

Analisis kerapuhan struktur gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan dengan *static adaptive pushover*

Arum Narwastu^{1,*}, Senot Sangadji², Rida Handiana Devi¹, Hendramawat Aski Safarizki¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Veteran Bangun Nusantara, Sukoharjo, Jawa Tengah, Indonesia

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

*Corresponding authors: arumnar5@gmail.com

Submitted: 11 July 2023, Revised: 29 June 2024, Accepted: 30 June 2024

ABSTRACT: Information from BMKG indicates an increase in earthquake occurrences in Pacitan Regency in recent years, a phenomenon that has been noticeable to the local community. Considering that the building of the Pacitan District Agriculture Office has been standing for about five years, a structural performance analysis is needed to ensure the building's strength in resisting earthquake damage. This research aims to investigate the structural response of a building when subjected to structural analysis due to deformation caused by dynamic seismic forces using the Seismostruct software. In this study, an adaptive pushover method was developed, considering the stiffness and modal characteristics of the structure at different levels of inelasticity to update the distribution of lateral loads. This method also considers the location-specific spectrum for load scaling. The results showed that this new approach yielded static analysis results that closely approximated inelastic dynamic analysis and could predict the structural response in detail. The existing building structure will be modeled as a structure, including column and beam frames with material specifications and dead and live loads, based on data obtained following SNI 1726:2012 regulations. The structural behavior analysis will be conducted using the static adaptive pushover method. From this research, the maximum value of the capacity curve for the building under study occurred at a base shear of 2070.595 kN and a displacement of 0.060971 m. The converted spectral displacement was found to be 0.47 m with a slight limit state of 100%, a moderate limit state of 100%, an extensive limit state of 99%, and a complete limit state of 71%.

KEYWORDS: capacity curve; fragility curve; static adaptive pushover.

ABSTRAK: Informasi dari BMKG menunjukkan peningkatan aktivitas gempa di Kabupaten Pacitan dalam beberapa tahun terakhir, yang dirasakan oleh masyarakat. Mengingat usia bangunan Gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan sudah berdiri sekitar 5 tahun lamanya, diperlukan analisis kinerja struktur untuk memastikan kekuatan bangunan dalam menahan kerusakan akibat gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui respon struktur suatu bangunan saat dilakukan suatu analisis struktur akibat deformasi karena gaya dinamis gempa pada *software Seismostruct*. Dalam studi ini, dikembangkan metode *pushover* adaptif yang memperhitungkan kekakuan dan sifat modal struktur pada tingkat inelastisitas yang berbeda untuk memperbarui distribusi beban lateral. Metode ini juga mempertimbangkan spektrum lokasi penelitian untuk penskalaan gaya. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan baru ini menghasilkan hasil analisis statis yang mendekati analisis dinamis inelastis dan mampu memprediksi respons struktur secara rinci. Struktur gedung eksisting tersebut akan dimodelkan menjadi struktur, meliputi rangka kolom dan balok dengan spesifikasi material beserta beban mati maupun beban hidup sesuai data yang sudah didapatkan sesuai peraturan SNI 1726:2012 dan dilakukan analisis perilaku struktur menggunakan metode *static adaptive pushover*. Dari penelitian ini didapatkan nilai maksimum kurva kapasitas pada gedung yang menjadi objek penelitian ini terjadi saat base shear sebesar 2070.595 kN pada displacement sebesar 0.060971 m sesuai konversi didapat spectral displacement 0.47 m limit state slight sebesar 100 %, limit state moderate sebesar 100 %, limit state extensive sebesar 99 %, dan limit state complete sebesar 71%.

KATA KUNCI: kurva kapasitas; kurva kerapuhan; *static adaptive pushover*.

© The Author(s) 2020. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1 PENDAHULUAN

Pacitan merupakan salah satu dari 38 Kabupaten di Provinsi Jawa Timur dan di ujung timur pantai selatan Pulau Jawa tepatnya di selatan barat daya dengan luas wilayah 1,389.87 km². Jika ditinjau dari wilayah geografisnya Kabupaten Pacitan terletak pada 110°55'-110°25' Bujur Timur dan 7°55'-8°17' Lintang Selatan yang berbatasan langsung dengan Provinsi Jawa Tengah dan pintu gerbang bagian barat

Jawa Timur berbatasan dengan Yogyakarta, yang terdiri dari pegunungan kapur selatan membentang dari Gunung Kidul hingga Kabupaten Trenggalek dan menghadap Samudera Indonesia (Pratama, 2014).

