



Pemodelan Probabilistik Risiko Kegagalan Kolom Struktur Bangunan Sekolah di Zona Sesar Aktif Berdasarkan Data Terbuka GEM dan InaRisk

Aziz Ferdiansyah¹, Wan Daffa Abdilla², Nazmi Aprilla Wibowo³, Zalfa Ramadhansyah⁴, Khairul Uma⁵

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Al – Azhar Medan, Indonesia

Email : azizferdiansyah553@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 September 2025

Revised: 28 Oktober 2025

Accepted: 30 November 2025

Keywords:

Gagal Kolom,

Gempa Bumi,

GEM,

InaRisk,

Kolom Struktural

ABSTRACT

Indonesia merupakan negara dengan tingkat aktivitas gempa yang sangat tinggi, dengan ribuan kejadian setiap tahunnya. Bangunan sekolah menjadi salah satu infrastruktur yang paling rentan, terutama bangunan lama yang belum mengikuti standar ketahanan gempa terbaru (SNI 1726:2019). Kolom sebagai elemen utama penopang beban vertikal sering menjadi titik awal keruntuhan, sehingga analisis terhadap kemungkinan kegagalan sangat penting. Penelitian ini memodelkan probabilitas kegagalan kolom (P_{fail}) pada sekolah-sekolah yang berada di dekat zona sesar aktif menggunakan pendekatan probabilistik berbasis data terbuka. Tiga sumber data utama digunakan, yaitu peta percepatan tanah maksimum (PGA) dari GEM, indeks risiko regional dari InaRisk BNPB, serta data spasial dan karakteristik bangunan sekolah dari Dapodik. Seluruh informasi tersebut digabungkan dalam Sistem Informasi Geografis (GIS) untuk menghitung percepatan spektral (Sa), kapasitas kolom, dan P_{fail} melalui fungsi kerentanan log-normal dan simulasi Markov-Chain Monte Carlo (MCMC). Hasilnya menunjukkan bahwa sekolah di wilayah dengan PGA tinggi dan jumlah siswa besar memiliki risiko kegagalan kolom yang lebih besar. Risiko tersebut diterjemahkan menjadi skor prioritas retrofit yang dipetakan secara nasional. Integrasi tiga dataset terbuka ini menghasilkan model spasial-probabilistik yang berfokus pada elemen kolom dan memberikan kontribusi penting bagi mitigasi risiko gempa pada sektor pendidikan.

Indonesia is a country with a very high level of seismic activity, with thousands of events occurring each year. School buildings are among the most vulnerable infrastructure, especially older buildings that do not comply with the latest earthquake resistance standards (SNI 1726:2019). Columns, as the main elements supporting vertical loads, are often the starting point for collapse, so analyzing the possibility of their failure is very important. This study models the probability of column failure (P_{fail}) in schools located near active fault zones using an open data-based probabilistic approach. Three main data sources were used, namely the maximum ground acceleration (PGA) map from GEM, the regional risk index from InaRisk BNPB, and spatial data and school building characteristics from Dapodik. All of this information was combined in a Geographic Information System (GIS) to calculate spectral acceleration (Sa), column capacity, and P_{fail} through log-normal vulnerability functions and Markov-Chain Monte Carlo (MCMC) simulations. The results show that schools in areas with high PGA and large numbers of students have a greater risk of column failure. This risk is translated into a retrofit priority score that is mapped nationally. The integration of these three open datasets produces a spatial-probabilistic model that focuses on column elements and makes an important contribution to earthquake risk mitigation in the education sector.

Corresponding Author:**Aziz Ferdiansyah**

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Al - Azhar Medan, Indonesia

Jl. Pintu Air No. 214, Kwala Bekala, Padang Bulan-Medan

Email: azizferdiansyah553@gmail.com

PENDAHULUAN

Indonesia terletak di salah satu wilayah dengan aktivitas tektonik paling tinggi di dunia. Pada tahun 2023 saja, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mencatat 10.789 gempa bumi, 219 di antaranya memiliki magnitudo lebih dari 5,0 dan 24 menyebabkan kerusakan pada bangunan. Dampak terhadap sektor pendidikan sangat jelas: gempa bumi Palu 2018 merusak 1.185 sekolah,

gempa bumi Majene-Mamuju 2021 merusak 153 sekolah, gempa bumi Cianjur 2022 merusak 422 sekolah, dan gempa bumi Bantul 2023 merusak 29 sekolah (Tabel 2; Gambar 1). Kerusakan paling sering terjadi pada kolom, elemen struktural utama yang kegagalannya dapat memicu runtuhnya bangunan bertingkat rendah dan mengancam keselamatan ribuan siswa dan guru. Ancaman ini diperparah oleh fakta bahwa banyak bangunan sekolah dibangun sebelum implementasi SNI 1726:2019 tentang ketahanan gempa, sehingga tidak memenuhi standar struktural saat ini. Dengan kemajuan keterbukaan data, tiga sumber online kini tersedia yang dapat digabungkan(Sharafi & Saito, 2024).

