

Analisis Kerentanan Hunian Tetap di Kabupaten Cianjur dengan Evaluasi Probabilitas Percepatan Gerakan Tanah

M. Ibnu Syamsi¹, Restu Faizah¹, Fanny Monika¹, Imam Wicaksono¹

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Kampus Terpadu UMY Jl. Brawijaya, Kasihan, Bantul, Yogyakarta, 55183

syamsibnu@umy.ac.id, restu.faizah@umy.ac.id, fanny.monika.2007@umy.ac.id, imamwicaksono.umy@gmail.com

Abstract

Indonesia has high seismic conditions because it is crossed by the Pacific Ring of Fire, which converges many tectonic plates. This condition leads to frequent earthquakes in the Indonesian region. In facing earthquakes, the infrastructure sector becomes a major concern because structural failures can have fatal consequences. For example, the earthquake in Cianjur Regency in 2022 resulted in many casualties due to structural weaknesses in housing. Therefore, this study was conducted to evaluate the vulnerability of community permanent housing related to earthquake events. Building vulnerability testing was conducted using the Incremental Dynamic Analysis (IDA) method, using data from 11 earthquake recordings. In the testing conducted, numerical software was used to model samples and earthquake loading. Sample model testing against the earthquake load applied was incrementally performed in the range of 0.1g to 1g. The results obtained are the building's response to the applied earthquake load. Additionally, probabilities of damage were obtained, represented in the form of vulnerability curves. There are five building performance levels to be discussed in this study: Operational Phase (OP), Immediate Occupancy (IO), Damage Control (DC), Life Safety (LS), and Collapse Prevention (CP). The probability of damage will be determined based on the intensity measure that occurs at the five building performance levels. Overall, a 50% probability of damage occurs at an intensity measure of 0.54g, and the building experiences 100% damage at the OP level, rendering the permanent housing uninhabitable. The results of this study are expected to provide stakeholders with considerations for making policies related to permanent housing safety.

Keywords: Earthquake, Vulnerability, Probability, Permanent residence, Incremental Dynamic Analysis (IDA)

Abstrak

Indonesia memiliki kondisi seismik tinggi karena dilewati oleh Cincin Api Pasifik yang mempertemukan banyak lempeng bumi. Kondisi ini menyebabkan banyak terjadi gempa di wilayah Indonesia. Dalam menghadapi kegempaan, sektor infrastruktur menjadi perhatian utama karena kegagalan struktur dapat berakibat fatal. Contohnya, gempa di Kabupaten Cianjur pada 2022 menyebabkan banyak korban jiwa karena kelemahan struktur hunian. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi hunian tetap masyarakat terkait kerentanan yang terjadi akibat gempa bumi. Pengujian kerentanan bangunan dilakukan dengan metode *Incremental Dynamic Analysis* (IDA) dengan menggunakan data 11 rekaman gempa bumi. Dalam pengujian yang dilakukan digunakan *software* numerik untuk melakukan pemodelan sampel serta dalam pembebanan gempa. Pengujian sampel model terhadap beban gempa yang diberikan dilakukan secara *increment* pada rentang 0,1g – 1g. Hasil yang diperoleh adalah respon bangunan terhadap beban gempa yang bekerja. Selain itu diperoleh juga angka probabilitas kerusakan yang direpresentasikan dalam bentuk kurva kerentanan. Terdapat lima level performa bangunan yang akan dibahas dalam penelitian ini, yaitu *Operational Phase* (OP), *Immediate Occupancy* (IO), *Damage Control* (DC), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP). Probabilitas kerusakan akan diketahui berdasarkan *intensity measure* yang terjadi pada 5 level performa bangunan. Secara keseluruhan probabilitas kerusakan sebesar 50% terjadi pada *intensity measure* 0,54g, dan bangunan mengalami 100% kerusakan pada level OP, sehingga bangunan hunian tetap tidak bisa dihuni. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan stakeholder dalam membuat kebijakan terkait keamanan hunian tetap.

Kata Kunci: Gempa, Kerentanan, Probabilitas, Hunian tetap, *Incremental Dynamic Analysis* (IDA)

PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu peristiwa bencana alam yang kerap terjadi di Indonesia. Banyaknya peristiwa gempa bumi yang terjadi di Indonesia salah satunya karena Indonesia terletak di cincin api pasifik (*ring of fire*). Hak tersebut menyebabkan kerusakan infrastruktur bangunan, dimana pada saat terjadinya gempa bumi tidak sedikit terjadi kegagalan struktur yang hal tersebut menimbulkan *collateral effect* yakni jatuhnya korban jiwa. Perlu menjadi perhatian bahwa gempa bumi besar dapat terjadi di lokasi yang sama pada rentang waktu lebih dari 50 tahun. Perlu adanya kewaspadaan untuk mengantisipasi peristiwa gempa bumi yang terjadi tersebut.

Gempa bumi yang terjadi di Kabupaten Cianjur pada akhir tahun 2022 merupakan salah satu kejadian gempa bumi yang menjadi perhatian pada tahun tersebut.

Menurut data dari BNPB kejadian yang terjadi pada tanggal 22 November 2022 tersebut merengut korban jiwa 602. Sebanyak 16 kecamatan dan 180 desa mengalami dampak dari gempa tersebut. Berdasarkan data yang masuk per-tanggal 24 Desember 2022 kerugian materiil berupa bangunan hunian tetap sejumlah 56,548 unit. Gempa bumi yang menyebabkan banyaknya dampak tersebut memiliki kekuatan sebesar M5,6 dengan skala *Modified Mercalli Intensity* (MMI) V-VI yang dirasakan di Kota Cianjur (Supendi et al., 2022). Kerusakan yang terjadi selain dampak langsung dari gempa bumi tersebut, juga kemungkinan disebabkan oleh bangunan yang memiliki kerentanan kegagalan struktur yang cukup tinggi. Banyak kemungkinan faktor menjadi pertimbangan dalam dampak kegagalan struktur yang terjadi, meliputi kualitas material, desain struktural, sampai dengan standar konstruksi bangunan yang kurang memadai.