Kondisi geologis Kabupaten Pacitan dilewati oleh sesar grindulu dan berhadapan langsung dengan daerah *subduction* menjadikan wilayah Kabupaten Pacitan rawan terjadi gempa bumi. Hasil monitoring BMKG terhadap aktivitas kegempaan sejak 2008 menunjukkan

bahwa di wilayah selatan Pacitan beberapa kali terbentuk kluster seismik aktif, meskipun kluster pusat gempa yang terbentuk tidak diakhiri dengan terjadinya gempa besar. Wilayah selatan Pacitan merupakan bagian dari zona aktif gempa di Jawa Timur yang mengalami peningkatan aktivitas kegempaan, di wilayah ini pada beberapa tahun terakhir sering terjadi aktivitas gempa signifikan yang guncangannya dirasakan masyarakat. Hal ini diperkuat dengan pernyataan Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral mengungkapkan fakta bahwa pada hari Minggu, tanggal 17 Juli 2022, pukul 16:13:05 WIB, BMKG mendeteksi terjadi gempa bumi yang berpusat di Samudera Hindia pada koordinat 9.14 LS dan 110.83 BT, dengan magnitudo (M5.5) pada kedalaman 10 km dan jarak sekitar 108.6 km di selatan – barat daya Kabupaten Pacitan, Provinsi Jawa Timur. Dampak dari gempa bumi yang terjadi adalah penduduk yang berada pada Kawasan Rawan Bencana dapat merasakan guncangan gempa, namun sejauh ini belum ada informasi terkait kerusakan bangunan.

Gempa bumi terjadi saat permukaan tanah bergetar karena pelepasan energi yang tiba-tiba akibat pecahnya batuan di lapisan kerak bumi. Energi ini terakumulasi dan terperangkap selama waktu yang lama sebelum akhirnya terlepas dan menyebar ke segala arah hingga ke permukaan tanah. Hal ini membuat permukaan tanah bergelombang dan mengakibatkan getaran pada bangunan di atasnya. Getaran tersebut menghasilkan gaya pada struktur bangunan karena massa bangunan cenderung untuk bertahan dari gerakan tersebut (Pawirodikromo, 2012). Analisis gempa terhadap struktur perlu dikembangkan untuk mengurangi adanya kerugian atau korban jiwa akibat kegagalan struktur (Muto, 1963).

Ditinjau dari letaknya, Gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan terletak pada lokasi yang sangat berdekatan dengan episentrum dan hiposentrum gempa yang telah terjadi di sepanjang tahun 1840 hingga tahun 2022. Mengingat bahwa bangunan ini sudah berdiri sekitar 5 tahun lamanya, maka diperlukan analisis kinerja struktur apakah bangunan tersebut mampu menahan kerusakan yang diakibatkan karena gempa dan tidak terjadi keruntuhan struktur yang berarti.

Dalam studi ini, penulis menggunakan metode *pushover* adaptif untuk mengatasi keterbatasan dalam prosedur statis. Metode ini mempertimbangkan kekakuan saat ini dan sifat modal struktur pada berbagai tingkat inelastisitas untuk memperbaiki distribusi beban lateral. Selain itu, metode ini juga memperhitungkan spektrum khusus lokasi penelitian untuk penskalaan gaya. Metode analisis tersebut mengasumsikan distribusi beban lateral awal, sedangkan beban tambahan berikutnya yang diberikan merupakan perhitungan dari *base shear* dan *storey resistances* pada langkah sebelumnya (Bracci et al., 1997). Beban yang diterapkan terus diperbarui

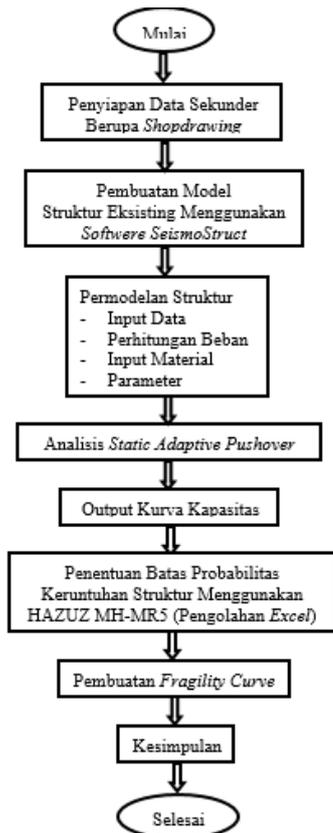
berdasarkan karakteristik waktu sesaat dinamik pada struktur dan spektrum lokasi spesifik yang digunakan untuk menentukan pola beban (Gupta dan Kunnath, 2000). Pendekatan baru ini menghasilkan hasil analisis statis yang mendekati analisis dinamis tidak elastis dan mampu memprediksi respons struktur dengan detail yang baik (Devi, 2020). Pendekatan tersebut telah dilakukan dengan model bangunan tidak beraturan yang hasil kurva kapasitasnya dari adaptive paling dekat dengan analisis dynamic dibandingkan dengan distribusi *uniform* dan *triangular* (Antonio & Pinho, 2004).

Didukung dengan adanya *software SeismoStruct* yang berfokus untuk menganalisis struktur akibat deformasi karena gaya dinamis gempa serta minimnya penelitian terhadap gempa di Kabupaten Pacitan. Oleh karena hal tersebut, Gedung Dinas Pertanian Pacitan akan dilakukan analisis perilaku struktur menggunakan analisis *static adaptive pushover* dengan permodelan 3D struktur eksisting dan peneliti menentukan batasan kurva kerapuhan dengan metode HAZUS MH-MR5.

