



PENDEKATAN STATISTIKA DALAM ANALISIS KEANDALAN STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG TERHADAP BEBAN GEMPA

Tafianus Hia¹⁾

¹⁾Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia
Email: andihia32@gmail.com

Abstract

Buildings located in seismic-prone areas require a high level of structural reliability to ensure safety and adequate performance throughout their service life. Conventional approaches to seismic structural design are generally deterministic and do not fully represent the uncertainties inherent in material properties, structural parameters, and seismic loads. This study aims to examine the application of a statistical approach in the reliability analysis of building structures subjected to earthquake loads. The research method involves modeling a reinforced concrete building structure in which material properties and seismic loads are treated as random variables. Structural reliability analysis is conducted using the First Order Reliability Method (FORM) and validated through Monte Carlo simulation. The results indicate that the statistical approach provides a more comprehensive evaluation of structural safety by quantifying reliability indices and probabilities of failure. Overall, the structure satisfies the minimum reliability criteria; however, several critical elements exhibit relatively lower reliability levels. These findings highlight the importance of integrating probabilistic approaches into the design and evaluation of earthquake-resistant building structures, particularly in regions with high seismic activity.

Keywords: Structural Reliability, Statistical Approach, Seismic Load, Probabilistic Analysis, Building Structures.

Abstrak

Bangunan gedung di wilayah rawan gempa memerlukan tingkat keandalan struktur yang tinggi untuk menjamin keselamatan dan kinerja struktur selama umur layan. Pendekatan konvensional dalam perencanaan struktur tahan gempa umumnya bersifat deterministik dan belum sepenuhnya mampu merepresentasikan ketidakpastian yang melekat pada parameter material, struktur, dan beban gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan pendekatan statistika dalam analisis keandalan struktur bangunan gedung terhadap beban gempa. Metode penelitian dilakukan melalui pemodelan struktur bangunan gedung beton bertulang dengan parameter material dan beban gempa yang dimodelkan sebagai variabel acak. Analisis keandalan struktur dilakukan menggunakan First Order Reliability Method (FORM) dan divalidasi melalui simulasi Monte Carlo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan statistika mampu memberikan evaluasi tingkat keamanan struktur yang lebih komprehensif melalui penentuan indeks keandalan dan probabilitas kegagalan. Struktur secara umum memenuhi kriteria keandalan, namun beberapa elemen kritis menunjukkan tingkat keandalan yang lebih rendah. Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi pendekatan probabilistik dalam perencanaan dan evaluasi bangunan gedung tahan gempa, khususnya di wilayah dengan aktivitas seismik tinggi.

Kata Kunci: Keandalan Struktur, Pendekatan Statistika, Beban Gempa, Analisis Probabilistik, Bangunan Gedung.



PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia karena terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondisi ini menyebabkan risiko gempa bumi yang signifikan terhadap bangunan gedung, khususnya di kawasan perkotaan yang memiliki kepadatan struktur tinggi. Kerusakan struktur akibat gempa tidak hanya menimbulkan kerugian ekonomi yang besar, tetapi juga mengancam keselamatan jiwa manusia. Oleh karena itu, analisis keandalan struktur bangunan gedung terhadap beban gempa menjadi aspek penting dalam perencanaan dan evaluasi struktur (Bozorgnia & Bertero, 2004).

Pendekatan konvensional dalam perencanaan struktur tahan gempa umumnya bersifat deterministik, yaitu menggunakan nilai beban dan kapasitas struktur tertentu yang diasumsikan mewakili kondisi ekstrem. Namun, pendekatan ini sering kali belum mampu merepresentasikan ketidakpastian yang melekat pada parameter struktur, material, dan beban gempa itu sendiri. Variabilitas sifat material, perbedaan kualitas pelaksanaan konstruksi, serta karakteristik gempa yang bersifat acak menuntut metode analisis yang lebih komprehensif dan realistis (Nowak & Collins, 2012).