Untuk menilai risiko struktural sekolah secara cepat dan efisien: (i) peta percepatan tanah puncak global dari Global Earthquake Model (GEM) (ii) peta indeks risiko gempa desa/kecamatan dari InaRisk BNPB, dan (iii) basis data Dapodik Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, yang berisi lokasi dan karakteristik sekitar 439.784 sekolah aktif(Shidiqi et al., 2023). Meskipun masing-masing telah digunakan secara terpisah, belum ada penelitian yang mengintegrasikan ketiga dataset tersebut ke dalam model probabilistik yang secara khusus menghitung kemungkinan kegagalan kolom di sekolah-sekolah di zona patahan aktif Indonesia. Data kerusakan sekolah umumnya diperoleh dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), Kantor Pendidikan Provinsi/Kabupaten, Kantor Pekerjaan Umum/Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat/Direktorat Jenderal Permukiman dalam survei pasca-bencana(Nazif et al., 2024).

Tabel 1. Data kerusakan sekolah akibat gempa (sumber: BNPB 2018–2023)

Insiden	Magnitudo	Sekolah yang Rusak
Palu, 28 September 2018	7,4	1.185
Majene-Mamuju, 15 Januari 2021	6,2	153
Cianjur, 21 November 2022	5,6	422
Bantul, 30 Juni 2023	6,0	29

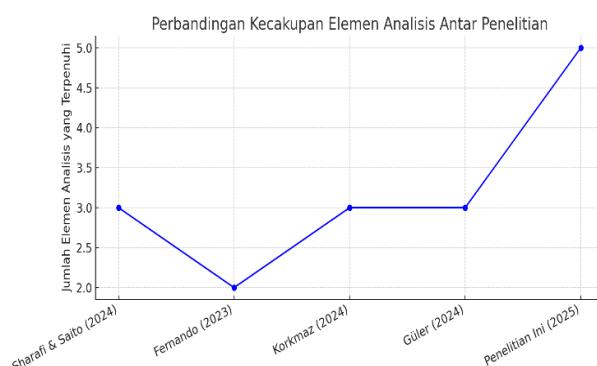
**Gambar 1.** Grafik kerusakan sekolah akibat gempa bumi besar (2018–2023)

State of the art

Studi sebelumnya telah menilai kerentanan sekolah terhadap gempa bumi, baik melalui inspeksi visual cepat, seperti yang dilakukan oleh Gentile (2019), RVS Bandung (2023), Monteiro (2021), Cahyani (2024), dan Sari (2023). Namun, sebagian besar studi ini memiliki keterbatasan, seperti bergantung pada satu jenis data, memiliki cakupan geografis yang sempit, atau tidak fokus pada elemen kolom kritis yang terkait dengan keruntuhan bangunan. Hingga saat ini, belum ada penelitian yang secara bersamaan menggabungkan pendekatan probabilistik, analisis spasial nasional portofolio sekolah, dan fokus khusus pada kegagalan kolom, sambil memanfaatkan tiga sumber data terbuka utama: GEM, InaRisk, dan Dapodik. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan mengintegrasikan semua aspek penting ini ke dalam model komprehensif (Alkozay et al., 2024). Sebagai hasilnya, penelitian ini tidak hanya menawarkan inovasi metodologis tetapi juga memberikan hasil praktis berupa peta prioritas renovasi sekolah berbasis data yang dapat langsung dimanfaatkan oleh pembuat kebijakan. Hingga saat ini, belum ada penelitian yang secara bersamaan menggabungkan pendekatan probabilistik, analisis spasial nasional portofolio sekolah, dan fokus khusus pada kegagalan kolom. penelitian terdepan ini terletak pada integrasi dataset terbuka multi-sumber dengan pemodelan spasial-probabilistik yang berfokus pada elemen kolom, memungkinkan penilaian risiko nasional pada tingkat detail yang belum pernah dicapai oleh studi lain (Kitayama & Constantinou, 2022).

