

**ANALISIS KERAPUHAN SEISMIK  
STRUKTUR GEDUNG TAK  
BERATURAN DENGAN ANALISIS  
PUSHOVER**

Wachid Hasyim<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil Fakultas  
Teknik Universitas Wiralodra,  
wachidhasyim@unwir.ac.id

**ABSTRAK**

Kerusakan struktur sering terjadi pada gedung akibat beban gempa. Bangunan gedung tak beraturan memiliki resiko kerusakan lebih besar akibat gempa dibandingkan gedung beraturan. Karena probabilitas kejadian gempa pada struktur tidak dapat diprediksi, maka diperlukan analisis yang dapat menggambarkan kerawanan atau kerapuhan akibat gempa. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui kinerja gedung tak beraturan dan probabilitas kerusakan gedung berdasarkan kerapuhan seismik. Metode yang digunakan untuk menyusun kurva kerapuhan seismik berupa HAZUS, sedangkan performa struktur didapatkan dari Analisis Pushover. Hazus merupakan metode perkiraan kerugian akibat bencana, sedangkan Analisis Pushover berupa aplikasi beban dorong pada struktur. Berdasarkan hasil analisis, didapatkan titik kinerja struktur dengan gaya geser dasar dan perpindahan pada arah x sebesar 4194.424 kN dan 0.145 m, sedangkan pada arah y sebesar 4187.2016 kN dan 0.152 m. Tingkat kinerja dari struktur gedung berdasarkan hasil analisis dinyatakan dalam kondisi Damage Control (DC) menurut ATC-40 dan Life Safety (LS) menurut FEMA 440. Berdasarkan kurva kerapuhan, probabilitas kerusakan kondisi leleh dalam kriteria sedang (moderate) dengan probabilitas kerusakan pada arah x dan y bangunan sebesar 100%. Hasil penelitian ini memberikan informasi penting tentang kondisi struktur gedung tak

beraturan saat terjadi gempa, sehingga dapat digunakan untuk evaluasi struktur dan mitigasi pada saat gempa.

**Kata kunci: Kurva Kerapuhan, Kinerja Struktur, Probabilitas Kerusakan**

**ABSTRACT**

Structural damage often occurs in buildings due to earthquake loads. Irregular buildings have a greater risk of damage due to earthquakes than regular buildings. Because the probability of an earthquake occurring in a structure cannot be predicted, an analysis is needed that can describe the vulnerability or fragility due to earthquakes. The purpose of this study was to determine the performance of irregular buildings and the probability of building damage based on seismic fragility. The method used to compile the seismic fragility curve is HAZUS, while the structural performance is obtained from the pushover analysis. Hazus is a method for estimating losses due to disasters, while the pushover analysis is in the form of a push-load application on the structure. Based on the results of the analysis, the structural performance point was obtained with a base shear force and displacement in the x direction of 4194.424 kN and 0.145 m, while in the y direction it was 4187.2016 kN and 0.152 m. The performance level of the building structure based on the analysis results is stated in the Damage Control (DC) condition according to ATC-40 and Life Safety (LS) according to FEMA 440. Based on the fragility curve, the probability of ultimate damage and yield conditions in moderate criteria and the probability of damage in the x and y directions of the building is 100%. The results of this study provide important information about the condition of irregular building structures during an earthquake so that it can be used for structural evaluation and mitigation during an earthquake.

**Keywords: Fragility Curve, Structural Performance, Probability of Failure**

## 1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan bencana alam yang sering terjadi di Indonesia. Dampak dari bencana tersebut berupa kerusakan infrastruktur dan korban jiwa. Infrastruktur yang berdampak dan menimbulkan korban jiwa diantaranya terjadi pada struktur bangunan gedung. Berdasarkan hal tersebut, maka setiap desain struktur gedung harus mempertimbangkan ketahanan terhadap beban gempa selain dari beban gravitasi yang bekerja pada gedung. Selain pada desain, struktur gedung eksisting pula harus dievaluasi ketahanannya terhadap gempa. Terlebih pada struktur gedung yang memiliki ketidakberaturan, sebab pada bentuk struktur tersebut dapat memiliki perilaku yang berbeda di kedua arah sumbu bangunan. Keruntuhan pada gedung tak beraturan berupa keruntuhan dengan bentuk progresif seperti yang terjadi pada gedung menara *World Trade Center* (WTC), *New York* (Yolanda dkk., 2017). Keruntuhan pada gedung tersebut memberikan gambaran kemungkinan (probabilitas) terjadi keruntuhan pada gedung-gedung sejenis, yaitu gedung dengan bentuk tak beraturan. Probabilitas kejadian keruntuhan harus terukur terutama pada gedung eksisting. Beberapa metode dapat digunakan untuk mengukur probabilitas kerusakan tersebut, diantaranya berupa metode HAZUS (Hazard US).

