

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan teknologi dan peraturan desain bangunan tahan gempa mengizinkan desain mencapai batas kekuatan sebelum runtuh (AISC, 2016; Fajfar, 2018; Froozanfar et al., 2024; Otani, 2004). Hal ini memungkinkan suatu bangunan memikul beban gempa dengan intensitas besar tanpa mengalami keruntuhan (Erdik et al., 2018). Aspek kekuatan dan daktilitas menjadi perhatian utama dalam fase desain (Dai et al., 2024; Nugroho et al., 2022; Sharma et al., 2025). Sementara itu, faktor guncangan (*shaking*) belum menjadi perhatian utama dalam fase desain. Selain menyebabkan ketidaknyamanan pada penghuni (Xie et al., 2023), guncangan pada bangunan dapat mengakibatkan elemen-elemen non-struktural berada dalam kondisi tidak stabil dan rawan roboh (Vijayanarayanan et al., 2012), sehingga berpotensi menimbulkan korban terluka bahkan sebagian meninggal. Berdasarkan data gempa-gempa besar yang terjadi di Jepang sejak tahun 1996 (Japan Meteorological Agency, 2023), jumlah korban terluka akibat gempa lebih besar dibanding jumlah korban meninggal. Selain itu, jumlah keruntuhan bangunan lebih sedikit dibanding jumlah bangunan yang mengalami kerusakan. Hal ini menunjukkan bahwa bangunan-bangunan tersebut secara umum sudah memenuhi kriteria kekuatan. Dengan demikian, adanya korban terluka atau meninggal bukan diakibatkan terutama oleh terjadinya keruntuhan bangunan, melainkan akibat guncangan yang besar (Gan, 2023). Oleh sebab itu, penentuan intensitas guncangan diperlukan dalam evaluasi kinerja bangunan. Evaluasi ini sangat berguna baik untuk fase desain bangunan maupun untuk pengembangan sistem mitigasi bencana.

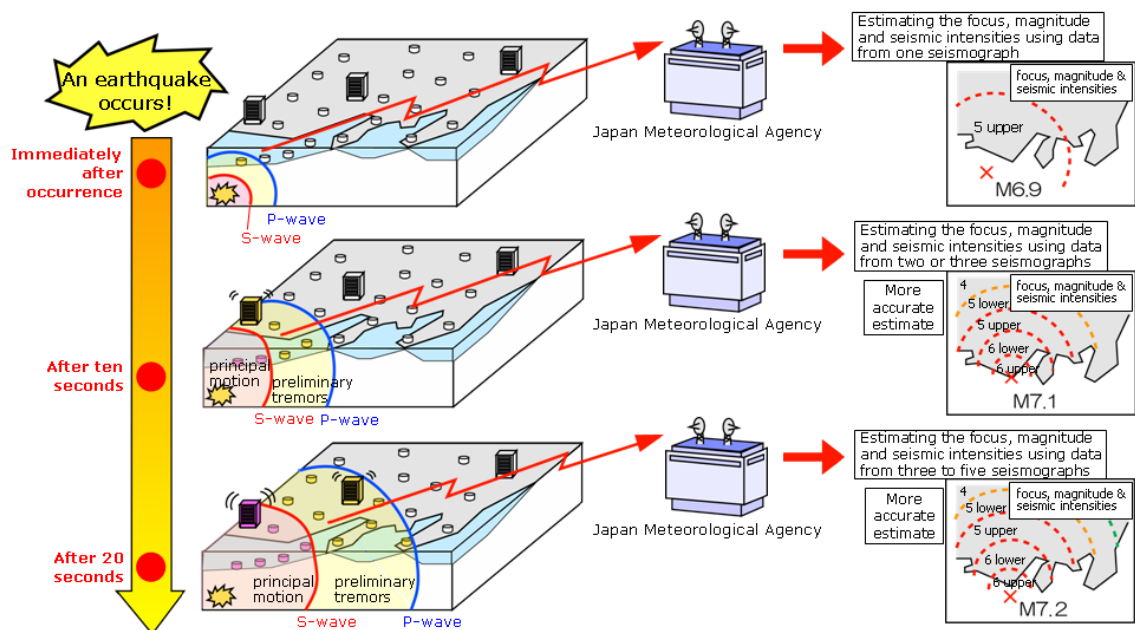
Seismic Intensity Scale (SIS) merupakan salah satu skala untuk mengukur besaran guncangan (*shaking intensity*) pada bangunan. Kriteria ini dikembangkan di Jepang oleh *Japan Meteorological Agency* (JMA) pada tahun 1996 (Shabestari and Yamazaki, 2001). SIS menunjukkan seberapa besar kekuatan atau kekuatan guncangan akibat gempa bumi dan dapat dikaitkan dengan percepatan tanah puncak atau *Peak Ground Acceleration* (PGA), serta periode dominan pada posisi tanah tertentu (Song et al., 2023). Pada dasarnya, SIS menyajikan data intensitas guncangan terbatas hanya pada level tanah dasar (Fujimoto and Midorikawa, 2010). Namun seiring perkembangan dalam penelitian, SIS