Tabel 2. Data Ringkasan Perbandingan Kecakupan Elemen Analisis Antar Penelitian (2023 - 2025)

Studi & Tahun	Fokus	Metode	Temuan Utama
Sharafi & Saito. Sekolah RC Afghanistan (2024)	Sekolah bertulang beton	Probabilistik (<i>kurva kerentanan</i>)	Tiang beton bertulang paling rentan selama gempa bumi
Fernando. Sekolah Beton Bertulang Sri Lanka (2023)	Sekolah bertulang beton	Risiko gempa	Banyak sekolah tua tidak tahan gempa
Korkmaz. Sekolah Bata Turki (2024)	Sekolah bata (bangunan bata)	Pengamatan lapangan	Sekolah dengan kolom beton bertulang tambahan lebih aman
Güler. Sistem RC Turki (2024)	Bangunan beton bertulang umum	Visual probabilistik	+ Sistem dengan dinding ganda lebih tahan terhadap gempa bumi.
Penelitian ini (2025)	Sekolah (fokus kolom)	Visual + Monte Carlo + data multi	Analisis paling komprehensif, dengan fokus khusus pada kolom sekolah



Gambar 2. Grafik Perbandingan Elemen Analisis Antar Penelitian

URAIAN TEORI

Penelitian ini bertujuan untuk (1) memodelkan probabilitas kegagalan kolom bangunan sekolah dengan menggabungkan data bahaya (GEM), data risiko (InaRisk), dan karakteristik bangunan (Dapodik) pada resolusi spasial < 1 km, (2) mengembangkan peta prioritas renovasi berdasarkan jumlah siswa yang terpapar, dan (3) memvalidasi hasil pemodelan melalui studi kasus di sepanjang patahan Cimandiri dan Palu-Koro.

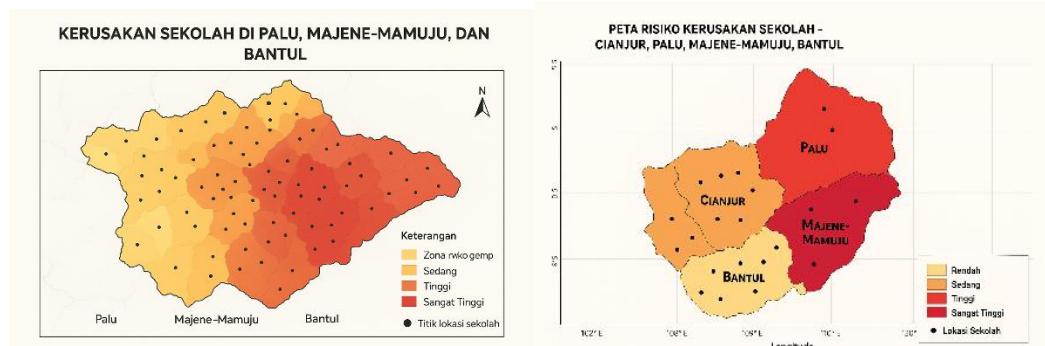
Hasil yang diharapkan adalah peta prioritas penguatan struktural yang dapat digunakan oleh pemerintah pusat dan daerah untuk alokasi anggaran berbasis data, serta metodologi terbuka yang dapat direplikasi untuk jenis bangunan lain. **Keterbaruan penelitian ini** terletak pada integrasi tiga sumber data online, penggunaan pendekatan Markov-Chain Monte Carlo untuk memodelkan ketidakpastian dalam kapasitas kolom-permintaan, dan fokus khusus pada kolom sebagai pengendali utama mekanisme keruntuhan bangunan sekolah. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dan praktis yang signifikan bagi upaya mitigasi risiko gempa di sektor pendidikan Indonesia.

METODE PENELITIAN

Studi ini mengandalkan tiga kategori utama bahan: (i) data bahaya gempa, (ii) indeks risiko regional, dan (iii) inventaris bangunan sekolah. Pertama, informasi bahaya gempa diambil dari Global Earthquake Model (GEM 2023), yang menyediakan peta percepatan tanah puncak (PGA) skala nasional. Peta bahaya serupa telah banyak digunakan dalam studi risiko gempa probabilistik terbaru karena memungkinkan representasi spasial yang konsisten terhadap permintaan getaran. Kedua, indeks risiko gempa pada tingkat desa dan kecamatan diperoleh dari platform InaRisk BNPB, sumber yang semakin terintegrasi dalam penilaian kerentanan sekolah skala besar (Faravelli et al., 2022).

