

Evaluasi Struktur Gedung Akibat Penambahan Lantai dengan *Incremental Dynamic Analysis* (Studi Kasus: Gedung 8 Lantai di Purwokerto)

Bestiar Mahdani* , Wibowo, Halwan Alfiesa Saifullah

Universitas Sebelas Maret, Indonesia

Email: bestiarmahdani15@gmail.com* , halwan@ft.uns.ac.id, wibowo68@staff.uns.ac.id

Keywords:

Incremental Dynamic Analysis (IDA); Seismic Performance; Floor Addition; Fragility Curve; Reinforced Concrete Structure.

Abstract

This study aims to evaluate the seismic performance of an existing 8-story reinforced concrete building structure and its condition after the addition of 2 floors using the Incremental Dynamic Analysis (IDA) method. Three-dimensional structural modeling was performed using SeismoStruct software based on as-built drawing data and referring to SNI 1726:2019 and SNI 2847:2019. The analysis was conducted using several earthquake recordings that have been scaled and adjusted to the response spectrum of the study area. The structural response was analyzed nonlinearly through a stepwise time history analysis until it reaches a collapse condition. The main parameters reviewed include inter-story drift, lateral displacement, and base shear force. In addition, a fragility curve was prepared based on the HAZUS MH-MR5 criteria to evaluate the probability of damage at various levels of earthquake intensity. The analysis results show that the existing structure has better seismic performance than the structure after the addition of floors. The addition of building mass and height causes an increase in inter-story drift and accelerates the occurrence of nonlinear behavior. The fragility curve shows a shift towards lower earthquake intensity in the structural condition after the addition of a floor, indicating an increase in the level of vulnerability. The probability of exceeding the damage limit at all levels (slight, moderate, extensive, and complete damage) also increases significantly. Based on these results, it can be concluded that the addition of one floor without structural reinforcement reduces the level of seismic reliability of the building. In this case, no retrofitting measures are required to increase the capacity of the structure, as it still meets the required performance. The addition of one floor to the building structure increases the probability of damage at all levels, but not significantly and the value is small. The highest risk is seen in the Complete category with a risk of 3.75%.

Kata Kunci:

Incremental Dynamic Analysis (IDA); Kinerja Seismik; Penambahan Lantai; Kurva Kerapuhan; Struktur Beton Bertulang.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja seismik struktur gedung beton bertulang eksisting 8 lantai dan kondisi setelah penambahan 2 lantai menggunakan metode *Incremental Dynamic Analysis* (IDA). Pemodelan struktur dilakukan secara tiga dimensi menggunakan perangkat lunak SeismoStruct berdasarkan data as-built drawing serta mengacu pada SNI 1726:2019 dan SNI 2847:2019. Analisis dilakukan dengan menggunakan beberapa rekaman gempa yang telah diskalakan dan disesuaikan dengan spektrum respons wilayah studi. Respon struktur dianalisis secara nonlinier melalui analisis riwayat waktu bertahap hingga mencapai kondisi runtuh. Parameter utama yang ditinjau meliputi simpangan antar lantai (*inter-story drift*), perpindahan lateral, dan gaya geser dasar. Selain itu, kurva kerapuhan (*fragility curve*) disusun

berdasarkan kriteria HAZUS MH-MR5 untuk mengevaluasi probabilitas kerusakan pada berbagai tingkat intensitas gempa. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur eksisting memiliki kinerja seismik yang lebih baik dibandingkan struktur setelah penambahan lantai. Penambahan massa dan tinggi bangunan menyebabkan peningkatan simpangan antar lantai serta mempercepat terjadinya perilaku nonlinier. Kurva kerapuhan menunjukkan pergeseran ke arah intensitas gempa yang lebih rendah pada kondisi struktur setelah penambahan lantai, yang mengindikasikan peningkatan tingkat kerentanan. Probabilitas terlampauinya batas kerusakan pada semua level (*slight, moderate, extensive* hingga *complete damage*) juga meningkat secara signifikan. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa penambahan satu lantai tanpa perkuatan struktur menurunkan tingkat keandalan seismik bangunan. Untuk kasus ini tidak diperlukan tindakan retrofit untuk meningkatkan kapasitas struktur, karena masih memenuhi kinerja yang disyaratkan. Penambahan satu lantai pada struktur gedung menambah probabilitas kerusakan pada semua tingkat namun tidak signifikan dan nilainya kecil. Terlihat risiko terbesar ada pada kategori Complete dengan risiko 3,75 %

PENDAHULUAN

Pertumbuhan aktivitas bisnis, akademik, pariwisata dan perjalanan dinas di kota Purwokerto membuat kebutuhan hunian sementara meningkat. Dalam kondisi ini, pemilik bangunan berencana untuk menambah kapasitas kamar tanpa harus membuka lahan baru yang biaya dan waktunya perlu pertimbangan matang juga tidak sebentar. Opsi menambah jumlah kapasitas kamar dengan menambah jumlah lantai secara vertikal pada bangunan gedung yang sudah terbangun, dianggap lebih efisien dari sisi ruang, waktu dan investasi. Opsi ini hanya dapat dilakukan apabila struktur bangunan eksisting benar-benar mampu menahan beban tambahan yang akan dibangun secara vertikal di atasnya (Saputro et al., 2024).

Penambahan lantai diatas gedung delapan lantai mengubah distribusi massa bangunan secara signifikan, yang bisa mengubah frekuensi alami struktur, gaya inersia dan distribusi beban geser pada elemen-elemen struktural. Perubahan tersebut dapat menimbulkan simpangan antar lantai yang lebih besar. Jika struktur bangunan tidak dinamis dengan tepat, penambahan lantai dapat meningkatkan risiko kerusakan struktur, terutama di wilayah yang memiliki potensi aktivitas seismik. Dengan demikian, evaluasi struktural menjadi keharusan sebelum penambahan lantai dilakukan (Abobakirova et al., 2024; Saputro et al., 2024).

Bangunan eksisting dirancang berdasarkan pedoman dan asumsi beban di masa sebelum kontruksi dilaksanakan, yang mungkin berbeda dengan kondisi nyata saat ini seperti: beban hidup, perubahan penggunaan ruang dan kondisi material yang menua. Oleh karena itu, penilaian ulang struktur eksisting dengan pendekatan analisis dinamis non-linier sangat penting untuk memastikan bahwa bangunan tetap aman jika akan dimodifikasi (Maidi & Shufrin, 2024).

Salah satu metode analisis yang mampu menggambarkan perilaku struktur secara nyata terhadap gempa adalah *Incremental Dynamic Analysis* (IDA). IDA melakukan analisis riwayat waktu non-linier dengan menskalakan rekaman gempa

dari intensitas rendah hingga tinggi, sehingga mampu menggambarkan perilaku struktur hingga melewati titik plastis dan mendekati kondisi runtuh (*collapse*). IDA menjadi metode yang banyak digunakan dalam penelitian modern karena mampu memberikan pemahaman yang lebih realistis tentang kapasitas struktur dibanding analisis statis seperti pushover (Miari & Jankowski, 2022; Radman Ahmed et al., 2025).

Implementasi IDA pada studi penelitian dan retrofit semakin praktis, perkembangan software analisis struktur membuat IDA semakin mudah diterapkan. Beberapa studi terkini menggunakan software SeismoStruct dan paket analisis modern lainnya untuk membangun

kurva kapasitas seismik, mengekstraksi parameter *fragility* dan mensimulasikan berbagai skenario gempa yang representatif. Software ini memberikan fleksibilitas bagi peneliti dan hasil analisis dapat memberikan dasar teknis yang kuat untuk menentukan apakah struktur bangunan layak ditambah lantai atau memerlukan perkuatan tertentu (Radman Ahmed et al., 2025) (Rahul & Uttam, 2018).

Selain menilai kapasitas struktur bangunan, penelitian terkini juga menekankan pentingnya memahami tingkat kerentanan bangunan terhadap gempa. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah penyusunan *fragility curve*, yaitu kurva yang menunjukkan peluang kerusakan pada berbagai tingkat intensitas gempa. Dengan membandingkan kurva untuk kondisi eksisting dan kondisi setelah penambahan lantai, peneliti dapat menilai apakah risiko kerusakan meningkat atau tetap berada dalam batas aman. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai dampak modifikasi struktur dan membantu menyusun rekomendasi teknis yang lebih tepat.