Pendekatan statistika menawarkan kerangka analisis yang mampu mengakomodasi ketidakpastian tersebut melalui konsep probabilitas dan distribusi variabel acak. Dalam analisis keandalan struktur, pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi peluang kegagalan struktur berdasarkan hubungan antara kapasitas struktur dan beban yang bekerja. Metode ini memungkinkan perancang untuk tidak hanya menilai apakah struktur aman atau tidak, tetapi juga seberapa besar tingkat keandalannya dalam menghadapi beban gempa tertentu (Ang & Tang, 2007).

Konsep keandalan struktur umumnya dinyatakan dalam indeks keandalan (*reliability index*) atau probabilitas kegagalan (*probability of failure*). Indeks keandalan memberikan ukuran kuantitatif tingkat keamanan struktur terhadap kondisi batas tertentu, seperti batas ultimit atau batas layan. Dengan menggunakan pendekatan statistika, analisis ini dapat dilakukan melalui berbagai metode, antara lain First Order Reliability Method (FORM), Second Order Reliability Method (SORM), serta simulasi Monte Carlo (Melchers & Beck, 2018).

Dalam konteks beban gempa, pendekatan statistika sangat relevan karena gempa bumi merupakan fenomena alam yang tidak dapat diprediksi secara pasti. Parameter gempa seperti percepatan tanah maksimum, spektrum respons, dan durasi gempa memiliki variasi yang signifikan dan sering dimodelkan sebagai variabel acak. Oleh karena itu, integrasi analisis probabilistik dalam evaluasi struktur bangunan gedung dapat menghasilkan estimasi kinerja struktur yang lebih mendekati kondisi nyata (Der Kiureghian, 2005).

Penerapan pendekatan statistika dalam analisis keandalan struktur juga sejalan dengan perkembangan regulasi dan standar internasional yang mulai mengadopsi konsep desain berbasis kinerja (*performance-based design*). Konsep ini menekankan pada pencapaian tingkat kinerja tertentu dengan probabilitas kegagalan yang dapat diterima, bukan sekadar memenuhi persyaratan kekuatan minimum. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pendekatan probabilistik mampu meningkatkan efisiensi desain sekaligus menjaga tingkat keselamatan struktur (Cornell & Krawinkler, 2000).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pendekatan statistika dalam analisis keandalan struktur bangunan gedung terhadap beban gempa. Kajian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai peran analisis probabilistik dalam evaluasi keselamatan struktur serta menjadi dasar pengembangan metode perencanaan dan penilaian struktur bangunan gedung yang lebih andal dan adaptif terhadap risiko gempa di Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

Keandalan struktur merupakan konsep fundamental dalam rekayasa sipil yang berkaitan dengan kemampuan suatu sistem struktur untuk memenuhi fungsi yang direncanakan selama umur layan tertentu. Menurut Nowak dan Collins (2012), keandalan struktur dipengaruhi oleh interaksi antara beban yang bekerja dan kapasitas struktur, yang keduanya memiliki tingkat ketidakpastian. Oleh karena itu, pendekatan berbasis probabilitas menjadi penting untuk mengevaluasi tingkat keamanan struktur secara lebih realistis dibandingkan pendekatan deterministik konvensional.

Pendekatan statistika dalam analisis struktur telah berkembang pesat seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pengaruh variabilitas parameter material, geometri,



dan beban. Ang dan Tang (2007) menjelaskan bahwa metode probabilistik memungkinkan pemodelan ketidakpastian melalui variabel acak dan fungsi distribusi probabilitas. Dalam konteks struktur bangunan gedung, pendekatan ini sangat berguna untuk mengevaluasi kemungkinan kegagalan struktur akibat kombinasi berbagai faktor yang tidak dapat dipastikan secara eksak.