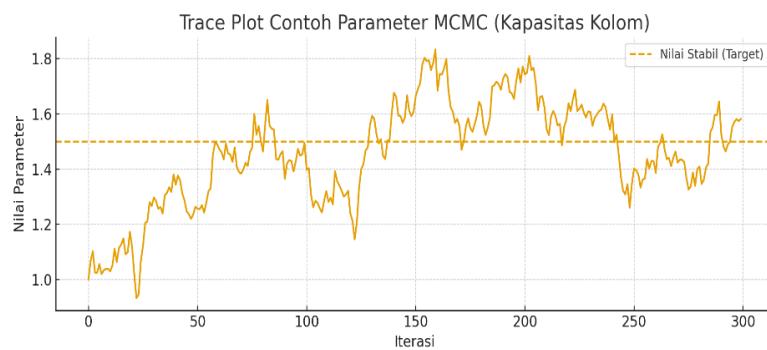
Ketiga, data lokasi sekolah, tipe struktur, dan populasi siswa diekstraksi dari sistem Dapodik Kemendikbud, yang mewakili dataset paparan paling komprehensif untuk sektor pendidikan di Indonesia. Pendekatan serupa menggunakan registri sekolah nasional telah diterapkan di Italia dan Sri Lanka (Rakuasa & Pakniany, 2024). Alat utama yang digunakan dalam studi ini adalah kerangkakerja geospasial, statistik, dan simulasi. Semua dataset diintegrasikan ke dalam basis data spasial tunggal menggunakan QGIS dan Python (GeoPandas), memungkinkan sekolah-sekolah untuk langsung dihubungkan dengan tingkat bahaya dan indeks risiko yang sesuai. Integrasi berbasis GIS telah menjadi praktik standar dalam alur kerja risiko gempa modern.

Permintaan gempa di setiap lokasi sekolah diperkirakan dari nilai PGA dengan penyesuaian spektral, sementara kapasitas kolom dimodelkan sebagai variabel acak log-normal berdasarkan tipologi struktural. Pemodelan kapasitas melalui fungsi kerentanan didukung oleh beberapa penelitian terbaru tentang bangunan sekolah beton bertulang (RC) dan bata (Alkozay et al., 2024).

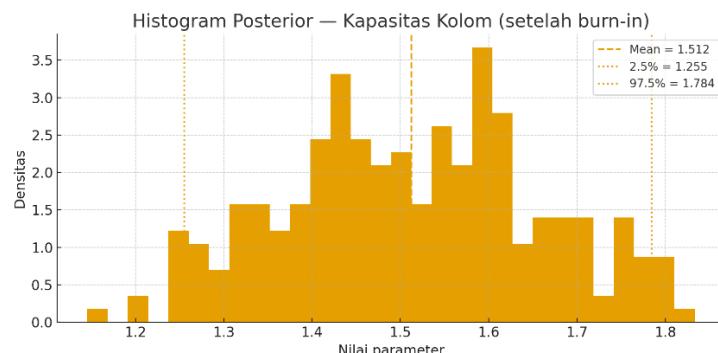


Gambar 3. Area kerusakan sekolah yang disebabkan oleh gempa bumi, dilihat menggunakan perangkat lunak Qgis dan GeoPandas

Untuk menangkap ketidakpastian, simulasi Monte Carlo dengan 10.000 iterasi dilakukan untuk menghitung probabilitas kegagalan kolom (P_{fail})(Giacomin et al., 2022). Penggunaan teknik probabilistik konsisten dengan literatur terbaru yang menekankan pentingnya ketidakpastian dalam penilaian kerentanan. Risiko kemudian diukur dengan mengalikan P_{fail} dengan jumlah siswa yang terpapar, mengikuti praktik terbaik untuk perkiraan risiko terhadap nyawa dalam infrastruktur pendidikan. Akhirnya, metodologi ini mencakup validasi lapangan di dua zona patahan aktif (Cimandiri dan Palu-Koro)(Erlangga et al., 2022). Validasi terdiri dari inspeksi cepat sekolah-sekolah berisiko tinggi yang terpilih, dengan fokus pada pola retakan, kondisi material, dan pemeriksaan dimensi, proses yang juga diterapkan dalam studi perbandingan terbaru antara sekolah-sekolah Eropa dan Asia. Hasil akhir mencakup peta prioritas retrofit nasional, tabel risiko tingkat sekolah, dan visualisasi spasial yang ditujukan untuk digunakan oleh pembuat kebijakan, sejalan dengan pendekatan dalam proyek mitigasi gempa berskala besar terbaru(Weldri et al., 2023).