Beberapa penelitian dilakukan tentang perilaku ketidakberaturan gedung, seperti yang dilakukan oleh Hidayati, dkk, bahwa perilaku struktur antara gedung beraturan dan tak beraturan akan berbeda, analisis statik ekuivalen dan respon spektrum dilakukan untuk mendapatkan perilaku struktur berupa perpindahan dan rasio simpangan serta penelitian ini memberikan hasil bahwa akibat ketidakberaturan maka peningkatan gaya

desain harus ditingkatkan 25%. (Hidayati dkk., 2023). Sementara itu, studi analisis kerapuhan seismik dilakukan oleh (Frans, 2021), dimana tujuan dari penelitiannya berupa mengetahui probabilitas kerusakan pada gedung dengan tingkat kerusakan tertentu akibat gempa, hasilnya menunjukkan bahwa berdasarkan kurva kerapuhan seismik hasil analisis memberikan informasi tentang probabilitas kerusakan ringan (*slight*), sedang (*moderate*), ekstensif (*extensive*), dan berat (*complete*) pada arah x sebesar 99.93%, 99.46%, 92.16% dan 50%, sedangkan pada arah y sebesar 99.19%, 96.28%, 86.34% dan 50%. Pendekatan yang digunakan (Frans, 2021) berupa analisis numerik dengan metode HAZUS dengan kombinasi Analisis Pushover. Selain itu, (Rifki & Teguh, 2019), (Zuher, 2023), dan (Arum Narwastu dkk., 2024) melakukan penelitian yang serupa yaitu analisis kerapuhan seismik menggunakan pendekatan Analisis Pushover dengan mengadopsi ketentuan HAZUS serta memberikan hasil yang serupa berupa probabilitas kerusakan pada masing-masing kategori yaitu: ringan, sedang, ekstensif, dan berat. penelitian tentang kerapuhan seismik dilakukan dengan pendekatan lain, seperti (Frans & Arfiadi, 2021) menggunakan analisis riwayat waktu non-linier, (Rahman dkk., 2022), dan (Abdi dkk., 2022) menggunakan pendekatan analisis riwayat waktu non linier dengan kombinasi pembentukan kurva *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) sebagai dasar pengukuran probabilitas kerusakan bangunan. selain itu, kurva kerapuhan seismik dapat dibentuk dari *Intensity Measurement* (IM) versus probabilitas kerusakan, dimana *intensity measurement* dapat berupa percepatan spektral, perpindahan spektral, percepatan puncak batuan, dan lain-lain.

### 1.1. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini berupa "sejauh mana kinerja dan nilai probabilitas kerusakan dari gedung tak

beraturan berdasarkan kerapuhan seismik dengan pendekatan analisis beban dorong (*pushover analysis*)”.

### 1.2. Tujuan Penulisan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja gedung tak beraturan dan probabilitas kerusakan gedung berdasarkan kerapuhan seismik dengan pendekatan analisis beban dorong.

### 1.3. Urgensi Penelitian

Penelitian secara teoritis memiliki urgensi berupa mengetahui nilai kinerja dan probabilitas kerusakan pada gedung tak beraturan, sehingga dapat dibandingkan dengan kinerja gedung yang memiliki keberaturan. Hal tersebut diharapkan dapat memberikan informasi resiko kerusakan yang dialami struktur gedung dalam menerima beban gempa. Resiko kerusakan yang terjadi pada gedung akibat gempa akan berbeda antara gedung tak beraturan dan gedung beraturan.

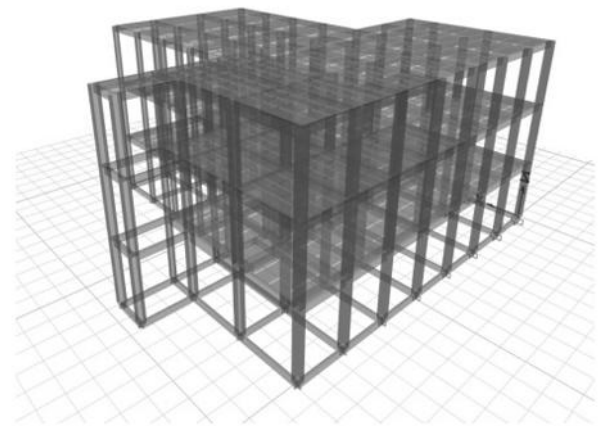
Perbedaan nilai titik kinerja dan probabilitas kerusakan tersebut dapat ditunjukkan berdasarkan nilai di dua arah sumbu gedung. Pada gedung tak beraturan horisontal maupun vertikal memiliki kemungkinan nilai yang lebih besar dibandingkan struktur gedung yang memiliki keberaturan horisontal maupun vertikal.

## 2. METODE PENELITIAN

Struktur gedung yang akan dianalisis berupa gedung 3 lantai dengan fungsi gedung kuliah, selain itu ketidakberaturan horisontal dan vertikal diperiksa menggunakan standar SNI 1726:2019. Selain itu, Analisis *Pushover* dilakukan setelah pemeriksaan kapasitas elemen struktur terhadap pembebanan gravitasi dinyatakan cukup aman. Analisis *Pushover* dilakukan pada model gedung 3 dimensi menggunakan *software* bantu ETABS v.16 dengan asumsi-asumsi sesuai dengan kaidah *Finite Element Analysis* (FEA). (Yudiyansyah, 2024).