Penelitian yang secara khusus membahas evaluasi penambahan lantai bangunan bertingkat menengah seperti hotel, apartemen atau rumah susun di Indonesia masih sangat terbatas. Sedangkan kebutuhan praktisnya cukup besar, terutama di kota berkembang seperti Purwokerto. Kajian mengenai struktur eksisting dan upaya retrofit memang sudah banyak dilakukan, tetapi penelitian yang menggabungkan analisis penambahan lantai dengan metode Incremental Dynamic Analysis (IDA) masih jarang ditemui. Penelitian semacam ini sangat relevan karena dapat memberikan rekomendasi teknis konkret bagi pemilik gedung dan perencana struktur serta memperkuat literatur akademik di bidang rekayasa gempa dan retrofit vertikal. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan metode IDA untuk mengevaluasi pengaruh penambahan lantai pada bangunan hotel bertingkat menengah di Purwokerto, yang belum banyak dikaji dalam literatur, serta penyusunan *fragility curve* untuk membandingkan kerentanan seismik antara struktur eksisting dan struktur setelah modifikasi.

Berdasarkan latar belakang, maka perumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan sebagai berikut: 1) Bagaimana perilaku struktur gedung eksisting dan struktur gedung setelah penambahan lantai berdasarkan metode *Incremental Dynamic Analysis*? 2) Bagaimana probabilitas terlampauinya batas kerusakan pada tiap tingkat level kerusakan (*fragility*) pada struktur gedung eksisting dan struktur setelah penambahan lantai? 3) Bagaimana kinerja seismik sebuah struktur ditinjau dari kurva kerapuhan (*fragility curve*) pada struktur gedung eksisting dan setelah penambahan lantai?

Penelitian ini bertujuan sebagai berikut: 1) Mengidentifikasi perilaku struktur gedung eksisting dan struktur gedung setelah penambahan lantai berdasarkan metode *Incremental Dynamic Analysis*. 2) Menentukan probabilitas terlampauinya batas kerusakan struktur tiap tingkat level kerusakan pada keadaan struktur gedung eksisting dan struktur setelah penambahan lantai. 3) Mengevaluasi kinerja seismik sebuah struktur ditinjau dari kurva kerapuhan (*fragility curve*) pada struktur gedung eksisting dan setelah penambahan lantai.

Penelitian ini menawarkan sudut pandang yang berbeda karena tidak hanya mengevaluasi struktur gedung eksisting, tetapi juga mengkaji kelayakan penambahan lantai dengan menggunakan analisis non-linier tingkat lanjut berbasis *Incremental Dynamic Analysis* (IDA). Pendekatan ini jarang diterapkan pada bangunan bertingkat menengah di Indonesia, terutama untuk kasus nyata yang berada di kota berkembang seperti Purwokerto.

Selain itu, penelitian ini menyertakan penyusunan *fragility curve* untuk dua kondisi struktural yang berbeda, yaitu struktur eksisting dan struktur setelah penambahan lantai. Perbandingan dua kurva tersebut menghasilkan gambaran yang lebih rinci tentang perubahan kerentanan bangunan terhadap gempa. Pendekatan ini tidak banyak digunakan dalam studi modifikasi vertikal di Indonesia, meskipun *fragility curve* sebenarnya mampu menggambarkan risiko kerusakan secara lebih realistis dibandingkan evaluasi linier konvensional.

Kebaruan lain muncul dari fokus penelitian pada gedung hotel bertingkat yang masih aktif beroperasi dan memiliki tingkat okupansi tinggi. Bangunan dengan karakteristik seperti ini memiliki konsekuensi struktural yang berbeda karena setiap penambahan lantai dapat berdampak signifikan terhadap massa total dan performa seismik. Penelitian sebelumnya dibahas bangunan bertingkat rumah duka, retrofit rumah sakit dan gedung parkir, sehingga studi yang menyoroti bangunan komersial dengan kondisi eksisting yang sudah berjalan cukup lama masih sangat terbatas.

Secara keseluruhan, penelitian ini mencoba mengisi kekosongan literatur mengenai evaluasi struktur eksisting yang mengalami ekspansi secara vertikal ke atas dengan menggunakan metode analisis non-linier secara komprehensif. Hasilnya diharapkan dapat menjadi rujukan akademik dan sekaligus memberikan kerangka evaluasi yang lebih sesuai bagi praktisi yang berhadapan dengan kasus serupa, terutama di wilayah perkotaan yang menghadapi keterbatasan lahan untuk membangun bangunan baru.

METODE PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada Hotel Luminor Purwokerto, yang berlokasi di Jl. Jend. Soedirman No. 324, Pereng, Sokanegara, Kecamatan Purwokerto Timur, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah. Bangunan yang dianalisis merupakan gedung beton bertulang 8 lantai yang berfungsi sebagai hotel dan tempat pertemuan, milik swasta, serta dibangun pada tahun 2019–2020.

Pengumpulan Data

Penelitian menggunakan data sekunder, meliputi:

1. Literatur berupa jurnal, skripsi, tesis, buku, pedoman, dan penelitian terdahulu yang relevan.
2. *As-built drawing* Hotel Luminor Purwokerto yang diperoleh dari pihak terkait.
3. Standar perencanaan struktur, yaitu **SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, dan SNI 1727:2020**.
4. Data respons spektrum gempa wilayah Purwokerto dari situs resmi Kementerian PUPR.
5. Rekaman gempa yang digunakan dalam analisis dinamik struktur.

Alat Penelitian

Analisis dilakukan menggunakan SeismoStruct versi 25 untuk pemodelan dan analisis struktur eksisting serta struktur dengan penambahan satu lantai. Rekaman gempa disesuaikan terhadap karakteristik respons spektrum wilayah Purwokerto menggunakan SeismoSignal dan SeismoMatch. Sebanyak 9 rekaman gempa digunakan dalam analisis.

Pemodelan Tiga Dimensi pada SeismoStruct

Model tiga dimensi struktur dibuat menggunakan SeismoStruct dengan mempertimbangkan perilaku nonlinier geometrik dan material. Proses analisis terdiri atas tiga tahap, yaitu Pre-Processor untuk memasukkan model dan parameter struktur, Processor untuk menjalankan analisis, serta Post-Processor untuk menampilkan dan mengevaluasi hasil analisis.

Tata Laksana Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan sebagai berikut:

1. **Studi literatur**, meliputi SNI 1726:2019, SNI 1727:2020, SNI 2847:2019, PPURG 1987, HAZUS-MH MR5, ATC-40, serta literatur mengenai analisis *pushover*, *Incremental Dynamic Analysis* (IDA), dan kerapuhan seismik.
2. **Pengumpulan data sekunder**, berupa *as-built drawing*, data material dan dimensi struktur, respons spektrum wilayah Purwokerto, serta rekaman gempa yang sesuai dengan karakteristik lokasi penelitian.

3. **Pemodelan struktur**, yaitu model kondisi eksisting dan model dengan penambahan satu lantai menggunakan *Building Modeller* pada SeismoStruct berdasarkan *as-built drawing*. Pemodelan mencakup elemen struktur, properti material, *constraint*, dan tumpuan. Ramp dan tangga tidak dimodelkan.
4. **Penentuan pembebanan**, meliputi beban mati, beban mati tambahan, dan beban hidup berdasarkan SNI 1727:2020. Berat sendiri struktur dihitung otomatis oleh program, sedangkan beban lainnya diterapkan pada elemen sesuai fungsi bangunan.
5. **Incremental Dynamic Analysis (IDA)** dilakukan menggunakan 9 rekaman gempa dari database PEER. Rekaman gempa diolah menggunakan SeismoSignal dan disesuaikan terhadap target respons spektrum Purwokerto melalui proses *spectrum matching* dengan SeismoMatch. Intensitas gempa kemudian ditingkatkan secara bertahap hingga struktur mencapai kondisi kerusakan atau keruntuhan. Hasil analisis berupa hubungan antara parameter intensitas gempa, seperti **PGA/Sa**, dengan respons struktur berupa **interstory drift ratio (ISDR)** pada arah X dan Y.
6. **Analisis kerapuhan struktur** dilakukan berdasarkan hasil IDA dengan menentukan batas kondisi kerusakan (*damage states*), perpindahan lateral, dan respons struktur. Nilai probabilitas kerusakan dihitung menggunakan distribusi lognormal dan disajikan dalam bentuk **kurva kerapuhan**, dengan parameter intensitas gempa pada sumbu X dan probabilitas terlampauinya tingkat kerusakan pada sumbu Y. Kurva tersebut digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan tingkat kerusakan struktur akibat gempa pada masa mendatang.
7. **Penarikan kesimpulan** dilakukan berdasarkan perbandingan kinerja seismik struktur eksisting dan struktur dengan penambahan satu lantai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjalankan IDA

Incremental Dynamic Analysis merupakan cara dalam mempelajari perilaku keseluruhan struktur ketika beban gempa bumi dengan intensitas berbeda diterapkan pada model struktur hingga mengalami keruntuhan. Dalam berbagai analisis dinamis nonlinier dalam serangkaian rekaman gerakan tanah, memungkinkan dilakukannya penilaian yang rinci terhadap kinerja seismik struktur dalam berbagai macam kondisi seperti *limit states*, elastisitas hingga ketidakstabilan dinamis dan akhirnya runtuh. Setiap akselerogram gempa digunakan sebagai beban fungsi dari waktu, sehingga dalam penelitian ini terbentuk banyak respon struktur untuk setiap gempa, dan yang digunakan sebagai parameter kerusakan struktur adalah respon *displacement* (perpindahan).

