



Probabilitas Tingkat Kerapuhan pada Bangunan Masjid Beton Bertulang Bertingkat Rendah Akibat Beban Seismik

***Hakas Prayuda¹, Taufiq Ilham Maulana¹, Desti Lailatul Mufida Fattiha¹,
Muhammad Mundzirul Haq¹, Renita Husna²**

¹Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, D. I. Yogyakarta

²Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Sekolah Tinggi Teknologi Cahaya Surya, Kediri

^{*}hakasprayuda@umy.ac.id

Received: 19 Agustus 2024 Revised: 3 November 2025 Accepted: 12 November 2025

Abstract

Building collapse is one of the leading causes of casualties during an earthquake. It is necessary to assess the resistance of the building in seismic performance in order to reduce and prevent earthquake-related damage and building collapse. With this evaluation, it is possible to predict the probability of building damage in the event of an earthquake. This study evaluates the performance of mosque buildings using the fragility curve to determine the probability level of damage. As one of the nations with the largest number of mosques in the world, Indonesia faces the challenge of overcoming the possibility of earthquake damage to the mosque buildings. In addition, many mosque buildings were built based on mutual cooperation without using detailed technical calculations. Therefore, an evaluation of the mosque structure is essential. This study employs a STERA 3D numerical simulation utilizing earthquake time history data. In this study variation, five types of earthquake time history data are utilized. Additionally, the irregular shape of the building is one of the factors under investigation. By performing a pushover analysis, the output of the capacity curve for calculations using the HAZUS method is obtained, allowing for the generation of a seismic fragility curve. The evaluation results show that different variations of time history data produce different levels of probability of damage.

Keywords: Fragility curve, mosque, reinforced concrete, STERA 3D, time history

Abstrak

Runtuhnya bangunan merupakan salah satu penyebab yang paling dominan adanya korban jiwa saat terjadi gempa bumi. Untuk mengurangi dan mencegah terjadinya kerusakan hingga runtuhnya bangunan selama gempa bumi, perlu dilakukan evaluasi pada bangunan terhadap beban seismik. Dengan evaluasi tersebut tentunya dapat memprediksi tingkat probabilitas terjadinya kerusakan pada bangunan apabila terjadi gempa bumi. Penelitian ini menjelaskan tingkat probabilitas dengan menggunakan kurva kerapuhan untuk mengevaluasi kinerja bangunan masjid. Indonesia merupakan salah satu negara dengan jumlah masjid terbanyak di dunia tentunya menjadi tantangan tersendiri untuk mengatasi kemungkinan kerusakan bangunan akibat gempa bumi. Selain itu, banyak juga bangunan masjid yang dibangun atas dasar gotong royong tanpa menggunakan perhitungan teknik secara detail. Oleh sebab itu, evaluasi pada bangunan masjid sangat perlu dilakukan. Penelitian ini menggunakan aplikasi simulasi numerik STERA 3D dengan menggunakan data gempa riwayat waktu. Terdapat lima jenis data riwayat gempa yang digunakan pada variasi penelitian ini. Selain itu, bentuk ketidakberaturan bangunan juga menjadi salah satu faktor yang diteliti. Dengan dilakukannya analisis pushover, maka diperoleh output kurva kapasitas untuk perhitungan menggunakan metode HAZUS sehingga dihasilkan kurva kerapuhan seismik. Hasil evaluasi menunjukkan dengan variasi data riwayat waktu yang berbeda menghasilkan tingkat probabilitas kerusakan yang berbeda-beda.

Kata Kunci: Bangunan masjid, beton bertulang, kurva kerapuhan, riwayat waktu, STERA 3D

Pendahuluan

Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam

yang sangat sering terjadi di dunia dan seringkali menyebabkan kerusakan pada infrastruktur. Kerusakan hingga runtuhnya infrastruktur seperti

bangunan gedung, jembatan hingga bendungan merupakan salah satu sumber utama adanya korban jiwa ketika terjadi gempa bumi. Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam yang disebabkan oleh aktivitas tektonik yang menyebabkan pergerakan lempeng pada lapisan *lithosphere*. Selain itu, akibat dari gempa bumi sering kali juga diikuti dengan jenis bencana lainnya seperti tanah longsor hingga terjadinya tsunami. Hingga saat ini, terdapat beberapa penelitian menyimpulkan bahwa runtuhnya bangunan gedung menjadi salah satu kerusakan fatal yang tertinggi dibandingkan infrastruktur lainnya, khususnya di Indonesia (Maidiawati dan Sanada, 2008; Saputra *et al.*, 2017; Pujianto *et al.*, 2019; Idris *et al.*, 2022).

Dari hasil investigasi lapangan terhadap bangunan pasca gempa menunjukkan bahwa kerusakan bangunan gedung terjadi diakibatkan oleh banyak faktor, diantaranya akibat dari ketidakberaturan bentuk bangunan, kualitas material, umur bangunan hingga metode konstruksi yang digunakan tidak memenuhi kaidah teknik bangunan tahan gempa (Prayuda *et al.*, 2017; Zulfar *et al.*, 2019). Oleh sebab itu, perlu dilakukan investigasi yang mendalam mengenai ketahanan dan probabilitas keruntuhan bangunan dalam mengatasi kerusakan bangunan akibat gempa bumi.

Indonesia merupakan salah satu negara dengan jumlah bangunan masjid yang cukup banyak di dunia, hal tersebut dikarenakan jumlah populasi masyarakat Indonesia melebihi 80% adalah beragama Islam. Bangunan masjid di Indonesia sangat bervariasi dari sisi bentuk bangunan hingga arsitekturalnya. Banyak terdapat bangunan masjid yang dikategorikan sebagai salah satu bangunan bersejarah. Selain itu, banyak juga bangunan masjid yang berbentuk modern dengan bentuk arsitektur yang sangat unik. Dengan mempertimbang pentingnya bangunan masjid serta digunakan oleh banyak manusia, tentunya sangat perlu dilakukan evaluasi berkala maupun asesmen secara mendetail tentang ketahanan bangunan tersebut. Selain itu, beberapa bangunan masjid di daerah-daerah yang jauh dari perkotaan seringkali dibangun dengan menggunakan asas gotong royong.

Pembangunan masjid yang tidak menggunakan dasar-dasar perhitungan teknis atau dikategorikan sebagai *non-engineered building*. Menariknya, banyak pula terdapat pembangunan masjid yang dilakukan secara bertahap dalam jangka waktu yang lama. Hal ini tentunya mempengaruhi ketahanan bangunan tersebut apabila terjadi gempa bumi. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa bangunan masjid cukup rentan mengalami kerusakan apabila terjadi gempa bumi. Beberapa penelitian mengenai evaluasi langsung di lapangan

mengenai kerusakan bangunan masjid pasca gempa bumi juga telah ditemukan (Saatcioglu *et al.*, 2006; Korzhnikov *et al.*, 2018; Atmaca *et al.*, 2020; Temur *et al.*, 2021). Hasil investigasi ini menunjukkan sebagian besar elemen non-struktural mengalami kerusakan, khususnya pada masjid-masjid yang berukuran besar. Kerusakan yang cukup banyak terjadi pada bagian-bagian kolom masjid akibat dari besarnya gaya geser yang terjadi ketika gempa bumi berlangsung. Selain investigasi langsung di lapangan, beberapa hasil studi numerik menggunakan berbagai metode seperti metode elemen hingga dan analisis *pushover* juga telah ditemukan untuk bangunan masjid di berbagai negara khususnya pada bangunan-bangunan masjid bersejarah (Rossi *et al.*, 2015; Seker *et al.*, 2014; Bilgin dan Ramadani, 2021). Selain itu, ditemukan juga beberapa hasil penelitian mengenai analisis perilaku seismik bangunan masjid terhadap berbagai tipe dan jenis gempa bumi di berbagai negara (Demir *et al.*, 2016; Cakir *et al.*, 2015; Dogangun *et al.*, 2012; Maras *et al.*, 2022; Seker & Ozkaynak, 2021; Senturk *et al.*, 2022).

