

# Analisis Keandalan Balok Beton dengan Pendekatan Probabilistik dan Simulasi Monte Carlo

Nico Jeremia Samosir<sup>1</sup>, Samsul Abdul Rahman Sidik Hasibuan<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Medan Area

Jalan Kolam Nomor 1 Medan Estate / Jalan Gedung PBSI, Medan 20223

<sup>2</sup>E-mail: samsulrahman@staff.uma.ac.id

*Abstract — The reliability of building structures is very important to ensure the safety and resistance of buildings to the given loads. In structural design, concrete beams are crucial elements that function to withstand vertical loads and distribute them to other structural elements. This study aims to analyze the reliability of concrete beams using a probabilistic approach, considering variations in resistance moments and load moments assumed to follow a normal distribution. Monte Carlo simulation is used to analyze this variability and calculate the probability of failure and reliability index. The simulation results show a probability of failure of around 8.40%, which is very close to the results of manual probabilistic calculations of 8.53%. The calculated reliability index is 1.37, indicating that the structure has a low level of reliability. The sensitivity factor shows that the uncertainty of the load moment has a greater effect on the reliability of the structure compared to the resistance moment. This study provides important insights for improving structural design that is more sensitive to uncertainty variability, in order to improve construction safety and efficiency.*

*Keywords: structural reliability; concrete beams; Monte Carlo simulation; probability of failure; reliability index.*

*Abstrak — Keandalan struktur bangunan sangat penting untuk memastikan keselamatan dan ketahanan bangunan terhadap beban yang diberikan. Dalam desain struktur, balok beton merupakan elemen krusial yang berfungsi untuk menahan beban vertikal dan mendistribusikannya ke elemen struktural lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan balok beton dengan pendekatan probabilistik, mempertimbangkan variasi momen resistensi dan momen beban yang diasumsikan mengikuti distribusi normal. Simulasi Monte Carlo digunakan untuk menganalisis variabilitas ini dan menghitung probabilitas kegagalan serta indeks keandalan. Hasil simulasi menunjukkan probabilitas kegagalan sekitar 8,40%, yang sangat mendekati hasil perhitungan probabilistik manual sebesar 8,53%. Indeks keandalan yang dihitung adalah 1,37, yang menunjukkan struktur memiliki tingkat keandalan rendah. Faktor sensitivitas menunjukkan bahwa ketidakpastian momen beban lebih berpengaruh terhadap keandalan struktur dibandingkan dengan momen resistensi. Penelitian ini memberikan wawasan penting untuk perbaikan desain struktural yang lebih sensitif terhadap variabilitas ketidakpastian, guna meningkatkan keselamatan dan efisiensi konstruksi.*

*Kata-kata kunci: keandalan struktur; balok beton; simulasi Monte Carlo; probabilitas kegagalan; indeks keandalan.*

## I. PENDAHULUAN

Keandalan struktur bangunan sangat penting untuk memastikan keselamatan dan ketahanan bangunan terhadap beban yang diberikan. Dalam desain struktur, salah satu elemen paling krusial adalah balok beton, yang berfungsi untuk menahan beban vertikal dan mendistribusikannya ke elemen struktural lainnya. Pada umumnya, perencanaan balok beton dilakukan dengan pendekatan deterministik, di mana berbagai variabel yang memengaruhi kekuatan dan beban pada balok dianggap sebagai nilai tetap. Namun, dalam kenyataannya, terdapat variabilitas material, ketidakpastian dalam perhitungan beban, dan faktor lingkungan yang dapat memengaruhi perilaku struktur (Cheng et al., 2007; Lee & Mosalam, 2004). Oleh karena itu, diperlukan analisis keandalan untuk memahami seberapa besar tingkat kegagalan yang mungkin

terjadi pada balok beton dalam kondisi tersebut (del Caño et al., 2012). Penelitian ini fokus pada analisis keandalan balok beton dengan pendekatan probabilistik, dengan mempertimbangkan variasi dalam momen resistensi dan momen beban (Khaleel Ibrahim & Movahedi Rad, 2023; Lu et al., 1994). Variabilitas ini akan dianalisis menggunakan simulasi Monte Carlo untuk memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai kemungkinan kegagalan pada balok beton (Kirk & da Silva, 2016; Choi & Kwon, 2000). Melalui pendekatan ini, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi keandalan struktur dan mengembangkan metode analisis yang lebih tepat dibandingkan dengan metode deterministik yang lebih umum digunakan dalam praktik konstruksi saat ini (Martins Gomes & Miguel Awruch, 2005;