2 METODOLOGI

Dalam alur kerja analisis penelitian, ada beberapa implementasi diperlukan. Hal ini dilakukan untuk memudahkan pelaksanaan penelitian, sehingga diperoleh hasil yang sesuai dengan rumusan dan tujuan penelitian. Gambar 1 merupakan langkah penelitian ini:

1. Mengumpulkan data sekunder berupa gambar struktur dan gambar arsitektur.
2. Menentukan metode yang akan dipakai yaitu, analisis *adaptive static pushover*.
3. Membuat permodelan 3D dengan program *SeismoStruct* menggunakan struktur eksisting.
4. Prosedur dalam perencanaan model yang mencakup besarnya beban rencana mengikuti ketentuan mengenai perencanaan dalam sebuah tatacara berdasarkan pada asumsi bahwa suatu struktur direncanakan guna untuk memikul beban kerja sebagai beban gravitasi dan sesuai ketentuan SNI 1727-2020.
5. Menentukan *material properties* (jenis material yang dipakai yaitu: beton bertulang) dan menentukan *section properties* profil dimensi balok dan kolom.
6. Menghitung *tributary area* untuk mengetahui beban yang akan didistribusikan ke balok-balok.
7. Beban mati dan beban hidup bersumber pada SNI – 1727, 2020.
8. Batasan kurva kerapuhan menggunakan metode HAZUS-MH MR5.
9. Analisis *adaptive pushover* yang akan dibuat untuk mengetahui kurva kerapuhan (*fragility curve*).

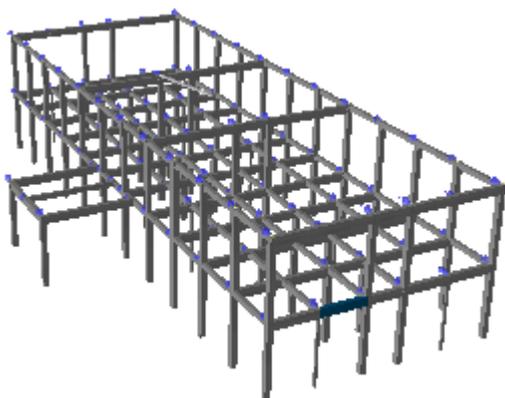


Gambar 1. Diagram alir penelitian

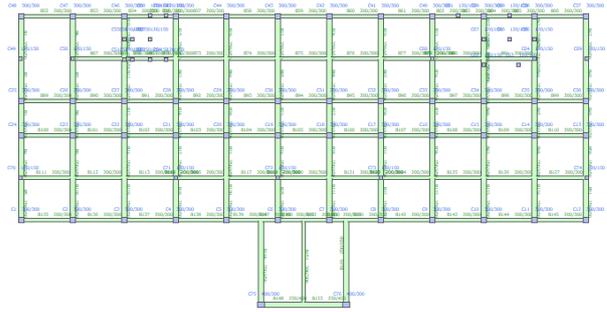
2.1 Permodelan Struktur Gedung

Dalam penelitian ini menggunakan gedung yang fungsi utamanya sebagai perkantoran dengan tinggi bangunan 2 lantai dan masing-masing lantainya memiliki tinggi 4 meter. Denah panjang 33 meter dan lebar 12 meter dengan jarak antar kolom 3 meter. Konstruksi gedung yang menjadi objek penelitian gedung adalah struktur beton bertulang dan menggunakan permodelan struktur eksisting bentuk portal 3 dimensi dengan analisis *static adaptive pushover* menggunakan program *SeismoStruct*.

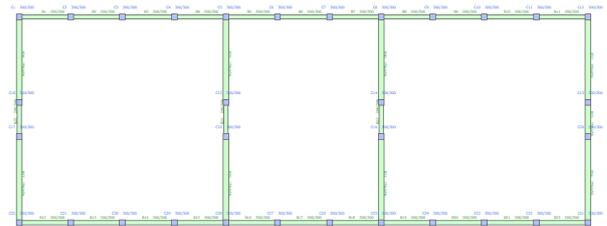
Pemodelan 3D diperlihatkan seperti pada Gambar 2 tentang rangka struktur eksisting, Gambar 3 berupa rangka struktur *building modeller* lantai 1, dan Gambar 4 menunjukkan rangka *building modeller* lantai 2.



Gambar 2. Struktur eksisting



Gambar 3. Rangka struktur *building modeller* lantai 1



Gambar 4. Rangka struktur *building modeller* lantai 2

2.2 Metode Analisis *Static Adaptive Pushover*

Prosedur *adaptive pushover* telah diuji dan diverifikasi menggunakan perangkat lunak *SeismoStruct*. Keuntungan utamanya adalah kemampuan untuk menghitung profil gaya yang tepat dengan analisis modal pada setiap langkah tanpa mengalami masalah stabilitas atau kinerja. Metode ini juga sangat fleksibel dan mendukung berbagai pilihan, seperti:

1. Memperbesar skala kekuatan model dengan atau tanpa mempertimbangkan amplifikasi spektral. Analisis spesifik lokasi dapat dilakukan dengan memperbarui distribusi kekuatan, tetapi hanya berdasarkan pada sifat modal struktur.
2. Menggunakan spektrum yang ditentukan oleh pengguna (berdasarkan kode) atau menggunakan data tertentu untuk mendapatkan koordinat spektral.
3. Memperbarui distribusi beban pada setiap langkah perhitungan untuk meningkatkan akurasi dan stabilitas, atau pada langkah-langkah yang telah ditentukan untuk mengurangi usaha komputasi (Antoniou et al., 2004).