### 2.1. Model Struktur

Gedung yang ditinjau berupa gedung dengan fungsi perkuliahan. Gedung eksisting tersebut terdiri dari 3 lantai dengan bentuk geometris tak beraturan horisontal dan vertikal. Lebih lanjut, pengecekan terhadap ketakberaturan menggunakan standar SNI 1726:2019 (BSN, 2019) dengan melakukan pemeriksaan terhadap beberapa kriteria yang harus dipenuhi dalam standar tersebut. Model dari struktur gedung dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1.  
Struktur Gedung Kuliah

Spesifikasi kuat material dari struktur berupa kuat tekan beton dan kuat leleh baja tulangan dari elemen struktur balok, kolom, dan pelat. Properti tersebut masing-masing adalah:

- a. Kuat tekan beton ( $f'c$ ) sebesar 20 Mpa.
- b. Kuat leleh tulangan baja ulir (BJTD) sebesar 420 Mpa.
- c. Kuat leleh tulangan baja polos (BJTP) sebesar 280 Mpa

Elemen struktur balok dan kolom memiliki dimensi penampang masing-masing dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1.

Dimensi Penampang Elemen Struktur

Elemen struktur	Dimensi penampang (m)	
	Lebar (b)	Tinggi (h)
Kolom, K1	0.40	0.40
Kolom, K2	0.30	0.30
Balok, B1	0.25	0.50
Balok, B2	0.25	0.35

Pembebanan gravitasi pada struktur berupa beban mati dan hidup sesuai dengan standar pembebanan yaitu PPURG (DPU, 1987) dan SNI 1727:2020 tentang Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung (BSN, 2020). Beban mati pada lantai dengan total beban distribusi sebesar 119 kg/m<sup>2</sup> dapat dilihat pada tabel 2 berikut

Tabel 2.

Beban Mati Lantai

Jenis	Ukuran Tebal (m)	Berat Sendiri (kg/m <sup>3</sup> )	Beban Mati (kg/m <sup>2</sup> )
Berat Penggantung	1	7	7
Berat Finishing Lantai	0.02	2,100	42
Berat Keramik	0.01	2,400	24
Berat Plafond	1	11	11
Berat Waterproof	1	10	10
Berat Instalasi ME	1	25	25

Beban hidup yang bekerja pada lantai gedung dapat dilihat pada tabel 3. (BSN, 2020). Adapun kriteria ketakberaturan struktur arah horisontal dan vertikal menurut SNI 1726:2019 (BSN, 2019) dapat dilihat pada tabel 4 berikut.

Tabel 3.

Beban Hidup Lantai

Jenis Berat	Beban Mati (kN/m <sup>2</sup> )
Ruang Kuliah	4.79
Koridor	4.79
Loteng Atap	0.96

Tabel 4.

Kriteria Ketidakberaturan Gedung

No	Kriteria	Parameter
	<b>Ketidakteraturan horisontal</b>	
1	Ketidakteraturan torsi dan torsi berlebihan	Pasal 7.3.3.4, Pasal 7.7.3, Pasal 7.8.4.3, Pasal 7.12.1, Tabel 16, pasal 11.3.4
2	Ketidakteraturan sudut dalam	Pasal 7.3.3.4 dan Tabel 16
3	Ketidakteraturan diskontinuitas diafragma.	Pasal 7.3.3.4 dan Tabel 16
4	Ketidakteraturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang.	Pasal 7.3.3.3, pasal 7.3.3.4, pasal 7.7.3, Tabel 16
5	Ketidakteraturan sistem nonparalel.	Pasal 7.5.3, pasal 7.7.3, Tabel 16, pasal 11.3.4
	<b>Ketidakteraturan vertikal</b>	
6	Ketidakteraturan kekakuan tingkat lunak dan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan.	Pasal 7.3.3.1, Tabel 16

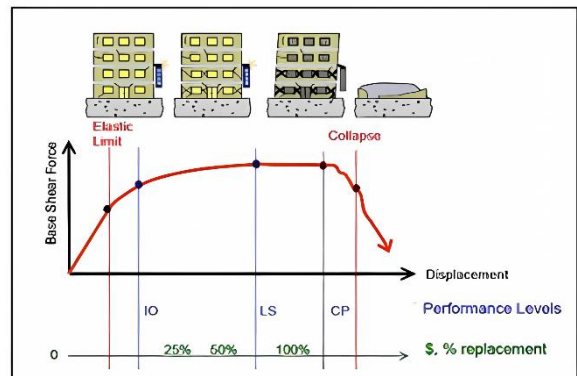
No	Kriteria	Parameter
7	Ketidakteraturan berat (massa)	Tabel 16
8	Ketidakteraturan geometri vertikal.	Tabel 16
9	Ketidakteraturan akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral.	Pasal 7.3.3.3, pasal 7.3.3.4, Tabel 16
10	Ketidakteraturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat dan ketidakteraturan tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat.	Pasal 7.3.3.1, pasal 7.3.3.2, Tabel 16

**2.2. Analisis Pushover**

Beban dorong dengan beban statik yang bersifat non-linier yang bekerja pada gedung secara bertahap hingga struktur mencapai bentuk plastis dan gedung mengalami keruntuhan disebut sebagai analisis beban dorong. Selain keruntuhan, peningkatan beban statik yang bekerja pada struktur dapat dibatasi dengan memperhatikan perpindahan join struktur berdasarkan titik kontrol perpindahan dengan nilai tertentu.(Rinda Fitri Nabhilla & Hayu, 2020), (Potalangi dkk., 2020).