Szép et al., 2023). Urgensi penelitian ini sangat tinggi, mengingat pentingnya keandalan struktur bangunan dalam dunia konstruksi untuk memastikan keselamatan dan keberlanjutan bangunan (Eamon & Jensen, 2012). Pendekatan probabilistik dan simulasi Monte Carlo memungkinkan penilaian yang lebih baik terhadap ketidakpastian yang ada dalam desain struktural (Pattipawaej & Budiarto, 2007). Dengan mempertimbangkan ketidakpastian material dan beban, perancang dapat mengidentifikasi dan mengurangi potensi risiko kegagalan secara lebih efektif (Hasibuan et al., 2020; Dewi et al., 2018). Penelitian ini juga relevan untuk memenuhi standar keselamatan yang lebih ketat dan meningkatkan efisiensi desain struktur, yang pada gilirannya dapat mengurangi biaya dan meningkatkan kualitas konstruksi. Dalam penelitian ini, variabel yang dianalisis meliputi momen resistensi ( $R$ ) dan momen beban ( $S$ ) pada balok beton, yang keduanya diasumsikan mengikuti distribusi normal dengan parameter rata-rata (*mean*) dan standar deviasi (*sigma*) tertentu (Hasyim, 2015, 2024). Fungsi batas yang digunakan adalah selisih antara momen resistensi dan momen beban, yaitu  $g(R, S) = R - S$ . Berdasarkan variabilitas dari kedua variabel ini, analisis keandalan dilakukan dengan menghitung indeks keandalan ( $\beta$ ) dan probabilitas kegagalan ( $P_f$ ) (Lu et al., 1994; Lee & Mosalam, 2004). Penelitian ini menawarkan pendekatan baru dalam analisis keandalan balok beton, dengan memanfaatkan simulasi Monte Carlo yang lebih komprehensif dalam menangani ketidakpastian dibandingkan dengan pendekatan deterministik yang sering digunakan (Hasyim, 2015). Sebagian besar penelitian sebelumnya mungkin hanya mengandalkan metode analitis atau eksperimen terbatas, sementara penelitian ini mengkombinasikan simulasi komputer untuk memberikan estimasi probabilitas kegagalan yang lebih akurat (Szép et al., 2023). Meskipun pendekatan probabilistik dan simulasi Monte Carlo telah digunakan dalam berbagai bidang teknik lainnya, penerapannya dalam konteks struktur balok beton yang mempertimbangkan variabilitas momen resistensi dan beban masih tergolong terbatas (Kirk & da Silva, 2016). Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis keandalan balok beton dengan pendekatan probabilistik dan simulasi Monte Carlo, dengan fokus pada variabilitas momen

resistensi dan momen beban. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk menghitung indeks keandalan dan probabilitas kegagalan balok beton pada kondisi tertentu, menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi keandalan balok beton berdasarkan ketidakpastian momen resistensi dan momen beban, serta memberikan rekomendasi untuk meningkatkan keandalan struktur melalui desain yang lebih sensitif terhadap ketidakpastian variabel yang terlibat (Hasibuan et al., 2020; Hasyim, 2024).

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Analisis keandalan struktur bangunan, khususnya balok beton, sangat penting untuk memastikan keselamatan dan kinerja struktur di bawah beban yang diberikan. Keandalan struktur dapat dianalisis menggunakan pendekatan probabilistik, di mana ketidakpastian dalam variabel-variabel yang memengaruhi struktur dipertimbangkan. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah fungsi batas, yang menggambarkan perbedaan antara kapasitas struktural dan beban yang diterima oleh struktur. Dalam konteks balok beton, fungsi batas dapat dituliskan sebagai Persamaan 1.

$$g(R, S) = R - S \quad (1)$$

di mana:

- $g(R, S)$  adalah fungsi batas,
- $R$  adalah momen resistensi balok beton,
- $S$  adalah momen beban yang diterima balok.

Fungsi batas ini digunakan untuk menentukan apakah momen resistensi  $R$  lebih besar dari momen beban  $S$ . Jika nilai  $g(R, S) > 0$ , maka struktur dianggap aman. Sebaliknya, jika  $g(R, S) < 0$ , maka struktur mengalami kegagalan. Fungsi batas yang mengacu pada perbedaan antara momen resistensi dan momen beban digunakan untuk menganalisis probabilitas kegagalan dan indeks keandalan struktur. Indeks keandalan  $\beta$  dihitung dengan membandingkan rata-rata fungsi batas dengan simpangan baku fungsi batas, yang dapat dituliskan dalam Persamaan 2.

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (2)$$

di mana:

- $\mu_g$  adalah rata-rata dari fungsi batas,
- $\sigma_g$  adalah simpangan baku dari fungsi batas.

