



Estimasi Kerugian Fisik Akibat Gempa Bumi pada Infrastruktur Jalan dan Jembatan: Studi Kasus *Fly Over* di Kota Bandung

Roi Milyardi¹, Ariel Natanael¹

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknologi dan Rekayasa Cerdas, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, Indonesia

Corresponding author:

Roi Milyardi | roi.milyardi@maranatha.edu

ABSTRACT

Indonesia's geographical location, which is prone to earthquakes and high economic losses in the infrastructure sector, requires a quantitative approach to support post-disaster financial resilience. This study aims to estimate earthquake losses to road and bridge infrastructure in a flyover in the City of Bandung using the HAZUS method developed by FEMA in the United States. The research methodology involved analyzing losses on the 550-meter flyover at the Jakarta street, the City of Bandung, which consisted of road and bridge segments. Estimates were made based on eight earthquake scenarios with different recurrence periods, using seismic parameters from the 2017 Indonesian Earthquake Map correlated to meet annual physical loss requirements (AAL). The analysis components included hazard (PGD and S1), fragility curves, and cost variables for each damage level. The results showed that the AAL values for sections AB, BC, and CD were IDR 23.46 million, IDR 14.29 million, and IDR 28.67 million, respectively. These findings indicate that the HAZUS method can be used to systematically map potential road infrastructure losses and support the planning of Disaster Pool Funding (PFB) allocations. Despite limitations in local data and design parameters, this study provides a strong basis for the development of more contextual and applicable loss estimation models in Indonesia.

Keywords: Bridge; Disaster Pool Funding; Earthquake; HAZUS; Road

ABSTRAK

Lokasi geografis Indonesia yang rawan gempa dan tingginya kerugian ekonomi pada sektor infrastruktur meniscayakan perlunya pendekatan kuantitatif untuk mendukung ketahanan finansial pascabencana. Kajian ini bertujuan untuk mengestimasi kerugian gempa bumi pada infrastruktur jalan dan jembatan di *fly over* Kota Bandung dengan menggunakan metode HAZUS—yang dikembangkan oleh FEMA di Amerika Serikat. Metodologi penelitian melibatkan analisis kerugian pada ruas *fly over* Jalan Jakarta Kota Bandung sepanjang 550 meter, yang terdiri dari segmen jalan dan jembatan. Estimasi dilakukan berdasarkan delapan skenario gempa dengan periode ulang berbeda, menggunakan parameter seismik dari Peta Gempa Indonesia 2017 yang dikorelasikan untuk memenuhi kebutuhan kerugian fisik tahunan (AAL). Komponen analisis mencakup *hazard* (PGD dan S1), kurva fragilitas, dan *cost variable* untuk tiap tingkat kerusakan. Hasil menunjukkan bahwa nilai AAL untuk ruas AB, BC, dan CD masing-masing sebesar Rp23,46 juta, Rp14,29 juta, dan Rp28,67 juta. Temuan ini menunjukkan bahwa metode HAZUS dapat digunakan untuk memetakan potensi kerugian infrastruktur jalan secara sistematis dan mendukung perencanaan alokasi dana *Pool Funding* Bencana (PFB). Meskipun terdapat keterbatasan pada data lokal dan parameter desain, studi ini memberikan dasar kuat bagi pengembangan model estimasi kerugian yang lebih kontekstual dan aplikatif di Indonesia.

Kata Kunci: Gempa Bumi; HAZUS; Jalan; Jembatan; *Pool Funding* Bencana

ARTICLE HISTORY

Received: September 9, 2025

Revised: October 18, 2025

Published: November 15, 2025

Copyright © 2025, Journal of Infrastructure Policy and Management

CITATION (APA 7TH)

Milyardi, R., & Natanael, A. (2025). Estimasi kerugian fisik akibat gempa bumi pada infrastruktur jalan dan jembatan: Studi kasus *fly over* di kota Bandung. *Journal of Infrastructure Policy and Management*, 8(2), 127–138. <https://doi.org/10.35166/jipm.v8i2.138>

PENDAHULUAN

Indonesia terletak pada zona tektonik kompleks, yaitu pertemuan tiga lempeng tektonik besar: Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik (Pribadi et al., 2023). Dengan kondisi geografis tersebut, Indonesia menjadi salah satu negara di dunia yang sangat rawan ditimpa bencana gempa bumi. Berdasarkan data historis kebencanaan, bencana gempa bumi berpotensi menyebabkan kerusakan dan kerugian ekonomi pada infrastruktur yang paling vital dibandingkan bencana lainnya (BNPB, 2021; UNDRR, 2011).