Intensity Measure (IM) yang digunakan dalam analisis ini adalah *Peak Ground Acceleration* (PGA). Dimana, kenaikan intensitas gempa dapat dilakukan dengan mengalikan data akselerogram dengan sebuah skalar yang menunjukkan *scaling factor* intensitas gempa sehingga terjadi kenaikan nilai PGA secara simultan.

Sebagai awalan untuk analisis IDA gempa dengan skala 1 adalah akselerogram gempa sintetis yang sudah sesuai dengan target spektrum. Setiap gempa memberikan respon struktur yang berbeda. Peneliti juga tidak bisa memastikan apakah dengan gempa skala 1 perilaku struktur masih linier atau sudah nonlinier. Maka dari itu penyekalaan dimulai dengan menyekalikan kebawah (*scale down*) terlebih dahulu dengan tujuan untuk melihat perilaku linier dengan teliti. Dilanjutkan dengan penyekalaan keatas (*scale up*) sampai menghasilkan *damage measure* (DM) berupa *drift ratio* yang lebih dari 6% atau mencapai *flatline*.

Faktor skala yang digunakan dalam penelitian ini dibuat sama untuk keseluruhan gempa. Penyekalaan yang dilakukan terhadap akselerogram dimulai 0,1 kali PGA dengan kenaikan setiap 0,1 satuan sampai pada skala 1 kali PGA. Hal itu bertujuan untuk melihat

perilaku linier struktur dengan lebih teliti. Penyekalaan dilanjutkan dengan kenaikan 0,1 satuan secara monoton mulai dari 1 kali PGA hingga struktur memberikan respon yang dapat memberikan anggapan bahwa struktur tersebut telah runtuh.

Tabel 1. PGA Data Gempa pada Skala 1

No.	Event	PGA Gempa Longitudinal, Sumbu x (g)	PGA Gempa Transversal, Sumbu y (g)
1	Taiwan Smart1 M07	0,7760	0,7469
2	USA Sierra Madre	0,7567	0,7787
3	Northwest China-04	0,8093	0,8275
4	Taiwan Smart1 I05	0,7289	0,6942
5	Taiwan Smart1 I12	0,8320	0,8269
6	Japan South Sanriku	0,7946	0,8286
7	Japan Kushirooki	0,7522	0,8367
8	New Zealand-FDCS	0,8365	0,7402
9	Taiwan-2944860	0,7995	0,7261

Berdasarkan hasil pengolahan Sembilan pasang rekaman gempa hasil *spectral matching*, diperoleh bahwa nilai *peak ground acceleration* pada arah X (north-south) berada pada rentang 0,7522 hingga 0,8365 g dengan rata-rata 0,7873 g. Sedangkan pada arah Y (east-west) berada pada rentang 0,6942 hingga 0,8366 g dengan nilai rata-rata 0,7784 g. Hasil tersebut menunjukkan bahwa intensitas percepatan tanah pada arah X sedikit lebih besar daripada arah Y, dengan rata-rata sekitar 1,02 kali lebih tinggi.

Respon Perpindahan (*Displacement*)

Dalam menggambarkan kondisi secara keseluruhan dari struktur gedung hotel, maka bagian dari *joint* lantai paling atas dekat dengan sumbu dijadikan titik tinjauan untuk melihat respon *displacement* yang terjadi. Titik tersebut dipilih karena merupakan bagian yang terhubung secara *rigid* dengan balok dan kolom bangunan hotel dan sekaligus memberikan gambaran simpangan yang terjadi pada tumpuan. Sehingga peneliti dapat mengetahui apakah bangunan hotel tersebut *collapse* karena kegagalan kolom.

Banyaknya data gempa yang digunakan dalam analisis menghasilkan respon yang sangat beragam. Terlebih lagi dengan adanya penambahan intensitas gempa untuk menjalankan IDA respon struktur yang tercipta menjadi lebih banyak lagi. Sehingga proses pengolahan data yang tepat harus dilakuka. Berikut adalah respon *displacement* yang terjadi akibat seluruh beban gempa yang digunakan pada skala 1 atau dengan target spektrum.

Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur *existing* dan struktur dengan penambahan 1 lantai memiliki pola respons dinamik yang hampir sama pada seluruh rekaman data gempa yang dianalisis. Perbedaan respons hanya terlihat pada saat terjadi percepatan gempa maksimum (*peak ground motion*), namun selisih amplitude perpindahan yang terjadi relative kecil dan tidak menunjukkan perubahan perilaku struktur yang signifikan.

Pada fase sebelum dan sesudah puncak gempa, kedua model struktur memperlihatkan karakteristik *osilasi*, frekuensi getaran, serta kecendrungan redaman yang hampir sama. Hal ini mengidentifikasikan bahwa penambahan 1 lantai belum menyebabkan perubahan kekakuan efektif maupun karakteristik dinamik struktur secara berarti sehingga respons perpindahan lateral tetap berada pada rentang yang sebanding dengan struktur *existing*.

Secara mekanika struktur, kondisi ini menunjukkan bahwa sistem struktur masih memiliki kapasitas kekakuan lateral yang memadai untuk mengakomodasi peningkatan massa akibat penambahan 1 lantai. Dengan demikian, peningkatan massa bangunan tidak diikuti oleh peningkatan *displacement* yang signifikan karena masih diimbangi oleh kemampuan elemen struktur daman menahan gaya gempa.

Secara keseluruhan, dari hasil analisis IDA mengidentifikasikan bahwa penambahan 1 lantai tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respon *displacement* lateral

bangunan, sehingga dari aspek perpindahan, kinerja struktur tetap berada pada tingkat yang sebanding dengan struktur *existing*.

Spektrum Kapasitas

Setelah mendapatkan output *base shear* dan *displacement* pada kurva kapasitas, perlu dilakukan pengolahan data lebih lanjut untuk mendapatkan spektrum kapasitas dalam format ADRS. Spektrum kapasitas ini yang nantinya akan digunakan untuk membentuk kurva kerapuhan kedua model struktur. Spektrum kapasitas dengan format ADRS menunjukkan hubungan antara *spectral displacement* (sd) dalam satuan meter dengan *spectral acceleration* (sa) dalam satuan percepatan gravitasi (g).

Berdasarkan kedua grafik tersebut, menunjukkan perbandingan besar spektrum kapasitas dari kedua model struktur gedung. Jika spektrum kapasitas lebih kecil, ini mengindikasikan bahwa struktur gedung memiliki kapasitas yang lebih rendah untuk menanggung beban gempa atau beban lateral lainnya. Spektrum kapasitas adalah representasi grafis dari hubungan antara percepatan gempa (biasanya di sumbu horizontal) dan gaya yang dapat ditanggung oleh struktur gedung.

Nilai *sa* dan *sd* didapatkan dari konversi *base shear* dan *displacement* pada kurva kapasitas dengan format ADRS menurut ATC-40 seperti persamaan 2.3 hingga 2.6. Berikut merupakan contoh perhitungan konversi kurva kapasitas menjadi kurva spektrum kapasitas dengan format ADRS untuk model struktur *existing* pada gempa *sierra madre*.

Tabel 2. Data ϕ gempa *sierra madre* RSN 1648 pada model struktur *existing*

RSN 1648	Wi	Wi/g	ϕ	ϕ^2	Wi* ϕ /g	Wi* ϕ^2 /g
Dasar	159,6776	16,2770	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Roof	11148,5271	1136,4452	0,3124	0,0976	354,9742	110,8779
Σ	11308,2047	1152,7222	0,3124	0,0976	354,9742	110,8779

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N \frac{(w_i \cdot \phi_{il})}{g} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N \frac{w_i}{g} \right] \left[\sum_{i=1}^N \frac{(w_i \cdot \phi_{il}^2)}{g} \right]} = \frac{[354,9742]^2}{[1152,7222][110,8779]} = 0,9858$$

$$PF1 = \left[\sum_{i=1}^N \frac{\frac{(w_i \cdot \phi_{il})}{g}}{\frac{(w_i \cdot \phi_{il}^2)}{g}} \right] = \frac{[354,9742]}{[110,8779]} = 3,2014$$

$$Sa = \frac{V/W}{\alpha_1} = \frac{7481,3518/110933,4885}{0,9858} = 0,0684$$

$$Sd = \frac{\Delta_{roof}}{PF1 \cdot \phi_{ROOF1}} = \frac{0,0757}{3,2014 \times 0,3124} = 0,0757$$

Rekapitulasi spektrum kapasitas struktur *existing* dan struktur tambahan1 lantai pada setiap *event* gempa jumlahnya masing-masing 9 data gempa disajikan pada Tabel 3 dan 6 berikut.