Distribusi beban lateral dalam metode *adaptive pushover* diperbarui terus-menerus selama analisis dilakukan berdasarkan bentuk mode, faktor modal partisipasi, massa tiap lantai, amplifikasi spectral dari nilai eigen. Metode ini mempertimbangkan pelemahan struktur, perpanjangan periode struktur, dan modifikasi gaya inersia akibat amplifikasi spektral. Selain distribusi gaya, deformasi profil juga digunakan untuk mengetahui respons struktur terhadap beban seismik dan mengatasi kelemahan pendekatan *fixed-pattern*

displacement pushover. Dengan demikian, hasil analisis lebih akurat dalam mengevaluasi struktur dengan spesifikasi bangunan yang memiliki efek mode yang lebih tinggi dan ketidakteraturan. Elemen akan memperlihatkan respon yang lebih realistis karena beban yang selalu bertambah di setiap langkahnya dalam menggambarkan kerusakan yang diakibatkan beban seismic (Devi & Sangadji, 2022).

Dalam *seismostruct*, *adaptive pushover* membutuhkan parameter tambahan. Terdapat tiga jenis penskalaan yang dapat digunakan, yaitu penskalaan berbasis gaya (*force based*), penskalaan berbasis perpindahan (*displacement based*), dan penskalaan berbasis geser antar-lantai (*inter-storey drift based*). Derajat kebebasan MPF (*modal participation factor*) digunakan dalam menghitung faktor partisipasi dan menentukan derajat kebebasan. Terakhir, efek amplifikasi spektral pada kombinasi solusi vektor beban modal yang berbeda memiliki tiga opsi, yaitu tanpa amplifikasi spektral, menggunakan akselerogram, dan *user-defined spectrum*.

Setelah memodelkan struktur dan memasukkan data yang relevan, termasuk material, spesifikasi dan pembebanan, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis struktur (*run analysis*) untuk menghitung gaya internal dan respon struktur yang terjadi. Perhitungan ini mengacu pada standar yang berlaku, seperti perhitungan pengaruh beban gempa sesuai dengan SNI 1726:2019. Berdasarkan hasil perhitungan, analisis data, dan pembahasan, kesimpulan dapat diambil sesuai dengan tujuan penulisan.

2.3 Material Properties

Material yang digunakan dalam *software SeismoStruct* menggunakan model material baja dari Menegotto-Pinto dilambangkan sebagai model *stl_mp* dan material beton bertulang menggunakan model Mander *nonlinier concrete model* yang dilambangkan dengan *con_ma*.

2.3.1 Material properti baja tulangan

Penguatan dalam merancang suatu struktur yang dimodelkan dengan rumus yang diusulkan oleh model baja Menegotto-Pinto (*stl_mp*) untuk mempertimbangkan aturan pengerasan isotropik. Model ini memberikan tingkat akurasi dan stabilitas struktur beton bertulang dalam pembebanan pada seismik (Tabel 1) (Manegotto & Pinto, 1973).

2.3.2 Material properti beton

Beton diaplikasikan berdasarkan metode dari Mander yaitu *nonlinier* model beton (*con_ma*), yang didefinisikan sebagai suatu model pengekanan konstan *nonlinier unaksial*. Efek penahan ditunjukkan oleh tulangan lateral transversal dengan bantuan tekanan konstan yang diasumsikan pada semua batas tegangan-regangan (Tabel 2) (Mander et al 1988).

Tabel 1. Sifat material baja dengan model baja *Menegotto-Pinto*

<i>Material Properties</i>	Fy
<i>Modulus of elasticity (kPa)</i>	200000000
<i>Yield strength (kPa)</i>	420000
<i>Strain hardening parameter</i>	0.005
<i>Transition curve initial shape parameter</i>	20
<i>Transition curve shape calibrating coefficients</i>	18,5
<i>Fracture/buckling strain cult</i>	0,1
<i>Specific weight γ (kN/m³)</i>	78

Tabel 2. Sifat material beton dengan model beton *Nonlinier Mander*

<i>Material Properties</i>	Fc
<i>Compressive strength (kPa)</i>	38000
<i>Tensile strength (kPa)</i>	2900
<i>Modulus of elasticity (kPa)</i>	28972745.81
<i>Strain at peak stress (m/m)</i>	0.002
<i>Specific weight (kN/m³)</i>	24

2.4 Respon Spektrum Gempa

Respon spektrum adalah spektrum yang direpresentasikan dalam bentuk grafik atau bagan antara periode getaran struktur dengan redaman dan respons maksimum berdasarkan rasio gempa yang spesifik. Untuk mendapatkan kurva respons spektrum di suatu lokasi, ada prosedur yang harus diperhatikan dan dilakukan (*site specific response spectrum*):