Salah satu strategi penanggulangan dampak bencana adalah perencanaan ketahanan finansial untuk pulih kembali lebih cepat (The World Bank, 2019). Perencanaan ketahanan finansial sendiri memerlukan studi estimasi kerugian yang akan dihadapi. Beberapa studi sebelumnya telah melakukan upaya estimasi kerugian di wilayah Indonesia, namun estimasi tersebut lebih berfokus pada infrastruktur gedung (Aulady & Fujimi, 2019; Roi Milyardi, Pribadi, Abduh, Meilano, Lim, Wirahadikusumah, et al., 2025; Wibowo et al., 2024). Studi estimasi kerugian infrastruktur jalan dan jembatan masih sangat minim dilakukan, dan sering kali terbatas pada studi indeks risiko bencana gempa bumi (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2014). Sementara itu, pembangunan dan pengembangan

infrastruktur jalan dan jembatan masih terus berjalan dan menjadi prioritas pembangunan nasional (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2023).

Dalam konteks kebijakan publik, strategi ketahanan finansial telah diinisiasi melalui Peraturan Presiden Nomor 75 Tahun 2021 tentang Dana Bersama Penanggulangan Bencana dan Peraturan Menteri Keuangan Nomor 205/PMK.05/2021 Tahun 2021 tentang Pengakumulasian Cadangan *Pooling Fund* Bencana (PFB) pada Sisa Lebih Pembiayaan Anggaran Tahun Anggaran 2021. Skema tersebut diharapkan dapat mengurangi beban keuangan negara dalam proses rekonstruksi pasca bencana. Namun, dalam pelaksanaannya, PFB tidak dapat berdiri sendiri tanpa adanya metode estimasi kerugian bencana yang bertujuan menentukan besarnya kebutuhan PFB (Khotimah, 2024). Belum adanya metode baku dalam penentuan estimasi kerugian menjadi kendala pada proses realisasi PFB.

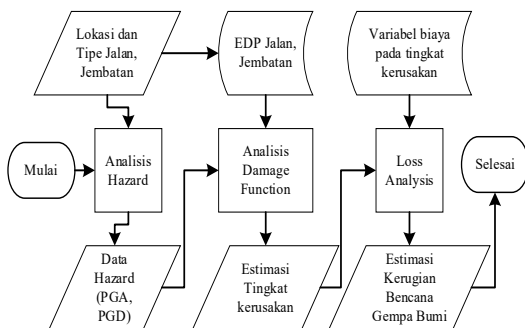
Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi kerugian gempa bumi pada infrastruktur jalan dan jembatan dengan studi kasus pada *fly over* Jalan Jakarta di Kota Bandung. Proses dan hasil studi ini diharapkan dapat memberi gambaran adopsi metode yang dapat digunakan untuk kontribusi PFB di Indonesia. Estimasi kerugian dilakukan melalui salah satu metode yang telah lama dikembangkan dan digunakan di berbagai

negara, yaitu metode HAZUS (FEMA-NIBS, 2020). Analisis estimasi dilakukan pada studi kasus ruas *fly over* Jalan Jakarta Kota Bandung. Hasil studi ini dapat memberikan gambaran alternatif metode estimasi kerugian bencana pada infrastruktur jalan dan jembatan pada kontribusi PFB di Indonesia.

KERANGKA TEORI

Metode HAZUS dikembangkan oleh Federal Emergency Management Agency (FEMA) pada tahun 1992 untuk memberikan perkiraan kerugian potensial akibat gempa bumi di Amerika Serikat (FEMA-NIBS, 2020). Metode ini telah dikembangkan dan diaplikasikan di beberapa negara di luar Amerika Serikat (Milyardi et al., 2025).

Salah satu keunggulan metode HAZUS ini adalah bahwa ia dapat membantu menghitung parameter teknis, atau *Engineering Demand Parameter (EDP)*, dengan simplifikasi sesuai tipe jalan maupun jembatan yang ditinjau, tanpa melalui analisis yang rigid (Milyardi et al., 2023). Hal tersebut dapat mempercepat proses estimasi pada skala luas. Pada modul estimasi kerugian jalan dan jembatan, terdapat tiga komponen analisis, yaitu *hazard*, *damage function*, dan *loss analysis*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Metode Estimasi Kerugian Gempa Bumi Hazus untuk Modul Jalan Dan Jembatan

Pada objek jalan, data *hazard* yang digunakan adalah *Peak Ground Deformation* (PGD). Nilai PGD didapat berdasarkan estimasi skenario magnitude gempa yang akan terjadi pada suatu ruas jalan yang dihitung melalui Persamaan 1 dan 2. Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan nilai percepatan spektral respons horizontal di batuan dasar pada periode 1,0 detik, S_1 yang merupakan basis *hazard* untuk jembatan didapatkan berdasarkan peta gempa lokal (dalam studi kasus ini berdasarkan Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia 2017) (PUSGEN, 2017). Pada data sumber gempa 2017, terdapat keterbatasan dalam ketersediaan data, yaitu hanya tersedia periode ulang 2500 tahun, sementara data yang dibutuhkan adalah minimal 8 periode ulang dalam menentukan kerugian tahunan (*Average Annualized Losses, AAL*) sesuai metode HAZUS. Oleh sebab itu, penghitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan korelasi parameter seismik sebagai berikut.

$$E[PGD_{SC}] = K_A \times E[PGA / PL_{SC}] \quad (1)$$

$$K_A = 0.0086M^3 - 0.0914M^2 + 0.4698M - 0.9835 \quad (2)$$

$$\frac{a_g}{a_{gR}} = \left(\frac{T}{T_R} \right)^k \quad (3)$$

Di mana:

K_A = faktor koreksi pergeseran yang

diberikan oleh Persamaan 2

M = skenario magnitude gempa

a_g = nilai percepatan gempa yang dicari

a_{gR} = nilai referensi percepatan gempa

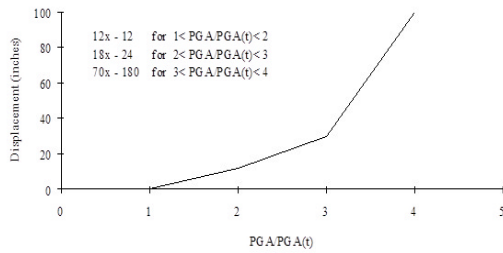
T = nilai periode ulang gempa yang dicari

T_R = nilai referensi periode ulang

k = koefisien seismik diambil 0,4

$E[PGA / PL_{SC}]$ = pergeseran tanah permanen yang diharapkan untuk kategori kerentanan tertentu pada tingkat getaran tanah yang dinormalisasi yang ditentukan Gambar 2.

$PGA(t)$ = percepatan tanah ambang batas yang diperlukan untuk memicu likuefaksi, diambil 0.26 gram untuk kategori kerentanan *very low*



Gambar 2. Hubungan Pergeseran Penyebaran Lateral (FEMA-NIBS, 2020)

Pada komponen analisis kerusakan, dilakukan konstruksi kurva fragilitas yang dihitung berdasarkan Persamaan 4 untuk objek jalan, dan Persamaan 5 untuk objek jembatan. Penentuan EDP Persamaan 4 dan 5 yang digunakan berdasarkan tipe jalan dan jembatan yang ditinjau ditunjukkan pada Tabel 1 untuk jalan, dan Tabel 2 untuk jembatan. Pada *damage function* ini terdapat 4 tingkat kerusakan, yaitu *slight*, *moderate*, *extensive*, dan *complete*.

$$P_{Road} [ds \leq S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{road}} \times \ln \left(\frac{PGD}{\overline{PGD}} \right) \right] \quad (4)$$

$$P_{Bridge} [ds \leq S_d] = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{bridge}} \times \ln \left(\frac{S_l}{\overline{S_l}} \right) \right] \quad (5)$$

Di mana:

$P_{Road} [ds \leq S_d]$ = probabilitas tingkat kerusakan untuk jalan

$P_{Bridge} [ds \leq S_d]$ = probabilitas tingkat kerusakan untuk jembatan

Φ = fungsi distribusi kumulatif normal standar

$\overline{PGD}$ = Nilai median dari PGD jalan untuk tingkat kerusakan tertentu

$\overline{S_l}$ = Nilai median dari S_l jalan untuk tingkat kerusakan tertentu

β_{road} = standar deviasi dari logaritma natural dari PGD untuk jalan

β_{bridge} = standar deviasi dari logaritma natural dari S_l untuk jembatan

Tabel 1. Komponen Analisis Estimasi Kerugian Gempa Bumi HAZUS untuk Modul Jalan Tipe HRD2 (*Urban Road*)

Komponen		Parameter		
Tingkat kerusakan		<i>Slight</i>	<i>Moderate</i>	<i>Extensive/Complete</i>
<i>Hazard</i>		<i>Peak Ground Deformation (PGD)</i>		
<i>Damage Function</i>	<i>PGD</i> (mm)	150	600	1500
	β_{road}	0.7		
<i>Loss Analysis</i> <i>(Cost variable)</i>		0.05	0.20	0.7

Tabel 2. Komponen Analisis Estimasi Kerugian Gempa Bumi HAZUS untuk Modul Jembatan Tipe HWB4 (*Single Span-Seismic Design*)

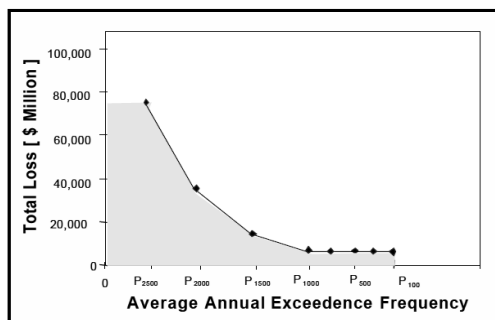
Komponen	Parameter				
Tingkat kerusakan	<i>Slight</i>	<i>Moderate</i>	<i>Extensive</i>	<i>Complete</i>	
<i>Hazard</i>	<i>Peak Ground Deformation (PGD)</i>				
<i>Damage Function</i>	$\overline{S_l}$ (g)	0.8	1.0	1.2	1.7
	β_{bridge}	0.6			
<i>Loss Analysis</i> <i>(Cost variable)</i>	0.03	0.08	0.25	1	

Nilai probabilitas kerusakan tiap tingkat kerusakan dikalikan dengan *cost variable*, yang dikalikan dengan nilai jembatan untuk mendapatkan nilai estimasi kerugian pada tiap skenario gempa yang ditinjau. Lingkup estimasi yang dihasilkan adalah kerugian fisik jalan dan jembatan saja, atau kerugian langsung (*direct loss*). Nilai estimasi tiap

skenario gempa menjadi dasar untuk penyusunan kurva ALL, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai AAL dihitung dari luasan area yang diarsir.