Hasil Analisis *Pushover* berupa performa atau kinerja struktur yang digambarkan dengan gaya geser dasar (V) dan perpindahan (D) atau dalam bentuk kurva percepatan spektral (Sa) dan perpindahan spektral (Sd). (Frans, 2021). Analisis *Pushover* dapat dilakukan dengan bantuan software FEA (*Finite Element Analysis*), dimana input pembebanan menggunakan beban gravitasi. Beban gravitasi yang digunakan berupa beban mati dan beban hidup.

Hasil Analisis *Pushover* berupa gaya geser dasar dan perpindahan menjadi parameter kinerja struktur gedung, dimana kinerja tersebut diukur dengan standar ATC-40 dan FEMA 440. Standar-standar tersebut memberikan deskripsi dan batasan-batasan kinerja struktur berdasarkan tingkat kerusakan yang terjadi pada bangunan gedung. Ilustrasi tingkat kinerja dan kerusakan struktur gedung dapat dilihat pada gambar 2 berikut. (ATC-40, 1996)



Gambar 2. Tingkat Kinerja Bangunan

Batasan-batasan kinerja struktur gedung didasarkan pada nilai simpangan (*Drift*), dimana menurut ATC-40 nilai simpangan total dan simpangan inelastik menjadi batasan tingkat kinerja bangunan. kriteria tingkat kinerja bangunan dapat dilihat pada tabel 5 berikut.

Tabel 5. Rasio *Drift* Tingkat Kinerja Bangunan

Parameter	Tingkat kinerja			
	IO	DC	LS	CP
Maks simpangan total	0.01	0.01-0.02	0,02	0.33 (Vi/Pi)
Maks simpangan inelastik	0.33	0.005-0.015	no limit	no limit

Batasan-batasan pada kinerja struktur gedung menurut FEMA (FEMA-356, 2024), berupa :

1. *Operational*: Kinerja bangunan yang masih dapat beroperasi dengan normal setelah terjadi gempa.
2. *Immediate Occupancy*: Kinerja bangunan yang dapat menahan gaya gempa tanpa mengalami kerusakan struktural yang signifikan, sehingga bangunan masih dapat dihuni segera setelah gempa.
3. *Life Safety*: Kinerja bangunan yang dapat menjamin keselamatan jiwa penghuni selama dan setelah gempa, dengan memungkinkan kerusakan yang wajar.
4. *Collapse Prevention*: Kinerja bangunan yang dapat mencegah runtuhnya struktur bangunan selama dan setelah gempa

**2.3. Analisis Kerapuhan Seismik**

Analisis kerapuhan seismik dilakukan untuk mendapatkan nilai probabilitas kerusakan gedung. Kerusakan sebagai parameter yang diukur, menurut metode HAZUS terdiri atas, ringan (*slight*), sedang (*moderate*), ekstensif (*extensive*), dan berat (*complete*).

Pada analisis kerapuhan, probabilitas kegagalan struktur diukur dan dihitung untuk mendapatkan nilai probabilitas dan kategori ambang batas kerusakan (*damage state*). Berdasarkan hal tersebut, maka nilai probabilitas kegagalan dapat dihitung menurut persamaan berikut. (Frans, 2021), (Lallemant dkk., 2015).

$$P(ds|S_d) = \Phi\left(\frac{1}{\beta_{ds}}\right) \ln\left(\frac{S_d}{S_{d,ds}}\right) \dots\dots\dots(1)$$

Dimana,

- $P(ds|S_d)$  = Probabilitas kerusakan
- $S_d$  = Perpindahan spektral (m)
- $S_{d,ds}$  = nilai median *spectral displacement* pada ambang batas kerusakan (*damage state*)
- $\beta$  = nilai simpangan baku logaritmik pada ambang batas kerusakan (*damage state*)
- $\Phi$  = fungsi distribusi standar kumulatif normal

Nilai median tersebut disesuaikan berdasarkan nilai ambang batas kerusakan yang dapat dihitung menurut Barbat, seperti pada tabel berikut. (Barbat dkk., 2008) dan (Frans, 2021).