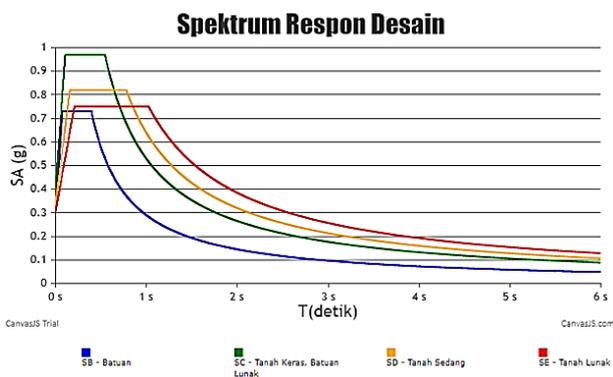
1. Studi bahaya gempa yaitu pengkajian seberapa besar suatu gempa yang nantinya akan digunakan sebagai tolak ukur dalam menginput pergerakan batuan dasar yang dihubungkan dengan resiko intensitas kekuatan gempa di wilayah tersebut dan periode ulang gempa yang bersangkutan serta standar desain atau massa layan sebuah struktur yang akan dibangun.
2. Studi respon dinamis tanah adalah tahapan dengan mempertimbangkan pengaruh lapisan endapan tanah pada batuan dasar dan sifat geometrinya.

Berdasarkan SNI-03-1726-2019 kurva respon spektrum gempa merupakan grafik hubungan antara percepatan respon spektra (S_a) dan periode (T). Menentukan respon percepatan desain S_{DS} , S_{D1} , T_0 , T_s dan T_L untuk membuat respon spektrum desain.

Prosedur untuk memperoleh grafik respon spektrum gempa adalah sebagai berikut:

1. Menentukan lokasi bangunan yang akan direncanakan
2. Plot koordinat lokasi bangunan pada peta respon spektra percepatan 0.2 detik (S_s) dan 1 detik (S_1) di batuan dasar menentukan faktor amplifikasi terkait percepatan yang mewakili getaran periode 0 detik (F_{PGA}), periode 0.2 detik (F_a), dan periode 1.0 detik (F_v).
3. Menentukan nilai S_s dan S_1 .
4. Menentukan klasifikasi atau kelas situs, berdasarkan kondisi tanah (keras, sedang, lunak) dan klasifikasi kecepatan rambat gelombang geser, SPT atau kuat geser.
5. Menentukan faktor amplifikasi periode 0.2 detik (F_a) dan 1 detik (F_v) berdasarkan klasifikasi *site* (kelas situs).
6. Menghitung S_{MS} dan S_{M1} di permukaan tanah.

Sedangkan untuk menentukan parameter percepatan gempa batuan dapat diakses melalui *website* resmi dari Litbang Puskim Kementerian PUPR (Gambar 5 dan Tabel 3).



Gambar 5. Spectra percepatan di lokasi gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan (Sumber: PU, 2021)

Tabel 3. Data respon spektrum gempa gedung dinas pertanian kabupaten pacitan

Kelas	T_0	T_s	S_{ds}	S_{d1}
SB	0.08	0.4	0.73	0.29
SC	0.11	0.55	0.97	0.53
SD	0.16	0.78	0.82	0.64
SE	0.21	1.03	0.75	0.77
Bujur			111.0849436	
Lintang			-8.19972488	
PGA			0.5296	
S_s			1.2091	
S_1			0.5484	
TI			20	

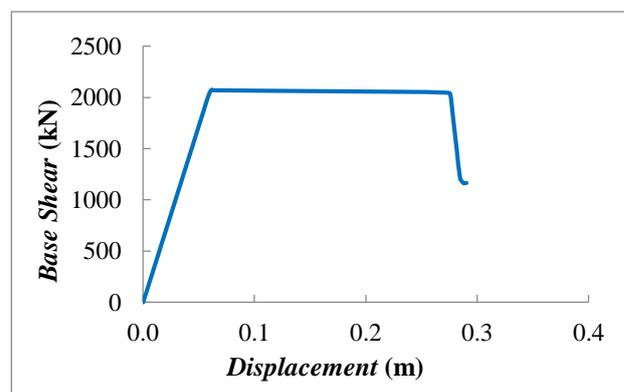
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini merupakan langkah-langkah dalam melakukan analisis *adaptive pushover* dalam *software Seismostruct* hingga mendapat hasil akhir kurva kerapuhan:

3.1 Kurva Kapasitas

Kurva kapasitas adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dan simpangan atap (*roof displacement*). Meskipun metode ini sederhana, informasi yang dihasilkan sangat berguna karena dapat menggambarkan respons bangunan yang tidak elastis. Perubahan perilaku struktur dari keadaan elastis menjadi keadaan plastis dapat dikenali dari penurunan kemiringan kurva, yang disebabkan oleh pembentukan sendi plastis pada balok dan kolom. Sendi plastis ini terjadi ketika beban yang diterapkan pada struktur melebihi kapasitas momen lentur struktur yang diizinkan. Semakin banyak sendi plastis yang terbentuk, semakin baik struktur tersebut dalam menyerap energi sebelum mencapai batas kapasitasnya (Pranata, 2006).