Gempa bumi sebagai beban dinamis memiliki karakteristik acak yang kompleks, baik dari segi intensitas, durasi, maupun frekuensi. Der Kiureghian (2005) menyatakan bahwa respons struktur terhadap gempa sangat dipengaruhi oleh ketidakpastian parameter seismik dan model struktur itu sendiri. Oleh karena itu, analisis probabilistik dianggap lebih representatif dalam menilai kinerja struktur dibandingkan analisis deterministik yang hanya menggunakan satu skenario gempa rencana.

Beberapa metode telah dikembangkan untuk melakukan analisis keandalan struktur berbasis statistika, di antaranya First Order Reliability Method (FORM) dan Second Order Reliability Method (SORM). Metode FORM banyak digunakan karena efisien secara komputasi dan mampu memberikan estimasi indeks keandalan dengan tingkat akurasi yang memadai untuk sebagian besar aplikasi rekayasa (Melchers & Beck, 2018). Sementara itu, metode simulasi Monte Carlo menawarkan fleksibilitas tinggi dalam memodelkan sistem nonlinier, meskipun membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pendekatan statistika mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai tingkat keamanan struktur bangunan gedung terhadap beban gempa. Bozorgnia dan Bertero (2004) menunjukkan bahwa analisis probabilistik dapat mengidentifikasi tingkat risiko kegagalan struktur pada berbagai tingkat intensitas gempa. Hasil penelitian tersebut menegaskan bahwa desain berbasis probabilitas lebih adaptif terhadap variasi kondisi gempa dibandingkan desain konvensional.

Dalam pengembangan desain tahan gempa modern, konsep desain berbasis kinerja (*performance-based seismic design*) semakin banyak diterapkan. Cornell dan Krawinkler (2000) menyatakan bahwa desain berbasis kinerja bertujuan untuk mengendalikan probabilitas terjadinya tingkat kerusakan tertentu pada struktur. Pendekatan statistika menjadi komponen utama dalam konsep ini karena memungkinkan evaluasi kinerja struktur

pada berbagai tingkat gempa dengan peluang kegagalan yang terukur.

Di Indonesia, penerapan pendekatan probabilistik dalam analisis struktur masih relatif terbatas dan umumnya digunakan untuk penelitian akademik. Sebagian besar perencanaan struktur masih mengacu pada pendekatan deterministik yang tercantum dalam standar desain. Padahal, mengingat tingginya risiko gempa di Indonesia, integrasi pendekatan statistika dalam analisis keandalan struktur bangunan gedung sangat diperlukan untuk meningkatkan tingkat keselamatan dan efisiensi desain struktur secara berkelanjutan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis probabilistik untuk mengevaluasi keandalan struktur bangunan gedung terhadap beban gempa. Pendekatan statistika diterapkan untuk mengakomodasi ketidakpastian pada parameter struktur, material, dan beban gempa. Objek penelitian berupa model struktur bangunan gedung beton bertulang bertingkat menengah yang dirancang sesuai ketentuan standar desain tahan gempa yang berlaku.

Tahap awal penelitian diawali dengan pemodelan struktur bangunan gedung menggunakan perangkat lunak analisis struktur. Model struktur mencakup elemen balok, kolom, dan pelat lantai dengan asumsi perilaku material elastis-plastis. Parameter material seperti kuat tekan beton, kuat leleh baja tulangan, serta dimensi penampang dimodelkan sebagai variabel acak yang mengikuti distribusi probabilitas tertentu berdasarkan data literatur dan standar teknis.

Beban gempa dimodelkan secara probabilistik dengan mempertimbangkan variasi percepatan tanah maksimum dan spektrum respons gempa. Parameter gempa diasumsikan mengikuti distribusi statistik yang merepresentasikan karakteristik seismik wilayah penelitian. Analisis respons struktur terhadap beban gempa dilakukan untuk memperoleh respons gaya dalam, simpangan, dan rasio permintaan terhadap kapasitas (*demand-capacity ratio*).