Implementasi metode HAZUS dalam konteks Indonesia memerlukan adaptasi yang cermat terhadap kondisi geologis dan karakteristik infrastruktur lokal. Keunggulan utama metode ini terletak pada pendekatan modular yang memungkinkan analisis terpisah namun terintegrasi antara komponen *hazard*, *damage function*, dan *loss analysis*, sehingga memfasilitasi perubahan berdasar ketersediaan data dan karakteristik regional. Metode HAZUS telah terbukti memberikan hasil yang konsisten dalam berbagai studi internasional, dengan tingkat akurasi yang dapat diterima untuk perencanaan strategis bencana, meskipun memerlukan validasi lokal untuk parameter-parameter kritis seperti kurva *fragilitas* dan *cost variable*.

Dalam konteks Indonesia, adopsi metode ini menjadi relevan mengingat standar desain infrastruktur nasional masih banyak mengacu referensi internasional, utamanya Amerika Serikat, sehingga parameter *Engineering Demand Parameter (EDP)* yang tersedia dapat diaplikasikan dengan penyesuaian minimal namun tetap memerlukan verifikasi empiris untuk kondisi spesifik Indonesia.



Gambar 3. Perhitungan *Average Annualized Earthquake Loss* Kurva Kerugian Probabilistik (FEMA-NIBS, 2020)

METODOLOGI

Penelitian dilakukan dengan melakukan perhitungan estimasi kerugian pada ruas jalan studi kasus. Estimasi kerugian dilakukan berdasarkan 8 skenario gempa untuk mendapatkan nilai AAL ruas jalan. Kasus yang dipilih pada kajian ini adalah *fly over* Jalan Jakarta Kota Bandung dengan total panjang 550 meter, terdiri dari objek jalan dan jembatan (sebagaimana terlihat pada Gambar 4 dan Tabel 4).

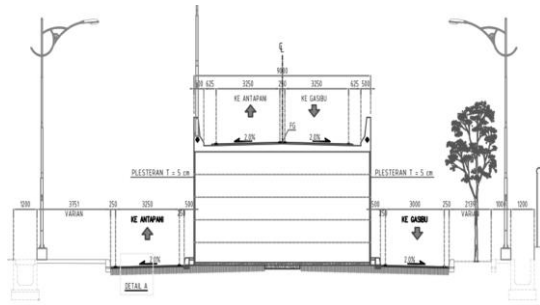
Detail perkerasan tipikal dan struktur jembatan ditunjukkan pada Gambar 5. Untuk ruas jalan terdiri dari 2 jalur dan 4 lajur.



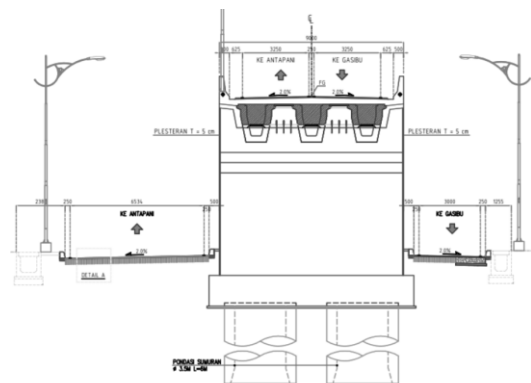
Gambar 4. Ruas Jalan *Fly Over* Jalan Jakarta Kota Bandung

Tabel 4. Data Ruas Jalan *Fly Over* Jalan Jakarta Kota Bandung

Ruas	Panjang (m)	Objek	Klasifikasi	Nilai Objek (Juta Rupiah)
A-B	225	Jalan	HRD2	7967
B-C	50	Jembatan	HWB4	6853
C-D	275	Jalan	HRD2	9737



Gambar 5a. Potongan Tipikal Objek Jalan



Gambar 5b. Potongan Tipikal Objek Jembatan

HASIL

Berikut hasil dari tiap komponen analisis metode HAZUS, yang terdiri dari komponen analisis *hazard*, kerusakan, dan kerugian.

Analisis Hazard

Hasil analisis *hazard* dapat dilihat pada Tabel 5. Nilai acuan parameter seismik (PGA, S_s , S_1) diambil berdasarkan data PUSGEN pada skenario gempa periode ulang 2500 tahun, dengan ketujuh periode ulang lainnya ditentukan berdasarkan Persamaan 3. Sementara itu, parameter seismik PGD ditentukan berdasarkan Persamaan 1 dan 2.