Berdasarkan model struktur yang telah dimodelkan dalam program *Seismostruct* dengan menggunakan analisis *adaptive pushover* didapatkan kurva kapasitas yang menggambarkan hubungan antara gaya *base shear* (sumbu Y) dalam satuan kN dan *roof displacement* (sumbu X) dalam meter. Kurva kapasitas merupakan hasil analisis *adaptive pushover* untuk model struktur gedung eksisting dengan batas kerusakan berdasarkan performa kriteria *SeismoStruct*.



Gambar 6. Kurva kapasitas gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan.

Berdasarkan kurva kapasitas pada Gambar 6, dapat diketahui bahwa nilai maksimum *base shear* struktur eksisting sebesar 2070.595 kN pada *displacement* sebesar 0.060971 m.

3.2 Pembentukan Spektrum Kapasitas

Setelah kurva kapasitas hasil *adaptive pushover* dianalisis, kurva kapasitas tersebut diubah menjadi spektrum kapasitas dengan format ADSSR

(Acceleration Displacement Spectrum Response). Spektrum kapasitas menggambarkan hubungan antara *spectral displacement* (S_d) sumbu X dan *spectral acceleration* (S_a) sumbu Y yang terjadi saat struktur menerima percepatan tanah tertentu. Gambar 3.3 adalah spektrum kapasitas hasil *adaptive pushover* yang diubah dengan format ADRS. Spektrum kapasitas untuk struktur Gedung Pertanian Kabupaten Pacitan.

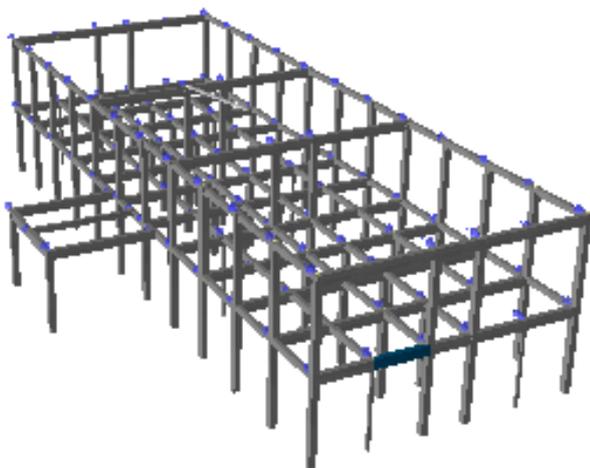
3.2.1 Metode konversi idealisasi perhitungan nilai α dan PF

Sebelum memasuki tahap konversi dari kurva kapasitas ke spektrum kapasitas perlu dilakukan *Eigen analysis*. Analisis dan hasilnya dapat diolah secara langsung oleh *SeismoStruct*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Berat Struktur per Lantai

Lantai	Massa (ton)	Berat (kN)
2	46.560	456.756
1	146.162	1433.851
Total	192.722	1890.607

Pada Gambar 7 dan Tabel 5 merupakan hasil pemodelan struktur eksisting yang dilakukan oleh *SeismoStruct*.



Gambar 7. Hasil pemodelan struktur eksisting (*output* dari *SeismoStruct*)

Tabel 5. Idealized conversion method convert to ADRS

Struktur Eksisting	W (kN)	m	ϕ (m)	ϕ^2	$m \times \phi$	$m \times \phi^2$
Lantai 2	456.75	46.56	0.0029	0.000008	0.13	0.00039
Lantai 1	143.85	146.16	0.0019	0.000004	0.27	0.00053
Σ	1890.6	192.72	0.0048	0.00001	0.41	0.00092

3.2.2 Konversi kurva kapasitas ke dalam kurva spektrum kapasitas

Mengkonversi kurva kapasitas (*base shear-displacement*) menjadi kurva spektrum kapasitas (*spectral acceleration-spectral displacement*) berdasarkan ATC-40, maka akan diperoleh nilai *PF1* dan $\alpha 1$, yaitu parameter untuk mengubah kurva kapasitas yang diperoleh ke dalam format ADRS (*Acceleration Displacement Response Spectrum*).

$$(\Sigma m_i \phi_i)^2 = (0.75070)^2 = 0.563$$

$$(\Sigma m_i \phi_i^2) = 0.003$$

$$(\Sigma m_i) = 192.722$$

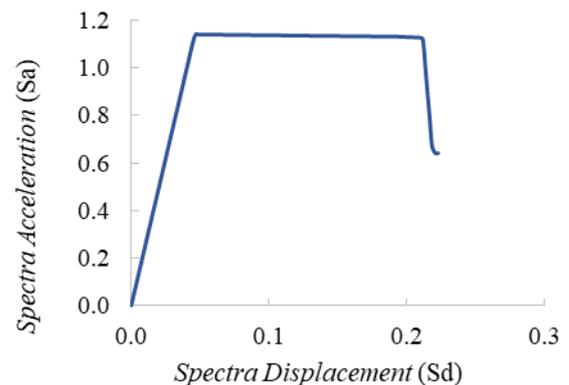
$$\alpha 1 = \frac{(m_i \phi_i)^2}{(m_i \phi_i^2) \times (\Sigma m_i)} = \frac{0.563^2}{0.003 \times 192.722} = 0.961$$

$$PF1 = \frac{(m_i \phi_i)}{(m_i \phi_i^2)} = \frac{0.750}{0.003} = 246.806 \text{ m}^{-1}$$

Perhitungan S_a dan S_d :

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha 1} = \frac{186.780/1890.607}{0.961} = 0.102$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF1 \cdot \phi_{roof1}} = \frac{0.005}{246.807 \times 0.00528} = 0.004$$



Gambar 8. Spektrum kapasitas gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan.