Tabel 3. Rekapitulasi spektrum kapasitas struktur *existing*

	RSN 490		RSN 1648		RSN 1755		RSN 3611			
	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,1	0,0267	0,0255	0,0304	0,0315	0,0264	0,0285	0,0286	0,0293	0,0306	0,0300
0,2	0,0499	0,0514	0,0510	0,0546	0,0451	0,0511	0,0473	0,0514	0,0600	0,0537
0,3	0,0738	0,0871	0,0703	0,0781	0,0694	0,0704	0,0655	0,0750	0,0788	0,0780
0,4	0,0902	0,1138	0,0901	0,1083	0,0912	0,1054	0,0849	0,1026	0,0951	0,0958
0,5	0,1099	0,1343	0,1074	0,1458	0,1062	0,1363	0,1132	0,1307	0,1122	0,1277
0,6	0,1165	0,1639	0,1164	0,1861	0,1139	0,1632	0,1479	0,1605		
0,7	0,1179	0,1942	0,1198	0,2250	0,1187	0,1862	0,1722	0,2037		
0,8	0,1332	0,2149	0,1258	0,2541	0,1335	0,2071	0,1828	0,3086		
0,9	0,1457	0,2308	0,1314	0,2822			0,1913	0,3795		
1,0	0,1556	0,2437	0,1343	0,3124			0,1990	0,4818		

Tabel 4. Lanjutan Rekapitulasi spektrum kapasitas struktur *existing*

	RSN 4022613			RSN 5001937			RSN 7004832		
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
0,1	0,0271	0,0257	0,0278	0,0261	0,0295	0,0299	0,0253	0,0269	
0,2	0,0513	0,0486	0,0496	0,0466	0,0491	0,0519	0,0453	0,0492	
0,3	0,0761	0,0751	0,0656	0,0741	0,0785	0,0761	0,0610	0,0733	
0,4	0,1093	0,1046	0,0877	0,1041	0,0872	0,1091	0,0746	0,0995	
0,5	0,1140	0,1461	0,1083	0,1344	0,1105	0,1507	0,0909	0,1283	
0,6			0,1252	0,1665	0,1262	0,1867	0,1186	0,1520	
0,7			0,1350	0,1999	0,1360	0,2097	0,1317	0,1926	
0,8			0,1433	0,2343	0,1409	0,2158	0,1370	0,1964	
0,9			0,1559	0,2707	0,1465	0,2684	0,1505	0,2086	
1,0			0,1645	0,3099	0,1547	0,3054	0,1566	0,2323	

Tabel 5. Rekapitulasi spektrum kapasitas struktur tambahan 1 lantai

	RSN 490		RSN 1648		RSN 1755		RSN 3611			
	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,1	0,0219	0,0274	0,0218	0,0297	0,0237	0,0289	0,0246	0,0293	0,0249	0,0302
0,2	0,0425	0,0588	0,0425	0,0566	0,0450	0,0548	0,0406	0,0514	0,0476	0,0555
0,3	0,0602	0,0914	0,0635	0,0917	0,0604	0,0826	0,0563	0,0750	0,0637	0,0789
0,4	0,0762	0,1150	0,0779	0,1276	0,0722	0,1092	0,0729	0,1026	0,0854	0,1207
0,5	0,0889	0,1410	0,0858	0,1615	0,0794	0,1331	0,0972	0,1307	0,0972	0,1749
0,6	0,0959	0,1672	0,0893	0,1920	0,0854	0,1541	0,1270	0,1605	0,1170	0,2628
0,7	0,1099	0,1989	0,1003	0,2294	0,0978	0,1728	0,1479	0,2037	0,1285	0,4456
0,8	0,1191	0,2239	0,1030	0,2798	0,1065	0,1927	0,1570	0,3086	0,1268	0,5670
0,9	0,1223	0,2562	0,1133	0,3317	0,1171	0,2154	0,1643	0,3795	0,1313	0,6743
1,0	0,1228	0,2797	0,1208	0,3519	0,1272	0,2442	0,1709	0,4818	0,1307	0,8315

Tabel 6. Lanjutan Rekapitulasi spektrum kapasitas struktur tambahan 1 lantai

	RSN 4022613				RSN 5001937		RSN 7004832	
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,1	0,0230	0,0307	0,0231	0,0272	0,0249	0,0325	0,0238	0,0301
0,2	0,0443	0,0586	0,0399	0,0509	0,0446	0,0584	0,0392	0,0541
0,3	0,0655	0,0884	0,0562	0,0820	0,0585	0,0925	0,0579	0,0792
0,4	0,0762	0,1338	0,0735	0,1149	0,0750	0,1235	0,0731	0,1123
0,5	0,0919	0,1769	0,0886	0,1488	0,0882	0,1494	0,0854	0,1302
0,6			0,1009	0,1848	0,1018	0,1679	0,0946	0,1480
0,7			0,1096	0,2220	0,1160	0,2267		
0,8			0,1155	0,2605	0,1139	0,2675		
0,9			0,1239	0,3009				
1,0			0,1336	0,3421				

Batas Kerusakan Struktur/ *Damage State*

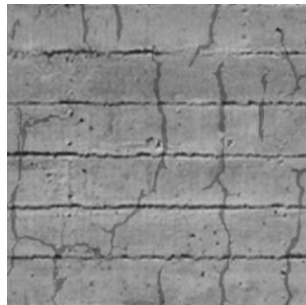
Kriteria kerusakan (*damage state*) yang sesuai dengan kriteria Hasuz diterapkan dalam analisis, namun dari batas kerusakan (*limit state*) merujuk pada hasil penelitian oleh Kristiawan (2023). Besaran nilai *drift ratio* untuk setiap batas kerusakan dapat dilihat pada **Persamaan 2.7.** sedangkan *performa criteria* yang dijadikan *input* pada *software* meliputi retak pada selimut beton (*crush unconfined*), leleh pada tulangan beton (*yield*), rusak pada inti beton (*crush confined*), *chord rotation*, kegagalan geser (*shear*), dan *fractured*.

Selain itu, pada *software seismostruct* dapat memfasilitasi penentuan batas kerusakan melalui visualisasi pada material dan elemen-elemen struktur yang ditinjau. Sebagai contoh, pada *software seismostruct* dapat menampilkan elemen balok ketika tulangan longitudinalnya mengalami leleh/ *yield*. Maka dari itu, penentuan batas kerusakan pada penelitian ini juga didasari oleh visualisasi pada *seismostruct*. Berikut merupakan visualisasi kerusakan yang terjadi pada setiap batas kerusakannya.

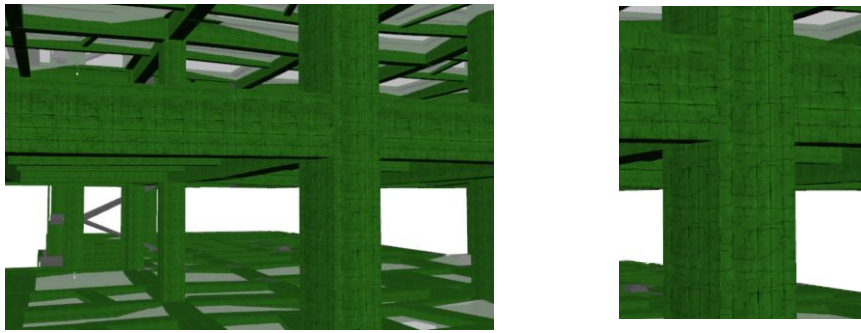
Damage state pertama atau kerusakan ringan (*slight*) merupakan kerusakan yang paling mungkin terjadi pada suatu struktur. Apabila mengacu pada teori yang digunakan, kerusakan *slight* ini didapatkan Ketika struktur mencapai batas linear elastisnya. Kita dapat menentukan batas linear elastis ini secara visual melalui grafik yang dihasilkan. Apabila dilihat dari *trend* yang dihasilkan oleh grafik, batas linear elastis ini terjadi pada *seismostruct* Ketika struktur mengalami batas rotasi atau *chord rotation* pada suatu elemen struktur. Selain itu, indikasi terjadinya *slight damage* juga diperlihatkan dengan adanya kerusakan pada selimut beton atau *crush unconfined*. Contoh perhitungan *damage state slight* pada: struktur *existing* pada rekaman gempa *sierra madre* RSN 1648 dapat dilihat sebagai berikut:

$$DS1 = 0,7 D_y$$

$$DS1 = 0,7 (0,1082751) = 0,0757926$$



Gambar 1. Visualisasi kerusakan ringan/ *slight damage* pada *seismostruct*

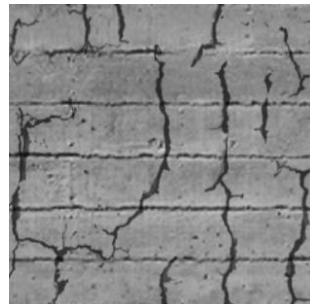


Gambar 2. Visualisasi kerusakan pada selimut beton/ *crush unconfined* pada *seismostruct*