Selain analisis yang telah dilakukan di berbagai negara oleh peneliti terdahulu, investigasi perilaku seismik pada bangunan masjid di Indonesia juga telah dilakukan. Investigasi tersebut dilakukan dengan berbagai metode yang cukup komprehensif, seperti investigasi langsung di lapangan hingga menggunakan bantuan analisis komputer (Putrie *et al.*, 2021; Sari *et al.*, 2020; Idham, 2019; Gunardi dan Barliana, 2012; Irfan *et al.*, 2022; Luthfi *et al.*, 2022; Boen, 2020). Dari hasil berbagai investigasi ini menunjukkan masih sangat banyak bangunan masjid yang rusak akibat terjadi gempa bumi serta perlunya dilakukan perkuatan khusus seperti *retrofitting* dan perkuatan jenis lainnya. Tentunya terdapat berbagai metode yang dapat digunakan untuk menginvestigasi ketahanan bangunan masjid.

Salah satu metode yang sangat cocok untuk digunakan pada investigasi bangunan masjid adalah dengan menggunakan kurva probabilitas kerapuhan. Berdasarkan *literature review* yang dilakukan, masih belum ditemukan hasil penelitian mengenai penggunaan kurva kerapuhan untuk memprediksi tingkat kerapuhan bangunan masjid ketika terjadi gempa, khususnya di Indonesia. Padahal, metode ini telah banyak diadopsi untuk bangunan dan infrastruktur jenis lainnya sebagai salah satu teknologi yang inovatif. Beberapa hasil penelitian mengenai kurva kerapuhan yang telah diaplikasikan pada berbagai jenis infrastruktur, diantaranya yaitu jembatan dan *highway* (Karim dan Yamazaki, 2003; Banerjee dan Shinozuka, 2008; Shoji & Moriyama, 2007), untuk bangunan bendungan (Hariri-Ardebili dan Saouma, 2016), dan bangunan gedung beton bertulang (Kappos dan

Panagopoulos, 2010; Kumar dan Samanta, 2020; Saruddin dan Nazri, 2015).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi dan memprediksi tingkat kerapuhan bangunan masjid dua lantai terhadap kejadian gempa bumi yang berbeda-beda. Penelitian ini menggunakan analisis numerik dengan STERA 3D untuk memperoleh perilaku seismik dari masing-masing variasi struktur. Melalui hasil analisis ini kemudian dilakukan perhitungan probabilitas kerusakan dengan menggunakan metode kurva kerapuhan. Aplikasi numerik STERA 3D ini pertama kali dikenalkan oleh professor Taiki Saito dari Toyohashi University of Technology (Saito, 2017).

Namun demikian, aplikasi ini telah digunakan oleh banyak peneliti dari berbagai negara untuk mengevaluasi perilaku seismik bangunan gedung beton bertulang (Cao *et al.*, 2013; Nabeel, 2016; Afifuddin *et al.*, 2017; Naqi dan Saito, 2017; Pavel *et al.*, 2018; Monika *et al.*, 2020; Olteanu *et al.*, 2016). Selain ini, hasil analisis aplikasi STERA 3D ini juga telah divalidasi dengan menggunakan pengujian laboratorium, sehingga hasil analisis dari aplikasi ini cukup baik untuk mengevaluasi perilaku seismik pada bangunan gedung beton bertulang (Maulana *et al.*, 2021). Penelitian ini menganalisis dua jenis bangunan beton bertulang bertingkat dua, dimana bangunan ini difungsikan sebagai bangunan masjid. Perbedaan kedua jenis bangunan ini terletak pada ketidakberaturan bentuknya. Pada masing-masing bangunan dilakukan simulasi menggunakan lima jenis data gempa riwayat waktu yang berbeda-

beda. Setelah diperoleh hasil perilaku seismik dari aplikasi STERA 3D, analisis dilanjutkan dengan menghitung menganalisis dan menggambarkan kurva kerapuhan dengan menggunakan metode HAZUS pada masing-masing bangunan dengan gempa yang berbeda-beda. Melalui penelitian ini diharapkan mampu mengumpulkan data yang lebih mudah untuk diaplikasikan di lapangan sebagai salah satu referensi dalam mendesain bangunan masjid tahan gempa.

Metode

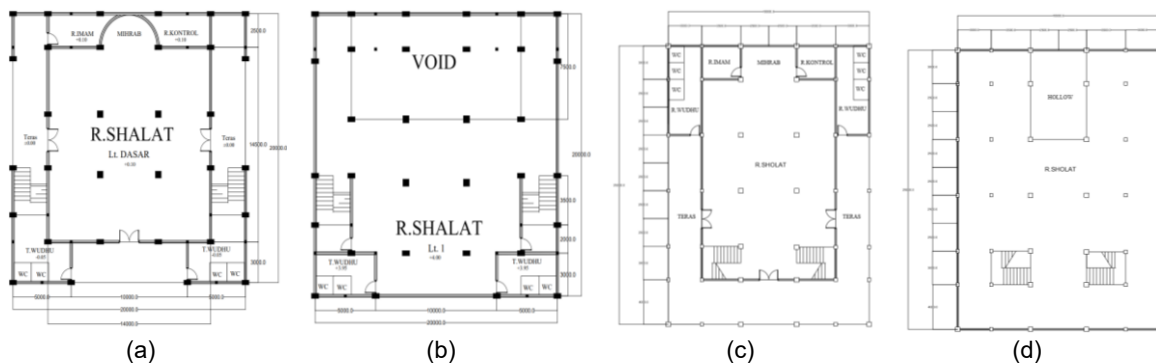
Detail bangunan

Penelitian ini menginvestigasi pengaruh dari beban gempa yang berbeda terhadap probabilitas terjadinya kerusakan pada bangunan masjid. Terdapat dua variasi bentuk bangunan masjid yang digunakan pada penelitian ini yaitu bangunan A dan bangunan B. Kedua tipe ini dipilih karena merupakan dua jenis bentuk bangunan masjid yang paling sering digunakan di Indonesia, khususnya bangunan masjid dua lantai yang dibangun tanpa menggunakan perhitungan teknik.

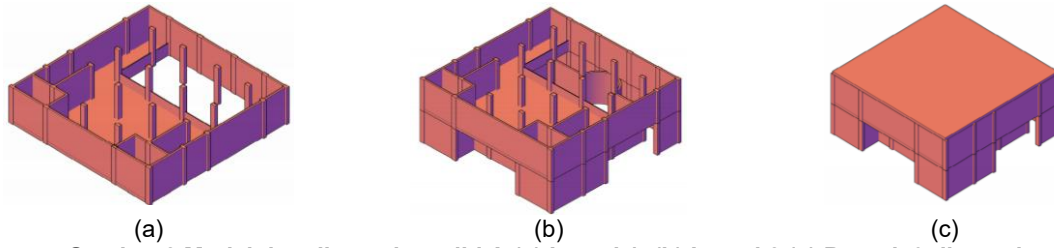
Gambar 1 (a) dan (b) merupakan denah lantai 1 dan lantai 2 bangunan A, sedangkan Gambar 1 (c) dan (d) menampilkan denah untuk bangunan B baik lantai 1 maupun lantai 2. Gambar 2 dan Gambar 3 menampilkan bentuk bangunan masjid A dan masjid B secara tiga dimensi, sehingga dengan lebih mudah dapat dilihat perbedaan pada kedua jenis bangunan masjid tersebut. Data struktur bangunan masjid A dan B dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data struktur bangunan