Tabel 6.  
Nilai Median Tiap Ambang Batas

Ambang batas	Median
Ringan ( <i>Slight</i> )	$S_d = 0.7 D_y$
Sedang ( <i>Moderate</i> )	$S_d = D_y$
Ekstensif ( <i>Extensive</i> )	$S_d = D_y + 0.25 (D_u - D_y)$
Berat ( <i>Complete</i> )	$S_d = D_u$

Dimana,

- $S_d$  = median perpindahan spektra
- $D_y$  = perpindahan spektra kondisi leleh
- $D_u$  = perpindahan spektra kondisi ultimit

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Kriteria struktur gedung perkuliahan hasil pemeriksaan terhadap standar SNI 1726:2019 berupa gedung tak beraturan. Hasil pemeriksaan dapat dilihat pada tabel 7 berikut. (Yudiyansyah, 2024).

Tabel 7.  
Pemeriksaan Ketidakberaturan Gedung

No	Kriteria	Parameter	Status
1	Ketidakteraturan torsi dan torsi berlebihan	Pasal 7.3.3.4, Pasal 7.7.3, Pasal 7.8.4.3, Pasal 7.12.1, Tabel 16, pasal 11.3.4	Tidak memenuhi
2	Ketidakteraturan sudut dalam	Pasal 7.3.3.4 dan Tabel 16	Memenuhi
3	Ketidakteraturan diskontinuitas diafragma.	Pasal 7.3.3.4 dan Tabel 16	Tidak memenuhi

No	Kriteria	Parameter	Status
4	Ketidakteraturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang.	Pasal 7.3.3.3, pasal 7.3.3.4, pasal 7.7.3, Tabel 16	Tidak memenuhi
5	Ketidakteraturan sistem nonparalel.	Pasal 7.5.3, pasal 7.7.3, Tabel 16, pasal 11.3.4	Tidak memenuhi
6	Ketidakteraturan kekakuan tingkat lunak dan Ketidakteraturan kekakuan tingkat lunak berlebihan.	Pasal 7.3.3.1, Tabel 16	Tidak memenuhi
7	Ketidakteraturan berat (massa)	Tabel 16	Memenuhi
8	Ketidakteraturan geometri vertikal.	Tabel 16	Tidak memenuhi
9	Ketidakteraturan akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral.	Pasal 7.3.3.3, pasal 7.3.3.4, Tabel 16	Tidak memenuhi
10	Ketidakteraturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat dan ketidakteraturan tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat.	Pasal 7.3.3.1, pasal 7.3.3.2, Tabel 16	Tidak memenuhi

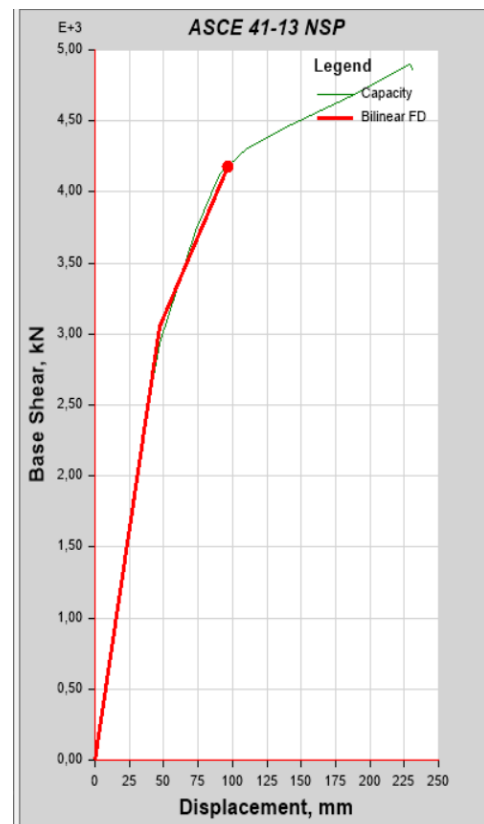
Berdasarkan hasil pemeriksaan, struktur gedung memenuhi persyaratan sebagai gedung tak beraturan dengan kriteria ketidakteraturan sudut dalam dan ketidakteraturan berat (massa) seperti yang disebutkan di SNI 1726:2019.

### 3.1. Hasil Analisis Pushover

Hasil analisis beban dorong berupa nilai kinerja bangunan gedung pada arah x dan y. Nilai-nilai yang dihasilkan berupa titik kinerja dan tingkat kinerja bangunan gedung. Nilai titik kinerja (*Performance Point*) dari struktur dengan nilai gaya geser dasar (*V*) dan perpindahan (*D*) masing-masing dalam arah x sebesar 4,194.424 kN dan 0.145 m, serta dalam arah y sebesar 4,187.2016 kN dan 0.152 m. (Yudiyansyah, 2024). Sementara itu, tingkat kinerja menunjukkan kondisi tingkat keparahan dari kerusakan yang terjadi pada bangunan gedung ketika terjadi gempa bumi. Tingkat kinerja struktur berdasarkan hasil analisis dinyatakan dalam kondisi *Damage Control (DC)* menurut ATC-40 dan *Life Safety (LS)* menurut FEMA 440. (Yudiyansyah, 2024).