Percepatan gerakan tanah juga menjadi poin penting dalam dampak kerusakan bangunan yang terjadi, karena percepatan gerakan tanah tersebut akan menentukan sejauh mana bangunan dapat merespon gempa. Percepatan gempa bumi memberikan gambaran secara probabilitas terkait besaran gempa yang terjadi dan bagaimana struktur bangunan tersebut terpengaruh.

Penelitian terkait kerentanan bangunan juga dilakukan oleh (Saruddin & Nazri, 2015). Penelitian tersebut berfokus pada bangunan rendah dan menengah dengan mengambil studi kasus di Malaysia. Metode yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah *Incremental Dynamic Analysis* (IDA). Model sampel yang digunakan merupakan model bangunan bertingkat dengan perkuatan beton bertulang dan bingkai baja penahan momen. Penggunaan metode IDA dalam penelitian ini digunakan 7 rekaman gerakan tanah. Pertambahan *intensity measure* (IM) yang digunakan meningkat setiap 0,05g hingga mencapai 0,6g. Kurva kerentanan yang dibuat menambilkkan 5 level performa bangunan yakni, *operational phase*, *immediate occupancy*, *damage control*, *life safety*, dan *collapse prevention*.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh (Kassem et al., 2020) pada sebuah bangunan universitas. Penelitian ini bertujuan untuk menggali lebih dalam terkait perbaikan bangunan yang sudah ada. Bangunan yang dijadikan objek diterapkan sebuah Teknik perbaikan dengan menambahkan dinding geser beton bertulang dan sistem rangka baja. Metode IDA juga diterapkan dalam penelitian ini untuk mengembangkan kurva kerentanan seismik. Terdapat 3 gerakan tanah kuat yang digunakan dalam analisis bangunan. Hasil dari analisis pada penelitian ini yang dilakukan untuk membandingkan 5 level performa bangunan.

Kurva kerentanan pada bangunan beton bertulang juga diteliti oleh (Vazurkar & Chaudhari, 2016). Kurva kerentanan bangunan pada penelitian (Vazurkar & Chaudhari, 2016) berfokus pada penilaian bangunan. Kerusakan yang disebabkan oleh bencana gempa bumi menjadikan poin penting bahwa perlunya evaluasi seismic untuk memprediksi kemungkinan terjadinya kerusakan. Metode yang digunakan di dalam penelitian ini mengacu pada metode HAZUS serta analisis yang digunakan dalam penelitian ini merupakan analisis pushover. Penilaian tingkat kerusakan yang disajikan dalam kurva kerentanan penelitian ini mengacu pada tingkat kerusakan di dalam manual HAZUS.

Dalam penelitian lain yang dilakukan oleh (Betti et al., 2015) digunakan sampel rumah sederhana pasangan bata. Penelitian tersebut dilakukan untuk mengkomparasi 2 model pendekatan numerik dalam menginvestigasi perilaku bangunan batu bata yang tidak diperkuat dengan diafragma. Analisis yang digunakan dalam penelitian ini merupakan analisis *time history*, dengan 2 model *non-linear*. Penelitian tersebut menghasilkan efektivitas dari kedua model dengan tipologi bangunan yang mengacu pada beberapa parameter seperti percepatan, lendutan, dan gaya geser yang terjadi.

Hal tersebut menjadikan perhatian penting untuk melakukan analisis kerentanan struktur bangunan khususnya hunian tetap. Bangunan hunian tetap yang

menjadi tempat perlindungan bagi masyarakat harus memiliki Tingkat kerentanan yang rendah guna mengurangi risiko kerusakan akibat gempa di masa depan. Oleh karena itu, adanya evaluasi terkait kerentanan hunian tetap masyarakat akan memberikan *awareness* dan mengetahui tingkat probabilitas terjadinya kegagalan struktur pada bangunan hunian tetap.

METODE

Pada penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan, yang secara umum terbagi menjadi tiga bagian: pengumpulan data, pemodelan dan perhitungan, analisis dan pembahasan. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diambil dari lembaga/instansi ataupun *platform* penyedia data. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data eksisting hunian tetap dan data rekaman gempa. Setelah data-data yang dibutuhkan terkumpul, model sampel bangunan dibuat dalam *software* numerik. Model sampel dibuat berdasarkan data lapangan dengan harapan hasil dari pengujian akan lebih akurat.

Setelah itu, dilakukan analisis pembebanan gempa menggunakan analisis *time history*. Analisis dilakukan secara *increment* dengan pertambahan *intensity measure* sebesar 0,1g serta berakhir pada *intensity measure* 1g. Analisis tersebut dilakukan secara berulang pada semua data rekaman gempa. Data dari hasil analisis tersebut berupa data lendutan yang kemudian diolah menjadi data prosentase *drift ratio*. Dari data prosentase *drift ratio* tersebut diinterpretasikan kedalam bentuk kurva. Kurva hasil interpretasi tersebut dinamakan kurva *Incremental Dynamic Analysis* (IDA). Hasil dari prosentase *interstorey drift ratio* tersebut kemudian diolah lagi menjadi nilai distribusi normal kumulatif. Nilai tersebut berada pada rentang 0 – 1 yang hal tersebut menggambarkan nilai dari probabilitas kerusakan yang terjadi.

Hasil yang akan diketahui dalam penelitian ini berupa nilai dari probabilitas kerusakan yang terjadi pada 5 level kinerja seperti yang disebutkan dalam (Fema 356 - Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building, 2000) yakni pada level *Operational Phase* (OP), *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), *Damage Control* (DC), dan *Collapse Prevention* (CP).