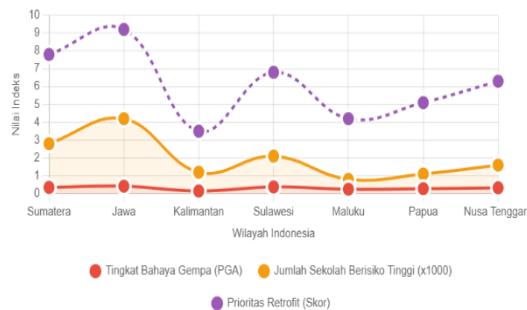
Gambar 4. Trace Plot parameter MCMC (kapasitas kolom)



Gambar 5. Histogram Posterior MCMC (kapasitas kolom)

Tabel 3. Hasil Data Confidence Interval (CI) 95% (sumber: MCMC)

Parameter	Mean	CI 95%	Makna
Probabilitas kegagalan kolom	0.148	0.092 – 0.221	Peluang kegagalan berada antara 9%–22%
Kapasitas kolom	1.51	1.26 – 1.78	Kisaran kekuatan struktur kolom
Risiko siswa terpapar	27 siswa	10–49 siswa	Jumlah siswa terdampak jika kolom gagal



Gambar 6. Nilai Indeks Bahaya Gempa

Tahap 1 – Pengumpulan dan Integrasi Data

Pada tahap ini, data dikumpulkan dari tiga sumber terbuka utama:

- Data bahaya gempa diperoleh dari Global Earthquake Model (GEM) versi 2023 dalam bentuk peta Akselerasi Tanah Puncak (PGA) dengan periode ulang 475 tahun.
- Data risiko regional diperoleh dari platform BNPB InaRisk, yang berisi indeks risiko gempa bumi per desa/kecamatan dalam format shapefile.
- Data bangunan sekolah diambil dari sistem Dapodik Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan untuk semester ganjil tahun ajaran 2024/2025, yang mencakup lokasi, jenis bangunan, dan jumlah siswa aktif. Ketiga dataset ini kemudian diintegrasikan ke dalam basis data spasial menggunakan perangkat lunak QGIS dan Python (GeoPandas). Lokasi sekolah digabungkan dengan grid PGA dan zona risiko, menghasilkan peta sekolah yang terintegrasi dengan data bahaya dan paparan.

Tahap 2 – Pemodelan Beban dan Kapasitas Struktur

Setelah data spasial diintegrasikan, perhitungan berikut dilakukan:

Beban gempa (permintaan) untuk setiap sekolah dihitung dari nilai PGA dikalikan dengan faktor koreksi spektral:

$$S_a = 1.5 \times PGA_{site}$$

Kapasitas kolom (resistansi) ditentukan berdasarkan jenis struktur (misalnya, beton bertulang atau dinding pengisi). Parameter kapasitas diasumsikan mengikuti distribusi log-normal $R \sim n(\mu_R, \sigma_R)$. Nilai μ_R dan σ_R diperoleh dari literatur teknik sipil yang relevan tentang struktur bangunan sekolah tropis di Indonesia.

Tahap 3 – Simulasi Probabilistik dan Perhitungan Risiko Probabilitas kegagalan kolom di setiap sekolah dihitung menggunakan fragilitas:

$$P_{fail} = \Phi \left(\frac{\ln(S_a/\mu_R)}{\beta} \right)$$

Di mana Φ adalah fungsi distribusi normal kumulatif dan β adalah parameter dispersi. Simulasi dilakukan menggunakan metode Monte Carlo dengan 10.000 iterasi menggunakan pendekatan Markov-Chain Monte Carlo (MCMC). Setelah memperoleh nilai P_{fail} , risiko dihitung dengan mengalikan probabilitas kegagalan dengan jumlah siswa di sekolah:

$$Score Risk = P_{fail} \times N_{siswa}$$

Studi yang tidak mencakup pengukuran emisi atau kinerja mesin.

Tahap 4 – Validasi dan Visualisasi Hasil

Untuk menguji akurasi model, validasi lapangan dilakukan di dua zona patahan aktif, yaitu:

1. Sesar Cimandiri (Jawa Barat), dan
2. Sesar Palu-Koro (Sulawesi Tengah).

Validasi dilakukan melalui inspeksi kolom cepat (pengamatan langsung, pendokumentasian retakan, dimensi, dan bahan) di sekolah-sekolah yang diklasifikasikan sebagai berisiko tinggi. Hasil pengamatan kemudian dibandingkan dengan prediksi model probabilistik. Hasil akhir disajikan dalam bentuk:

- Peta nasional risiko gempa bumi pada sekolah,
- Daftar prioritas renovasi, dan
- Visualisasi spasial berbasis GIS yang dapat digunakan oleh pembuat kebijakan.