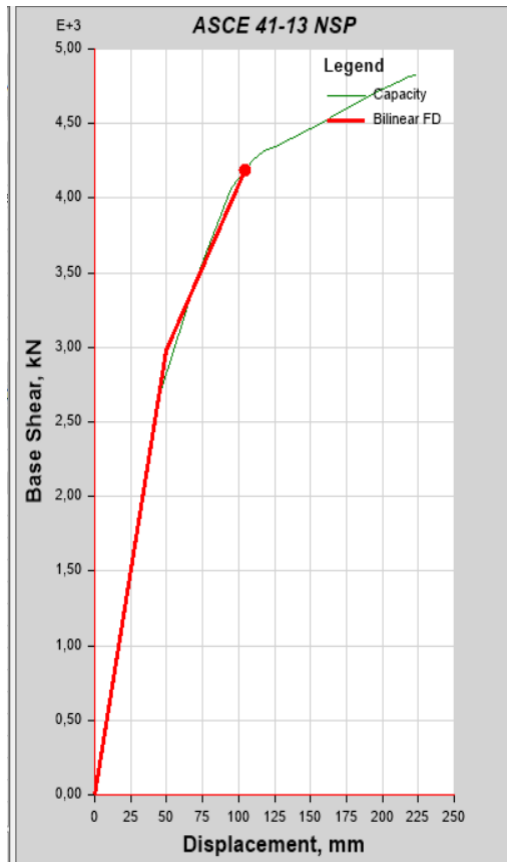
Titik kinerja struktur dengan penggambaran kurva kapasitas dan respon

spektrum dapat dilihat pada gambar 3 berikut. (Yudiyansyah, 2024)



Gambar 3. Titik Kinerja PUSHX

Sementara itu, penggambaran kurva dengan titik kinerja sesuai metode ATC-40 di arah y dapat dilihat pada gambar 4 berikut (Yudiyansyah, 2024).



Gambar 4. Titik Kinerja PUSHY

**3.2. Hasil Analisis Kerapuhan Seismik**

Pada analisis kerapuhan, beberapa nilai yang mempengaruhi hasil analisis, diantaranya berupa nilai median spektra yang dihitung sesuai ketentuan HAZUS. Nilai tersebut didapatkan berdasarkan perhitungan yang dinyatakan dalam tabel 6. Hasil perhitungan nilai median tiap ambang batas dapat dilihat pada tabel 8 berikut.

Tabel 8. Nilai Median

Ambang batas	Median (m)	
	Arah x	Arah y
Ringan ( <i>Slight</i> )	0.0259	0.0266
Sedang ( <i>Moderate</i> )	0.0370	0.0380
Ekstensif ( <i>Extensive</i> )	0.0587	0.0607
Berat ( <i>Complete</i> )	0.1240	0.1290

Selain nilai median, nilai simpangan baku pada masing-masing ambang batas dapat ditentukan dengan memperhatikan ketentuan HAZUS. Nilai simpangan baku ditentukan berdasarkan kriteria struktur gedung yang ditinjau. Berdasarkan data-data gedung, bahwa kriteria gedung menurut tabel 4.2 HAZUS termasuk dalam tipe gedung C1M (FEMA, 2022). Selanjutnya, nilai simpangan baku dari masing-masing tipe kerusakan dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9.

Nilai simpangan baku

Ambang batas	Simpangan baku, $\beta$ (m)	
	Arah x	Arah y
Ringan ( <i>Slight</i> )	0.01727	0.01727
Sedang ( <i>Moderate</i> )	0.01701	0.01701
Ekstensif ( <i>Extensive</i> )	0.01727	0.01727
Berat ( <i>Complete</i> )	0.02057	0.02057

Nilai simpangan baku di tabel 9 didapatkan dari tabel 6.a kerapuhan struktur gedung (FEMA, 2001) dengan tipe gedung C1M. Nilai-nilai tersebut sesuai dengan kode desain seismik tingkat tinggi sebab obyek gedung yang ditinjau memiliki faktor keutamaan sebesar 1.5.