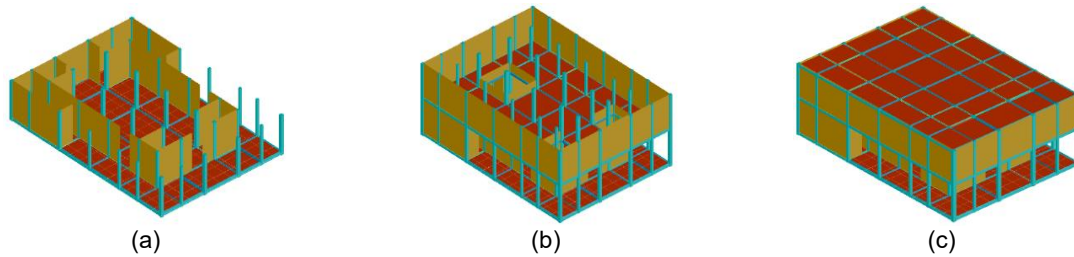
Deskripsi	Bangunan A	Bangunan B
Jumlah lantai	2 lantai	2 lantai
Tinggi bangunan	9,5 m	9,5 m
Tinggi tiap lantai	5 dan 4,5 m	5 dan 4,5 m
Lebar bangunan	20 m	18 m
Panjang bangunan	20 m	25 m
Luas bangunan	800 m ²	900 m ²



Gambar 1. Denah bangunan masjid (satuan mm) (a) Bentuk A lantai 1 (b) Bentuk A lantai 2 (c) Bentuk B lantai 1 (d) Bentuk B lantai 2



Gambar 2 Model tiga dimensi masjid A (a) Lantai 1, (b) Lantai 2 (c) Bentuk 3 dimensi



Gambar 3 Model tiga dimensi masjid B (a) Lantai 1, (b) Lantai 2 (c) Bentuk 3 dimensi

Tabel 2. Data dimensi dan tulangan balok bangunan A dan B

Kolom	Dimensi (mm)	Tulangan pokok	Tulangan sengkang (mm)	Selimut beton (mm)
K1	400 × 400	20D19	3D10-100	40
K2	500 × 500	20D19	3D10-100	40
K3	200 × 200	4D16	2D10-100	40

Tabel 3. Data dimensi dan tulangan balok bangunan A dan B

Balok	Dimensi (mm)	Tulangan pokok		Tulangan sengkang (mm)	Selimut beton (mm)
		Atas	Bawah		
B1	400 × 350	5D16	3D16	2D10-150	40
B2	350 × 250	5D16	3D16	2D10-150	40

Tabel 4. Data dimensi dan tulangan pelat bangunan A dan B

Plat	Dimensi (mm)	Tulangan pokok (mm)	Selimut beton (mm)
Plat lantai	200	2D16-150	40
Plat bordes	150	2D16-150	40
Plat tangga	150	2D16-150	40
Plat dak	200	2D16-150	40

Tabel 5. Spesifikasi material

Material	Mutu
Mutu Beton	25 MPa
Mutu Baja BjTS 280	350 MPa
Mutu baja BjTP 280	350 MPa
Modulus elastisitas beton	23.500 MPa

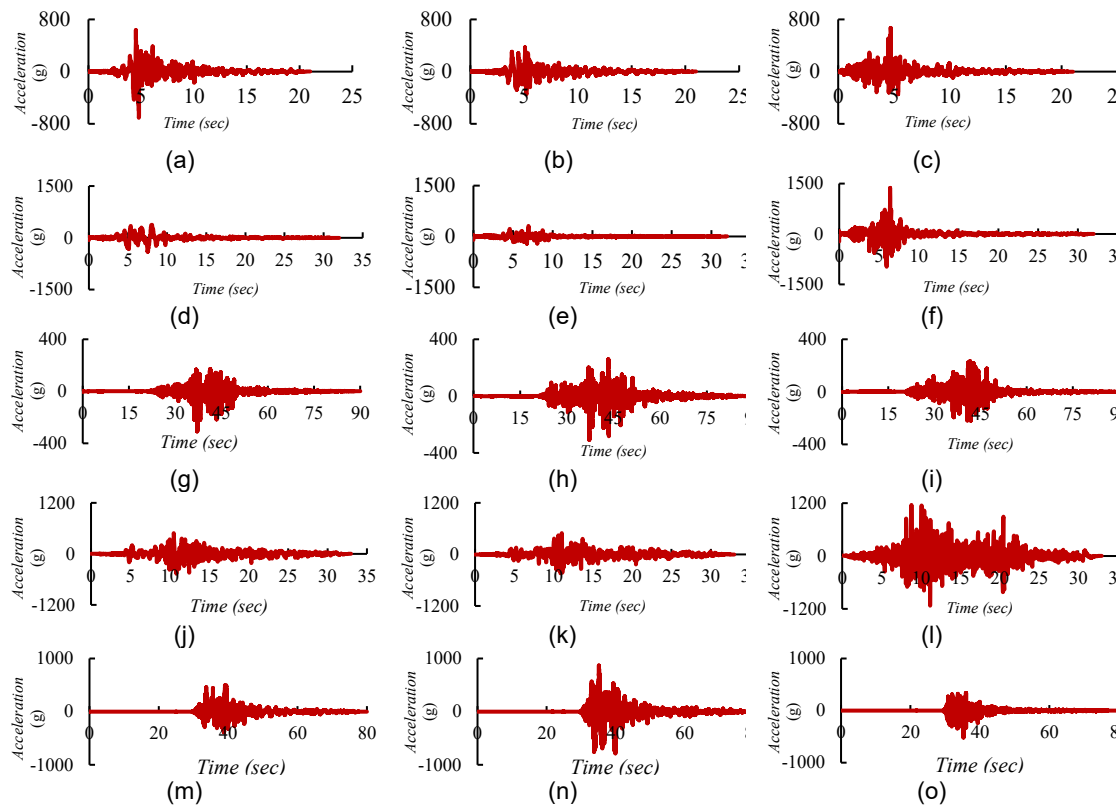
Pada penelitian ini menggunakan tiga jenis kolom yaitu K1, K2 dan K3 dengan ukuran yang berbeda, selain itu juga menggunakan dua ukuran balok yang berbeda. Namun demikian ukuran balok dan kolom pada bangunan A dan B adalah sama.

Adapun detail tulangan kolom dan balok dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3, sedangkan data dimensi ketebalan pelat dapat dilihat pada Tabel 4. Untuk mutu material pada penelitian ini menggunakan kualitas yang sama baik pada

bangunan A maupun bangunan B, mutu material yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.

Data gempa riwayat waktu

Penelitian ini menggunakan aplikasi STERA 3D sebagai salah satu *software* analisis struktur untuk mengevaluasi perilaku seismik bangunan gedung beton bertulang. Jenis beban seismik yang digunakan pada penelitian ini berupa beban gempa riwayat waktu.



Gambar 4. Data gempa riwayat waktu sebagai beban seismik (a) Parkfield-X (b) Parkfield-Y (c) Parkfield-Z (d) Kobe-X (e) Kobe-Y (f) Kobe-Z (g) Chichi-X (h) Chichi-Y (i) Chichi-Z (j) Tabas-X (k) Tabas-Y (l) Tabas-Z (m) Chuetsu-oki-X (n) Chuetsu-oki-Y (o) Chuetsu-oki-Z

Terdapat lima variasi beban gempa yang digunakan yaitu data riwayat waktu Parkfield, Kobe, Chichi, Tabas dan Chuetsu-oki. Untuk melihat *performance* dari masing-masing bangunan, penelitian ini juga menganalisis *performance point* masing-masing hasil pengujian dengan kurva respon spektrum untuk beberapa lokasi di wilayah Indonesia.

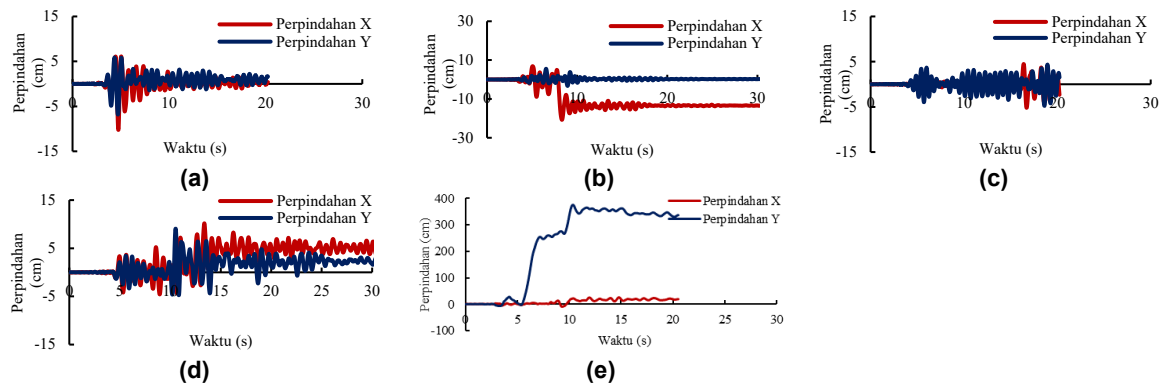
Pemilihan data gempa dan lokasi sebagai pembanding dilakukan dengan pendekatan terhadap nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) atau nilai percepatan tanah maksimum, *Peak Ground Velocity* (PGV) atau kecepatan tanah maksimum, durasi, kondisi tanah, serta jarak terhadap episentrum yang berkisar 0-20 km yang dilakukan pada setiap daerah yang ditinjau. Gambar 4 menampilkan data riwayat waktu gempa yang digunakan sebagai input di aplikasi STERA 3D.