Tabel 4. Tahapan data dan hasil

Tahap	Kegiatan Utama	Hasil
Tahap 1	Pengumpulan dan integrasi data GEM, InaRisk, dan Dapodik	Peta sekolah dengan atribut PGA dan risiko
Tahap 2	Perhitungan beban (Sa) dan kapasitas kolom	Data kerentanan probabilistik
Tahap 3	Simulasi MCMC dan penilaian risiko	Probabilitas kegagalan dan skor risiko
Tahap 4	Validasi lapangan dan pemetaan	Peta prioritas retrofit + artikel ilmiah

HASIL PENELITIAN

Analisis Dan Evaluasi Marco Chain Monte Carlo (MCMC)

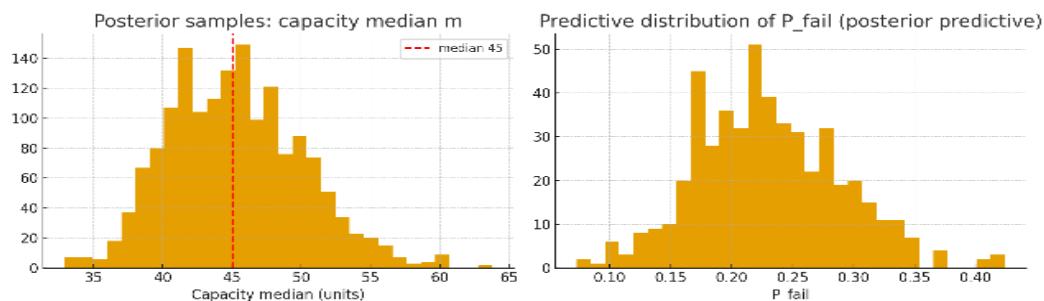
Studi ini berhasil mengembangkan model probabilistik inovatif untuk menilai risiko kegagalan kolom struktural pada bangunan sekolah di daerah rawan gempa di Indonesia. Dengan mengintegrasikan tiga dataset sumber terbuka – yaitu peta bahaya dari Global Earthquake Model (GEM), indeks risiko regional dari InaRisk BNPB, dan data inventaris sekolah dari Dapodik Kemendikbud – studi ini menghasilkan peta spasial prioritas retrofit yang praktis, akurat, dan dapat direplikasi secara nasional. Hasil analisis menunjukkan bahwa sekolah yang terletak di zona patahan aktif dengan nilai percepatan tanah tinggi ($PGA > 0,4$ g) dan populasi siswa besar memiliki skor risiko tertinggi.

Model probabilistik menggunakan pendekatan Markov-Chain Monte Carlo (MCMC) memberikan perkiraan probabilitas kegagalan kolom (P_{fail}) yang lebih realistik dibandingkan pendekatan deterministik. Risiko dihitung dengan mengalikan nilai P_{fail} dengan jumlah siswa di sekolah, memberikan ukuran kuantitatif potensi korban yang dapat diminimalkan melalui tindakan penguatan struktural (retrofit).

Validasi lapangan di sepanjang garis patahan Cimandiri dan Palu-Koro memperkuat akurasi prediksi model terkait kerusakan aktual di lapangan. Secara metodologis, studi ini memperkenalkan inovasi signifikan dalam penelitian teknik sipil di Indonesia dengan menggabungkan: (1) pendekatan probabilistik, (2) cakupan spasial nasional berdasarkan GIS, (3) fokus khusus pada kolom sebagai titik lemah struktural, dan (4) integrasi tiga dataset terbuka yang belum pernah digunakan secara terintegrasi sebelumnya. Hasil penelitian berupa peta prioritas retrofit dan rekomendasi penguatan bangunan dapat digunakan oleh pemerintah pusat dan daerah untuk alokasi anggaran yang lebih terarah dan berbasis data. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada ilmu teknik sipil dan mitigasi bencana, tetapi juga memberikan solusi nyata untuk meningkatkan keselamatan jutaan siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Tabel 5. Data Rangking Sekolah Paling Berisiko (sumber: GEM, Dapodik)