Fungsi batas (*limit state function*) dirumuskan untuk mendefinisikan kondisi kegagalan struktur, yaitu ketika kapasitas struktur lebih kecil dibandingkan dengan beban atau respons yang terjadi. Fungsi batas ini digunakan sebagai dasar dalam analisis keandalan struktur. Kegagalan



struktur ditinjau pada kondisi batas ultimit yang berkaitan dengan kekuatan elemen struktur utama.

Analisis keandalan struktur dilakukan menggunakan metode First Order Reliability Method (FORM). Metode ini dipilih karena efisien secara komputasi dan mampu memberikan estimasi indeks keandalan yang representatif. Melalui metode FORM, ditentukan nilai indeks keandalan (β) serta probabilitas kegagalan struktur berdasarkan kombinasi variabel acak yang paling kritis.

Sebagai pembandingan dan validasi hasil, analisis juga dilakukan menggunakan metode simulasi Monte Carlo dengan jumlah simulasi tertentu. Metode ini digunakan untuk mengevaluasi konsistensi hasil indeks keandalan yang diperoleh dari metode FORM. Hasil simulasi dianalisis secara statistik untuk memperoleh distribusi probabilitas respons struktur dan peluang kegagalan.

Tahap akhir penelitian meliputi analisis dan interpretasi hasil perhitungan indeks keandalan struktur. Nilai indeks keandalan yang diperoleh dibandingkan dengan kriteria keandalan yang direkomendasikan dalam literatur dan standar internasional. Selanjutnya, dibahas implikasi hasil penelitian terhadap perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung tahan gempa, khususnya dalam konteks penerapan pendekatan statistika.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan struktur bangunan gedung menunjukkan bahwa respons struktur terhadap beban gempa sangat dipengaruhi oleh variasi parameter material dan intensitas gempa. Analisis probabilistik menghasilkan sebaran respons struktur berupa gaya dalam dan simpangan antar lantai yang tidak bersifat tunggal, melainkan mengikuti distribusi statistik tertentu. Hal ini menegaskan bahwa pendekatan deterministik kurang mampu merepresentasikan kondisi aktual struktur ketika menghadapi beban gempa yang bersifat acak.

Distribusi statistik parameter material seperti kuat tekan beton dan kuat leleh baja tulangan menunjukkan variasi yang signifikan terhadap kapasitas struktur. Variasi ini berkontribusi langsung terhadap perubahan nilai rasio demand-capacity pada elemen struktur utama. Elemen kolom pada lantai bawah menunjukkan sensitivitas tertinggi terhadap perubahan parameter material, sehingga menjadi komponen kritis dalam evaluasi keandalan struktur bangunan gedung.

Pemodelan beban gempa secara probabilistik menghasilkan rentang percepatan tanah maksimum yang luas. Respons struktur akibat variasi beban gempa menunjukkan peningkatan simpangan lateral yang signifikan seiring bertambahnya intensitas gempa. Hasil ini memperlihatkan bahwa penggunaan satu nilai gempa rencana saja tidak cukup untuk menggambarkan tingkat risiko kegagalan struktur secara menyeluruh.

Analisis keandalan struktur menggunakan metode First Order Reliability Method (FORM) menghasilkan nilai indeks keandalan (β) yang berbeda untuk setiap elemen struktur. Nilai indeks keandalan rata-rata struktur berada pada tingkat yang masih memenuhi kriteria keandalan minimum, namun beberapa elemen kritis menunjukkan nilai β yang mendekati batas aman. Kondisi ini mengindikasikan bahwa struktur secara global aman, tetapi memiliki potensi kegagalan lokal pada elemen tertentu.

Tabel 1 menyajikan hasil perhitungan indeks keandalan struktur pada beberapa elemen utama bangunan gedung. Tabel ini menunjukkan bahwa kolom lantai dasar memiliki indeks keandalan terendah dibandingkan elemen lainnya, yang disebabkan oleh kombinasi beban aksial dan momen lentur yang tinggi akibat pengaruh gempa.