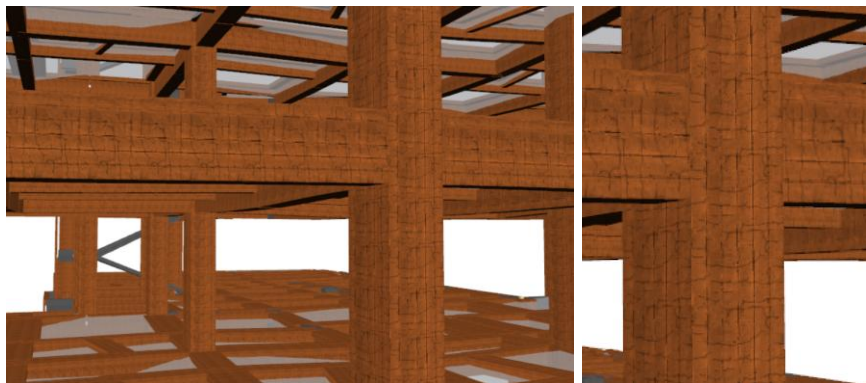
Damage state kedua atau kerusakan sedang (*moderate*) merupakan kerusakan sedang yang terjadi setelah kerusakan ringan. Apabila mengacu teori yang digunakan, kerusakan *moderate* ini didapatkan melalui persamaan dengan memperhitungkan batas linear elastis dan batas leleh (*yield*). Namun, pada *software seismostruct* kerusakan *moderate* dapat diwakilkan oleh kerusakan pada selimut beton seperti pada kerusakan *slight*. Namun, memiliki tingkat kerusakan yang lebih dibandingkan pada kerusakan *slight*. Contoh perhitungan *damage state moderate* pada: struktur eksisting pada rekaman gempa *sierra madre* RSN 1648 dapat dilihat sebagai berikut:

$$DS2 = D_y$$

$$DS2 = 0,1082751$$



Gambar 3. Visualisasi kerusakan sedang/ *moderate damage* pada *seismostruct*



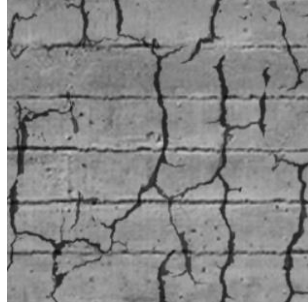
Gambar 4. Visualisasi tercapainya batas leleh/ *yield* pada *seismostruct*

Damage state ketiga atau kerusakan luas (*extensive*) merupakan kerusakan yang terjadi setelah struktur mengalami kerusakan sedang. Berdasarkan teori yang digunakan, kerusakan luas ini dapat diperhitungkan melalui batas leleh tulangan atau *yield*. Sehingga, pada *seismostruct* kerusakan ini dapat diwakilkan dengan tercapainya batas leleh pada tulangan.

Contoh perhitungan *damage state extensive* pada: struktur *existing* pada rekaman gempa *sierra madre* RSN 1648 dapat dilihat sebagai berikut:

$$DS3 = D_y + 0,25 (D_u - D_y)$$

$$DS3 = 0,1082751 + 0,25 (0,3123549 - 0,1082751) \\ = 0,159295$$



Gambar 5. Visualisasi kerusakan luas/ *extensive damage* pada *seismostruct*

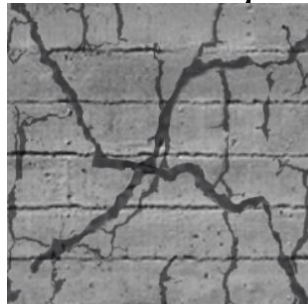
Damage state keempat sekaligus yang terakhir adalah kerusakan total atau *complete*. Pada kondisi ini struktur bangunan sudah dianggap mengalami keruntuhan. Berdasarkan teori yang digunakan, kerusakan total ini diperoleh Ketika bangunan mengalami keruntuhan/ *rapture*. Dikarenakan dalam pemodelan pada *seismostruct* tidak dapat untuk memvisualisasi keadaan runtuh. Maka, kondisi kerusakan total ini dapat diwakilkan oleh keadaan rusak pada inti beton, kegagalan geser pada balok, dan juga retak atau *fractured*. Namun, berdasarkan hasil analisis, kondisi kerusakan total ini lebih sering diwakili oleh kegagalan geser balok dan retak. Contoh perhitungan *damage state complete* pada: struktur *existing* pada rekaman gempa *sierra madre* RSN 1648 dapat dilihat sebagai berikut:

$$DS4 = D_u$$

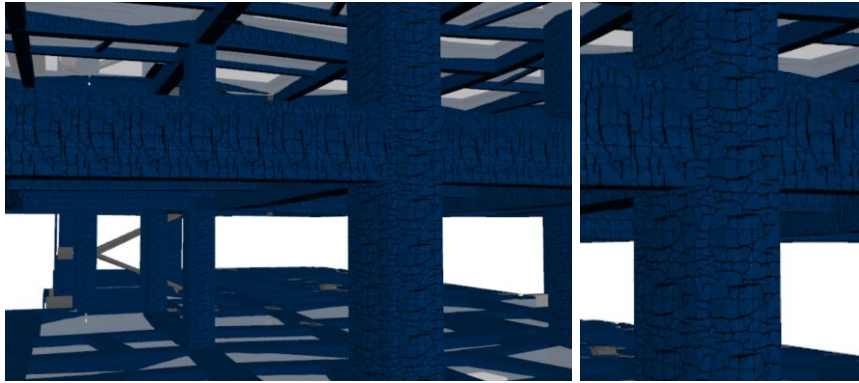
$$DS4 = 0,3123549$$



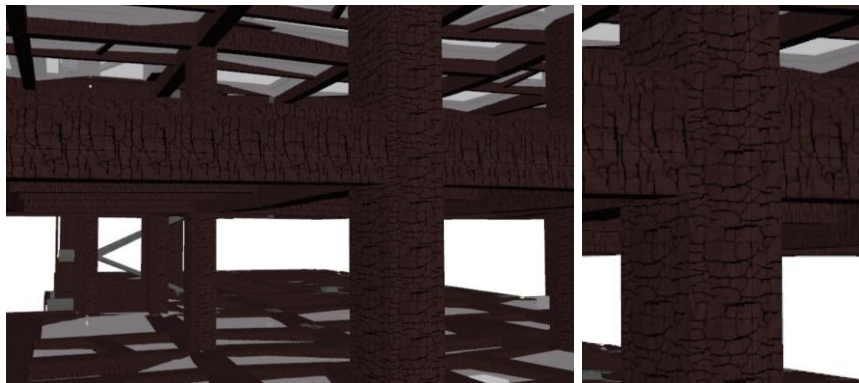
Gambar 6. Visualisasi kerusakan total/ *complete damage* pada *seismostruct*



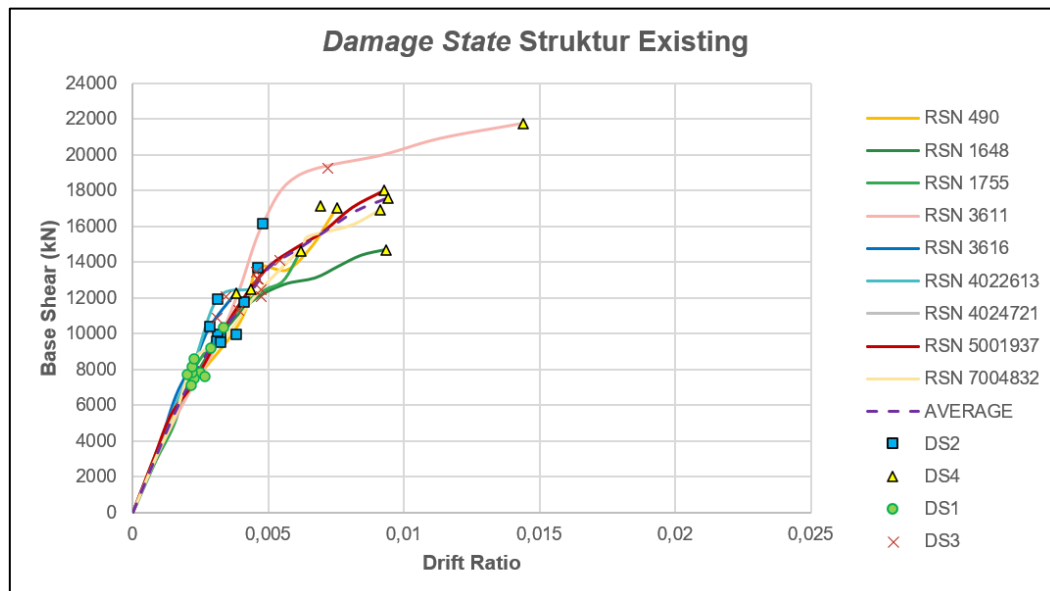
Gambar 7. Visualisasi kegagalan geser pada balok pada *seismostruct*