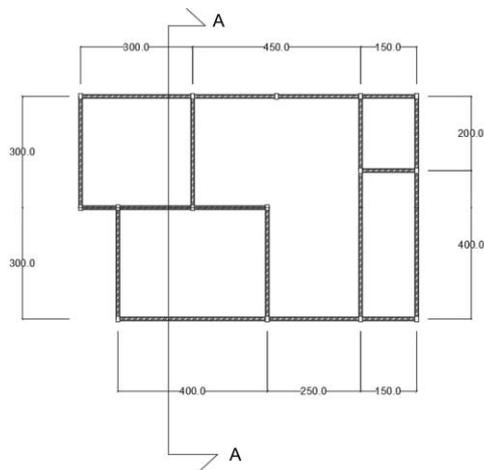
Data Sampel Hunian Tetap

Data hunian tetap merupakan data eksisting gambaran umum hunian tetap diambil dari hasil Uji Petik dan Rekomtek Penerapan RTG Mandiri Paska Bencana Gempa Bumi di Kabupaten Cianjur Periode Agustus 2023 oleh Direktorat Bina Teknik Permukiman dan Perumahan, Dirjen Cipta Karya, Kementerian PUPR. Hunian tetap yang dijadikan sampel model dalam penelitian ini merupakan hunian tetap yang berlokasi di Desa Nagrak. Informasi umum terkait sampel hunian tetap yang dipakai pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 1. Gambar 1** dan **2** menunjukkan gambar denah dan potongan melintang dari sampel hunian tetap yang akan dibahas pada penelitian ini. Sementara **Gambar 3** menunjukkan dokumentasi tinjauan

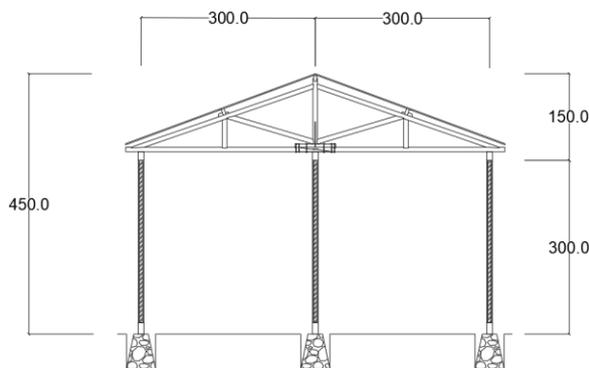
pengambilan data langsung ke lapangan saat proses konstruksi hunian tetap.

Tabel 1. Data umum sampel hunian tetap.

Item	Keterangan
Modul	Ukuran bangunan tidak standar.
Struktur Utama	- Kolom ukuran 10/15 cm, tulangan utama 4P10,35 mm dan Sengkang P4,9-180 mm - Balok keliling ukuran 10/15 cm, tulangan utama 4P8,55 mm dan Sengkang P4,7-180 mm
Struktur Atap	Kuda-kuda ukuran 8/8 cm, jarak antar kuda-kuda 3m dengan gording ukuran 5/10 cm



Gambar 1. Denah posisi kolom



Gambar 2. Potongan A-A



Gambar 3. Tampak modul sampel penelitian (a) kolom praktis (b) diameter tulangan (c) jarak antar tulangan (d) pembuatan adukan beton (e) pemasangan hebel (f) stek tulangan.

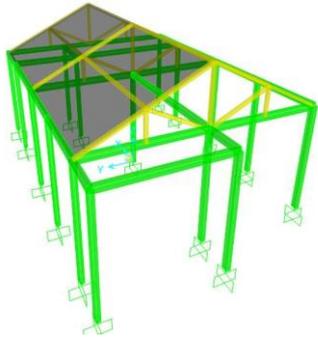
Denah dan potongan yang ditunjukkan pada **Gambar 1** dan **2** digunakan sebagai acuan dalam membuat model numerik. Kolom pada sampel model memiliki tinggi 3 meter dari pondasi bangunan. Ukuran penampang balok, kolom, dan kuda-kuda, serta mutu material yang digunakan dalam pemodelan juga mengikuti data-data eksisting lapangan. Data penampang dan material yang dipakai dalam pengujian sampel model tersaji dalam **Tabel 2**.

Tabel 2. Data material

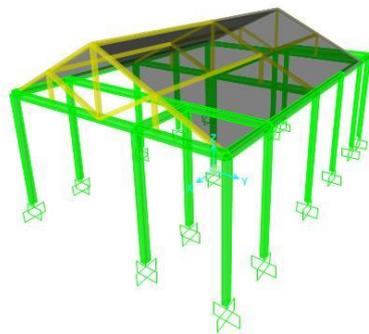
Item	Material	Keterangan
Balok keliling	Beton	- $F_c' = 25 \text{ MPa}$
	bertulang	- Tulangan BJTP 37 ($f_y = 280 \text{ MPa}$ dan $f_u = 405 \text{ Mpa}$)
Kolom	Beton	- $F_c' = 25 \text{ MPa}$
	bertulang	- Tulangan BJTP 37 ($f_y = 280 \text{ MPa}$ dan $f_u = 405 \text{ Mpa}$)
Struktur atap	Kayu	- Berat unit 8 kN/m - Modulus Elastisitas 200.000 MPa

Asumsi Pemodelan sampel

Hasil pemodelan sampel pada hunian tetap dapat dilihat pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**.



Gambar 4. Tampak depan 3D model sampel hunian tetap.



Gambar 5. Tampak belakang 3D model sampel hunian tetap.

Balok dan kolom dimodelkan dalam *software* numerik sebagai elemen satu dimensi. Tumpuan kolom diasumsikan terjepit pada fondasi. Pada setiap elemen balok dan kolom diterapkan sendi plastis pada 5% dan 95% dari bentangannya. Sambungan pertemuan balok dan kolom adalah jepit. Sendi plastis didefinisikan pada semua *joint* antara elemen balok dan kolom.

Pembebanan Sampel Model

Model hunian tetap yang telah termodelkan dalam *software* numerik dengan mengacu pada keadaan eksisting rumah kemudian dilakukan pembebanan. Beban yang diberikan pada sampel model tersebut merupakan beban-beban standar yang bekerja pada hunian tetap. Beban yang bekerja pada sampel model tidak hanya beban karena berat struktur atau elemen bangunan itu sendiri, akan tetapi terdapat beban-beban tambahan yang bekerja pada bangunan hunian tetap tersebut. Beban-beban tersebut meliputi beban mati tambahan (*super dead load*) dan beban hidup.