Tabel 5. Komponen Analisis *Hazard*

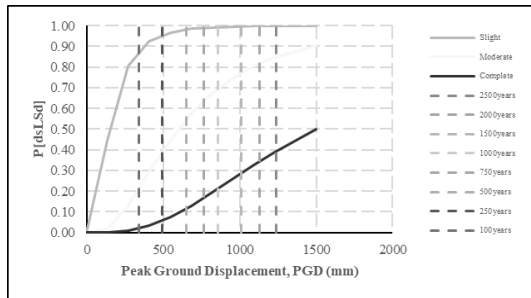
Parameter Seismik (Amplified)	Skenario Periode Ulang							
	2500	2000	1500	1000	750	500	250	100
PGA	0.62	0.57	0.51	0.43	0.39	0.33	0.25	0.17
S_s	1.42	1.30	1.16	0.98	0.88	0.75	0.57	0.39
S_1	0.76	0.70	0.62	0.53	0.47	0.40	0.30	0.21
PGD (mm)	1238.50	1132.75	1009.62	858.46	765.15	650.59	493.06	341.76

Penentuan parameter seismik dalam analisis *hazard* merupakan tahapan kritis yang memerlukan pendekatan sistematis untuk memastikan akurasi estimasi kerugian. Dalam studi ini, tantangan utama yang dihadapi adalah keterbatasan data periode ulang gempa pada Peta Gempa Indonesia 2017 yang hanya menyediakan data untuk periode ulang 2500 tahun, sementara metode HAZUS memerlukan minimum delapan periode ulang berbeda untuk perhitungan AAL yang komprehensif.

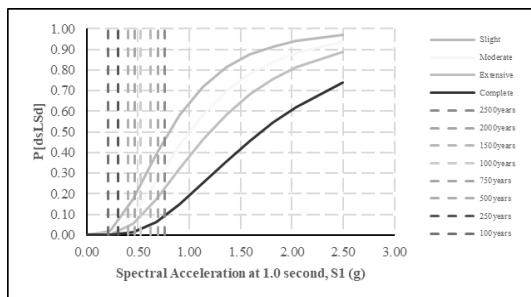
Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dilakukan interpolasi menggunakan persamaan korelasi parameter seismik dengan koefisien seismik $k=0,4$ yang telah terbukti valid untuk kondisi Indonesia. Proses ini memungkinkan transformasi data tunggal menjadi spektrum *hazard* multi-periode yang diperlukan, meskipun tetap membawa potensi deviasi terhadap kondisi seismik aktual di lapangan.

Analisis Kerusakan

Tingkat kerusakan dapat ditentukan dari hasil plot *hazard* pada kurva fragilitas, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dan Tabel 6 untuk objek jalan (Ruas AB, dan CD), dan pada Gambar 7 dan Tabel 7 untuk objek jembatan (Ruas BC).



Gambar 6. Plot Kurva Fragilitas untuk Objek Jalan (Ruas AB dan CD)



Gambar 7. Plot Kurva Fragilitas untuk Objek Jembatan (Ruas BC)

Konstruksi kurva fragilitas dalam analisis kerusakan menunjukkan pola respons yang berbeda antara infrastruktur jalan dan jembatan terhadap intensitas getaran gempa yang sama. Objek jalan dengan klasifikasi HRD2 (*Urban Road*) menunjukkan tingkat kerentanan yang relatif tinggi terhadap deformasi tanah permanen (PGD), dengan probabilitas kerusakan *slight* mencapai 37.10% pada periode ulang 100 tahun,

sementara kerusakan *extensive/complete* masih signifikan pada 15.02% untuk skenario yang sama.

Sebaliknya, objek jembatan tipe HWB4 (*Single Span - Seismic Design*) menunjukkan karakteristik kerentanan yang berbeda, dengan tingkat kerusakan *complete* yang dominan mencapai 31.50% pada periode ulang 2500 tahun, namun menurun drastis menjadi 10.49% pada periode ulang 100 tahun. Perbedaan pola ini mengindikasikan bahwa jembatan memiliki ambang batas kerusakan yang lebih tinggi dibandingkan jalan, namun ketika ambang tersebut terlampaui, tingkat kerusakannya cenderung lebih parah.

Analisis Kerugian

Estimasi nilai kerugian langsung (kerugian fisik) probabilitas tingkat kerusakan dilakukan melalui perhitungan kerugian dengan perkalian *cost variable* dan nilai objek infrastruktur yang ditinjau, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 8. Dari perhitungan estimasi kerugian langsung dari tiap skenario *hazard* kemudian dilakukan perhitungan AAL, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8 dan Tabel 9. Pemetaan estimasi kerugian langsung ditunjukkan pada Gambar 9.