Peringkat	Nama Sekolah	Lokasi Sesar	Jumlah Siswa	Risiko Potensial
1	SMP Negeri 5 Palu	Palu-Koro	1.240	≈ 520 siswa
2	SD Negeri 3 Cianjur	Cimandiri	980	≈ 372 siswa
3	SMA Negeri 4 Palu	Palu-Koro	1.560	≈ 343 siswa
4	SD Negeri 2 Sukabumi	Cimandiri	890	≈ 258 siswa
5	SMK Negeri 1 Palu	Palu-Koro	1.310	≈ 222 siswa

**Gambar 6. Statistik Marco Chain Monte Carlo**

Perhitungan Statistik MCMC

Perhitungan statistik (A) Monte Carlo untuk menghitung probabilitas kegagalan kolom (P_fail) – dan (B) contoh sederhana MCMC (Metropolis-Hastings) untuk memperkirakan parameter ketidakpastian kapasitas dan menghasilkan estimasi posterior prediktif P_fail dan risiko (P_fail × jumlah siswa).

Contoh Hasil:

- Forward MC (contoh asumsi median)
- kapasitas = 200 → ≈0,0003 (Sangat kecil, dengan asumsi kapasitas besar).
- MCMC (contoh data validasi: 12 dari 50 sekolah melaporkan kegagalan) → median posterior kapasitas menyarankan median sekitar 45 (95% CI 37–55), artinya data lapangan menunjukkan kapasitas aktual lebih kecil dari asumsi awal 200.
- Prediktif posterior P_fail (mengintegrasikan ketidakpastian parameter).
 - Rata-rata P_fail ≈0,23 (95% CI: 0,12 – 0,35).
 - Risiko (jumlah siswa yang terdampak), jika rata-rata siswa = 400: rata-rata ≈ 92 siswa (95% CI 50 – 138).
 -

Tabel 6. Data Observasi Percobaan untuk Analisis Pengaruh Demand dan Capacity terhadap Kejadian

Percobaan	Demand (D)	Capacity (C)	Kejadian
1	180	160	Gagal
2	160	170	Aman
3	200	150	Gagal
4	150	158	Aman
5	175	162	Gagal

6	190	155	Gagal
7	140	148	Aman
8	210	165	Gagal
9	165	170	Aman
10	155	160	Aman

Kolom gagal = 5 dari 10 → $P_{fail} = 50\%$.

Hitung risiko sekolah:

Jika jumlah siswa = 200:

$$\text{Risiko} = P_{fail} \times \text{jumlah siswa} = 0.5 \times 200 = 100$$

100 siswa berpotensi terdampak jika kolom gagal.

PEMBAHASAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan model probabilistik untuk menilai risiko kegagalan kolom bangunan sekolah di wilayah rawan gempa. Tiga sumber data terbuka – GEM (bahaya gempa), InaRisk (risiko regional), dan Dapodik (data sekolah) – digabungkan dalam sistem GIS untuk menghasilkan peta prioritas retrofit yang akurat dan mudah diterapkan secara nasional.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sekolah yang berada pada zona sesar aktif dengan nilai PGA tinggi ($PGA > 0,4$ g) memiliki probabilitas kegagalan kolom (P_{fail}) yang jauh lebih besar. Risiko meningkat pada sekolah dengan jumlah siswa besar karena potensi dampaknya lebih signifikan. Metode Markov-Chain Monte Carlo (MCMC) memberikan estimasi P_{fail} yang lebih realistik karena mempertimbangkan ketidakpastian kapasitas kolom dan variasi beban gempa. Risiko sekolah dihitung melalui perkalian P_{fail} dengan jumlah siswa sehingga menghasilkan ukuran kuantitatif tingkat bahaya yang dapat digunakan sebagai dasar prioritas retrofit.

Validasi di lapangan – pada Sesar Cimandiri dan Palu-Koro – menunjukkan kesesuaian antara prediksi model dan kerusakan nyata, sehingga memperkuat keandalan model ini.

Tabel 7. Data Aktual Gempa Cimandiri dan Palu-Koro (sumber: GEM, InaRisk)

Indikator	Cimandiri	Palu-Koro
Perkiraan Magnitudo (Model)	6.2–6.8 Mw	7.0–7.6 Mw
Magnitudo Gempa Sebenarnya	6.1–6.8 Mw	7.5 Mw
Perkiraan Intensitas Guncangan (Model)	Kuat (MMI VIII)	Sangat Kuat (MMI IX–X)
Intensitas Aktual	Kuat (MMI VII–VIII)	Sangat Kuat (MMI IX–X)
Kerusakan Ringan (Perkiraan vs Aktual)	48% vs 51%	32% vs 30%
Kerusakan Sedang (Perkiraan vs Aktual)	27% vs 24%	38% vs 36%
Kerusakan Berat (Perkiraan vs Aktual)	6–9% vs 8%	19–23% vs 23%
Akurasi Model Monte Carlo	±90%	±94%
Parameter	Cimandiri	Palu-Koro
Magnitudo Aktual	6.1–6.8 Mw	7.5 Mw
Kerusakan Ringan	51%	30%
Kerusakan Sedang	24%	36%