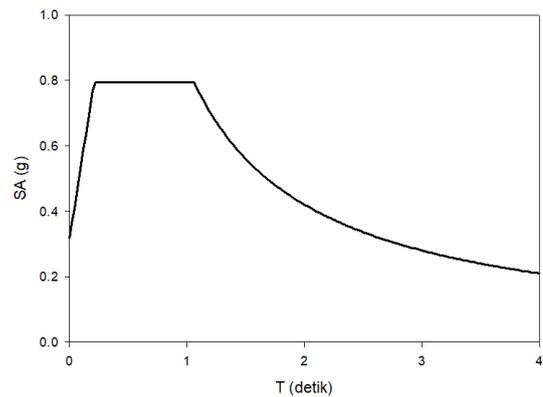
Beban mati tambahan diberikan pada struktur atap model hunian tetap sebagai beban luasan. Beban yang dimasukkan pada atap meliputi beban mati yang berupa beban genteng dan ampig, secara berurutan sebesar $0,09 \text{ kN/m}^2$ dan $0,12 \text{ kN/m}^2$. Sementara beban hidup yang bekerja pada atap berupa beban angin dengan perhitungan kemiringan atap $14,03^\circ$ sebesar $0,28 \text{ kN/m}^2$.

Data rekaman gempa bumi diambil dari laman basis data PEER NGA. Data rekaman yang diambil dari laman basis data tersebut sejumlah 11 data rekaman yang sudah disesuaikan dengan parameter gempa bumi yang terjadi di Kabupaten Cianjur tahun 2022.

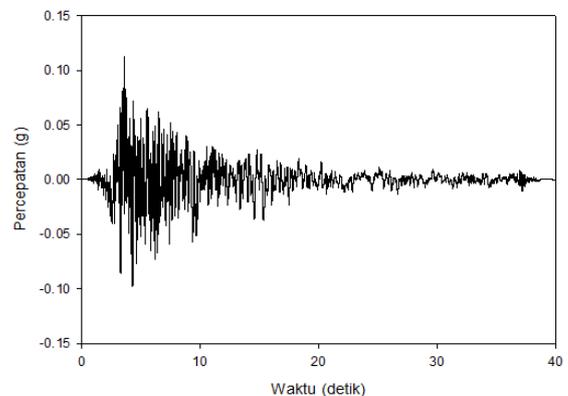
Percepatan Gerakan Tanah Lokal

Data gerakan tanah (*ground motion*) yang digunakan pada pengujian diperoleh melalui metode pendekatan. Pendekatan yang dilakukan mengacu pada respon spektra lokal dan parameter gempa yang terjadi di Kabupaten Cianjur pada tahun 2022. Hal tersebut disesuaikan berdasarkan faktor *Ground Motion Modification* (GMF) yang memodifikasi percepatan tanah pada saat terjadinya gempa bumi di suatu lokasi tertentu dengan berdasar karakteristik topologi dan geologi lokasi tersebut (Joel D, Cruz-Arguelles Miguel A & Caesar A, 2020).

Dalam penelitian (Hutabarat, 2023) disebutkan bahwa berdasarkan tinjauan peta geologi Kabupaten Cianjur, gerakan tanah yang terjadi pada saat gempa yang terjadi pada tahun 2022 berada pada lapisan batuan kelas C (tanah keras) sampai lapisan D (tanah sedang). Sehingga respon spektra yang digunakan dalam pencarian data gerakan tanah merupakan kelas tanah sedang (SD). Parameter tersebut antara lain ($S_S=1,1450g$), ($S_1=0,5052g$), dan ($T_L=8$ detik). Respon spektrum yang digunakan dalam *ground motion* penelitian ini disajikan pada **Gambar 6**. Sementara **Gambar 7** menyajikan contoh grafik *ground motion* yang digunakan dalam pengujian. Rekaman-rekaman gempa yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 3**.



Gambar 6. Respon spektra kelas tanah sedang Kabupaten Cianjur.



Gambar 7. Grafik *ground motion* gempa Imperial Valley -08.

Parameter gempa yang digunakan antara lain kekuatan gempa, kedaman gempa, dan indeks kecepatan gelombang geser pada kedalaman 30 meter (V_s30). Kekuatan gempa yang digunakan berada pada rentang (M5,6 – M5,7), kedalaman gempa pada rentang (9 – 10 KM), dan

indeks kecepatan gelombang geser pada 30 meter pada rentang (175 – 350 m/s). Dari parameter-parameter diatas menghasilkan data rekaman gerakan tanah pada **Tabel 3** serta contoh grafik data gerakan tanah disajikan pada **Gambar 7**.

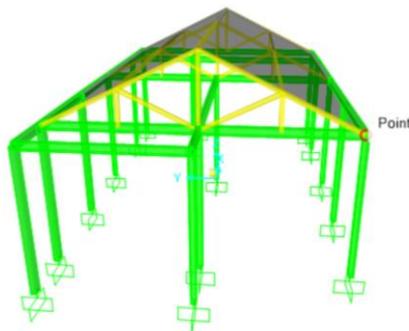
Tabel 3. Tabel rekaman gempa yang digunakan.

Kode Uji	Nomor Seri Rekaman Gempa	Nama Gempa	Tahun	Stasiun
GM1	RSN209_IMPVALL.BG_FWSM090	Imperial Valley-08 (California)	1979	Westmorland Fire Station
GM2	RSN1630_UPLAND_UP90S-H1	Upland (United States)	1990	Ocean Floor SEMS III
GM3	RSN1991_GULFCA_CXO090	Gulf of California (California)	2001	Calexico Fire Station
GM4	RSN1992_GULFCA_CAL090	Gulf of California (California)	2001	Calipatria Fire Station
GM5	RSN2001_GULFCA_2049A270	Gulf of California (California)	2001	Seeley School
GM6	RSN4426_MOLISE.P_A-CMM000	Molise-01 (Italy)	2002	Castiglione Messer Marino
GM7	RSN1993_GULFCA_2027A090	Gulf of California (California)	2001	El Centro – Meadows Union School
GM8	RSN1998_GULFCA_HVP090	Gulf of California (California)	2001	Hotville Post Office
GM9	RSN1999_GULFCA_0512A180	Gulf of California (California)	2001	Imperial Valley – Midway Well
GM10	RSN2001_GULFCA_20449B180	Gulf of California (California)	2001	Seeley School
GM11	RSN4542_L-AQUILA.AY027XTE	L'Aquila Italy (Italy)	2009	Serracapriola

