

Premi Asuransi Jembatan Menggunakan *Fragility Curve* dan *Seismic Hazard*

Nabila Zahratu Fuadi *, Sutawanir Darwis

Prodi Statistika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Islam Bandung, Indonesia.

nabilazahraf@gmail.com, std.darwis@unisba.ac.id

Abstract. Earthquake insurance provides coverage for potential damage to vital infrastructure, such as bridges, caused by seismic hazards. This study aims to estimate the pure risk premium for Caltrans-owned bridges by integrating fragility curves with the Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) approach. Damage data from the 1994 Northridge earthquake were used to build lognormal fragility curves across four damage states. The curves were used to develop a Damage Probability Matrix (DPM) and calculate the Mean Damage Ratio (MDR) based on Modified Mercalli Intensity (MMI), converted from PGA using Pailoplee's empirical regression. Seismic hazard function $SH(I)$ was derived using USGS data from 1990–2025 for the Los Angeles region. By integrating MDR and $SH(I)$, an Expected Annual Damage Ratio (EADR) of 0.1511 was obtained, meaning 15.11% of the asset value is statistically at risk each year. For a bridge valued at USD 10 million, this results in a pure risk premium of USD 1,511,182 annually.

Keywords: *Earthquake Insurance, Fragility Curve, Pure Risk Premium.*

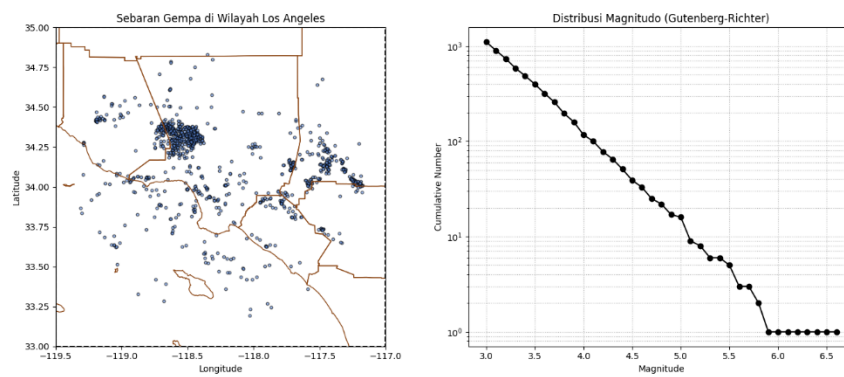
Abstrak. Asuransi gempa bumi merupakan perlindungan terhadap kerugian infrastruktur akibat kejadian seismik yang berisiko tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung premi risiko murni jembatan akibat gempa bumi dengan mengintegrasikan model *fragility curve* dan pendekatan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Data yang digunakan berupa data sekunder dari kerusakan jembatan milik Caltrans pada gempa Northridge 1994, yang dikategorikan binomial berdasarkan status kerusakan. Model *fragility curve* dibentuk menggunakan distribusi lognormal dengan estimasi parameter median kapasitas (c_k) dan simpangan baku logaritmik (ζ_k) pada empat tingkat kerusakan (*Minor, Moderate, Major, dan Collapse*). Model tersebut digunakan untuk menyusun *Damage Probability Matrix* (DPM) dan menghitung *Mean Damage Ratio* (MDR) dalam domain *Modified Mercalli Intensity* (MMI) setelah dilakukan konversi dari PGA menggunakan regresi empiris Pailoplee (2012). Selanjutnya, fungsi *hazard* tahunan $SH(I)$ diperoleh dari analisis PSHA menggunakan katalog gempa USGS periode 1990–2025 di wilayah Los Angeles. Hasil integrasi antara MDR dan $SH(I)$ menghasilkan nilai *Expected Annual Damage Ratio* (EADR) sebesar 0,1511 atau 15,11%. Angka ini menunjukkan bahwa rata-rata kerusakan tahunan yang diharapkan pada aset jembatan adalah sebesar 15% dari nilai total aset. Dengan asumsi nilai aset jembatan sebesar USD 10.000.000, maka estimasi premi risiko murni tahunan yang disarankan adalah sebesar USD 1.511.182.