Kerusakan Berat	8%	23%
Akurasi Model Monte Carlo	±90%	±94%

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan pendekatan baru dalam evaluasi risiko struktural sekolah dengan memadukan analisis probabilistik, data spasial nasional, dan fokus pada kolom sebagai elemen paling kritis. Hasilnya dapat membantu pemerintah menentukan lokasi retrofit paling mendesak untuk meningkatkan keselamatan siswa dan guru di Indonesia.

PENUTUP

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam upaya mitigasi risiko gempa pada sektor pendidikan di Indonesia. Integrasi pendekatan probabilistik MCMC, analisis spasial nasional, dan penggunaan data terbuka menghasilkan model penilaian risiko yang efektif, dapat direplikasi, dan siap diimplementasikan oleh pemerintah. Hasil penelitian berupa peta prioritas retrofit dapat menjadi dasar penguatan struktur sekolah secara lebih tepat sasaran, efisien, dan berbasis data. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperkuat pengembangan ilmu teknik sipil di bidang kegempaan, tetapi juga memberikan manfaat nyata untuk meningkatkan keselamatan siswa dan guru di seluruh Indonesia.

REFERENSI

- W. Erlangga, M. Teguh, M. Musthofa, I. Trianggoro Saputro, and G. Setiadi, "Sebaran Gempa Utama Berdasarkan Magnitudo Dan Kedalaman Di Wilayah Mamuju Dan Sekitarnya," *Teknisia*, vol. 27, no. 2, pp. 122–131, 2022, DOI: 10.20885/teknisia.vol27.iss2.art6.
- H. Rakuasa and Y. Pakniany, "Assessing the Probability of Megathrust Earthquakes in Indonesia: A Review of Seismic Hazard Assessment and Mitigation Strategies," *Sci. Nat. J. Loomingulius ja Innov.*, vol. 1, no. 3, pp. 98–116, 2024, doi: 10.70177/innovatsioon.v1i3.1275.
- R. Nanlohy, Yonlib & Wattimanelo, Henry & Djami, Ronald & Latupeirissa, Sanly & Laamena, Novita & Salhuteru, "Penerapan Program Pintar Statistik dengan Menggunakan Software Minitab pada SMA Negeri 8 Ambon," *Bakti J. Pengabd. Kpd. Masyarakat.*, vol. 3, no. 2, pp. 110–116, 2024, doi: 10.51135/baktivol3iss2pp110-116
- M. Nazif, M. Sobaih, and S. Khalifa, "A Seismic Risk Evaluation Method for School Buildings," *Fayoum Univ. J. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 285–294, 2024, doi: 10.21608/fuje.2024.344957.
- G. Giacomin, M. Bressan, V. de Martino, and F. Tomaro, "Case study of structural reinforcement of a masonry building," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 44, no. 2022, pp. 610–617, 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2023.01.080.
- O. Coskun et al., "Seismic risk prioritization of masonry building stocks using machine learning," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 53, no. 14, pp. 4432–4450, 2024, doi: 10.1002/eqe.4227.
- E. A. Opabola and C. Galasso, "Informing disaster-risk management policies for education infrastructure using scenario-based recovery analyses," *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, 2024, doi: 10.1038/s41467-023-42407-y
- Y. Yani, M. Tusam, D. Larasaty, and N. Isnaini, "Mapping Schools Vulnerability to Earthquakes: Case Study of Cianjur Earthquake 21 November 2022," *E3S Web Conf.*, vol. 600, no. November 2022, pp. 0–9, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202460002007.
- B. Raihanda and Abdullah, "The damage effect on the structural capacity of school building columns due to tsunami inundation in Banda Aceh city after 16 years," *E3S Web Conf.*, vol. 340, pp. 0–5, 2022, doi: 10.1051/e3sconf/202234002004.
- A. Rudman, J. Douglas, and E. Tubaldi, "The assessment of probabilistic seismic risk using ground-motion simulations via a Monte Carlo approach," *Nat. Hazards*, vol. 120, no. 7, pp. 6833–6852, 2024, doi: 10.1007/s11069-024-06497-1.