HASIL DAN PEMBAHASAN

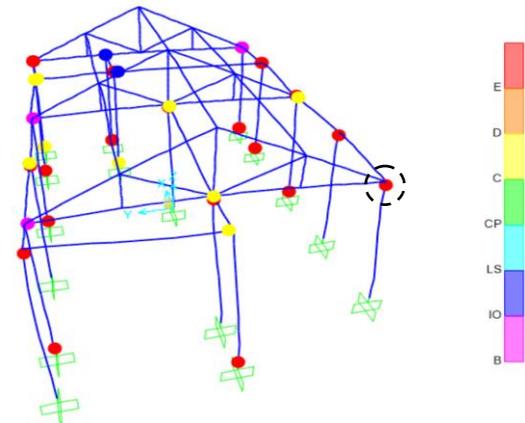
Lendutan/Displacement Hunian Tetap

Titik tinjauan yang akan digunakan sebagai titik pantauan untuk memperoleh nilai lendutan. Lendutan merupakan perubahan akibat beban yang diberikan secara lateral (Pala'biran et al., 2019). lendutan dari sampel hunian tetap terletak pada sudut atap seperti terlihat pada **Gambar 8**. Nilai perpindahan yang terjadi pada titik tersebut dikalkulasi terhadap tinggi hunian tetap menjadi *drift ratio*. Data *drift ratio* yang diambil dilakukan pada setiap *intensity measure* yang telah ditentukan.



Gambar 8. Lokasi titik tinjauan pada model

Gambar 9 menampilkan contoh distribusi sendi plastis antar elemen yang terjadi pada sampel hunian tetap akibat data *ground motion* dengan kode uji GM1 yang memiliki grafik simpangan getaran seperti pada **Gambar 7** untuk *intensity measure* 0,3g. Lingkaran merah pada **Gambar 9** tersebut menunjukkan titik tinjauan yang diambil. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa sebagian besar elemen telah terjadi sendi plastis. Sebagian besar sendi plastis yang terjadi menunjukkan warna merah yang berarti bahwa struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan hancur.



Gambar 9. Sendi plastis yang mengalami kerusakan

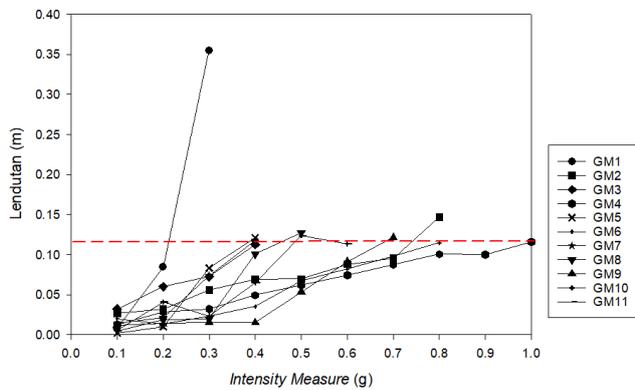
Sebagaimana telah tersebut dalam metodologi penelitian, analisis dilakukan *intensity measure* (IM) rentang 0,1 – 1g. Rekapitulasi nilai lendutan yang terjadi untuk tiap rekaman gempa dan tiap *intensity measure* disajikan dalam **Tabel 3**.

Hasil yang disajikan pada **Tabel 4** tersebut merupakan lendutan yang terjadi pada setiap data rekaman gempa yang diuji pada rentang IM 0,1 – 1g. Terdapat perbedaan jumlah lendutan yang tercatat pada *intensity measure* (IM) untuk tiap rekaman gempa. Perbedaan terjadi karena perhitungan lendutan dihentikan pada saat prosentase *drift ratio* telah mencapai minimal 2,5 %. Terdapat beberapa nilai batas *drift ratio*, yaitu 0,5%; 1%; 1,5%; 2%; dan 2,5% (Kassem et al., 2020). Nilai-nilai tersebut secara berurutan mengacu pada level kinerja struktur yang dibagi menjadi 4 yakni *immediate occupancy*, *damage control*, *life safety*, dan *collapse prevention* (Muhammad Hilmi et al., 2021). Hasil dari **Tabel 4** kemudian diinterpretasikan kedalam grafik yang disajikan pada **Gambar 10**.

Tabel 4. Hasil analisis lendutan.

IM (g)	Lendutan yang terjadi akibat rekaman gempa (m)										
	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	GM6	GM7	GM8	GM9	GM10	GM11
0,1	0.01	0.03	0.03	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0,2	0.08	0.03	0.06	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.04	0.04
0,3	0.35	0.06	0.07	0.03	0.08	0.02	0.07	0.02	0.02	0.02	0.02
0,4	-	0.07	0.11	0.05	0.12	0.04	0.12	0.10	0.02	0.07	0.07
0,5	-	0.07	-	0.06	-	0.07	-	0.13	0.05	0.12	0.12
0,6	-	0.09	-	0.07	-	0.08	-	-	0.09	0.11	0.11
0,7	-	0.10	-	0.09	-	0.10	-	-	0.12	-	-
0,8	-	0.15	-	0.10	-	0.11	-	-	-	-	-
0,9	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	0.12	-	-	-	-	-	-	-

Garis putus-putus pada Gambar 11 menunjukkan nilai batas lendutan 2,5%. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa terdapat satu nilai rekaman gempa yang cukup berbeda dengan kurva rekaman gempa yang lain, yaitu pada kurva rekaman gempa GM1. Perbedaan tersebut ditunjukkan pada rekaman GM1, yang memiliki nilai lendutan yang sangat besar saat IM 0,3g dibandingkan dengan rekaman gempa yang lain. Hal tersebut mungkin terjadi karena keberagaman karakteristik data gempa yang digunakan.



Gambar 10. Grafik lendutan.

Grafik lendutan tersebut digambarkan dalam garis berwarna hitam dengan simbol. Simbol tersebut menunjukkan sebaran data lendutan dari setiap analisis rekaman gempa. Garis merah putus-putus menggambarkan batas lendutan sebesar 114mm (*drift* 2,5%). Secara umum, keseluruhan hasil simulasi seluruh rekaman gempa terhadap hunian tetap yang ditinjau memiliki kesamaan tendensi. Semakin tinggi nilai *intensity measure* (IM) rekaman gempa, semakin tinggi pula nilai lendutan yang terjadi.