Tabel 6. Estimasi Tingkat Kerusakan pada Objek Jalan (Ruas AB dan CD)

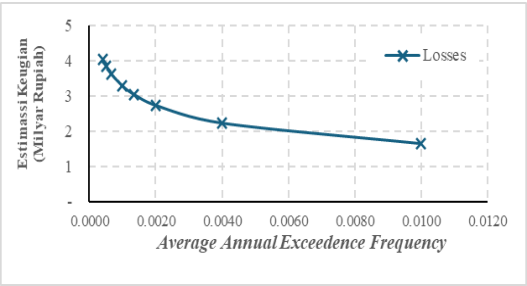
Tingkat Kerusakan	Skenario Periode Ulang Gempa							
	2500	2000	1500	1000	750	500	250	100
<i>Slight</i>	23.62%	24.97%	26.68%	29.00%	30.54%	32.52%	35.22%	37.10%
<i>Moderate</i>	24.74%	24.97%	25.13%	25.10%	24.88%	24.32%	22.73%	19.66%
<i>Extensive/Complete</i>	44.67%	42.21%	39.08%	34.80%	31.87%	27.94%	21.80%	15.02%

Tabel 7. Estimasi Tingkat Kerusakan pada Objek Jembatan (Ruas BC)

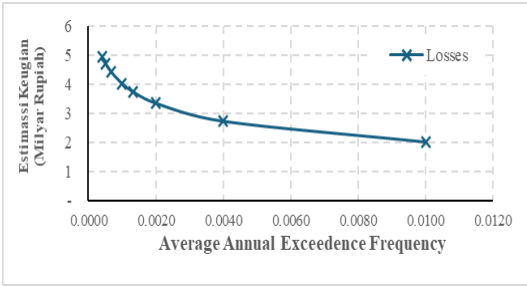
Tingkat Kerusakan	Skenario Periode Ulang Gempa							
	2500	2000	1500	1000	750	500	250	100
<i>Slight</i>	5.31%	5.28%	5.21%	5.08%	4.96%	4.75%	4.33%	3.66%
<i>Moderate</i>	4.26%	4.20%	4.12%	3.96%	3.84%	3.63%	3.24%	2.67%
<i>Extensive</i>	7.75%	7.59%	7.35%	6.97%	6.67%	6.22%	5.41%	4.31%
<i>Complete</i>	31.50%	29.62%	27.28%	24.15%	22.04%	19.27%	15.05%	10.49%

Tabel 8. Estimasi Kerugian pada Objek Jalan dan Jembatan

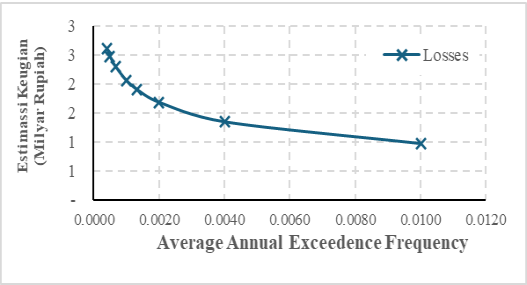
Estimasi Kerugian (Milyar Rupiah)								
Skenario Periode Ulang Gempa	2500	2000	1500	1000	750	500	250	100
Ruas AB	4.05	3.86	3.62	3.29	3.06	2.74	2.24	1.66
Ruas BC	2.61	2.47	2.30	2.06	1.90	1.69	1.35	0.97
Ruas CD	4.95	4.72	4.43	4.02	3.74	3.35	2.74	2.03



Gambar 8a. Kurva AAL Ruas AB



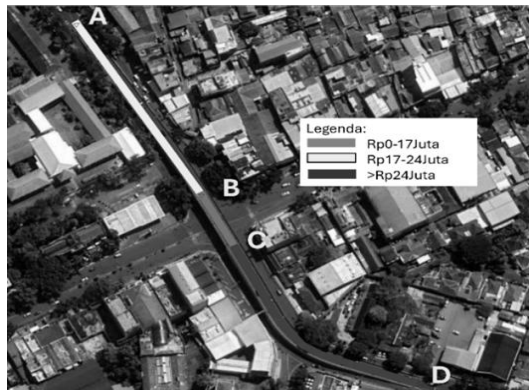
Gambar 8c. Kurva AAL Ruas CD



Gambar 8b. Kurva AAL Ruas BC

Tabel 9. Estimasi Kerugian Tahunan (AAL)

Ruas	Tipe	AAL (Juta Rupiah)
AB	Jalan	23.46
BC	Jembatan	14.29
CD	Jalan	28.67



Gambar 9. Pemetaan Kerugian Tahunan (AAL)

Konstruksi kurva fragilitas dalam analisis kerusakan menunjukkan pola respons yang berbeda antara infrastruktur jalan dan jembatan terhadap intensitas getaran gempa yang sama. Objek jalan dengan klasifikasi HRD2 (*Urban Road*) menunjukkan tingkat kerentanan yang relatif tinggi terhadap deformasi tanah permanen (PGD), dengan probabilitas kerusakan *slight* mencapai 37.10% pada periode ulang 100 tahun, sementara kerusakan *extensive/complete* masih signifikan pada 15.02% untuk skenario yang sama.

Sebaliknya, objek jembatan tipe HWB4 (*Single Span - Seismic Design*) menunjukkan karakteristik kerentanan yang berbeda, dengan tingkat kerusakan *complete* yang dominan mencapai 31.50% pada periode ulang 2500 tahun, namun menurun drastis menjadi 10.49% pada periode ulang 100 tahun. Perbedaan pola ini mengindikasikan bahwa jembatan memiliki ambang batas kerusakan yang lebih tinggi dibandingkan jalan, namun ketika ambang tersebut terlampaui, tingkat kerusakannya cenderung lebih parah.