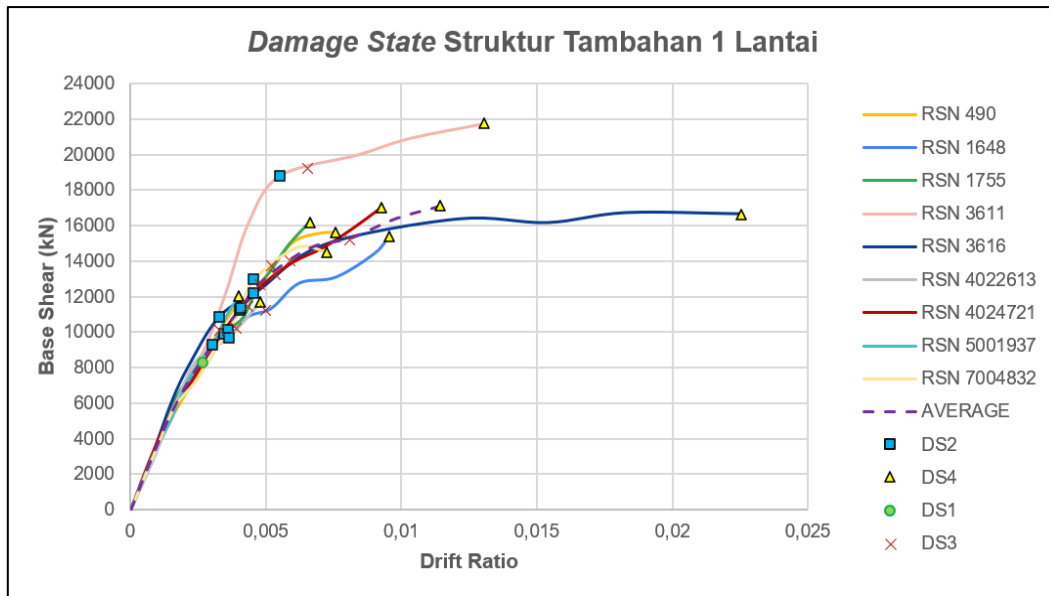
Gambar 8. Visualisasi tercapainya kerusakan pada inti beton/ *crush confined* pada *seismostruct*



Gambar 9. Visualisasi tercapainya retak/ *fractured* pada *seismostruct*
 Berdasarkan perhitungan dan analisis yang dilakukan, serta visualisasi pada *seismostruct* maka dapat ditentukan kerusakan pada setiap model struktur yang dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut.



Gambar 10. Batas Kerusakan Struktur *Existing*



Gambar 11. Batas Kerusakan Struktur Tambahan 1 Lantai

Dikarenakan ada banyaknya respons struktur yang di hasilkan oleh IDA. Maka diperlukan perhitungan nilai median dari setiap Batasan kerusakan sehingga dapat mewakili adanya variasi nilai Batasan dari kerusakan yang muncul. Untuk menentukan nilai median tersebut kita dapat mengacu pada **Persamaan 2.11**. Contoh perhitungan untuk menentukan nilai median untuk kriteria *DS1 (slight)* pada struktur *existing* sebagai berikut.

$$m = 0,07377$$

$$\sigma = 0,00872$$

$$\theta_Y = \frac{m}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{m^2} + 1}}$$

$$= \frac{0,07377}{\sqrt{\frac{0,00872^2}{0,07377^2} + 1}}$$

$$= 0,07326$$

Perhitungan lengkap dari nilai median kedua model struktur disajikan pada tabel berikut:

Tabel 7. Rekapitulasi nilai batas kerusakan struktur *existing*

Rekaman Gempa	DS1 (<i>Slight</i>)	DS2 (<i>Moderate</i>)	DS3 (<i>Extensive</i>)	DS4 (<i>Complete</i>)
	Sa (g)	Sa (g)	Sa (g)	Sa (g)
RSN 490	0,07169	0,09019	0,12291	0,15564
RSN 1648	0,06841	0,09008	0,11044	0,13428
RSN 1755	0,07148	0,09117	0,10356	0,13346
RSN 3611	0,09471	0,14788	0,17596	0,19897
RSN 3616	0,07031	0,09512	0,09940	0,11225
RSN 4022613	0,07430	0,10927	0,11046	0,11404
RSN 4024721	0,06489	0,08772	0,11940	0,16455
RSN 5001937	0,07857	0,08716	0,11375	0,15472
RSN 7004832	0,06959	0,09087	0,11934	0,15658
Jumlah	0,66393	0,88946	1,07521	1,32448

Rata-rata (m)	0,07377	0,09883	0,11947	0,14716
Deviasi (σ)	0,00872	0,01956	0,02251	0,02710
V	0,11821	0,19794	0,18843	0,18413
Median (θ)	0,07326	0,09695	0,11740	0,14473
$\beta T(ds)$	0,11780	0,19604	0,18679	0,18259
βds	0,7167	0,7336	0,7312	0,7301

Tabel 8. Rekapitulasi nilai batas kerusakan struktur tambahan 1 lantai

Rekaman Gempa	DS1 (<i>Slight</i>)	DS2 (<i>Moderate</i>)	DS3 (<i>Extensive</i>)	DS4 (<i>Complete</i>)
	Sa (g)	Sa (g)	Sa (g)	Sa (g)
RSN 490	0,06516	0,09592	0,09968	0,12278
RSN 1648	0,06211	0,07795	0,08834	0,12081
RSN 1755	0,06506	0,07936	0,08991	0,12722
RSN 3611	0,08135	0,14790	0,15113	0,17089
RSN 3616	0,06656	0,08538	0,11926	0,13074
RSN 4022613	0,06672	0,07625	0,08017	0,09195
RSN 4024721	0,06787	0,07353	0,10375	0,13364
RSN 5001937	0,07184	0,10183	0,10781	0,11386
RSN 7004832	0,05740	0,07311	0,07921	0,09456
Jumlah	0,60407	0,81121	0,91925	1,10645
Rata-rata (m)	0,06712	0,09013	0,10214	0,12294
Deviasi (σ)	0,00665	0,02385	0,02259	0,02331
V	0,09903	0,26466	0,22117	0,18959
Median (θ)	0,06679	0,08713	0,09973	0,12079
$\beta T(ds)$	0,09878	0,26019	0,21853	0,18792
βds	0,7067	0,7465	0,7331	0,7245

Perhitungan Ketidaktentuan Struktur

Pembentukan kurva kerapuhan pada penelitian ini menggunakan prosedur menurut HAZUS MH-MR5. Ukuran disperse dari kurva kapasitas diperhitungkan secara eksplisit sebagai standar deviasi ketidaktentuan (β) untuk membentuk kurva kerapuhan. Standar deviasi kerusakan struktur merupakan parameter yang mengakomodasi nilai estimasi tingkat kerusakan struktur akibat percepatan tanah serta nilai dari ketidaktentuan kapasitasnya. **Persamaan 2.7** dapat digunakan untuk menentukan standar deviasi untuk ketidaktentuan total dari tiap kondisi kerusakan (β_{ds}) yang merupakan kombinasi dari tiga standar deviasi ketidaktentuan, yaitu ketidaktentuan nilai batas kondisi kerusakan (β_c), ketidaktentuan spektrum *demand* (β_d), dan ketidaktentuan nilai batas kondisi kerusakan ($\beta_{T(ds)}$). Pada analisis ini, nilai (β_d) diambil sebesar 0,45 karena struktur memiliki periode alami kurang dari 3,5 atau periode pendek. Contoh perhitungan standar deviasi untuk kerusakan *sligt* pada struktur *existing* sebagai berikut:

$$\beta_c = 0,54517$$

$$\beta_d = 0,45$$

$$\beta_{T(ds)} = 0,11780$$

$$(\beta_{ds}) = \sqrt{(CONV[\beta_c, \beta_d])^2 + [\beta T(ds)]^2}$$

$$= \sqrt{(CONV[0,54517, 0,45])^2 + [0,11780]^2}$$

$$= 0,7167$$

Rekapitulasi standar deviasi untuk kedua model struktur pada setiap batas kerusakan disajikan pada tabel berikut:

Tabel 9. Rekapitulasi Standar Deviasi Logaritmik Normal pada Setiap Batas Kerusakan, β_{ds}

Model Struktur	DS1	DS2	DS3	DS4
<i>Existing</i>	0,7167	0,7336	0,7312	0,7301
Tambahan 1 Lantai	0,7067	0,7465	0,7331	0,7245

Kurva Kerapuhan Seismik

Kurva kerapuhan menggambarkan hubungan antara probabilitas dengan komulatif dari tiap kondisi kerusakan pada tingkat percepatan tanah tertentu. Untuk menentukan besarnya probabilitas kerusakan, dapat digunakan **Persamaan 2.6**. Perhitungan probabilitas ini dilakukan berulang-ulang dengan beberapa nilai *spectral acceleration* mulai dari 0,00 g hingga 1,00 g sehingga diperoleh titik-titik probabilitas untuk Menyusun kurva kerapuhan seismic.