Berdasarkan spektrum kapasitas pada Gambar 8 dapat diketahui nilai dengan S_a maksimal sebesar 1.139 dan S_d 0.047 pada Gedung Dinas Pertanian Pacitan.

3.3 Pembentukan Kurva Kerapuhan

Kurva kerapuhan adalah kurva yang merepresentasikan probabilitas/persentase kemungkinan dengan dihubungkan antara batasan kerusakan struktur (*damage states*) terhadap parameter spektral tertentu sebagai *Intensity Measurement* (baik parameter intensitas yang berupa percepatan/*acceleration* ataupun perpindahan/*displacement*) (Saruddin *et al.*, 2015).

Ditinjau dari struktur bangunannya, gedung yang menjadi objek penelitian ini jika diklasifikasikan menurut definisi HAZUS termasuk dalam kategori gedung *low rise-buildings-moderate-code design level*

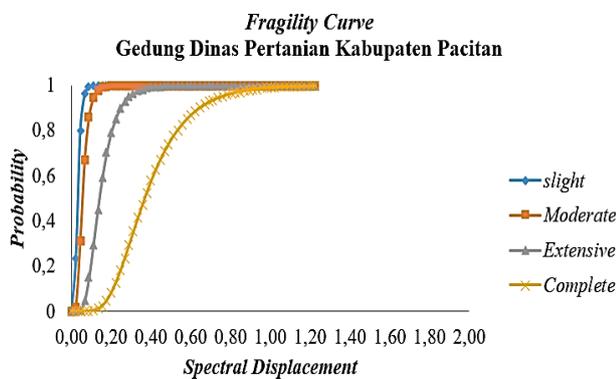
karena memiliki ketinggian 2 lantai dengan Label C1 yaitu jenis bangunan *Concrete Moment Frame* yang dimana nilai koefisien *interstory drift (ID) ratio* dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6. *Interstory drift ratio* berdasarkan tabel HAZUS average inter-story drift ratio (β ds) of structural damage states

Low Rise-Buildings-Moderate-Code Design Level	
<i>Slight</i>	0.0050
<i>Moderate</i>	0.0090
<i>Extensive</i>	0.0230
<i>Complete</i>	0.0600

Tabel 7. *Damage states* berdasarkan *interstory drift ratio* – HAZUS MH-MR5

Limit State	Sd (m)	β LS	β C	β D	β Total
<i>Slight</i>	0.031	0.40	0.40	0.45	0.4386
<i>Moderate</i>	0.055	0.40	0.40	0.45	0.4386
<i>Extensive</i>	0.141	0.40	0.40	0.45	0.4386
<i>Complete</i>	0.368	0.40	0.40	0.45	0.4386

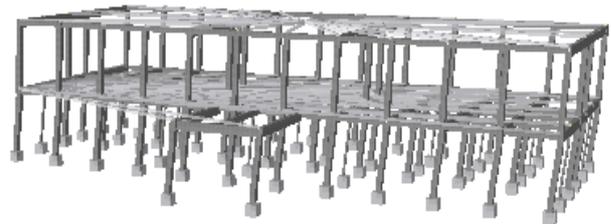


Gambar 8. Kurva kerapuhan gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan.

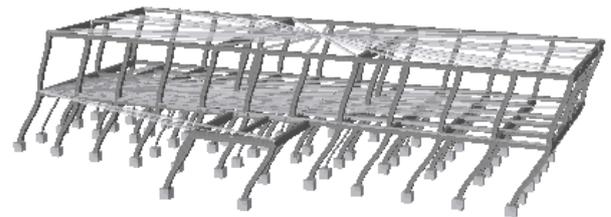
Pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa probabilitas terlampauinya batas kerusakan struktur Gedung Dinas Pertanian Pacitan saat beban gempa menghasilkan *spectral displacement* sebesar 0.47 m pada kerusakan ringan (*limit state slight*) sebesar 100%, kerusakan sedang (*limit state moderate*) sebesar 100%, kerusakan berat (*limit state extensive*) sebesar 99%, dan keruntuhan total (*limit state complete*) sebesar 71% serta pada *spectral displacement* 1.23 m mengalami kerusakan ringan (*limit state slight*) sebesar 100%, kerusakan sedang (*limit state moderate*) sebesar 100%, kerusakan berat (*limit state extensive*) sebesar 100%, dan keruntuhan total (*limit state complete*) sebesar 100 %.