DISKUSI

Hasil pemetaan estimasi kerugian langsung pada ruas jalan di studi kasus menunjukkan bahwa metode HAZUS dapat berkontribusi pada pemetaan kerugian infrastruktur akibat

gempa di wilayah Indonesia. Tantangan yang dihadapi adalah pada adopsi EDP untuk tipe jembatan dan jalan yang diobservasi. EDP yang disediakan HAZUS adalah EDP yang merepresentasikan karakteristik infrastruktur di Amerika Serikat.

Pada penerapannya di infrastruktur Indonesia, masih relevan dengan acuan standar desain jalan dan jembatan masih banyak mengacu pada standar desain Amerika Serikat (Simanjuntak et al., 2023). Beberapa studi sebelumnya menunjukkan bahwa adopsi seluruh EDP HAZUS untuk wilayah Indonesia menghasilkan deviasi yang minim berdasarkan analisis yang komprehensif pada infrastruktur (Milyardi et al., 2025).

Adanya potensi penerapan metode HAZUS pada infrastruktur jalan dan jembatan dapat mendukung ketahanan bencana di Indonesia secara lebih luas dan cepat. Hal tersebut mendukung kebijakan terkait ketahanan bencana PFB sehingga kebijakan publik yang berbasis data kerugian dapat diukur dengan lebih efektif dalam mengalokasikan dana dan merespons dampak bencana secara sistematis (Rachman et al., 2025). Salah satu keterbatasan utama dalam studi ini adalah ketergantungan pada parameter seismik dari Peta Gempa Indonesia 2017 yang hanya menyediakan data untuk satu periode ulang (2500 tahun).

Upaya untuk memenuhi kebutuhan analisis AAL sesuai metode HAZUS dilakukan melalui interpolasi menggunakan persamaan korelasi parameter seismik, yang meskipun valid secara teknis, tetapi membawa potensi deviasi terhadap kondisi aktual. Selain itu, kurva fragilitas dan *cost variable* yang digunakan masih mengacu pada standar Amerika Serikat sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik infrastruktur lokal Indonesia. Keterbatasan ini menunjukkan perlunya pengembangan

basis data lokal yang lebih komprehensif agar estimasi kerugian dapat dilakukan dengan lebih akurat dan kontekstual dalam mendukung kebijakan PFB.

Selain itu, keterbatasan dari studi ini adalah estimasi kerugian yang dihasilkan hanya berupa kerugian langsung (*direct loss*), yaitu kerugian fisik saat jalan dan jembatan mengalami kerusakan akibat gempa bumi. Nilai *annual loss* yang dihasilkan dapat digunakan sebagai acuan dasar untuk analisis lebih lanjut dalam penentuan premi asuransi. Nilai kerugian tak langsung (*indirect loss*) berupa dampak ekonomi akibat tidak berfungsinya suatu ruas jalan dan jembatan, tidak ditinjau pada studi ini.

Untuk mengisi keterbatasan studi ini, penelitian selanjutnya dapat mengembangkan basis data dengan parameter seismik lokal yang lebih komprehensif, mencakup berbagai periode ulang gempa untuk mendukung estimasi AAL kerugian fisik yang lebih akurat. Selain itu, perlu dilakukan kalibrasi kurva fragilitas dan *cost variable* berdasarkan karakteristik infrastruktur Indonesia, baik dari segi desain teknis maupun kondisi geologis. Penelitian kolaboratif lintas institusi dapat mempercepat proses ini, terutama dengan melibatkan Kementerian PUPR, BNPB, dan lembaga akademik. Pengembangan model HAZUS yang terlokalisasi juga dapat membuka peluang integrasi dengan sistem anggaran nasional, sehingga estimasi kerugian tidak hanya bersifat akademik, tetapi juga aplikatif dalam mendukung kebijakan *Pool Funding* Bencana secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan bahwa metode HAZUS dapat diadaptasi untuk estimasi kerugian gempa bumi pada infrastruktur jalan dan jembatan di Indonesia, khususnya dalam mendukung kebijakan *Pool Funding*

Bencana (PFB). Studi kasus *fly over* Jalan Jakarta Kota Bandung menghasilkan estimasi kerugian tahunan (AAL) yang dapat menjadi acuan dalam perencanaan ketahanan finansial pascabencana. Meskipun metode ini dikembangkan di Amerika Serikat, hasil analisis menunjukkan bahwa parameter EDP dan *cost variable* yang digunakan tetap relevan dengan kondisi infrastruktur lokal, terutama karena standar desain nasional masih mengacu pada referensi internasional.

Namun, penelitian ini juga mengungkap beberapa keterbatasan, seperti keterbatasan data parameter seismik lokal dan belum adanya kurva fragilitas serta *cost variable* yang dikembangkan khusus untuk konteks Indonesia. Oleh sebab itu, penelitian selanjutnya dapat berfokus pada pengembangan basis data lokal yang lebih komprehensif dan kalibrasi model HAZUS agar lebih representatif pada karakteristik infrastruktur nasional. Dengan demikian, estimasi kerugian yang dihasilkan akan lebih akurat dan aplikatif dalam mendukung kebijakan publik, khususnya pengalokasian dana PFB secara efektif dan berkelanjutan.