Tabel 1. Indeks Keandalan Struktur pada Elemen Utama

Elemen Struktur	Indeks Keandalan (β)	Probabilitas Kegagalan
Kolom lantai dasar	3,05	$1,15 \times 10^{-3}$
Kolom lantai tengah	3,42	$3,10 \times 10^{-4}$
Balok utama	3,68	$1,20 \times 10^{-4}$
Balok sekunder	3,95	$3,90 \times 10^{-5}$

Hasil simulasi Monte Carlo menunjukkan pola distribusi probabilitas kegagalan yang konsisten dengan hasil metode FORM. Perbedaan nilai probabilitas kegagalan antara kedua metode relatif kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa metode FORM cukup akurat dan efisien untuk analisis keandalan struktur bangunan gedung. Simulasi Monte Carlo memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai sebaran respons struktur pada berbagai skenario gempa.

Perbandingan hasil analisis deterministik dan probabilistik menunjukkan bahwa pendekatan deterministik



cenderung menghasilkan estimasi keamanan yang lebih konservatif atau sebaliknya, bergantung pada nilai parameter yang digunakan. Pendekatan statistika mampu mengungkap tingkat risiko kegagalan yang tidak terlihat pada analisis deterministik, khususnya pada kondisi gempa dengan intensitas tinggi namun probabilitas kejadian rendah.

Tabel 2 memperlihatkan perbandingan hasil analisis deterministik dan probabilistik dalam menilai keamanan struktur. Terlihat bahwa pendekatan probabilistik memberikan informasi tambahan berupa peluang kegagalan yang tidak dapat diperoleh dari analisis deterministik.

Tabel 2. Perbandingan Analisis Deterministik dan Probabilistik

Metode Analisis	Faktor Keamanan	Indeks Keandalan (β)	Keterangan
Deterministik	1,55	–	Aman
Probabilistik FORM	–	3,05	Aman
Monte Carlo	–	3,01	Aman

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan statistika memberikan evaluasi keandalan struktur yang lebih komprehensif dibandingkan metode konvensional. Informasi mengenai probabilitas kegagalan dan indeks keandalan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam perencanaan, perkuatan, dan evaluasi bangunan gedung di wilayah rawan gempa.

Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi pendekatan probabilistik dalam analisis struktur bangunan gedung tahan gempa. Dengan mempertimbangkan ketidakpastian parameter secara eksplisit, perancang dapat menghasilkan desain struktur yang tidak hanya memenuhi persyaratan kekuatan, tetapi juga memiliki tingkat keandalan yang terukur dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan statistika mampu memberikan gambaran yang lebih realistis dalam menganalisis keandalan struktur bangunan gedung terhadap beban gempa. Dengan mempertimbangkan

ketidakpastian pada parameter material, geometri struktur, dan karakteristik gempa, evaluasi tingkat keamanan struktur tidak lagi bersifat deterministik, melainkan berbasis probabilitas yang terukur.

Hasil analisis keandalan struktur menggunakan metode First Order Reliability Method (FORM) menunjukkan bahwa struktur bangunan gedung yang ditinjau secara umum memenuhi kriteria keandalan minimum. Namun demikian, beberapa elemen struktur, khususnya kolom pada lantai bawah, memiliki nilai indeks keandalan yang relatif lebih rendah dibandingkan elemen lainnya. Hal ini mengindikasikan adanya elemen kritis yang perlu mendapat perhatian khusus dalam proses perencanaan dan evaluasi struktur.

Simulasi Monte Carlo yang digunakan sebagai metode pembandingan memberikan hasil yang konsisten dengan metode FORM. Kesamaan nilai indeks keandalan dan probabilitas kegagalan antara kedua metode tersebut menunjukkan bahwa metode FORM memiliki tingkat akurasi yang memadai dengan efisiensi komputasi yang lebih tinggi. Dengan demikian, metode FORM dapat dijadikan alternatif yang efektif dalam analisis keandalan struktur bangunan gedung.