Hasil dan Pembahasan

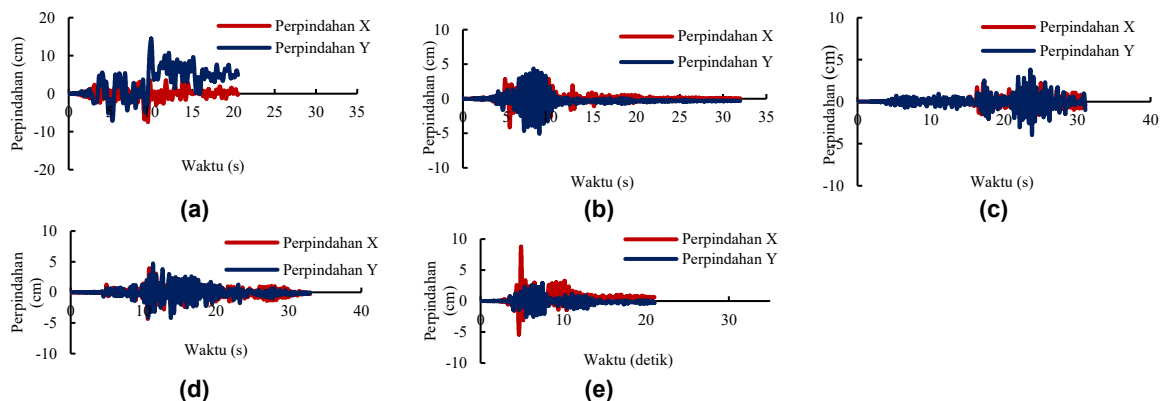
Perpindahan

Perpindahan merupakan salah satu komponen hasil analisis struktur yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi tingkat keamanan struktur. Nilai perpindahan menunjukkan tingkat ketahanan struktur terhadap gaya yang dibebankan. Hasil

hubungan antara perpindahan dengan durasi pembebanan untuk bangunan masjid A dapat dilihat pada Gambar 5. Nilai perpindahan yang ditampilkan berupa besarnya perpindahan arah x dan y untuk masing-masing jenis gempa yang digunakan sebagai input beban pada analisis di STERA 3D. Hasil ini menunjukkan bahwa rentang perpindahan secara general berkisar antara 5 cm sampai dengan 11 cm untuk bangunan masjid dengan pembebanan gempa Parkfield, Kobe, Chichi dan Tabas. Namun demikian, hasil investigasi menunjukkan dengan menggunakan data riwayat waktu Chuetsu-oki pada bangunan masjid A menghasilkan perpindahan yang sangat besar yaitu sebesar 25 cm untuk arah X dan 376 cm untuk arah Y. Hasil analisis ini mengindikasikan terjadinya kerusakan pada bangunan masjid A dengan tipe gempa Chuetsu-oki. Gambar 6 menampilkan hasil hubungan perpindahan bangunan masjid tipe B terhadap waktu gempa. Dengan gempa rencana yang diinput ke dalam STERA 3D maka akan diperoleh perpindahan maksimum sebagai respon terhadap beban gempa yang dihitung sesuai target rencana, dengan parameter berupa perpindahan dapat diketahui simpangan yang terjadi ketika struktur menghadapi gempa. Semakin kecil simpangan maka semakin baik kinerja struktur tersebut.



Gambar 5 Hubungan perpindahan dan waktu getar untuk bangunan masjid A (a) Parkfield (b) Kobe (c) Chichi (d) Tabas (e) Chuetsu-oki



Gambar 6 Hubungan perpindahan dan waktu getar untuk bangunan masjid B (a) Parkfield (b) Kobe (c) Chichi (d) Tabas (e) Chuetsu-oki

Perpindahan maksimum sendiri merupakan simpangan yang terjadi pada bagian bangunan teratas sebagai akibat dari dorongan lantai dasar terhadap beban gempa.

Dari hasil analisis untuk bangunan masjid tipe B terlihat bahwa perpindahan yang terjadi berkisar antara 2 cm hingga 9 cm untuk seluruh jenis gempa. Namun demikian terdapat juga perpindahan maksimum sebesar 14,54 cm untuk bangunan masjid tipe B pada gempa riwayat waktu Parkfield arah Y. Sementara itu nilai perpindahan terkecil pada bangunan masjid tipe B dihasilkan dengan menggunakan simulasi beban gempa Chichi yaitu sebesar 2,29 cm. Berdasarkan hasil simulasi kedua tipe bangunan ini, dapat disimpulkan bahwa bangunan masjid tipe A cenderung menghasilkan nilai perpindahan yang lebih besar untuk semua variasi dibandingkan bangunan masjid tipe B.

