbkd.1.2.79-89.2023>
-