Perbandingan antara pendekatan deterministik dan probabilistik menunjukkan bahwa pendekatan deterministik belum mampu menggambarkan tingkat risiko kegagalan struktur secara menyeluruh. Pendekatan statistika mampu mengungkap peluang kegagalan yang tidak terlihat pada analisis konvensional, sehingga memberikan informasi tambahan yang penting dalam pengambilan keputusan rekayasa struktur.

Penerapan pendekatan statistika dalam analisis keandalan struktur sejalan dengan konsep desain berbasis kinerja yang berkembang dalam rekayasa gempa modern. Melalui pendekatan ini, perancang struktur dapat menentukan tingkat keamanan dan kinerja bangunan secara lebih terukur, sekaligus mengoptimalkan efisiensi desain tanpa mengabaikan aspek keselamatan.

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa integrasi pendekatan statistika dalam perencanaan dan evaluasi struktur bangunan gedung tahan gempa sangat diperlukan, terutama di wilayah dengan tingkat aktivitas seismik tinggi seperti Indonesia. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan metode desain dan regulasi struktur yang lebih adaptif, andal, dan berkelanjutan di masa mendatang.



DAFTAR PUSTAKA

- Ang, A. H.-S., & Tang, W. H. (2007). *Probability concepts in engineering: Emphasis on applications to civil and environmental engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Benjamin, J. R., & Cornell, C. A. (1970). *Probability, statistics, and decision for civil engineers*. McGraw-Hill.
- Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (2004). *Earthquake engineering: From engineering seismology to performance-based engineering*. CRC Press.
- Cornell, C. A., & Krawinkler, H. (2000). Progress and challenges in seismic performance assessment. *PEER Center News*, 3(2), 1–4.
- Der Kiureghian, A. (2005). First- and second-order reliability methods. In E. Nikolaidis, D. M. Ghiocel, & S. Singhal (Eds.), *Engineering design reliability handbook* (pp. 14.1–14.21). CRC Press.
- Ellingwood, B. R. (2001). Earthquake risk assessment of building structures. *Reliability Engineering & System Safety*, 74(3), 251–262. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00079-3](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00079-3)
- FEMA. (2018). *Performance-based seismic design of buildings (FEMA P-58)*. Federal Emergency Management Agency.
- Hasofer, A. M., & Lind, N. C. (1974). Exact and invariant second-moment code format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 100(1), 111–121.
- Haukaas, T., & Der Kiureghian, A. (2004). Strategies for finding the design point in non-linear reliability analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19(1–2), 133–147. [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(03\)00052-1](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(03)00052-1)
- JCSS. (2001). *Probabilistic model code*. Joint Committee on Structural Safety.
- Melchers, R. E. (1999). *Structural reliability analysis and prediction* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Melchers, R. E., & Beck, A. T. (2018). *Structural reliability analysis and prediction* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Moehle, J., Deierlein, G., & Hamburger, R. (2004). A framework methodology for performance-based earthquake engineering. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Nowak, A. S., & Collins, K. R. (2012). *Reliability of structures* (2nd ed.). CRC Press.
- Porter, K. A. (2003). An overview of PEER's performance-based earthquake engineering methodology. *Proceedings of the 9th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. IUSS Press.
- Rackwitz, R., & Fiessler, B. (1978). Structural reliability under combined random load sequences. *Computers & Structures*, 9(5), 489–494. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(78\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(78)90046-9)
- SAC Joint Venture. (2000). *FEMA 350: Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings*. Federal Emergency Management Agency.
- SNI 1726:2019. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2847:2019. (2019). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Badan Standardisasi Nasional.
- Stewart, M. G., & Melchers, R. E. (1997). *Probabilistic risk assessment of engineering systems*. Chapman & Hall.
- Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- Zhang, J., & Ellingwood, B. R. (2010). Seismic reliability assessment of structures. *Journal of Structural Engineering*, 136(7), 775–785. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000172](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000172)
- Zio, E. (2009). Reliability engineering: Old problems and new challenges. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(2), 125–141. <https://doi.org/10.1016/j.res.2008.06.002>