telah dikembangkan untuk dapat menguantifikasi guncangan pada tiap lantai bangunan, secara khusus bangunan rangka baja (Wariyatno, 2022). Penemuan ini membuka ruang bagi pengembangan-pengembangan yang lebih luas karena dalam penelitian yang mendukung penemuan tersebut, aplikasi perhitungan guncangan baru diterapkan pada bangunan dengan material dan konfigurasi bangunan yang terbatas, serta belum mempertimbangkan variasi jenis tanah. Oleh sebab itu, pengembangan penerapan perhitungan guncangan pada bangunan-bangunan beragam jenis material dengan berbagai variasi jumlah lantai dan jenis tanah, harus diteliti.

Pengembangan selanjutnya terkait topik intensitas seismik adalah penerapan evaluasi SIS dalam sistem mitigasi bencana gempa, secara khusus sistem peringatan dini gempa (Sokolov et al., 2010). Sistem peringatan dini gempa didesain untuk mendeteksi suatu kejadian gempa dengan parameter-parameternya dan mempublikasikan peringatan ke lokasi/area di mana tindakan yang diperlukan harus diambil sebelum datangnya energi seismik yang merusak (Tajima and Hayashida, 2018). Sistem peringatan dini gempa mempublikasikan estimasi intensitas seismik dan waktu tibanya gelombang utama (*S wave*) berdasarkan analisis cepat terhadap fokus dan magnitudo gempa, menggunakan data gelombang hasil pengamatan seismograf di dekat pusat gempa (Japan Meteorological Agency, 2010). Gambar 1.1 menunjukkan mekanisme kerja sistem peringatan dini yang dikembangkan di Jepang. Setidaknya ada tiga (3) titik waktu estimasi dan publikasi peringatan dini, yaitu sesaat setelah terjadi gempa, sepuluh (10) detik, dan dua puluh (20) detik setelah terjadi gempa. Pada tiap pengulangan titik waktu, terdapat peningkatan jumlah data seismograf sehingga estimasi yang dihasilkan menjadi lebih akurat dan rinci. Dengan sistem peringatan dini ini, tindakan mitigasi baik di area publik maupun privat dapat dilakukan.

Sistem peringatan dini gempa membutuhkan proses kalkulasi yang sangat cepat baik dalam mendeteksi *P-wave* (Mârmureanu et al., 2011) maupun mengestimasi intensitas seismik pada lantai bangunan (Kubo et al., 2011), untuk memberikan cukup waktu bagi penghuni bangunan melakukan penyelamatan diri sesegera mungkin. Sementara itu, perhitungan nilai SIS yang dikembangkan sejauh ini dilakukan dengan metode numerik yang membutuhkan waktu relatif panjang. Berdasarkan pedoman FEMA (2005), pemodelan sederhana dari struktur bangunan dapat digunakan untuk mengurangi

waktu komputasi dan kinerja manajemen data, salah satunya *stick model* atau model *lumped-mass*.



Gambar 1.1. Ilustrasi sistem peringatan dini (Japan Meteorological Agency, 2010)

Teknologi yang berpotensi menyelesaikan persoalan ini adalah kecerdasan buatan atau *artificial intelligence* (AI). Hal ini ditunjukkan dengan implementasinya pada berbagai bidang rekayasa, seperti teknik sipil, teknik elektro, mekatronika, dan teknik pertambangan (Momeni et al., 2023). Teknologi ini melingkupi pembelajaran mesin (*machine learning*) yang di dalamnya secara spesifik terdapat metode *Deep Learning* (DL) (Plevris et al., 2023). Metode ini terdiri dari serangkaian algoritma pembelajaran sederhana yang digunakan untuk mempelajari dan menyelesaikan prediksi permasalahan yang kompleks. Metode *Deep Learning* (DL) atau yang juga dikenal dengan metode *Deep Neural Network* (DNN) membutuhkan informasi berupa himpunan data untuk dipelajari. Akurasi hasil metode ini ditentukan oleh banyaknya jumlah himpunan data pembelajaran. Dalam bidang kegempaan, sebuah kompetisi ilmiah terkait prediksi gempa menggunakan *machine learning* pernah diselenggarakan (Johnson et al., 2021).