Interstorey Drift Ratio

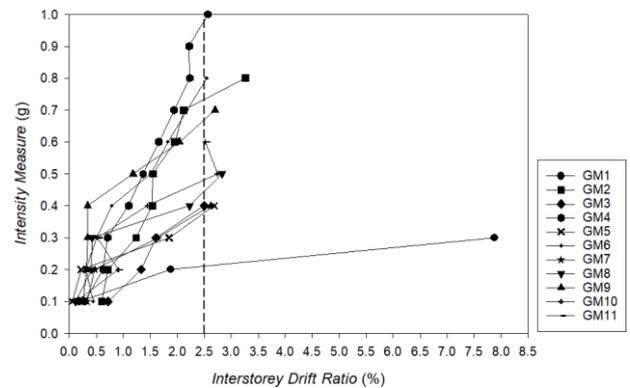
Pemberian beban gempa pada pengujian menggunakan *software* numerik memberikan respon lendutan terhadap model akibat gaya yang diberikan. Lendutan yang yang diperoleh dapat dikalkulasi menjadi nilai *interstorey drift ratio* yang merupakan hasil perbandingan antara nilai simpangan terhadap tinggi bangunan (Kassem et al., 2020). Formula perhitungan nilai prosentase *interstorey drift ratio* (%ISDR) dapat dilihat pada Persamaan (1) (Kassem et al., 2020). Nilai *interstorey drift ratio* dihitung untuk setiap nilai IM. Tabel 5 menyajikan prosentase *intersorey drift ratio* (%ISDR) dari setiap data rekaman gempa yang diuji.

$$\%ISDR = (Lendutan / (Tinggi Bangunan)) \times 100\% \quad (1)$$

Tabel 5. Hasil %ISDR

IM (g)	Nilai %ISDR dari rekaman gempa (%)										
	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	GM6	GM7	GM8	GM9	GM10	GM11
0,1	0.18	0.60	0.72	0.28	0.06	0.44	0.33	0.12	0.26	0.12	0.12
0,2	1.88	0.71	1.33	0.63	0.22	0.31	0.48	0.42	0.31	0.91	0.91
0,3	7.88	1.24	1.61	0.71	1.85	0.51	1.64	0.43	0.35	0.52	0.52
0,4	-	1.54	2.50	1.10	2.69	0.78	2.62	2.23	0.34	1.45	1.45
0,5	-	1.55	-	1.37	-	1.51	-	2.83	1.18	2.75	2.75
0,6	-	1.96	-	1.66	-	1.82	-	-	2.04	2.52	2.52
0,7	-	2.12	-	1.94	-	2.18	-	-	2.71	-	-
0,8	-	3.26	-	2.23	-	2.55	-	-	-	-	-
0,9	-	-	-	2.22	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	2.57	-	-	-	-	-	-	-

Hubungan anantara nilai %ISDR dan *intensity measure* (IM) kemudian disajikan ke dalam bentuk grafik *Incremental Dynamic Analysis* (IDA). *Interstorey Drift ratio* merupakan grafik yang menunjukkan pola respon bangunan terhadap *intensity measure* tertentu yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Kurva *Incremental Dynamic Analysis* (IDA).

Sebaran data prosentase *interstorey drift ratio* pada Gambar 11 ditunjukkan oleh garis lurus hitam dan simbol. Garis putus-putus dalam Gambar 11 menunjukkan batas performa *collapsing* yakni dengan nilai *interstorey drift ratio* sebesar 2,5%. Analisis yang dilakukan pada 11 rekaman gempa menunjukkan bahwa hasil sebaran data berada pada sekitar daerah batas *collapsing*.

Kurva Kerentanan

Kurva kerentanan merupakan kurva yang menggambarkan probabilitas kerusakan suatu komponen bangunan untuk melampaui batasan tertentu (Yogi, 2003). Probabilitas yang dimaksud dalam penelitian ini merupakan level performa bangunan yang terdiri dari *operational phase* (OP), *immediate occupancy* (IO), *damage control* (DC), *life safety* (LS), dan *collapse prevention* (CP).

Hasil nilai %ISDR kemudian dianalisis menggunakan formula kurva kerentanan yang digunakan oleh (Ibrahim dalam Kassem et al., 2020).

$$P[D/PGA] = \Phi((\ln(PGA) - \mu) / \sigma) \quad (2)$$

PGA dalam kasus ini merupakan nilai *intensity measure*, ϕ merepresentasikan fungsi distribusi standar

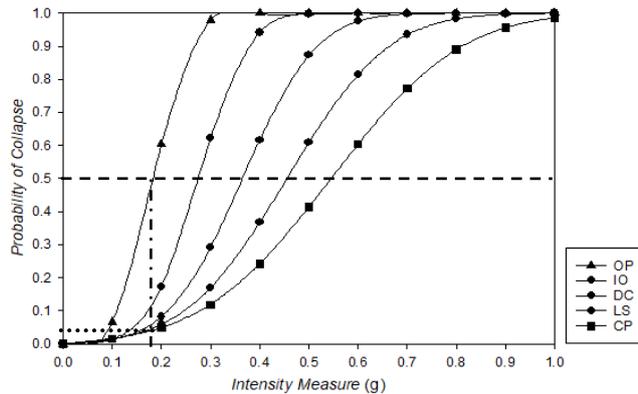
normal kumulatif, μ menunjukkan rata-rata nilai, dan σ merupakan standar deviasi logritma PGA.

Dengan formulasi diatas akan diperoleh nilai sesuai dengan 5 level performa bangunan. Hasil nilainya akan berbentuk nilai distribusi normal yang nantinya jika diinterpretasikan menghasilkan kurva kerentanan. Nilai distribusi normal tersebut menunjukkan probabilitas kerusakan yang terjadi pada setiap level performa bangunan. Nilai probabilitas kerusakan disajikan pada **Tabel 6**.