3.4 Output 3 Dimensi Deformasi Struktur

Hasil 3D deformasi struktur gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan dengan program *SeismoStruct* pada Gambar 9 sebagai *output displacement* 0.060971 m yang merupakan nilai *base shear* maksimum dan Gambar 10 pada *output displacement* 0.278758 m sebagai target *displacement* yang ditentukan untuk mengetahui kurva kapasitas ditampilkan dalam gambar dibawah ini:



Gambar 9. *Output* deformasi 3D gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan pada *displacement* 0.060971 m.



Gambar 10. *Output* deformasi 3D gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan pada *displacement* 0.278758 m.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis *adaptive pushover* pada struktur bangunan Gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan yang telah dilakukan maka didapat kesimpulan bahwa hasil analisis pada struktur bangunan Gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan, *base shear* mencapai nilai maksimum sebesar 2070.595 kN saat terjadi pergeseran sebesar 0.060971 m. Berdasarkan HAZUS-MH MR5 gedung yang menjadi objek penelitian termasuk dalam klasifikasi *low rise-buildings-moderate-code design level* karena memiliki ketinggian 2 lantai dengan Label C1 yaitu jenis bangunan *concrete moment frame*.

Hasil kurva kerapuhan menunjukkan bahwa probabilitas terjadinya kerusakan struktur gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan pada *spectral displacement* 0.47 m menunjukkan tercapai 100% kerusakan pada batas rusak ringan dan rusak sedang, pada kerusakan berat tercapai 99% dan keruntuhan struktur hanya tercapai 71% serta pada *spectral displacement* 2.23 m menunjukkan tercapai 100% pada semua batas kerusakan dan mencapai 100% keruntuhan total (*collapse*) bangunan.

Penelitian ini masih memodelkan objek yang beraturan, namun mewakili salah satu bangunan bertingkat di kota Pacitan yang rentan terjadi gempa. Perlu memodelkan objek lain yang tidak beraturan sehingga analisis adaptif *pushover* akan lebih direkomendasikan sebagai analisis yang lebih sederhana dibandingkan dengan analisis dinamik.

DAFTAR PUSTAKA

- Antoniou, S., & Pinho, R. (2004). Advantages and limitations of adaptive and non-adaptive force-based pushover procedures. *Journal of earthquake engineering*, 8(04), 497-522.
- Antoniou, S., Rovithakis, A., & Pinho, R. (2004). Development and Verification of a Fully Adaptive Pushover Procedure. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-3.
- Bencana, B. N. (2021). *Indeks Resiko Bencana Indonesia*. Jakarta: Pusat Data, Informasi dan Komunikasi Kebencanaan Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Bracci, J. M., Kunnath, S. K. and Reinhorn, A. M. [1997] "Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures," *Journal of Structural Engineering* 123(1), 3–10
- Devi, R. H. (2020). Seismic Capacity of Low-to-Mid Rise Reinforced Concrete Buildings Retrofitted with CFRP. *National Central University*, 3-34.
- Devi, R. H., & Sangadji, S. (2022). Pengaruh Faktor Lingkungan Internal dan Agresif Terhadap Kolom Retrofit dengan CFRP dan GFRP. *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 27(2), 189-198.
- Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan Direktorat Jenderal Cipta Karya Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (n.d.). *Grafik Respon Spektra*. Retrieved Juli 13, 2022, from Desain Spektra Indonesia: <http://rsa.ciptakarya.pu.go.id/>
- (FEMA), F. E. (2010). *HAZUS-MH MR5 Technical Manual - Earthquake Model*. U.S. Department of Homeland Security.
- Geologi, B. (n.d.). *Analisis Geologi Kejadian Gempa Bumi Di Perairan Selatan Provinsi Jawa Timur, Tanggal 17 Juli 2022*. Retrieved Juli 18, 2022, from <https://vsi.esdm.go.id/index.php/gempabumi-a-tsunami/kejadian-gempabumi-a-tsunami/3986-analisis-geologi-kejadian-gempa-bumi-di-perairan-selatan-provinsi-jawa-timur-tanggal-17-juli-2022>
- Gupta, B., & Kunnath, S. K. (2000). Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures. *Earthquake spectra*, 16(2), 367-391.
- HAZUS-MH MR 5. (2010). Washington, D.C.
- Muto, K. 1963. Analisis Perancangan Gedung Tahan Gempa. Terjemahan oleh Wira. 1990. Erlangga. Jakarta.
- Pawirodikmoro, Widodo. 2012. Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan. Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Pratama, D. T. A. (2014) Analisis Peran Sektor Unggulan Dalam Perekonomian Kabupaten Pacitan Periode 2007-2011. UNS-F. Ekonomi Jur. Ekonomi Pembangunan-F.0110043-2014. Surakarta.
- Saruddin, S. N. A., & Nazri, F. M. (2015). Fragility curves for low-and mid-rise buildings in Malaysia. *Procedia Engineering*, 125, 873-878.
- (SNI), S. N. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung SNI 1726:2012*. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2020). *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain SNI 1727:2020*. Jakarta.