Kata Kunci: *Asuransi Gempa Bumi, Fragility Curve, Premi risiko murni.*

A. Pendahuluan

Gempa bumi merupakan peristiwa pelepasan sejumlah energi batuan kerak bumi. Salah satu energi tersebut adalah energi gelombang yang disebut gelombang seismik. Gelombang ini menjalar ke segala arah dan dapat dideteksi oleh sensor seismik (Gunawan, 2005). Dalam konteks keimanan, fenomena ini telah disebutkan dalam Al-Qur'an sebagai bagian dari tanda kekuasaan dan peringatan Allah SWT dalam Qur'an surat Az-Zalzalah ayat 1-2. Ayat tersebut menjelaskan ketika bumi mengalami guncangan yang hebat, hal ini sejalan dengan fenomena alam yang sering terjadi yaitu gempa bumi.

Dari sisi rekayasa, kerusakan akibat gempa dapat dikaji dan diminimalisasi dengan pendekatan teknik berbasis probabilitas. Salah satu pendekatan yang kini banyak digunakan adalah analisis fragility curve, yaitu representasi probabilistik untuk menilai kemungkinan terjadinya kerusakan struktur akibat tingkat intensitas gempa tertentu. Fragility curve memberikan dasar kuantitatif untuk mengukur kerentanan infrastruktur terhadap guncangan seismik berdasarkan level intensitas gempa yang diasumsikan. Kurva ini umumnya berbentuk fungsi lognormal, yang menggambarkan probabilitas struktur akan melebihi suatu tingkat kerusakan (Damage State) pada intensitas tertentu (Shinozuka et al., 2000; FEMA, 2003).



Gambar 1. Peta gempa Los Angeles, California (USGS, 1990–2025)

Wilayah Los Angeles, California merupakan salah satu kawasan paling aktif secara seismik di dunia. Aktivitas tektonik tinggi ini disebabkan oleh pertemuan antara Lempeng Pasifik dan Lempeng Amerika Utara yang membentuk zona subduksi dan sistem sesar aktif, termasuk Sesar San Andreas. Salah satu gempa paling mematikan yang pernah tercatat di wilayah ini adalah gempa Northridge pada 17 Januari 1994 dengan magnitudo Mw 6.7. Meski tergolong menengah, gempa ini menyebabkan kerugian ekonomi sekitar 44 miliar dolar AS (Eguchi et al., 1998), menjadikannya salah satu bencana paling mahal dalam sejarah Amerika Serikat. Sekitar 60 orang meninggal dunia dan lebih dari 9.000 orang terluka (FEMA, 1995). Kerentanan struktural tercatat pada puluhan ribu bangunan dan belasan jembatan (Chang & Nojima, 2001), termasuk beberapa jembatan jalan tol utama yang runtuh sebagian atau sepenuhnya, mengganggu konektivitas transportasi dan logistik kota.

Premi untuk jangka waktu tertentu berkorelasi dengan besarnya pembayaran kerugian properti yang diasuransikan. Premi asuransi kerugian dihitung berdasarkan dua komponen utama, yaitu frekuensi kejadian gempa dan *severity* atau tingkat keparahan kerusakan akibat kejadian tersebut. Frekuensi kejadian di suatu *site* akan sama untuk semua struktur, sedangkan *severity* kerusakan tergantung pada sistem struktural, usia, konfigurasi, dan faktor teknis lainnya. Frekuensi asuransi dikuantifikasi melalui analisis *seismic hazard*. Distribusi magnitudo gempa diasumsikan mengikuti distribusi eksponensial, dikenal dengan hukum *Gutenberg-Richter*. Keacakan lokasi episenter gempa diasumsikan berdistribusi *uniform*. Distribusi temporal mengikuti distribusi *Poisson*. Dalam penelitian ini, perhitungan probabilitas tahunan intensitas gempa menggunakan pendekatan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) berdasarkan metode *lognormal* terhadap PGA yang dikembangkan oleh Baker (2008).