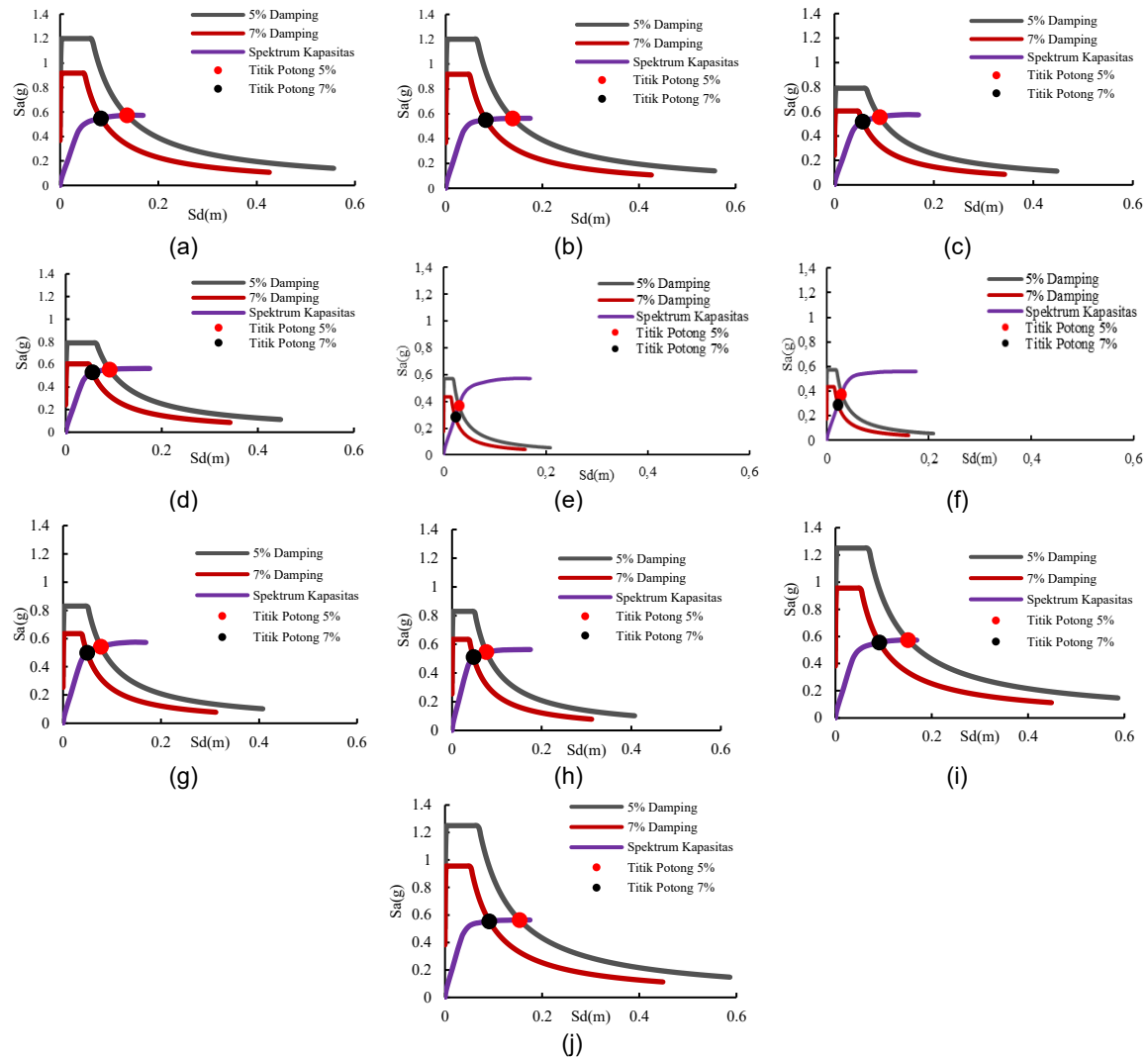
Performance point

Performance point merupakan perpotongan antara kurva respon spektrum dan kurva kapasitas spektrum. Titik tersebut merupakan kekuatan atau kapasitas dari struktur untuk menahan beban lateral

akibat gempa yang diberikan yang dapat dilihat dari nilai perpindahan lateralnya. Pada penelitian ini menggunakan kurva respon spektrum dari beberapa kasus untuk wilayah di Indonesia. Lokasi yang dipilih merupakan lokasi yang memiliki tipikal nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) atau nilai percepatan tanah maksimum, *Peak Ground Velocity* (PGV) atau kecepatan tanah maksimum, durasi, kondisi tanah, serta jarak terhadap episentrum.

Lima lokasi yang memiliki peluang terjadinya gempa di Indonesia dipilih sebagai pembanding untuk melihat kapasitasnya. Adapun lokasi yang dipilih yaitu Kota Gorontalo untuk gempa Parkfield, Kabupaten Kaili untuk gempa Kobe, Kota Kendari untuk gempa Chichi, Kota Mataram untuk gempa Tabas dan Pulau Sabang untuk gempa Chuetsu-oki. Pada Gambar 7 menampilkan titik performa untuk masing-masing jenis gempa pada bangunan A.

Hasil analisis menunjukkan beberapa bangunan masjid tipe A berada pada kondisi plastis ketika berada di titik performa. Hanya pada gempa Chichi untuk wilayah Kendari terlihat titik performa bangunan masjid A berada di kondisi elastis.



Gambar 7. Performance point untuk bangunan A (a) Parkfield – Gorontalo arah X (b) Parkfield – Gorontalo arah Y (c) Kobe – Kaliandra arah X (d) Kobe – Kaliandra arah Y (e) Chichi – Kendar arah X (f) Chichi – Kendari arah Y (g) Tabas – Mataram arah X (h) Tabas – Mataram arah Y (i) Chuetsu-oki – Sabang arah X (j) Chuetsu-oki – Sabang arah Y

Sementara hasil analisis untuk wilayah lainnya menunjukkan titik performa bangunan berada pada kondisi plastis. Titik performa pada bangunan masjid tipe B dengan masing-masing wilayah di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 8.

Hasil analisis ini menunjukkan pada gempa Parkfield untuk wilayah Kota Gorontalo dan gempa Chuetsu-oki untuk Pulau Sabang menampilkan titik performa bangunan berada pada kondisi plastis baik arah X maupun arah Y dengan respon *damping* 5% dan 7%. Tentunya hasil ini dapat menjadi pertimbangan ketika akan membangun bangunan masjid pada wilayah tersebut dengan bangunan masjid bertipe B ini. Sementara itu, pada gempa Kobe dan Tabas menunjukkan masing-masing hasil titik performa berada di titik plastis untuk respon *damping* 5%, namun pada pada kondisi *damping* 7% terlihat titik performa bangunan berada di

kondisi plastis. Sedangkan gempa Chichi menunjukkan titik performa bangunan berada pada kondisi elastis baik pada respon *damping* 5% dan 7%. Masing-masing kondisi tersebut terlihat sama baik pada arah X maupun arah Y. Dari hasil analisis ini disimpulkan bahwa pada bangunan B memiliki lebih banyak hasil yang titik performanya berada pada kondisi elastis dibandingkan dengan bangunan A.

Kurva kerapuhan

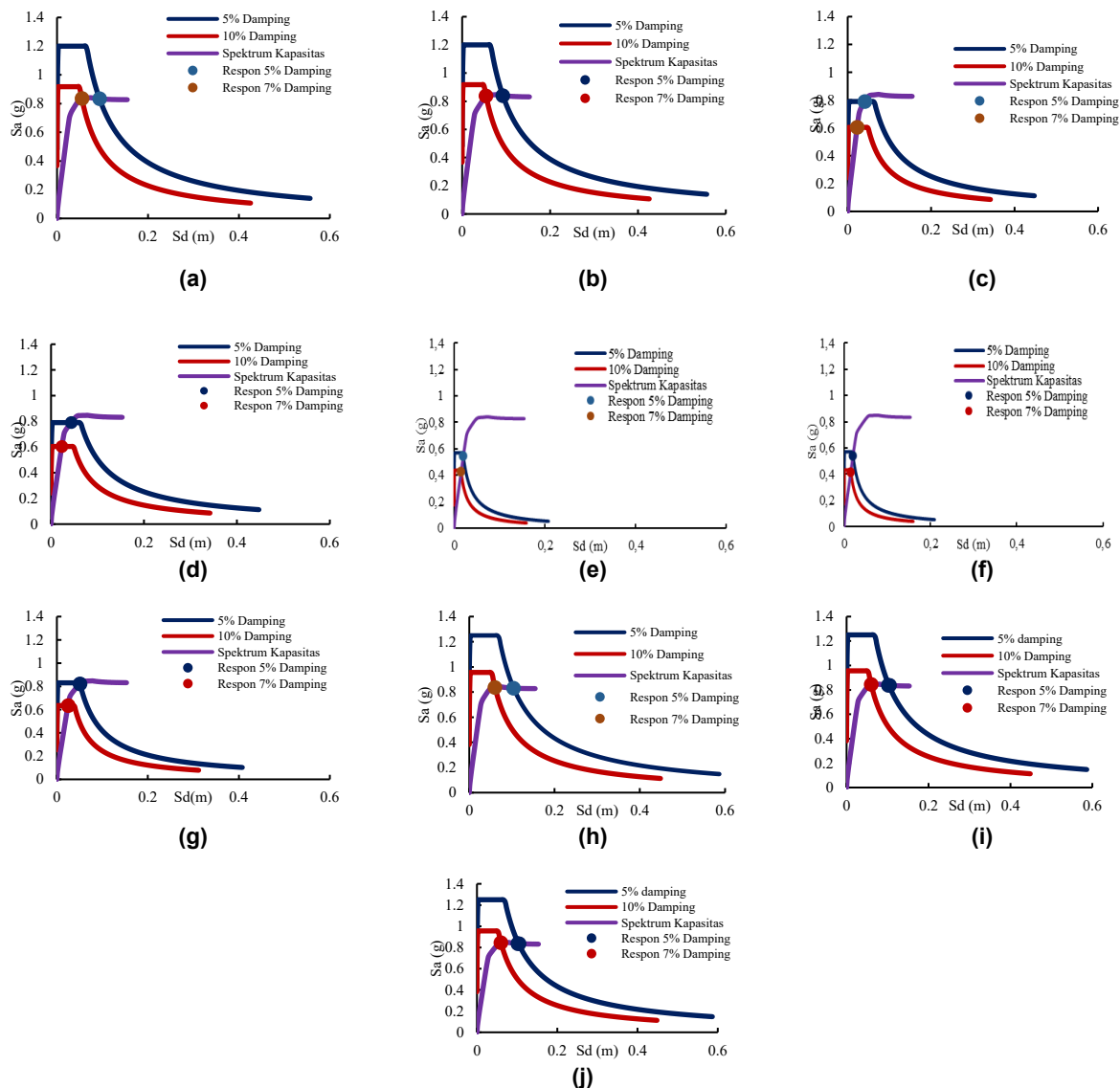
Kurva kerapuhan merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengetahui probabilitas dari kerusakan yang mungkin terjadi pada struktur akibat beban gempa. Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode HAZUS dengan kriteria yang harus dipenuhi. Kriteria pembagian kode tingkat kinerja struktur dalam

ketetapan HAZUS, kinerja bangunan masjid diasumsikan sebagai bangunan yang mengalami *maximum strength* dan *maximum ductility* sehingga bangunan masjid masuk ke dalam kriteria *High-Code*. Struktur masjid didesain menggunakan sistem struktur portal dengan material utama beton bertulang, maka struktur masjid masuk kedalam kategori *Concrete Moment Frame*.