Data-data sebelumnya yang telah dihitung seperti nilai median kerusakan serta standar deviasi dari setiap kerusakan yang ada digunakan dalam perhitungan probabilitas kerusakan. Berikut ini merupakan contoh perhitungan probabilitas kerusakan pada struktur *existing* tingkat kerusakan *slight* atau DS1.

$$S_a = 0,25 \text{ g}$$

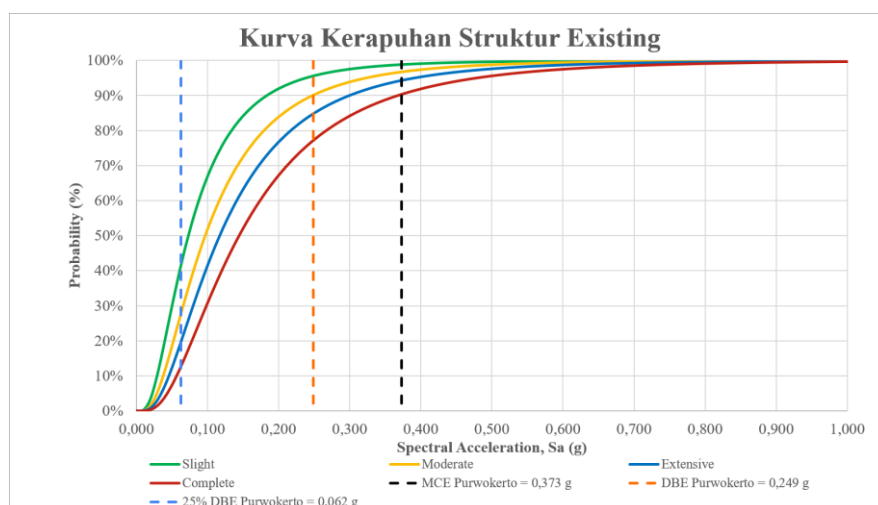
$$\theta = 0,07326$$

$$\beta_{ds} = 0,7167$$

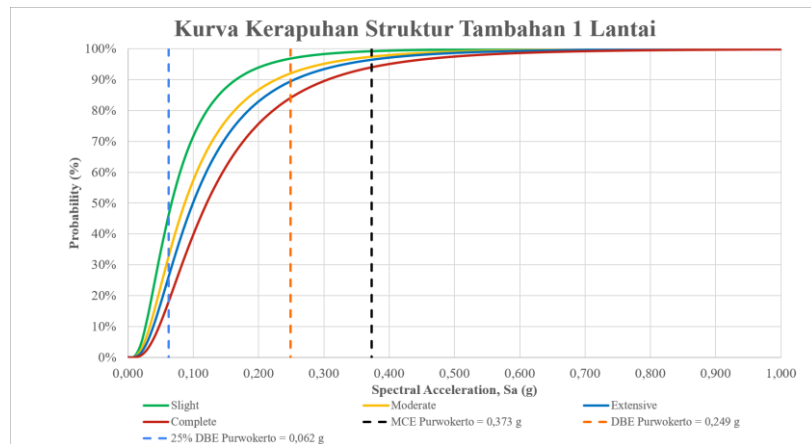
$$P = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{S_a}{\theta} \right) \right]$$

$$= \Phi \left[\frac{1}{0,7167} \ln \left(\frac{0,25}{0,07326} \right) \right] = 95,66\%$$

Kemudian dengan perhitungan yang sama, akan dilakukan perhitungan berulang kali sehingga mendapatkan nilai nilai-nilai yang dapat digunakan untuk Menyusun kurva kerapuhan seismic. Berikut merupakan kurva kerapuhan dari kedua model struktur dengan kemungkinan kerusakan yang terjadi.



Gambar 12. Kurva Kerapuhan Struktur *Existing*



Gambar 13. Kurva Kerapuhan Struktur Tambahan 1 Lantai

Kedua kurva ini menggambarkan probabilitas kerusakan pada berbagai tingkat kerusakan (*slight*, *moderate*, *extensive*, dan *complete*) terhadap *spectral acceleration* (*Sa*) dalam satuan g. jika dicermati pada nilai MCE Purwokerto sebesar 0,373 g, probabilitas kerusakan setiap kondisi sebagai berikut:

Tabel 10. Perbandingan Kurva Kerapuhan pada MCE Purwokerto 0,373 g

Tingkat Kerusakan	Existing	Tambahan 1 lantai	Perbedaan Risiko
<i>Slight</i>	98,85 %	99,26 %	0,41%
<i>Moderate</i>	96,69 %	97,43 %	0,74 %
<i>Extensive</i>	94,32 %	96,41 %	2,09 %
<i>Complete</i>	90,28 %	94,03 %	3,75 %

Penambahan 1 lantai pada struktur gedung menambah probabilitas kerusakan pada semua tingkat namun tidak signifikan dan nilainya kecil. Terlihat risiko terbesar ada pada kategori *Complete* dengan risiko 3,75 %

Dari kedua model struktur yang dianalisis menggunakan target spektrum daerah Purwokerto menunjukkan kemungkinan kerusakan yang berbeda. Model struktur tersebut telah dilakukan perhitungan menggunakan nilai percepatan spectral gempa periode 500 tahun dan 2500 tahun sesuai dengan periode masing-masing struktur. Dari hasil tersebut, dapat dikatakan bahwa kedua model struktur akan mengalami kerusakan hingga 100% pada nilai *spectral acceleration* tertentu. Kerusakan total tersebut merupakan kerusakan *DS4* atau *complete* sehingga bangunan sudah dianggap mengalami keruntuhan.

Tabel 11. Diskrit Damage pada Gempa 500 Tahunan, DBE = 0,249 g

Model	Limit State	DBE = 0,249	
		Prob.	DD
Struktur Existing	<i>Undamaged</i>	4,40%	
	<i>Slight</i>	95,60%	5,54%
	<i>Moderate</i>	90,06%	5,27%
	<i>Extensive</i>	84,79%	7,69%
	<i>Complete</i>	77,10%	77,10%
	Jumlah		95,60%
Struktur Tambahan 1 Lantai	<i>Undamaged</i>	3,14%	
	<i>Slight</i>	96,86%	4,86%
	<i>Moderate</i>	92,01%	2,62%
	<i>Extensive</i>	89,38%	5,31%
	<i>Complete</i>	84,08%	84,08%
	Jumlah		96,86%

Tabel 12. Diskrit Damage pada Gempa 2500 Tahunan, MCE = 0,373 g

Model	Limit State	MCE = 0,373 g	
		Prob.	DD
Struktur Existing	<i>Undamaged</i>	1,15%	
	<i>Slight</i>	98,85%	2,15%
	<i>Moderate</i>	96,69%	2,38%
	<i>Extensive</i>	94,32%	4,04%
	<i>Complete</i>	90,28%	90,28%
	Jumlah		98,85%
Struktur Tambahan 1 Lantai	<i>Undamaged</i>	0,74%	
	<i>Slight</i>	99,26%	1,82%
	<i>Moderate</i>	97,43%	1,02%
	<i>Extensive</i>	96,41%	2,38%
	<i>Complete</i>	94,03%	94,03%
	Jumlah		99,26%

Selain itu, kita dapat membandingkan kemungkinan kerusakan pada kedua model yang dianalisis menggunakan nilai *spectral acceleration* yang sama, pada hal ini kita menggunakan nilai 25%; 50%; 75% dari nilai DBE untuk kedua model struktur yang dianalisis. Perbandingan tersebut disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 13. Perbandingan Antara Struktur Existing dengan Tambahan 1 Lantai, Sa = 25% DBE

Model	Limit State	25% DBE = 0,249 g	
		Prob.	DD
Struktur Existing	<i>Undamaged</i>	59,03%	
	<i>Slight</i>	40,97%	13,71%
	<i>Moderate</i>	27,26%	8,01%
	<i>Extensive</i>	19,25%	6,88%
	<i>Complete</i>	12,37%	12,37%
	Jumlah		40,97%
Struktur Tambahan 1 Lantai	<i>Undamaged</i>	54,01%	
	<i>Slight</i>	45,99%	13,41%
	<i>Moderate</i>	32,59%	6,60%
	<i>Extensive</i>	25,98%	8,00%
	<i>Complete</i>	17,99%	17,99%
	Jumlah		45,99%