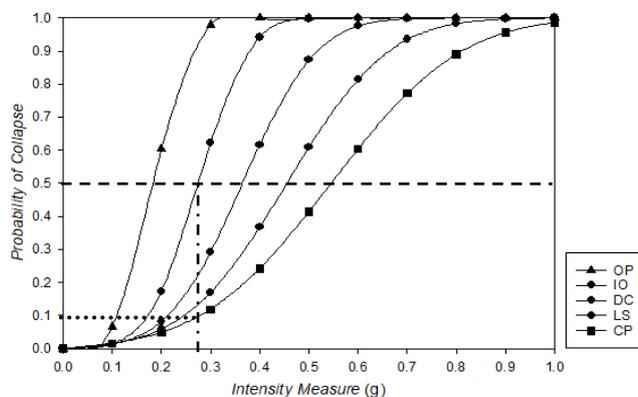
Tabel 6. Hasil nilai probabilitas kerentanan

IM	Damage State				
	OP	IO	DC	LS	CP
0,1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0,2	0.067	0.014	0.013	0.014	0.016
0,3	0.603	0.173	0.081	0.058	0.048
0,4	0.978	0.622	0.291	0.169	0.119
0,5	1.000	0.941	0.616	0.367	0.242
0,6	1.000	0.998	0.873	0.609	0.414
0,7	1.000	1.000	0.976	0.814	0.604
0,8	1.000	1.000	0.998	0.935	0.772
0,9	1.000	1.000	1.000	0.983	0.890
1	1.000	1.000	1.000	0.997	0.956

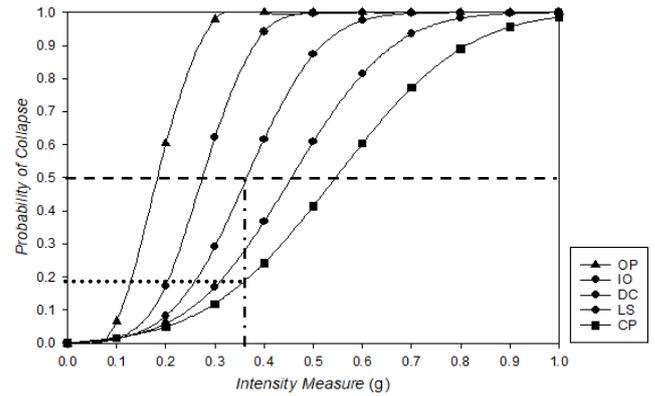
Hasil dari nilai probabilitas tersebut ditampilkan ke dalam bentuk kurva kerentanan bangunan, yang ditunjukkan pada **Gambar 12 – 15** yang menyajikan kurva kerentanan dengan 5 level performa bangunan secara berurutan dari kiri OP, IO, DC, LS, dan CP.



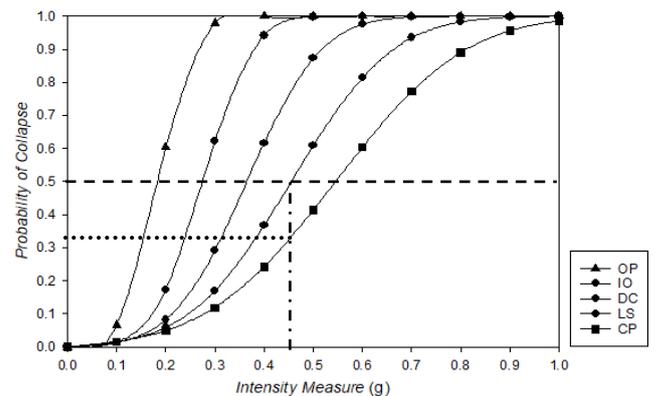
Gambar 12. Hubungan kurva OP-CP



Gambar 13. Hubungan kurva IO-CP



Gambar 14. Hubungan kurva DC-CP



Gambar 15. Hubungan kurva LS-CP

Terlihat pada **Gambar 12 – 15** hubungan antara kurva kerentanan performa bangunan OP, IO, DC, dan LS, terhadap kurva kerentanan CP. Dalam **Gambar 12** ditampilkan garis putus-putus menandai kerusakan yang terjadi pada level performa bangunan sebesar 50%. Kurva OP diketahui bahwa pada saat probabilitas kerusakan mencapai angka 50% dicapai pada *intensity measure* 0,18g. Hal tersebut diasumsikan bahwa bangunan masih bisa beroperasi secara prosentase sebesar 50%. Sedangkan pada kasus yang sama pada kondisi 0,18g kurva CP memiliki probabilitas 0,04 atau 4% kerusakan. Pada Pembacaan yang serupa dilakukan pada kurva-kurva yang lainnya.

Tampilan pada **Gambar 13** kurva kerentanan IO diketahui bahwa pada saat mengalami probabilitas kerusakan sebesar 50% berada pada *intensity measure* (IM) 0,28g. Level performa bangunan IO menunjukkan bahwa elemen bangunan mengalami kerusakan minimum setelah terjadi gempa (Asmara et al., 2021). Kurva CP menunjukkan nilai probabilitas sebesar 0,09 atau 9% kerusakan yang terjadi pada saat kondisi IO mengalami 50% kerusakan.

Gambar 14 menunjukkan hubungan antara kurva kerentanan DC dan CP. Kurva kerentanan DC digambarkan mengalami probabilitas kerusakan sebesar 50% pada *intensity measure* (IM) 0,37g. Pada kurva kerentanan CP, jika kondisinya dilihat dari probabilitas kerusakan 50% kurva kerentanan DC maka kurva kerentanan CP memiliki nilai probabilitas kerusakan sebesar 0,19 atau 19%. Level performa bangunan *damage control* memiliki artian kontrol kerusakan yang hal

tersebut merujuk pada mencegah atau meminimalkan kerusakan yang terjadi pada bangunan (Asmara et al., 2021). Level tersebut juga dapat diartikan sebagai kerusakan yang terkontrol.

Hubungan kurva LS-CP seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 15** memiliki nilai probabilitas kerusakan 50% pada kurva LS yang terletak di *intensity measure* (IM) 0,46g. Pada performa *life safety* diartikan sebagai keamanan jiwa yang merujuk pada aspek keamanan penghuni bangunan untuk pencegahan cedera dalam suatu situasi darurat (Asmara et al., 2021). *Life safety* juga diartikan sebagai kerusakan yang dapat membahayakan penghuni gedung pada saat terjadi situasi darurat. Melihat kondisi probabilitas 50% pada kurva LS, kurva CP menunjukan probabilitas sebesar 0,32 atau 32% dengan *intensity measure* (IM) yang sama. Pada performa bangunan ini kondisi bangunan tidak memungkinkan untuk dihuni dengan alasan keselamatan.