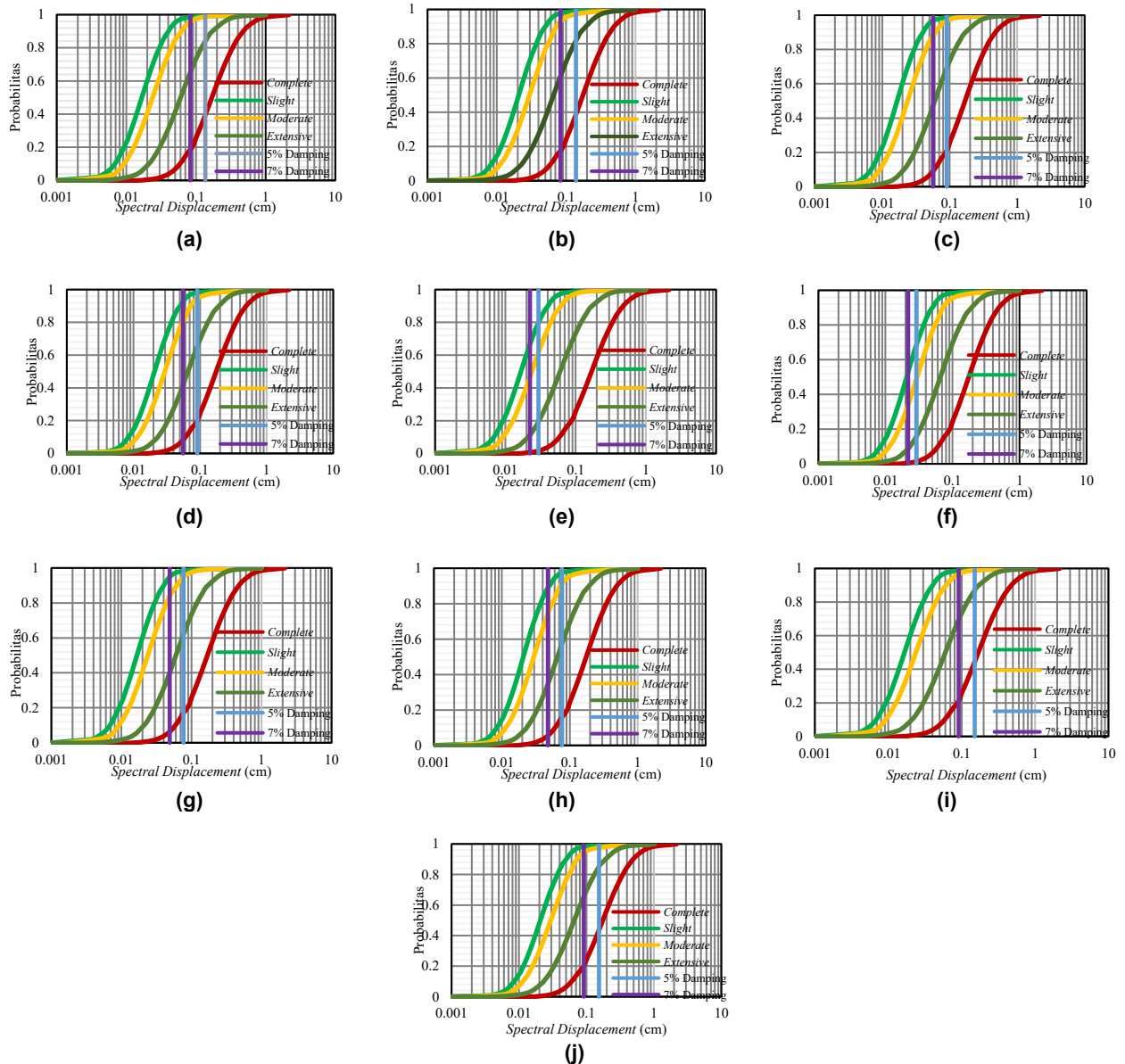
Pada penelitian ini, struktur memiliki jumlah lantai sebanyak 2 lantai sehingga dapat dikategorikan sebagai struktur *low-rise*. Berdasarkan parameter tersebut, HAZUS mengkategorikan struktur bangunan masjid sebagai tipe C1L. Gambar 9 menampilkan kurva kerapuhan untuk bangunan masjid tipe A pada arah X dan arah Y untuk masing-masing jenis gempa. Gambar 10 menampilkan hasil

kurva kerapuhan pada bangunan masjid tipe B untuk masing-masing jenis gempa riwayat waktu baik arah X maupun arah Y, dari analisis ini dapat dilihat probabilitas terjadinya kerusakan bangunan dengan respon *damping* yang diberikan yaitu sebesar 5% dan 7%.

Hasil analisis menunjukkan dengan gempa riwayat waktu Chichi menghasilkan probabilitas yang cukup rendah terjadinya kerusakan pada bangunan baik arah X maupun arah Y. Namun pada jenis gempa lainnya menghasilkan probabilitas yang cukup besar, khususnya pada bangunan masjid tipe A. Melalui kurva kerapuhan ini dapat disimpulkan bahwa tingkat kerusakan bangunan yang dihasilkan akan berbeda-beda bila bentuk bangunan yang digunakan juga berbeda.



Gambar 8 *Performance point* untuk bangunan B (a) Parkfield – Gorontalo arah X (b) Parkfield – Gorontalo arah Y (c) Kobe – kalianda arah X (d) Kobe – Kalianda arah Y (e) Chichi – Kendari arah X (f) Chichi – Kendari arah Y (g) Tabas – Mataram arah X (h) Tabas – Mataram arah Y (i) Chuetsu-oki – Sabang arah X (j) Chuetsu-oki – Sabang arah Y



Gambar 9 Kurva kerapuhan untuk bangunan A (a) Parkfield arah X (b) Parkfield arah Y (c) Kobe arah X (d) Kobe arah Y (e) Chichi arah X (f) Chichi arah Y (g) Tabas arah X (h) Tabas arah Y (i) Chuetsu-oki arah X (j) Chuetsu-oki arah Y