Setelah pemodelan kemunculan gempa, langkah berikutnya adalah menentukan efek gempa terhadap suatu lokasi. Untuk tujuan ini, beberapa model atenuasi telah dikembangkan, mulai dari model sederhana hingga model yang rumit yang melibatkan aspek geofisika dan mekanika gerakan gempa. Komponen tingkat keparahan (*severity*) gempa dikuantifikasi melalui model kerusakan jembatan akibat gempa dengan intensitas tertentu. Suatu metode mempresentasikan tingkat kerusakan jembatan melalui *damage probability matrices* (DPM). DPM memperlihatkan distribusi peluang kerusakan jembatan pada *damage states*.

Dalam skripsi ini, frekuensi kejadian gempa diasosiasikan dengan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA), sedangkan *severity* kerusakan jembatan akibat gempa dengan magnitudo tertentu dimodelkan melalui *fragility curve*. Kombinasi dari frekuensi gempa dan *severity* jembatan didefinisikan sebagai premi dasar asuransi jembatan akibat gempa dan dinotasikan sebagai *Expected Annual Damage Ratio* (EADR). Penelitian ini mengintegrasikan *fragility curve* jembatan menggunakan model distribusi *lognormal* dengan parameter median dan deviasi logaritmik, serta PSHA menggunakan data katalog gempa. Karena terdapat perbedaan skala pengukuran, maka dilakukan konversi dari PGA (*Peak Ground Acceleration*) menjadi MMI (*Modified Mercalli Intensity*) menggunakan model regresi logaritmik dari Pailoplee (2012).

Sementara itu, probabilitas tahunan $SH(I)$ intensitas gempa dihitung berdasarkan pendekatan frekuensi menggunakan model PSHA (Baker, 2008). Hasil akhir dari proses integrasi ini adalah premi dasar *Expected Annual Damage Ratio* (EADR), yaitu rata-rata ekspektasi kerusakan tahunan, yang kemudian digunakan untuk mengestimasi premi asuransi infrastruktur terhadap risiko gempa. Model ini menjadi pendekatan integratif antara teknik sipil dan aktuaria dalam konteks mitigasi risiko kebencanaan.

Berdasarkan uraian dari latar belakang di atas, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: “Bagaimana membangun model *severity* premi jembatan melalui *fragility curve* menggunakan distribusi *lognormal*? Bagaimana memodelkan komponen frekuensi premi menggunakan pendekatan PSHA? Serta bagaimana menghitung *Expected Annual Damage Ratio* (EADR) berdasarkan integrasi *fragility curve* dan seismic hazard?”.

Selanjutnya, tujuan dalam penelitian ini adalah untuk menerapkan *fragility curve* sebagai komponen tingkat keparahan (*severity*) premi untuk jembatan milik Caltrans menggunakan model probabilistik *lognormal*; menghitung *Expected Annual Damage Ratio* (EADR) sebagai representasi premi dasar; dan mengaitkan nilai EADR dengan perhitungan premi asuransi risiko gempa bumi.

B. Metode

Peneliti menggunakan data sekunder yang diperoleh dari penelitian terdahulu yang dilakukan oleh (Shinozuka et al., 2000). Data tersebut merupakan data kerusakan jembatan. Data ini berisi informasi nilai percepatan tanah maksimum (PGA) dalam satuan g untuk masing-masing jembatan, yang diperoleh melalui proses interpolasi spasial dari data rekaman *accelerograph* yang tersebar di wilayah terdampak. Metode interpolasi yang umum digunakan antara lain *kriging* dan *inverse distance weighting* (IDW), sehingga setiap jembatan dapat dikaitkan dengan estimasi PGA yang dapat diandalkan berdasarkan lokasinya. Nilai percepatan tanah inilah yang kemudian digunakan sebagai parameter intensitas gempa untuk penyusunan *fragility curve*.

Setiap baris data memuat status kerusakan jembatan dalam format binomial, yaitu nilai “1” jika jembatan mengalami kerusakan dan “0” jika tidak. Data ini diklasifikasikan berdasarkan empat tingkat kerusakan (*Damage State*) kumulatif: Minor ($\geq \text{Min}$), Moderate ($\geq \text{Mod}$), Major ($\geq \text{Maj}$), dan Collapse ($\geq \text{Col}$).

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis probabilistik untuk memperkirakan premi risiko gempa pada jembatan melalui integrasi antara kurva *fragility* dan *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA).