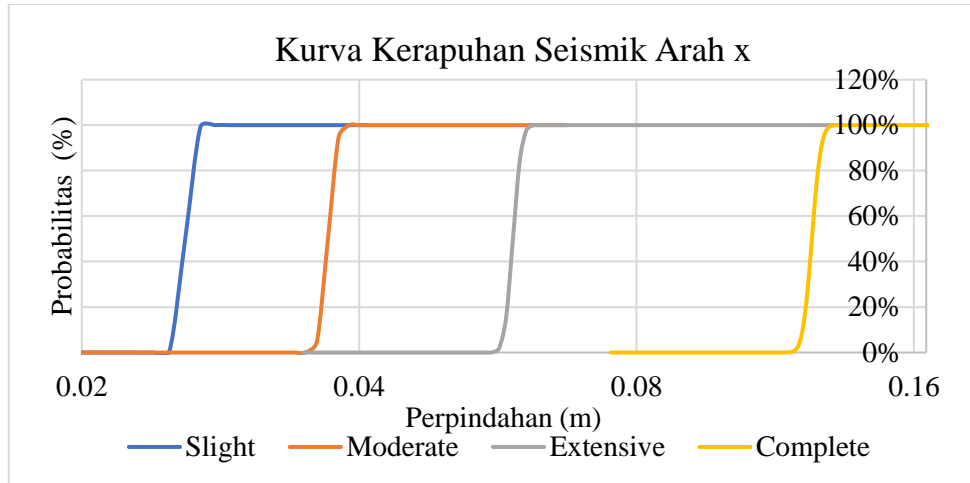
**3.3. Kurva Kerapuhan Seismik**

Kurva kerapuhan merupakan gambaran dari probabilitas kegagalan struktur di setiap ambang batas kerusakan. Kurva dapat dibentuk berdasarkan nilai intensitas gempa, dalam hal ini berupa perpindahan (*displacement*) dan probabilitas (*probability*) dalam bentuk prosentase. Nilai probabilitas dihitung menggunakan persamaan 1, dengan nilai median dan simpangan baku seperti pada tabel 8 dan 9.

Berdasarkan analisis, kurva kerapuhan seismik dalam arah x dengan 4 tipe kerusakan dapat dilihat pada gambar 5 berikut. Kurva kerapuhan hasil plot antara perpindahan dan probabilitas kerusakan

memiliki nilai perpindahan antara 0.02 m sampai 0.16 m. Selanjutnya, probabilitas kerusakan dapat diketahui berdasarkan kurva tersebut. Sebagai contoh, untuk mendapatkan nilai probabilitas kerusakan tipe ringan (*slight*), maka kemungkinan terjadi sebesar 50% ketika perpindahan sebesar 0.026 m pada arah x dari gedung. Hal yang sama terjadi pada nilai probabilitas kerusakan tipe sedang

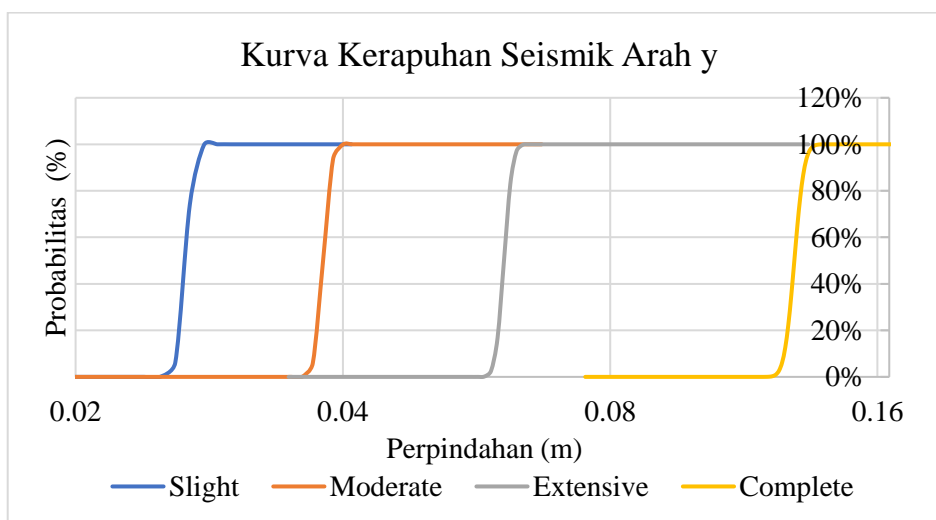
(*moderate*), dimana probabilitas kerusakan sebesar 50% terjadi ketika nilai perpindahan sebesar 0.038 m. Sementara itu, pada perpindahan struktur ketika kondisi leleh yang memiliki nilai perpindahan sebesar 0.0517 m maka akan didapatkan probabilitas kejadian sekitar 100% pada tipe kerusakan sedang (*moderate*).



Gambar 5.  
Kurva Kerapuhan Seismik Arah x

Selanjutnya, kurva kerapuhan seismik di arah y dengan 4 tipe kerusakan dapat dilihat di gambar 6. Pada kondisi leleh, nilai probabilitas kerusakan terjadi sebesar 100%

pada tipe sedang (*moderate*), dimana nilai perpindahan leleh yang terjadi sebesar 0.0556 m.



Gambar 6.  
Kurva Kerapuhan Seismik Arah y

Kerusakan yang terjadi pada struktur gedung kuliah berupa kerusakan sedang (*moderate*) di arah x dan y. Selanjutnya, kerusakan tersebut secara visual dideskripsikan oleh FEMA dengan kerusakan berupa retak rambut di seluruh bagian balok dan kolom struktur, pada struktur yang daktail, kelelahan yang terjadi diindikasikan dengan retak lentur dan beberapa bagian elemen struktur terlepas. (FEMA, 2011). Berdasarkan hasil studi ini, analisis kerapuhan seismik dapat dijadikan sebagai salahsatu analisis yang digunakan untuk evaluasi struktur gedung. Selain itu, kebijakan penanganan kerusakan dan mitigasi bencana pada saat terjadi gempa bumi dapat direncanakan dan dipersiapkan.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, beberapa hal yang dapat disimpulkan dalam penelitian ini berupa.