TENTANG PENULIS

Roi Milyardi merupakan dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknologi dan Rekayasa Cerdas, Universitas Kristen Maranatha. Ia menyelesaikan pendidikan Doktor Teknik Sipil dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 2025. Ia memiliki minat dan fokus riset pada topik estimasi kerugian gempa bumi pada infrastruktur, manajemen bencana, manajemen konstruksi, dan *Building Information Modelling (BIM)*.

Ariel Natanael menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Sipil dari Universitas Kristen Maranatha pada tahun 2021. Ia memiliki minat dan fokus riset pada bidang manajemen proyek.

REFERENCES

- Aulady, M. F. N., & Fujimi, T. (2019). Earthquake loss estimation of residential buildings in Bantul regency, Indonesia. *Jamba: Journal of Disaster Risk Studies*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.4102/jamba.v11i1.756>
- BNPB. (2021). *Indonesia's Disaster Casualties and Damage by Time*. <https://dibi.bnpb.go.id/kwaktu/index>
- Direktorat Jenderal Bina Marga, K. P. (2014). *Pedoman NO.06/P/BM/204-Analisis Risiko Bencana Alam yang Berdampak pada Jalan dan Jembatan*. Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR.
- FEMA-NIBS. (2020). HAZUS earthquake model technical manual. *Federal Emergency Management Agency*, October. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-10/fema_hazus_earthquake_technical_manual_4-2.pdf
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2023). *Informasi Statistik Infrastruktur PUPR 2023*. https://data.pu.go.id/sites/default/files/BIS_PUPR_Tahun_2023.pdf
- Khotimah, D. K. (2024). Pengaruh pengeluaran pemerintah terhadap pembiayaan mitigasi risiko bencana: Efektivitas pooling fund bencana (PFB) di Indonesia. *Innovative: Journal of Social Science Research*, 4(4 SE-Articles), 3288–3298. <https://doi.org/10.31004/innovative.v4i4.12030>
- Milyardi, R., Pribadi, K. S., Meilano, I., & Lim, E. (2023). Identifying the potential development of HAZUS model as an earthquake disaster loss model for school buildings in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1244(1), 12022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1244/1/012022>
- Milyardi, R., Pribadi, K. S., Abduh, M., Meilano, I., Lim, E., Hs, H., & Ansyari, A. (2025). Rehabilitation and reconstruction cost drivers in earthquake-affected buildings: A damage-level-based analysis in Indonesia. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-025-02243-5>
- Milyardi, R., Pribadi, K. S., Abduh, M., Meilano, I., Lim, E., Wirahadikusumah, R., Kusumaningrum, P., & Puri, E. R. (2025). Sensitivity analysis of engineering demand parameters: Empirical and analytical approaches to structural loss estimation. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 25–46. <https://doi.org/10.22075/jrce.2025.35649.2193>
- Pribadi, K. S., Abduh, M., Kusumaningrum, P., Hasiholan, B., Wirahadikusumah, R. D., & Milyardi, R. (2023). Promoting humanitarian engineering approaches for earthquake-resilient housing in Indonesia. Dalam Y. Koumpouros, A. Georgoulas, & G. Kremmyda (Eds.), *Transcending Humanitarian Engineering Strategies for Sustainable Futures* (hlm. 235–262). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-5619-4.ch012>
- PUSGEN. (2017). *Indonesia Earthquake Source and Hazard Map 2017*. Ministry of Public Works and Housing of Indonesia. <https://luk.staff.ugm.ac.id/gempa/pdf/Pusgen2017PetaGempaIndonesia.pdf>
- Rachman, M. G., Zelvany, Z. T., Favali, F. E., & Nugraha, M. R. A. P. (2025). Analisis risiko kebencanaan Indonesia untuk mendukung kebijakan publik. *Journal of Infrastructure Policy and Management*, 8(1), 85–96. <https://doi.org/10.35166/jipm.v8i1.99>
- Simanjuntak, V. C., Imran, I., Moestopo, M., & Setio, H. D. (2023). The evolution of seismic design provisions in Indonesia's national bridge code. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(6 SE-), 220614. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.6.14>
- The World Bank. (2019). Boosting financial resilience to disaster shocks. Dalam *Boosting Financial Resilience to Disaster Shocks*. <https://doi.org/10.1596/31887>

- UNDRR. (2011). *Indonesia Disaster Profile (1815-2019)*. <https://www.desinventar.net/DesInventar/profiletab.jsp?countrycode=idn&continue=y>
- Wibowo, H. A., Meilano, I., & Virtriana, R. (2024). Assessing potential earthquake-induced structural damage and losses in school buildings, West Java, Indonesia. *Papers in Applied Geography*, 10(2), 138–153. <https://doi.org/10.1080/23754931.2024.2323719>