Tantangan pengembangan metode AI saat ini adalah tidak tersedianya data raya (*big data*) intensitas guncangan yang direpresentasikan dalam suatu skala SIS. Oleh sebab itu, penelitian untuk mengembangkan data raya nilai SIS pada bangunan dengan berbagai kondisi sangat diperlukan. Penelitian-penelitian terdahulu terkait perhitungan nilai SIS pada tiap lantai bangunan belum mempertimbangkan faktor-faktor penting yang

memengaruhi nilai SIS yaitu: variasi jenis tanah, material bangunan yang menentukan kekakuan struktur, jumlah lantai bangunan, dan luas lantai (Nouchi et al., 2023). Selain itu, studi mengenai pemodelan dan pengembangan algoritma metode AI perlu dilakukan untuk menghasilkan akurasi yang tinggi dalam memprediksi nilai SIS.

Berdasarkan permasalahan yang diuraikan di atas, penelitian untuk mengembangkan *big data* intensitas guncangan gempa dengan mempertimbangkan berbagai faktor pada bangunan dilakukan untuk menghasilkan basis data yang mendukung penerapan metode AI. Pengembangan dan penelitian mengenai algoritma AI untuk memprediksi nilai SIS pada bangunan dilakukan sebagai langkah tindak lanjut dari penelitian awal. Hasil penelitian ini menjadi titik baru dalam perkembangan sistem peringatan dini bencana gempa (*earthquake early warning system*) yang dapat menyajikan informasi dini mengenai intensitas guncangan pada bangunan dengan lebih cepat dan akurat.

1.2 Identifikasi Masalah Penelitian

Penelitian ini dilakukan berdasarkan identifikasi masalah sebagai berikut:

1. Perhitungan nilai SIS dengan pemodelan numerik membutuhkan waktu yang panjang, sehingga diperlukan suatu metode yang dapat mempercepat proses perhitungan. Metode AI merupakan metode yang dapat dengan signifikan memperpendek proses perhitungan, dan memberikan hasil yang akurat.
2. *Big data* dan pengembangan model AI untuk prediksi SIS saat ini belum dikembangkan sehingga *big data* dan model AI perlu dikembangkan untuk memperoleh hasil prediksi nilai SIS yang akurat dengan waktu yang singkat.

1.3 Perumusan Masalah

Permasalahan dalam pengembangan sistem mitigasi bencana gempa berbasis guncangan pada bangunan adalah tidak tersedianya *big data* nilai SIS pada bangunan dengan berbagai variasi kondisi dan pemodelan sistem prediksi nilai SIS dengan metode AI. Oleh sebab itu, rumusan masalah yang diselesaikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengembangan *big data* nilai SIS dari model *lumped-mass* dengan mempertimbangkan berbagai variasi kondisi yang meliputi jenis tanah, jenis material bangunan, jumlah lantai bangunan, dan data gempa?

2. Bagaimana model AI dapat memprediksi nilai SIS tiap lantai dari kejadian gempa *real-time* berdasarkan *big data* yang dikembangkan?

1.4 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud penelitian ini adalah untuk mengembangkan sistem prediksi nilai SIS dengan metode AI. Pengembangan sistem prediksi tersebut terdiri dari pengembangan sistem *big data* dan pemodelan AI. Berdasarkan hal tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengembangkan *big data* nilai SIS dari model *lumped-mass* dengan mempertimbangkan berbagai variasi kondisi yang meliputi jenis tanah, jenis material bangunan, jumlah lantai bangunan, dan data gempa.
2. Mengembangkan model AI untuk memprediksi nilai SIS tiap lantai dari kejadian gempa *real-time* berdasarkan *big data* yang dikembangkan.