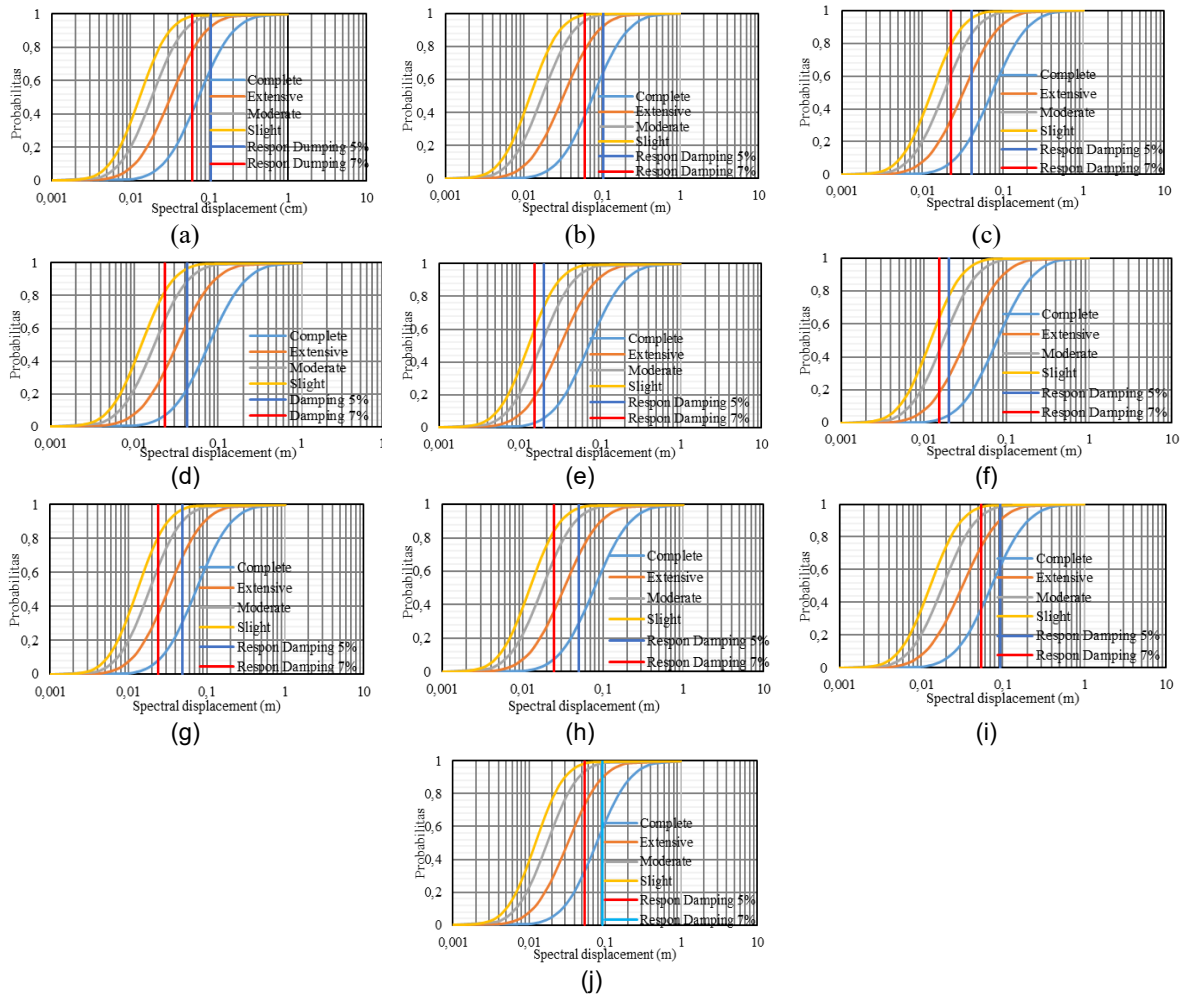
Bangunan tipe A menghasilkan probabilitas rusak yang lebih besar dibandingkan dengan tipe bangunan B. Selain itu, pola dan durasi gempa juga sangat mempengaruhi probabilitas kerusakan bangunan yang terjadi. Hal tersebut dapat dilihat dari variasi jenis gempa riwayat waktu yang digunakan. Dengan menggunakan data gempa Parkfield menghasilkan probabilitas yang cukup besar yaitu berada diatas 60% terjadinya kerusakan. Sementara dengan menggunakan data gempa Chichi menghasilkan nilai probabilitas kerusakan berada dibawah 70%. Melalui penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk mendesain bangunan masjid sederhana. Perlu diketahui, investigasi kurva kerapuhan dan studi probabilitas terkait kerusakan bangunan akibat gempa juga telah

dilakukan oleh peneliti sebelumnya (Prayuda, dkk., 2023, Prayuda, dkk., 2022). Pola yang dihasilkan sangat serasi dengan penelitian ini meskipun jenis bangunannya berbeda.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pengolahan data dapat diberikan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

Perpindahan struktur akibat variasi beban gempa sangat bervariasi baik pada bangunan tipe A maupun tipe B. Namun, hasil yang signifikan terlihat pada bangunan masjid tipe A dengan jenis gempa Chuetsu-oki.



Gambar 10 Kurva kerapuhan untuk bangunan B (a) Parkfield arah X (b) Parkfield arah Y (c) Kobe arah X (d) Kobe arah Y (e) Chichi arah X (f) Chichi arah Y (g) Tabas arah X (h) Tabas arah Y (i) Chuetsu-oki arah X (j) Chuetsu-oki arah Y

Secara keseluruhan terlihat bangunan tipe A menghasilkan perpindahan lebih besar dibandingkan bangunan tipe B. Titik performa bangunan dengan aplikasi pada beberapa lokasi di Indonesia menunjukkan hasil yang bervariasi sesuai dengan lokasi bangunan.

Namun demikian, dapat disimpulkan lebih banyak bangunan tipe B yang berada pada performa elastis dibandingkan bangunan tipe A yang secara garis besar berada pada kondisi plastis, khususnya pada titik performa dengan damping 7%. Dari kurva kerapuhan terlihat bahwa bangunan tipe A memiliki probabilitas yang lebih besar terjadi keruntuhan pada semua jenis gempa, hal ini disebabkan oleh ketidakberaturan bangunan. Bangunan tipe B memiliki kondisi bentuk yang lebih stabil sehingga menghasilkan probabilitas kerusakan yang lebih kecil. Setiap jenis gempa menghasilkan probabilitas kerusakan yang berbeda-beda. Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa gempa Parkfield dan Chuetsu-oki menghasilkan peluang yang sangat

besar terjadinya kerusakan pada bangunan gedung dibandingkan pola gempa lainnya pada analisis ini.

Daftar Pustaka

- Afifuddin, M., Panjaitan, M. A. R., Ayuna, D. (2017). The Behaviour of Reinforced Concrete Structure due to Earthquake Load using Time History Analysis Method. *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*, 56(1), 1-9.
- Atmaca, B., Demir, S., Gunaydin, M., Altunisik, A. C., Husem, M., Ates, S., Adanur, S., Angin, Z. (2020). Field Investigation on the Performance of Mosques Minarets during the Elazig-Sivrice Earthquake. *Journal of Performance Constructed Facilities*, 34(6), 1-10.
- Banerjee, S., Shinozuka, M. (2008). Mechanistic Quantification of RC Bridge Damage States Under Earthquake Through Fragility Analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 23(1), 12-22.