Tahapan pertama dalam penelitian ini adalah membentuk model *fragility curve* menggunakan pendekatan distribusi *lognormal*. Model ini menggambarkan probabilitas kerusakan struktur jembatan pada tingkat intensitas gempa tertentu, dengan fungsi kumulatif *lognormal* sebagai berikut:

$$P[D \geq d | IM = x] = 1 - \Phi \left(\frac{\ln(d) - \ln(\mu)}{\beta} \right) \quad (1)$$

Sebelum menghitung peluang kerusakan pada skala intensitas *Modified Mercalli Intensity* (MMI), dilakukan konversi dari nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) ke MMI menggunakan regresi logaritmik dari Pailoplee (2012). Konversi ini diperlukan agar skala intensitas antara *fragility curve* dan fungsi *hazard* dapat diselaraskan:

$$MMI = \frac{\log_{10}(PGA) + 3.1006}{0.2526} \quad (2)$$

Selanjutnya, probabilitas kerusakan dalam bentuk *Damage Probability Matrix* (DPM) dihitung berdasarkan data kerusakan jembatan pada masing-masing tingkat intensitas gempa. Peluang kerusakan pada *damage state* tertentu dihitung dengan:

$$F_k(I) = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{a(I)}{c_k} \right)}{\zeta_k} \right) \quad (3)$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung *Mean Damage Ratio* (MDR), yaitu ekspektasi tingkat kerusakan struktur akibat gempa pada tingkat intensitas tertentu. MDR diperoleh dengan menjumlahkan probabilitas kerusakan pada masing-masing kategori *Damage State* yang telah dibobot berdasarkan rasio kerugian (*damage ratio*) dari masing-masing tingkat kerusakan. Persamaan umum untuk menghitung MDR adalah sebagai berikut:

$$MDR_k(I) = \sum_{k=1}^n P_k(I) \cdot w_k \quad (4)$$

Bobot kerusakan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada pendekatan umum dalam studi probabilistik infrastruktur, terutama berdasarkan HAZUS-MH Technical Manual (FEMA, 2003) dan kajian Shinozuka et al. (2000), dengan nilai *Minor* = 0.01, *Moderate* = 0.10, *Major* = 0.30, *Collapse* = 1.00.

Untuk menghitung frekuensi kejadian gempa tahunan, diperoleh menggunakan pendekatan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) klasik (Cornell, 1968; McGuire, 1976), yang menghubungkan distribusi logaritmik dari PGA terhadap peluang tahunan terjadinya intensitas tertentu. Fungsi *hazard* tahunan atau probabilitas terjadinya intensitas tertentu dihitung dengan pendekatan distribusi *lognormal* terhadap PGA menggunakan data gempa USGS wilayah Los Angeles periode 1990–2025. Rumus umum PSHA yang digunakan adalah:

$$SH(I) = P(I > i) = \int_r \int_m P(I > i | m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (5)$$

Nilai *Expected Annual Damage Ratio* (EADR) dihitung dengan mengintegrasikan nilai MDR dan $SH(I)$ untuk setiap level intensitas. EADR menggambarkan besarnya kerusakan tahunan rata-rata yang diharapkan, dan dihitung dengan rumus:

$$EADR = \sum_{k \in \text{state}} \sum_{I=1}^{12} MDR_k(I) \times SH(I) \quad (6)$$

Terakhir, nilai premi tahunan dihitung dengan mengalikan EADR dengan nilai aset jembatan. Premi ini mencerminkan besarnya biaya asuransi dasar berdasarkan risiko aktual terhadap gempa bumi:

$$\text{Premi Tahunan} = \text{EADR} \times \text{Nilai Aset} \quad (7)$$

Pendekatan ini banyak digunakan dalam asuransi infrastruktur strategis seperti jembatan nasional, jalan tol, pelabuhan atau bandara di zona seismik aktif. Model ini memungkinkan penyesuaian premi berdasarkan hasil simulasi gempa dan kerusakan aktual, bukan berdasarkan tarif tetap atau premi historis yang bias.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Deskriptif Data

Deskripsi data menjelaskan mengenai karakteristik dari variabel yang akan digunakan dalam penelitian yaitu waktu *survival*. Berikut merupakan nilai pemusatan data dari waktu *survival*.