1.5 Kebaruan (Novelty)

Kebaruan yang terdapat pada penelitian ini adalah penerapan teknologi kecerdasan buatan (AI) dalam memprediksi nilai intensitas guncangan struktur (SIS), dengan mempertimbangkan faktor variasi data gempa, tanah, material bangunan, jumlah lantai bangunan, dan luas lantai. Perbandingan penelitian yang dilaksanakan oleh penulis dengan penelitian-penelitian terdahulu terkait perhitungan intensitas guncangan akibat gempa dapat dilihat pada Tabel 1.1. Dari Tabel 1.1, penelitian mengenai model AI untuk memprediksi nilai intensitas guncangan (SIS) dengan model *lumped-mass* dan mempertimbangkan jenis tanah, material bangunan, dan jumlah lantai, belum pernah dilakukan, sehingga menjadi kebaruan (*novelty*) dari penelitian.

Kebaruan penelitian ini tampak jelas dalam Tabel 1.1. Penelitian yang diawali pada tahun 2022 masih sangat terbatas. Penelitian ini merupakan langkah lebih maju dalam pengembangan SIS dan merupakan salah satu penelitian perintis penggunaan kecerdasan buatan dalam bidang ini.

Tabel 1.1. Perbandingan penelitian ini dengan penelitian-penelitian terdahulu

No.	Peneliti	Metode	Faktor-faktor yang dipertimbangkan
1	Wariyatno (2022)	Numerik	• Model <i>Beam Element</i> • Material bangunan dan jumlah lantai tertentu • Jenis tanah
2	Gan (2023)	<i>Convolutional Neural Network (CNN)</i>	• Model <i>Beam Element</i> • Material dan jumlah lantai tertentu • Jenis tanah
3	Penelitian ini	• <i>Convolutional Neural Network (CNN)</i> • <i>Neural Network (NN)</i> • <i>Gradient Boosting (GB)</i>	• Model <i>Lumped-Mass</i> • Variasi material bangunan yang memengaruhi massa dan kekakuan struktur • Variasi jumlah lantai bangunan • Variasi jenis tanah: lunak, sedang, keras

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini, antara lain:

1. Mengembangkan basis data intensitas guncangan pada bangunan dengan berbagai faktor/kondisi.
2. Mengembangkan sistem mitigasi bencana khususnya *earthquake early warning system* berbasis intensitas guncangan.
3. Sebagai bahan pertimbangan untuk melengkapi standar/code desain bangunan tahan gempa untuk memasukkan faktor guncangan selain kekuatan (*strength*).
4. Merupakan instrumen pendukung dalam proses evaluasi kondisi bangunan atau rekayasa forensik (*forensic engineering*), khususnya kondisi pascagempa.

1.7 Pembatasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Skala intensitas guncangan gempa yang digunakan mengacu pada standar yang diterapkan oleh JMA yaitu SIS.
2. Model struktur yang digunakan untuk analisis dinamik adalah model struktur *lumped-mass*.

3. Material bangunan yang digunakan sebagai variabel adalah material beton bertulang, baja, dan kayu.
4. Desain struktur memenuhi ketentuan bangunan tahan gempa sesuai SNI 1726:2019.
5. Struktur bangunan yang dimodelkan memenuhi ketentuan bangunan beraturan baik secara horizontal maupun vertikal, simetris (pusat massa berimpit dengan pusat kekakuan), dan tidak ada variasi struktur.
6. Analisis struktur dibatasi pada *range* elastik.
7. Konfigurasi struktur dan denah lantai identik untuk seluruh lantai bangunan, dengan bentang antar-kolom 4,5 m dan tinggi antar-lantai 3,5 m.

1.8 Sistematika Penulisan

Disertasi ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

BAB ini terdiri dari latar belakang masalah, identifikasi masalah, perumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2 Kajian Pustaka dan Kerangka Berpikir

BAB ini berisi kajian pustaka penelitian-penelitian terdahulu serta *state-of-the-art* dari penelitian. Selain itu, beberapa teori yang menjadi landasan dalam penelitian ini dan kerangka berpikir (*conceptual framework*) penelitian juga dituliskan dalam BAB ini.

BAB 3 Metode Penelitian

BAB ini terdiri dari uraian prosedur penelitian yang akan dikerjakan.

BAB 4 Kompilasi dan Analisis Data

BAB ini menyajikan proses analisis data dan memaparkan hasil dari tiap tahap penelitian.

BAB 5 Pembahasan Hasil Penelitian

BAB ini berisi pembahasan dari hasil penelitian dan interpretasinya.

BAB 6 Kesimpulan dan Saran

BAB ini terdiri dari kesimpulan penelitian dan saran untuk pengembangan penelitian ke depan.