- Bilgin, H., Ramadani, F. (2021). Numerical Study to Assess the Structural Behaviors of the Bajrakli Mosque (Western Kosovo). *Advances on Civil Engineering*, 2021, 1-17.
- Boen, T. (2020). Rapid Screening Procedure for Buildings Damaged by Earthquakes: The Need for Retrofitting. *E3S Web of Conferences*, 156, 1-7.
- Cakir, F., Seker, B. S., Durmus, A., Dogangun, A., Uysal, H. (2015). Seismic Assessment of a Historical Masonry Mosque by Experimental Tests and Finite Element Analyses. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, 158-164.
- Cao, M., Motosaka, M., Tsamba, T., Yoshida, K. (2013). Simulation Analysis of Damaged 9-Story SRC Building During the 2011 Great East Japan Earthquake. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 13(2), 45-64.
- Demir, A., Nohutcu, H., Ercan, E., Hokelekli, E., Altintas, G. (2016). Effect of Model Calibration on Seismic Behaviour of a Historical Mosque. *Structural Engineering and Mechanics*, 60(5), 749-760.
- Dogangun, A., Sezen, H. (2012). Seismic Vulnerability and Preservation of Historical Masonry Monumental Structures. *Earthquakes and Structures*, 3(1), 83-95.
- Gunardi, Y., Barliana, M. S. (2021). Disaster Response Mosque: A Mosque as a Center for the Rescue of the Ummah. *Journal of Development and Integrated Engineering*, 1(1), 37-46.
- Hariri-Ardebili, M. A., Saouma, V. E. (2016). Seismic Fragility Analysis of Concrete Dams: A State-of-the-Art Review. *Engineering Structures*, 128, 374-399.
- Idham, N. C. (2019). Indonesian Architecture and Earthquake Vulnerability: The Development of Building Safety through the Civilization. *MATEC Web of Conferences*, 280, 1-10.
- Idris, Y., Cummins, P., Rusydy, I., Mukhsin, U., Syamsidik, Habibie, M. Y., Meilianda, E. (2022). Post-Earthquake Damage Assessment After the 6.5 mw Earthquake on December 7th, 2016, in Pidie Jaya, Indonesia. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(1), 409-426.
- Irfan, Z., Abdullah, Afifuddin, M. (2022). Development of Fragility Curve Based on Incremental Dynamic Analysis Curve using Ground Motion Aceh Earthquake. *E3S Web of Conferences*, 340, 1-10.
- Kappos, A. J., Panagopoulos, G. (2010). Fragility Curves for Reinforced Concrete Buildings in Greece. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(2), 39-53.
- Karim, K. R., Yamazaki, F. (2003). A Simplified Method of Constructing Fragility Curves for Highway Bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 32(10), 1603-1626.
- Korzhenkov, A. M., Lomakin, D. A., Ovsyuchenko, A. N., Lar'kov, A. S., Marakhanov, A. V., Rogozhin, E. A. (2018). On Traces of Strong Laye Medieval Earthquake at the Uzbek Madrasah – Mosque Complex, Staryi Krym, Crimea. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 54, 627-645.
- Kumar, P., Samanta, A. (2020). Seismic Fragility Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings in Patna, India. *Structures*, 27, 54-69.
- Lutfi, M., Chayati, N., Ardiansyah, A. (2022). Structural Development of Mosque Building Based on Additional Capacity of Prayer Room. *ASTONJADRO: Civil Engineering, Architectures and Environmental Science Journal*, 11(1), 30-39.
- Maidiawati, Sanada, Y. (2008). Investigation and Analysis of Buildings Damaged During the September 2007 Sumatra, Indonesia Earthquakes. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 7(2), 371-378.
- Maras, M. M., Ozmen, A., Sayin, E., Ayaz, Y. (2022). Seismic Assessment of the Historical Sultu Minaret Mosque. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 445-459.
- Maulana, T. I., Enkhtengis, B., Saito, T. (2021). Proposal of damage index ratio for low-to mid-rise reinforced concrete moment-resisting frame with setback subjected to uniaxial seismic loading. *Applied Science*, 11(15), 1-16.
- Monika, F., Zega, B. C., Prayuda, H., Cahyati, M. D., Putra, Y. A. (2020). The Effect of Horizontal Vulnerability on the Stiffness Level of Reinforced Concrete Structure on High-Rise Buildings. *Journal of Civil Engineering Forum*, 6(1), 49-60.
- Nabeel, Y. (2016). Seismic Analysis of RC Frame with and Without Shear Walls. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 6(3), 168-176.
- Naqi, A., Saito, T. (2017). A Proposal for Seismic Evaluation Index of Mid-Rise Existing RC Buildings in Afghanistan. *AIP Conference Proceedings*, 1892, 1-8.

- Olteanu, P., Coliba, V., Vacareanu, R., Pavel, F., Ciuiu, D. (2016). Analytical Seismic Fragility Functions for dual RC Structures in Bucharest. The 1940 Vrancea Earthquake. *Issues, Insights and Lesson Learnt*, 463-479.
- Pavel, F., Calotescu, I., Stanescu, D., Badju, A. (2018). Lifecycle and Seismic Fragility Assessment of Code-Conforming Reinforced Concrete and Steel Structures in Bucharest, Romania. *International Journal of Disaster and Risk Science*, 9(2), 263-274.
- Prayuda, H., Zega, B. C., Priyosulistyo, H. (2017). Prediction of Allowable Lateral Ground Acceleration (in-Plane Direction) of Confined Masonry Walls Using Ambient Vibration (microtremor) Analysis. *Procedia Engineering*, 171, 1194-1203.
- Prayuda, H., Wilasamba, O., Saleh, F., Maulana, T. I., Firdaus, F. (2022). Evaluasi Perilaku Seismik Akibat Ketidakberaturan Vertikal pada Bangunan Beton Bertulang Bertingkat Tinggi. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 28(2), 178-191.
- Prayuda, H., Maulana, T. I., Putra, F. M. Y., Salsabila, B., Saleh, F. (2023). Pengaruh Ketidakberaturan Bentuk Bangunan Beton Bertulang Bertingkat Tinggi Terhadap Perilaku Seismik. *Jurnal Teknik Sipil*, 30(2), 307-319
- Pujianto, A., Prayuda, H., Rosyidi, S. A. P., Monika, F., Faizah, R. (2019). Rapid Visual Screening (RVS) for School Buildings after Earthquake in Lombok, West Nusa Tenggara, Indonesia. *IOP Conference Series: Materials and Science Engineering*, 650(1), 1-10.
- Putrie, Y. E., Maslucha, L., Handryant, A. N., Rahmah, S., Akbar, V. R., Bahar, M. A., Senjana, S. (2020). Seismic Risk Evaluation of Community Mosques in Southern Malang to Assess Their Suitability to Support Disaster Response. *Advances in Social science, Education and Humanities Research*, 529, 219-227.
- Rossi, M., Cattari, S., Lagomarsino, S. (2015). Performance-based Assessment of the Great Mosque of Algiers. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 369-388.
- Saatcioglu, M., Ghobarah, A., Nistor, I. (2006). Performance of Structures in Indonesia during the December 2004 Great Sumatra Earthquake and Indian Ocean Tsunami. *Earthquake Spectra*, 22(S3), 295-319.
- Saito, T. (2017). *Structural Earthquake Response Analysis 3D*, Technical Manual Version 5.8, Toyohashi University of Technology.
- Saputra, A., Rahardianto, T., Revindo, M. D., Delikostidis, I., Hadmoko, D. S., Sartohadi, J., Gomez, C. (2017). Seismic Vulnerability Assessment of Residential Buildings using Logistic Regression and Geographic Information System (GIS) in Pleret Subdistrict (Yogyakarta, Indonesia). *Geoenvironmental Disasters*, 49(11), 1-33.
- Sari, L. H., Izziah, Meutia, E. (2020). Adaptation of Local Wisdom in Contemporary Mosque Design for Achieving Good Building Physics and Earthquake Resistance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737, 1-9.
- Saruddin, S. N. A., Nazri, F. M. (2015). Fragility Curves for Low- and Mid-Rise Buildings in Malaysia, *Procedia Engineering*, Vol. 125, pp. 873-878.
- Seker, B. S., Cakir, F., Dogangun, A., Uysal, H. (2014). Investigation of the Structural Performance of a Masonry Domed Mosque by Experimental Tests and Numerical Analysis. *Earthquakes and Structures*, 6(4), 335-350.
- Seker, B. S., Ozkaynak, M. (2021). Seismic Assessment of Historical Timber Berdemir Mosque. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, 8(7), 14350-14357.
- Senturk, I., Ergun, M., Artar, M. (2022). Seismic Behavior Assessment of Historical Alaeddin Bey Mosque and Strengthening Suggestions by CFRP Fabric and Steel Plate. *Engineering Failure Analysis*, 137, 1-20.
- Shoji, G., Moriyama, T. (2007). Evaluation of the Structural Fragility of a Bridge Structure Subjected to a Tsunami Wave Load. *Journal of Natural Disaster Science*, 29(2), 73-81.
- Temur, R., Damci, E., Oncu-Davas, S., Oser, C., Sargin, S., Sekerci, C. (2021). Structural and Geotechnical Investigations on Sivrice Earthquake (Mw=6.8) January 24, 2020. *Natural Hazards*, 106, 401-434.
- Zulfiar, M. H., Prayuda, H., Monika, F. (2019). Vulnerability Assessment on Non-Engineered Building in Earthquake Prone Area. Case Study: Klaten District, Central Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Materials and Science Engineering*, 650(1), 1-7.