Tabel 1. Data Kerusakan Jembatan Caltrans di Los Angeles, California

No	PGA(g)	N	≥ Min	≥ Mod	≥ Maj	≥ Col
1	0.069	1	0	0	0	0
2	0.072	1	0	0	0	0
3	0.072	1	0	0	0	0
4	0.072	1	0	0	0	0
5	0.072	1	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1994	0.871	1	1	1	0	0
1995	0.875	1	1	0	0	0
1996	0.875	1	0	0	0	0
1997	0.887	1	0	0	0	0
1998	0.889	1	1	1	1	0

Sumber: Shinozuka et al. (2000)

Data pertama (Tabel 3.1) merupakan data kerusakan jembatan akibat gempa Northridge tahun 1994 yang dikumpulkan dan diolah oleh Shinozuka et al. (2000). Data ini berasal dari inspeksi visual terhadap 1.998 jembatan milik Caltrans (*California Department of Transportation*) yang tersebar di wilayah Los Angeles, California. Caltrans merupakan lembaga pemerintah negara bagian California yang bertanggung jawab atas pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur transportasi, termasuk jembatan. Los Angeles sendiri adalah salah satu kota besar di negara bagian California, Amerika Serikat, dan merupakan wilayah yang terdampak langsung oleh gempa Northridge.

Data ini berisi informasi nilai percepatan tanah maksimum (PGA) dalam satuan g untuk masing-masing jembatan, yang diperoleh melalui proses interpolasi spasial dari data rekaman *accelerograph* yang tersebar di wilayah terdampak. Metode interpolasi yang umum digunakan antara lain *kriging* dan *inverse distance weighting* (IDW), sehingga setiap jembatan dapat dikaitkan dengan estimasi PGA yang dapat diandalkan berdasarkan lokasinya. Nilai percepatan tanah inilah yang kemudian digunakan sebagai parameter intensitas gempa untuk penyusunan *fragility curve*.

Setiap baris data memuat status kerusakan jembatan dalam format binomial, yaitu nilai “1” jika jembatan mengalami kerusakan dan “0” jika tidak. Data ini diklasifikasikan berdasarkan empat tingkat kerusakan (*Damage State*) kumulatif: *Minor* ($\geq \text{Min}$), *Moderate* ($\geq \text{Mod}$), *Major* ($\geq \text{Maj}$), dan *Collapse* ($\geq \text{Col}$). Karena bersifat kumulatif, maka nilai pada *Damage State Collapse* mencakup seluruh jembatan yang mengalami kerusakan *Minor*, *Moderate*, *Major*, maupun *Collapse*; nilai pada *Damage State Major* mencakup jembatan yang mengalami *Minor*, *Moderate*, dan *Major*; nilai pada *Damage State Moderate* mencakup *Minor* dan *Moderate*; nilai pada *Damage State Minor* hanya mencakup jembatan yang mengalami kerusakan *Minor* atau lebih.

Tabel 2. Data katalog Gempa Bumi di California (1990-2025)

No	Tanggal	Waktu	Lintang	Bujur	Kedalaman	Magnitudo
1	2024-12-03	03:51:21	34.5125	-118.868	15.34	3.05
2	2024-11-22	22:15:54	34.05867	-118.807	10.59	3.62
3	2024-11-17	04:17:21	34.14317	-117.496	3.06	3.33
4	2024-11-16	22:17:04	34.1425	-117.5	2.79	3.47
5	2024-10-06	10:51:08	34.02367	-117.592	5.17	3.99
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
997	1994-01-17	12:30:55	34.213	-118.537	18.202	6.7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1100	1990-03-01	00:02:04	34.13	-117.714	5.622	3.15
1101	1990-02-28	23:46:54	34.133	-117.717	5.734	2.98
1102	1990-02-28	23:43:36	34.144	-117.697	3.292	5.10
1103	1990-02-28	20:37:24	34.139	-117.704	5.292	3.54
1104	1990-01-17	23:27:18	33.871	-118.263	13.948	3.45