1. Struktur gedung dinyatakan dalam bentuk ketidakberaturan horisontal dan vertikal sesuai standar SNI 1726:2019 pada kriteria pasal 2 dan 7.
2. Performa struktur gedung dengan nilai kinerja berupa gaya geser dasar (V) dan perpindahan (D) dalam arah x sebesar 4,194.424 kN dan 0.145 m, serta dalam arah y sebesar 4,187.2016 kN dan 0.152 m.
3. Tipe kerusakan gedung di arah x dan y pada kondisi leleh berupa kerusakan sedang (*moderate*), dimana nilai perpindahan masing-masing sebesar 0.0517 m dan 0.0556 m serta memiliki probabilitas kerusakan masing-masing sebesar 100%.
4. Kinerja struktur dapat dijadikan sebagai dasar evaluasi struktur dan analisis kerapuhan seismik dapat dijadikan sebagai dasar penyusunan kebijakan penanganan kerusakan dan perencanaan mitigasi bencana gempa yang terjadi pada struktur gedung.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, A., Hasan, M., Saidi, T., & Hayati, Y. (2022). Studi Kerentanan Struktur Bangunan Bertingkat Tinggi Akibat Gempa Di Kota Banda Aceh. In *Journal of The Civil Engineering Student* Vol. 4 No 1, 22–28.
- Arum Narwastu, Senot Sangadji, Rida Handiana Devi, & Hendramawat Aski Safarizki. (2024). Analisis kerapuhan struktur gedung Dinas Pertanian Kabupaten Pacitan dengan static adaptive pushover. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa* Vol.13 No.1, 89–96.
- ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings: Vols. 1 PG-346*. Applied Technology Council.
- Barbat, A. H., Pujades, L. G., & Lantada, N. (2008). Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28 No.10–11, 851–865.
- Standar Nasional Indonesia. (2019). *SNI 1726-2019: Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Gedung dan Non gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia. (2020). *SNI 1727:2020 tentang Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung. In Beban desain minimum dan Kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- DPU. (1987). *Pedoman Perencanaan Pembebanan Untuk Rumah Dan Gedung*. Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan, Bandung.
- FEMA-356. (2024). FEMA—The Federal Emergency Management Agency. In *Foundations of Homeland Security and Emergency Management*. Wiley.
- FEMA. (2001). Hazus® –MH 2.1 Technical Manual. In *Disaster Prevention and Management: An International*

- Journal*.
- FEMA. (2011). *Damage States Descriptions for Fragility Curves, Appendix 2, Hazus MH-2.1*.
- FEMA. (2022). *Hazus 6.0 Inventory Technical Manual*.
- Frans, R. (2021). Analisis Kerapuhan Seismik Struktur Beton Bertulang. *JUTEKS: Jurnal Teknik Sipil*, Vol.6 No.1, 17.
- Frans, R., & Arfiadi, Y. (2021). Analisis Fungsi Kerapuhan Struktur Dengan Menggunakan Analisis Riwayat Waktu. 1–10.
- Hidayati, N., Hariyadi, & Tibaq, M. R. S. (2023). Analisa ketidakberaturan horizontal dan vertikal pada struktur gedung beton bertulang. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, Vol.12 No.2, 235–243.
- Lallemant, D., Kiremidjian, A., & Burton, H. (2015). Statistical procedures for developing earthquake damage fragility curves. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 44 No.9, 1373–1389.
- Potalangi, J. G., Manalip, H., & Wallah, S. E. (2020). Analisis Keruntuhan Gedung Bertingkat Akibat Beban Gempa Dan Beban Angin Dengan Metode Pushover. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, Vol.10 No.1, 1–12.
- Rahman, F., Idris, Y., Abdullah, A., & Asyifa, C. N. (2022). Pengembangan Kurva Kerapuhan Berbasis Incremental Dynamic Analysis Pada Bangunan Tipikal Puskesmas di Kota Banda Aceh Terhadap Bahaya Gempa. *Journal of The Civil Engineering Student*, Vol. 4 No. 3, 246–252.
- Rifki, M., & Teguh, M. (2019). *Evaluasi Kerapuhan Seismik Pada Struktur Gedung Kuliah Twin Building UMY Menurut SNI 1726-2012*. 1–10.
- Rinda Fitri Nabhillah, & Hayu, G. A. (2020). Analisis Perilaku Struktur Perkantoran Tahan Gempa Menggunakan Metode Pushover Analysis. *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*, Vol.6 No.2, 141–154.
- Yolanda, A., Djauhari, Z., & Ridwan. (2017). Keruntuhan Progresif Gedung Struktur Beraturan dan Tidak Beraturan. *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 4 No.2, 1–13.
- Yudiyansyah, R. (2024). *Analisis Beban Dorong (Analysis Static Nonlinier Pushover) Pada Struktur Gedung Tak Beraturan (Studi Kasus : Gedung Perkuliahan)*. Universitas Wiralodra.
- Zuher, M. H. (2023). *Analisis Kurva Fragilitas Pada Struktur Bangunan 12 Lantai Dengan Metode Pushover*. Universitas Andalas.



Copyright© by the authors. Licensee Jurnal Ilmiah MITSU, Indonesia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike (CC BY-NC-SA 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*