Terlepas dari seluruh diskusi di atas, meskipun hunian tetap yang menjadi target tinjauan dalam penelitian ini termasuk dalam kategori *non-engineered building*, namun tingginya kerusakan yang terjadi pada hunian tetap mendorong peneliti untuk tetap menganalisis tingkat kerentanan bangunan hunian tetap. Karena minimnya dasar dan standar acuan analisis untuk hunian tetap rumah, maka pada penelitian ini analisis hunian tetap mengacu pada standar-standar yang digunakan pada *engineered building*. Penelitian terhadap bangunan *masonry* dengan analisis *time history* untuk model *non-linear* juga pernah dilakukan (Betti et al., 2015). Dilain sisi dalam analisis *time history* memiliki fleksibilitas dalam memilih akselerogram gempa yang dapat disesuaikan dengan wilayah dan karakteristik bangunan. Disebutkan dalam (Rifai et al., 2022) bahwa analisis *time history* merupakan cara menganalisis struktur secara dinamik, serta dalam (Harsono & Wahyuni, 2023) disebutkan bahwa *time history analysis* digunakan untuk mengevaluasi kinerja elemen struktur sebelum mencapai kelelahan. Sehingga pemilihan analisis *time history non-linear* akan menghasilkan perilaku bangunan sederhana lebih baik, serta dari hasil tersebut akan dapat digunakan dalam perancangan struktur bangunan yang lebih baik.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengavaluasi terkait bangunan hunian tetap atau rumah tinggal pada daerah Kabupaten Cianjur setelah terjadinya gempa bumi pada tahun 2022 silam. Objek yang diteliti merupakan hunian tetap eksisting salah satu warga di Desa Nagrak, Kabupaten Cianjur. Setelah dilakukan pengujian secara komputasi maka didapatkan hasil sebagai berikut.

- Lendutan maksimal yang terjadi dari model hunian tetap adalah 350 mm.
- Probabilitas kerusakan 50 % pada kurva OP, IO, DC, LS, dan CP secara berurutan terjadi pada *intensity measure* (IM) 0,18g, 0,28g, 0,37g, 0,46g, dan 0,54g.
- Jika ditarik secara keseluruhan maka probabilitas kerusakan pada CP sebesar 50 % terjadi pada *intensity measure* (IM) 0,54g, dan bangunan mengalami probabilitas kerusakan pada OP sebesar 100%, sehingga bangunan kemungkinan tidak bisa dihuni

dengan alasan keselamatan.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih kepada Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) atas kerjasama dan dukungan yang diberikan untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Fema 356 - Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building, Federal Emergency Management Agency 1 (2000).
- Asmara, K. B., Isneini, M., & D.W.S.B.U, C. N. (2021). Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Tinggi dengan Analisis Pushover Menggunakan Aplikasi Pemodelan Struktur (Studi Kasus: The Venetian Tower). *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, 9(1), 177–188.
- Betti, M., Galano, L., & Vignoli, A. (2015). Time-history seismic analysis of masonry buildings: A comparison between two non-linear modelling approaches. *Buildings*, 5(2), 597–621. <https://doi.org/10.3390/buildings5020597>
- Harsono, B., & Wahyuni, A. (2023). *PERFORMA NON-LINIER TIME HISTORY ANALISYS (NLTHA) STRUKTUR FIXED BASE RUMAH SEDERHANA DI DAERAH RAWAN GEMPA*. 9(September), 93–105. <https://jurnal.narotama.ac.id/index.php/patria>
- Hutabarat, L. E. (2023). Tinjauan Geologis Gempa Cianjur November 2022. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Dan Lingkungan, Program Studi Sipil, Universitas Kristen Indonesia, Jakarta*, 4(1), 46–53.
- Joel D, Cruz-Arguelles Miguel A, J., & Caesar A, A.-V. (2020). Simulation of Strong Ground Motions Modified by Attenuation Effect Under Specific Soil Condition: Modeling the 2017 Puebla, Mexico (Mw 7.1) Earthquake. *Journal of Seismology*, 24(June 2020), 495–509. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10950-020-09925-4>
- Kassem, M. M., Mohamed Nazri, F., & Noroozinejad Farsangi, E. (2020). On the quantification of collapse margin of a retrofitted university building in Beirut using a probabilistic approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(2), 373–381. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.05.003>
- Muhammad Hilmi, Erizal, & Febrita, J. (2021). Analisis Kinerja Struktur pada Bangunan Bertingkat dengan Metode Analisis Respon Spektrum Berdasarkan SNI 1726:2019. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 6(3), 143–158. <https://doi.org/10.29244/jsil.6.3.143-158>
- Pala'biran, O. A., Windah, R. S., & Pandaleke, R. (2019). Perhitungan Lendutan Balok Taper Kantlever Dengan Menggunakan SAP2000. *Jurnal Sipil Statik*, 7(8), 1039–1048.
- Rifai, M., Alami, F., Isneini, M., & Helmi, M. (2022). Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat Dengan Analisis Time History (Studi Kasus : Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro). *Jrsdd*, 10(1),

99–114.

- Saruddin, S. N. A., & Nazri, F. M. (2015). Fragility curves for low- and mid-rise buildings in Malaysia. *Procedia Engineering*, 125, 873–878.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.056>
- Supendi, P., Priyobudi, P., Jatnika, J., Sianipar, D., Ali, Y. H., Heryandoko, N., Daryono, D., Adi, S. P., Karnawati, D., Anugerah, S. D., Fatchurochman, I., & Sudrajat, A. (2022). Analisis gempa bumi Cianjur (Jawa Barat) Mw 5.6 tanggal 21 November 2022. *Badan Meterorologi, Klimatologi, Dan Geofisika (BMKG)*, November, 1–4.
<https://www.bmkg.go.id/berita/?p=42632&lang=ID&tag=cianjur>
- Vazurkar, U. Y., & Chaudhari, D. J. (2016). Development of Fragility Curves for RC Buildings. *International Journal of Engineering Research*, 5(Special 3), 591–594.
- Yogi, M. R. A. (2003). *Studi Komparatif Fragility Curve Desain Bangunan Beton Bertulang SRPMK dan SRPMM Wilayah Jakarta dengan peraturan RSNI 03-1726-201x*. 1–10.