Sumber: *United States Geological Survey* (USGS)

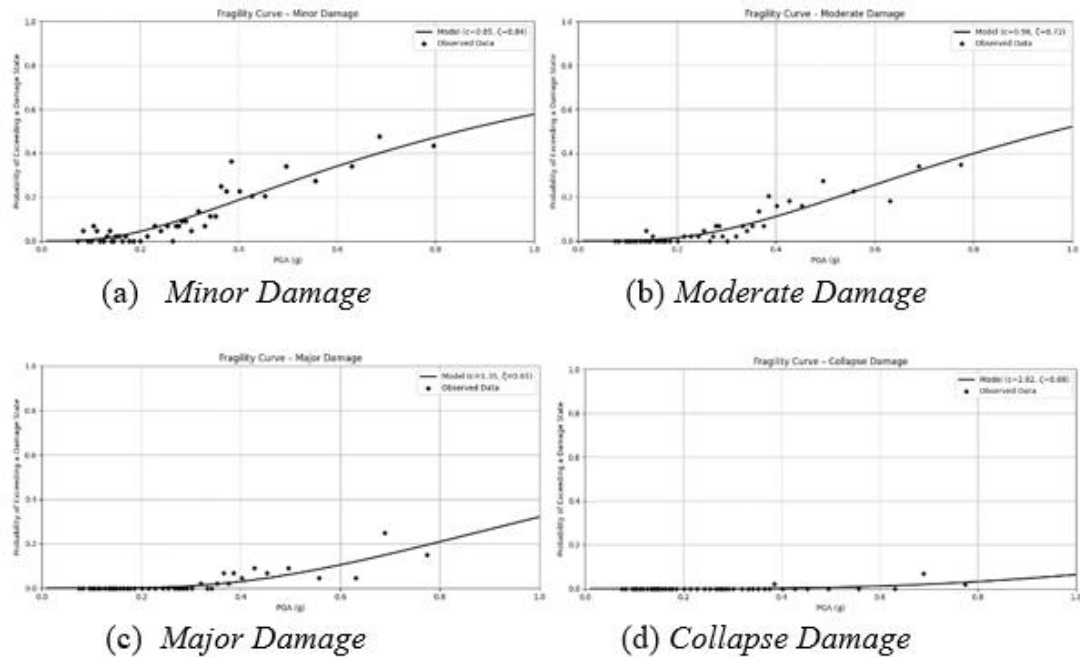
Wilayah cakupan analisis difokuskan pada California bagian selatan, sesuai dengan fokus objek penelitian yaitu jembatan milik Caltrans di kawasan metropolitan Los Angeles. Informasi katalog ini digunakan untuk membentuk fungsi *Seismic Hazard* tahunan $SH(I)$, yaitu peluang tahunan terjadinya intensitas gempa pada tingkat MMI tertentu. Nilai-nilai $SH(I)$ diperoleh melalui pendekatan probabilistik (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis/PSHA*) untuk kasus satu patahan.

Estimasi Parameter Median c_k dan Deviasi Logaritmik ζ_k

Tabel 3. Estimasi Parameter *Fragility Curve* untuk Setiap *Damage State*

<i>Damage State</i>	c_k (Median PGA)	ζ_k (Deviasi Logaritmik)
<i>Minor</i>	0,84840	0,84150
<i>Moderate</i>	0,96310	0,72054
<i>Major</i>	1,35312	0,64913
<i>Collapse</i>	2,81586	0,67934

Berdasarkan hasil penaksiran parameter pada Tabel 3 maka dapat diperoleh *fragility curve* dari persamaan (1) sebagai berikut,



Gambar 2. Kurva *Fragility* Setiap *Damage State*

Fragility curve untuk masing-masing kategori tingkat kerusakan (*Damage State*), yaitu *Minor*, *Moderate*, *Major*, dan *Collapse*, menunjukkan pola yang konsisten secara teoritis, di mana kurva bergeser ke kanan seiring meningkatnya tingkat keparahan kerusakan yang dimodelkan. Artinya, semakin berat tingkat kerusakan, semakin besar nilai percepatan tanah (PGA model) yang dibutuhkan untuk mencapainya. Pergeseran ini mencerminkan bahwa struktur pada umumnya masih mampu bertahan terhadap guncangan ringan hingga sedang, namun menjadi lebih rentan saat intensitas gempa meningkat.