Tabel 14. Perbandingan Antara Struktur *Existing* dengan Tambahan 1 Lantai, Sa = 50% DBE

Model	Limit State	50% DBE = 0,249 g	
		Prob.	DD
Struktur <i>Existing</i>	<i>Undamaged</i>	23,00%	
	<i>Slight</i>	77,00%	13,70%
	<i>Moderate</i>	63,31%	10,15%
	<i>Extensive</i>	53,16%	11,37%
	<i>Complete</i>	41,79%	41,79%
	Jumlah		77,00%
Struktur Tambahan 1 Lantai	<i>Undamaged</i>	18,94%	
	<i>Slight</i>	81,06%	12,73%
	<i>Moderate</i>	68,34%	6,48%
	<i>Extensive</i>	61,86%	10,23%
	<i>Complete</i>	51,63%	51,63%
	Jumlah		81,06%

Tabel 15. Perbandingan Antara Struktur *Existing* dengan Tambahan 1 Lantai, Sa = 75% DBE

Model	Limit State	75% DBE = 0,249 g	
		Prob.	DD
Struktur <i>Existing</i>	<i>Undamaged</i>	9,60%	
	<i>Slight</i>	90,40%	9,00%
	<i>Moderate</i>	81,40%	7,71%
	<i>Extensive</i>	73,69%	10,08%
	<i>Complete</i>	63,61%	63,61%
	Jumlah		90,40%
Struktur Tambahan 1 Lantai	<i>Undamaged</i>	7,30%	
	<i>Slight</i>	92,70%	8,08%
	<i>Moderate</i>	84,62%	4,25%
	<i>Extensive</i>	80,37%	7,78%
	<i>Complete</i>	72,59%	72,59%
	Jumlah		92,70%

Apabila mengacu pada tabel diatas, struktur *existing* memiliki kemungkinan kerusakan yang lebih kecil dibandingkan struktur tambahan 1 lantai.

KESIMPULAN

Berdasarkan refrensi, pengumpulan data, pengolahan data, proses analisis dan pembahasan mengenai evaluasi struktur gedung akibat penambahan lantai dengan *incremental dynamic analysis* (studi kasus: gedung 8 lantai di purwokerto) menghasilkan Kesimpulan yang menjawab rumusan masalah sebagai berikut: 1) Berdasarkan hasil *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) menggunakan 9 rekaman data gempa (RSN) dari 3 sumber lapisan tanah, diperoleh bahwa struktur *existing* dan struktur dengan penambahan 1 lantai menghasilkan respon perpindahan (*displacement*) yang relatif sama. Perbedaan hanya terjadi pada saat

puncak respons gempa dengan selisih amplitude yang kecil sehingga tidak menunjukkan peningkatan perpindahan lateral yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan 2) lantai masih dapat diakomodasi oleh sistem struktur tanpa mengubah karakteristik dinamik maupun kinerja perpindahan lateral secara berarti. 3) Kurva kerapuhan yang dihasilkan kedua model menyatakan bahwa model struktur *existing* memiliki nilai probabilitas yang lebih rendah dibandingkan struktur penambahan 1 lantai. Dengan asumsi terjadinya gempa nilai S_a maksimum sebesar 1,00 g maka kemungkinan tercapainya kerusakan di struktur *existing* pada *slight* 98,85%, *moderate* 96,69%, *extensive* 94,32%, *Complete* 90,28%. Sedangkan pada struktur penambahan 1 lantai nilai probabilitas kerusakan pada *slight* 99,26%, *moderate* 97,43%, *extensive* 96,41%, *Complete* 94,03%. 4) Berdasarkan perbedaan nilai probabilitas kerusakan kedua model struktur terhadap 9 data gempa yang sama, dapat dinyatakan bahwa penambahan 1 lantai terbukti menurunkan tingkat kekakuan suatu struktur sehingga meningkatkan probabilitas terlampaunya batas kerusakan (kerapuhan). Tetapi struktur gedung masih dalam kondisi aman walaupun telah dilakukan penambahan 1 lantai, karena dengan 9 data gempa 5,00 hingga 7,12 magnitude kedua struktur (*existing* dan penambahan 1 lantai) tidak mengalami keruntuhan.

REFERENSI

- Abobakirova, Z., Umarov, S., Davlyatov, S., Mirzababayeva, S., Nasriddinov, H., & Mahmudov, A. (2024). Methodology for checking the seismic strength of buildings based on existing norms. *BIO Web of Conferences*, 105. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410505014>
- Advanced Engineering. (2001). Hazus-MH MR5. Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency Mitigation Division. <https://www.fema.gov/plan/prevent/hazus>
- Bayyinah, D. A. L. N., & Faimun, F. (2017). Studi perbandingan analisis respon spektra dan time history untuk desain gedung. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1), 33–38. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i1.21617>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 1726-2019: Indonesia seismic resistance design guideline for buildings and other structures. <https://www.bsn.go.id>
- Denpasar, S. M. A. N., Wiryadi, I. G. G., Giatmajaya, I. W., Agus, I. P., & Wirawan, P. (2021). Analisis riwayat waktu perilaku struktur gedung. *Jurnal Ilmiah Kurva Teknik*, 10(2), 43–52.
- Desai, K. Y., Sheth, R. K., & Patel, K. R. (2022). Performance evaluation of RC frame-wall structures using incremental dynamic analysis. *ASPS Conference Proceedings*, 1(1), 1719–1725. <https://doi.org/10.38208/acp.v1.711>
- Goodall, J. E. (1996). ATC-40 seismic evaluation and retrofit of concrete buildings (Vol. 1, No. 118). <https://doi.org/10.1049/ic:19990660>
- Imran, I., & Hendrik, F. (2016). Perencanaan lanjut. In *Struktur benton bertulang* (p. 325). ITB Press.
- Kalkan, E., & Chopra, A. K. (2010). Practical guidelines to select and scale earthquake records for nonlinear response history analysis of structures (pp. 1–113).
- Kristiawan, S. A., Hapsari, I. R., Purwanto, E., & Marwahyudi, M. (2022). Evaluation of damage limit state for RC frame based on FE modeling (pp. 1–22).
- Maidi, M., & Shufrin, I. (2024). Evaluation of existing reinforced concrete buildings for seismic retrofit through external stiffening: Limit displacement method. *Buildings*, 14(9), 2781. <https://doi.org/10.3390/buildings14092781>
- Miari, M., & Jankowski, R. (2022). Incremental dynamic analysis and fragility assessment of buildings founded on different soil types experiencing structural pounding during

- earthquakes. *Engineering Structures*, 252, 113118. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113118>
- Mirtaheeri, M., Amini, M., & Khorshidi, H. (2017). Incremental dynamic analyses of concrete buildings reinforced with shape memory alloy. *Steel and Composite Structures*, 23(1), 95–105. <https://doi.org/10.12989/scs.2017.23.1.095>
- Pawirodikromo, W. (2016). *Analisis dinamika struktur*. Pustaka Pelajar.
- Poojitha, G. N., Vinod, Y., & Lingeshwaran, N. (2021). Seismic fragility analysis of multi span highway bridge based on probabilistic approach. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5185–5193. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.518>
- Radman Ahmed, A. A., Lu, L., Li, B., Bi, W., & Al-Dhubai, F. M. A. (2025). Seismic vulnerability assessment of residential RC buildings in Yemen using incremental dynamic analysis (IDA). *Buildings*, 15(8), 1336. <https://doi.org/10.3390/buildings15081336>
- Rahul, R., & Uttam, K. (2018). Incremental dynamic analysis and static pushover analysis of existing RC framed buildings using the seismostruct software. *International Journal of Advance Research*, 4(2), 2088–2101. Retrieved from www.IJARIIIT.com
- Saputro, H. M. W., Sangadji, S., & Alfisa, H. (2024). Fragility of existing building structure due to floor addition (Case: Grand Heaven Pluit building renovation, North Jakarta). *EasyChair Preprint*.
- SeismoStruct. (2018). *SeismoStruct user manual*. <https://seismosoft.com/>
- Syahrin, A. (2016). Pengaruh gempa berulang mengandung efek fling terhadap kurva kerapuhan sistem rangka pemikul momen beton bertulang (pp. 1–23).
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- Vargas, Y. F., Pujades, L. G., Barbat, A. H., & Hurtado, J. E. (2011). Incremental dynamic analysis and pushover analysis.
- Wanto, S. (2022). Kerapuhan struktur baja eksisting dengan perkuatan seismik X-bressing [Tesis, Universitas Sebelas Maret]. <https://digilib.uns.ac.id/dokumen/detail/85768/>
- Wulandari, C., Pramesti, D. W. I., Teknik, F., & Maret, U. S. (2025). Analisis risiko seismik bangunan publik dengan isolasi dasar menggunakan metode incremental dynamic analysis (IDA) [Tesis, Universitas Sebelas Maret].