Jika dilihat dari bentuk kurva, kategori *Minor* dan *Moderate* menunjukkan kenaikan probabilitas yang relatif cepat pada rentang PGA model 0,5g hingga 1,0g, sedangkan kurva *Major* dan *Collapse* memiliki *slope* yang lebih landai di awal dan baru meningkat signifikan pada PGA model di atas 1,5g. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar struktur tidak langsung mengalami kerusakan besar pada intensitas gempa menengah, dan keruntuhan total hanya terjadi pada gempa dengan intensitas sangat ekstrem.

Dengan demikian, *fragility curve* yang diperoleh tidak hanya menggambarkan peluang kerusakan pada berbagai tingkat PGA, tetapi juga memberikan wawasan penting mengenai kerentanan dinamis struktur jembatan terhadap gempa. Informasi ini sangat krusial dalam estimasi risiko, perencanaan mitigasi, serta penetapan premi asuransi berbasis probabilitas kerusakan aktual.

Konversi nilai PGA ke MMI

Dengan konversi ini, seluruh nilai probabilitas kerusakan yang awalnya berasosiasi dengan nilai PGA, kini dapat disusun dan digunakan dalam Damage Probability Matrix (DPM) berbasis skala intensitas MMI, serta selanjutnya diintegrasikan dengan fungsi Seismic Hazard $SH(I)$ dalam domain yang sama.

Tabel 4. Hasil Konversi PGA ke MMI

No	PGA(g)	MMI
1	0.069	7.677946
2	0.072	7.751118
3	0.072	7.751118
4	0.072	7.751118
5	0.072	7.751118
:	:	:
1994	0.871	12
1995	0.875	12
1996	0.875	12
1997	0.887	12
1998	0.889	12

Perhitungan Premi Asuransi Jembatan**Tabel 5.** Perhitungan *Expected Annual Damage Ratio* (EADR)

MMI	MDR	SH(I)	EADR = MDR × SH(I)
7	0,000003	0,0075	0,0000000
8	0,000056	0,0719	0,0000040
9	0,000685	0,3113	0,0002132
10	0,005621	0,6834	0,0038414
11	0,031181	0,9260	0,0288736
12	0,119115	0,9922	0,1181859

$$\text{EADR} = 0,1511182 = 15\%$$

Dari tabel di atas terlihat bahwa kontribusi terbesar terhadap nilai EADR berasal dari intensitas MMI tinggi, khususnya pada MMI 11 dan 12. Hal ini mencerminkan bahwa meskipun kejadian gempa dengan intensitas tinggi lebih jarang terjadi, dampak kerusakannya terhadap infrastruktur sangat signifikan.

Dengan total nilai EADR sebesar 0,1511182, dapat diartikan bahwa secara statistik, kerusakan tahunan rata-rata yang diharapkan pada struktur jembatan setara dengan 15% dari nilai aset. Nilai inilah yang kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan premi tahunan asuransi gempa, berdasarkan pendekatan *pure risk premium*:

$$\text{Premi} = \text{EADR} \times \text{Nilai Aset} \quad (8)$$

Jika, misalnya, nilai aset jembatan yang diasuransikan adalah sebesar \$10 juta, maka estimasi premi tahunan adalah:

$$\text{Premi} = 0,1511182 \times 10.000.000 = \$1.511.182$$

Nilai ini dapat menjadi masukan awal bagi aktuari atau penyusun kebijakan asuransi risiko bencana dalam menilai besaran premi yang mencerminkan risiko aktual infrastruktur akibat gempa.

D. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dalam penelitian ini, peneliti menyimpulkan beberapa hasil penelitian sebagai berikut:

1. *Fragility curve* berhasil dibangun untuk empat tingkat kerusakan (*Damage State*), yaitu *Minor*, *Moderate*, *Major*, dan *Collapse*, menggunakan pendekatan distribusi lognormal. Estimasi parameter median kapasitas (c) dan simpangan baku logaritmik (ζ) diperoleh dari data binomial kerusakan jembatan akibat gempa Northridge 1994. Hasil model menunjukkan bahwa nilai c meningkat seiring dengan tingkat kerusakan, yang berarti intensitas gempa yang dibutuhkan untuk menimbulkan kerusakan semakin besar. Sementara itu, nilai ζ mencerminkan variasi ketidakpastian pada tiap *Damage State*. Kurva *fragility* ini merepresentasikan tingkat keparahan (*severity*) kerusakan secara probabilistik dan dapat digunakan sebagai dasar dalam perhitungan risiko asuransi.
2. Nilai *Expected Annual Damage Ratio* (EADR) dihitung dari integrasi fungsi *fragility* dan *seismic hazard SH(I)*. Hasil perhitungan menunjukkan nilai total EADR sebesar 0,1511182 atau setara 15% dari nilai aset, yang mencerminkan rata-rata kerusakan tahunan yang diharapkan akibat gempa. Nilai ini menjadi dasar perhitungan premi tahunan.
3. Berdasarkan nilai EADR sebesar 0,1511182, estimasi premi asuransi tahunan untuk jembatan akibat gempa dapat dihitung dengan mengalikan EADR dengan nilai aset. Jika nilai aset jembatan sebesar USD 10.000.000, maka premi tahunan yang disarankan adalah USD 1.511.182. pendekatan ini merepresentasikan *pure risk premium* berbasis kerusakan aktual.

Ucapan Terimakasih

Alhamdulillah puji dan syukur penulis ucapkan pada Allah SWT atas berkah dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan karya ilmiah ini meskipun masih jauh dari kata sempurna. Terima kasih penulis ucapkan kepada seluruh keluarga dan kerabat atas segala bantuan dan dukungannya, terutama kepada Prof. Dr. Sutawanir Darwis, selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bantuan dan arahan selama masa penulisan yang sangat berarti dalam menyelesaikan karya ilmiah ini. Karya ilmiah ini merupakan sebagian dari penelitian pada tugas akhir yang penulis lakukan.

Daftar Pustaka

- Baker, J. W. (2008). *An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)*. Stanford University Lecture Notes.
- Chang, S. E., & Nojima, N. (2001). *Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 35(6), 475–494.
- Cornell, C. A. (1968). *Engineering Seismic Risk Analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(5), 1583–1606.
- Eguchi, R. T., Goltz, J. D., Seligson, H. A., Flores, P. J., Blais, N. C., Heaton, T. H., ... & Tierney, K. (1998). *Real-time loss estimation as an emergency response decision support system: The early post-earthquake damage assessment tool (EPEDAT)*. Earthquake Spectra, 14(4), 769–794.
- FEMA. (2003). *HAZUS-MH Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- Gunawan, I. (2005). *Pengantar Seismologi*. Bandung: ITB Press.
- McGuire, R. K. (1976). *FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis*. U.S. Geological Survey Open-File Report 76-67.
- Pailoplee, S. (2012). *Probabilistic Seismic Hazard Analysis in Thailand and Adjacent Areas*. Natural Hazards, 64(3), 2031–2048.

- Shinozuka, M., Feng, M., Lee, J., & Naganuma, T. (2000). *Statistical analysis of fragility curves*. Journal of Engineering Mechanics, 126(12), 1224–1231.
- Raisa Filmi Suryahadikusumah, & Sutawanir Darwis. (2024). Penentuan Premi Asuransi Gempa Berdasarkan Declustering Katalog Jawa Barat. *Jurnal Riset Statistika*, 127–136. <https://doi.org/10.29313/jrs.v4i2.5029>
- Roji, I. F. (2022). Penentuan Nilai Premi pada Asuransi Pertanian Berbasis Indeks Iklim di Kabupaten Bogor. *Jurnal Riset Statistika*, 65–72. <https://doi.org/10.29313/jrs.vi.908>
- Dewi, E. F., & Hajarisman, N. (n.d.). *Penanganan Data Hilang pada Pemodelan Persamaan Terstruktur melalui Metode Full Information Maximum Likelihood (FIML)*. <https://journals.sangkuriangpublisher.com/datamath>