Indeks keandalan ini memberikan ukuran seberapa besar jarak antara nilai rata-rata fungsi batas dengan titik kegagalan dalam satuan standar deviasi. Semakin besar nilai  $\beta$  (beta), semakin handal struktur tersebut. Dalam penelitian ini, analisis keandalan dilakukan dengan mempertimbangkan variabilitas momen resistensi  $R$  dan momen beban  $S$ , yang keduanya dianggap mengikuti distribusi normal. Simulasi Monte Carlo juga digunakan dalam penelitian ini untuk memperkirakan probabilitas kegagalan berdasarkan sampel acak dari variabel-variabel yang terlibat. Simulasi ini melibatkan pengambilan sampel acak dari distribusi normal untuk momen resistensi dan momen beban, kemudian menghitung nilai fungsi batas untuk setiap sampel. Probabilitas kegagalan dihitung sebagai proporsi sampel yang menghasilkan nilai  $g(R, S) < 0$ . Pendekatan ini memungkinkan verifikasi hasil perhitungan analitis dan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang ketidakpastian dalam desain struktur. Selain itu, faktor sensitivitas juga dianalisis untuk mengukur pengaruh ketidakpastian dalam momen resistensi  $R$  dan momen beban  $S$  terhadap keandalan struktur. Faktor sensitivitas dihitung dengan menggunakan Persamaan 3 untuk momen resistensi dan Persamaan 4 untuk momen beban.

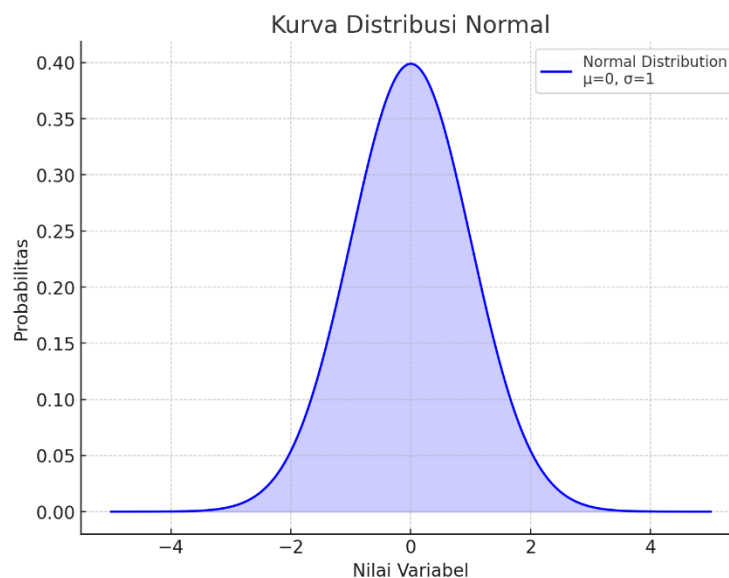
$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sigma_g} \quad (3)$$

$$\alpha_S = \frac{-\sigma_S}{\sigma_g} \quad (4)$$

di mana:

- $\alpha_R$  adalah faktor sensitivitas untuk momen resistensi,
- $\alpha_S$  adalah faktor sensitivitas untuk momen beban.

Faktor sensitivitas ini memberikan informasi mengenai seberapa besar ketidakpastian dalam masing-masing variabel mempengaruhi keandalan struktur. Jika  $\alpha_S$  lebih besar dari  $\alpha_R$ , maka ketidakpastian dalam momen beban lebih berpengaruh terhadap keandalan struktur dibandingkan ketidakpastian dalam momen resistensi. Sebagai ilustrasi, Gambar 1 menunjukkan kurva distribusi normal secara umum yang digunakan dalam analisis probabilitas. Kurva ini menggambarkan bagaimana distribusi normal digunakan untuk mencari probabilitas kegagalan, dengan area di bawah kurva yang merepresentasikan kemungkinan terjadinya suatu peristiwa. Dalam konteks ini, distribusi normal digunakan untuk menggambarkan ketidakpastian dalam variabel seperti momen resistensi dan momen beban yang diterima oleh struktur.



Gambar 1. Kurva distribusi normal untuk analisis probabilitas

### III. METODE

#### Pendekatan Probabilistik

Dalam penelitian ini, momen resistensi  $R$  dan momen beban  $S$  diasumsikan mengikuti distribusi normal dengan parameter rata-rata dan standar deviasi tertentu. Informasi mengenai momen resistensi dan momen beban yang digunakan dalam analisis ini disajikan dalam Tabel 1. Tabel ini menunjukkan nilai rata-rata dan standar deviasi untuk momen resistensi dan momen beban yang digunakan dalam perhitungan analisis keandalan. Kedua variabel tersebut akan digunakan dalam simulasi Monte Carlo untuk memperkirakan probabilitas kegagalan dan indeks keandalan balok beton.

#### Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo adalah metode yang digunakan untuk memperkirakan probabilitas kegagalan dengan menghasilkan sampel acak dari distribusi normal untuk momen resistensi dan momen beban. Proses simulasi Monte Carlo ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pengambilan Sampel Acak: Sampel acak diambil untuk momen resistensi ( $R$ ) dan momen beban ( $S$ ) menggunakan distribusi normal. Dalam penelitian ini, 100,000 nilai acak dihasilkan menggunakan perangkat lunak *Excel* untuk mendekati distribusi normal masing-masing variabel. Nilai-nilai ini digunakan untuk mewakili variasi yang mungkin terjadi pada momen resistensi dan momen beban dalam kehidupan nyata.
2. Perhitungan Fungsi Batas: Setelah sampel acak diambil, fungsi batas  $g(R, S) = R - S$  dihitung untuk setiap pasangan nilai  $R$  dan  $S$ . Nilai-nilai fungsi batas ini digunakan untuk

mengevaluasi apakah struktur mengalami kegagalan atau tidak.

3. Penentuan Probabilitas Kegagalan: Probabilitas kegagalan ( $P_f$ ) dihitung sebagai proporsi dari sampel yang menghasilkan nilai  $g(R, S) < 0$ , yang menunjukkan bahwa momen beban melebihi momen resistensi dan menyebabkan kegagalan struktur. Probabilitas ini memberikan gambaran tentang tingkat risiko kegagalan yang dihadapi oleh struktur.

Simulasi Monte Carlo memungkinkan kita untuk melakukan evaluasi yang lebih realistis terhadap keandalan struktur dengan memperhitungkan variasi dalam momen resistensi dan beban yang diterima oleh struktur.

#### Analisis Sensitivitas

Faktor sensitivitas digunakan untuk mengukur pengaruh ketidakpastian dalam momen resistensi ( $R$ ) dan momen beban ( $S$ ) terhadap keandalan struktur. Faktor sensitivitas dihitung untuk masing-masing variabel menggunakan rumus yang telah ditampilkan di Persamaan 3 dan Persamaan 4 pada Tinjauan Pustaka.

#### Validasi Hasil

Hasil yang diperoleh dari simulasi Monte Carlo akan dibandingkan dengan perhitungan probabilitas kegagalan yang dilakukan secara analitis menggunakan pendekatan probabilistik. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengandalkan simulasi untuk menghasilkan hasil, tetapi juga memverifikasi keakuratannya menggunakan metode perhitungan analitis untuk memastikan kesahihan dan konsistensi hasil yang diperoleh.

Tabel 1. Parameter momen resistensi dan momen beban

Variabel	Rata-rata ( $\mu$ ) [kNm]	Standar Deviasi ( $\sigma$ ) [kNm]
Momen Resistensi ( $R$ )	200	20
Momen Beban ( $S$ )	150	30

### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo dilakukan dengan menggunakan 100,000 sampel acak untuk momen resistensi  $R$  dan momen beban  $S$ , yang mengikuti distribusi normal dengan parameter yang telah ditentukan sebelumnya (lihat Tabel 1). Proses simulasi bertujuan untuk memperkirakan probabilitas kegagalan balok beton berdasarkan variabilitas momen resistensi dan momen beban.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa probabilitas kegagalan  $P_f$  balok beton yang dianalisis adalah sekitar 8,40%. Perlu dicatat bahwa karena penggunaan nilai acak dalam simulasi Monte Carlo, hasil probabilitas ini dapat bervariasi sedikit setiap kali dilakukan perhitungan ulang di *Excel*. Nilai probabilitas ini dihitung sebagai proporsi dari sampel yang menghasilkan  $g(R, S) < 0$ , yang menunjukkan bahwa momen beban

melebihi momen resistensi pada struktur tersebut, mengarah pada kegagalan struktur.

#### Pendekatan Probabilistik Manual

Sebagai perbandingan, probabilitas kegagalan dapat dihitung secara manual menggunakan pendekatan probabilistik dengan menggunakan fungsi distribusi kumulatif normal standar  $\Phi$ . Berdasarkan perhitungan sebelumnya, indeks keandalan  $\beta$  dihitung sebagai 1,37. Dengan menggunakan fungsi distribusi kumulatif normal standar, probabilitas kegagalan ( $P_f$ ) dapat dihitung sebagai berikut:

$$P_f = \Phi(-\beta) = \Phi(-1,37)$$

Dengan menggunakan kalkulator statistik atau tabel distribusi normal standar, didapatkan:

$$P_f = \Phi(-1,37) \approx 0,0853 = 8,53\%$$

Ini menunjukkan bahwa hasil probabilitas kegagalan yang dihitung secara analitis adalah sekitar 8,53%, yang sangat mendekati hasil simulasi Monte Carlo yang diperoleh sebelumnya (8,40%). Meskipun ada sedikit perbedaan karena variasi dalam nilai acak yang digunakan dalam simulasi, kedua metode memberikan hasil yang konsisten, yang menunjukkan validitas dari pendekatan probabilistik dan simulasi Monte Carlo dalam analisis keandalan struktur.

#### Indeks Keandalan dan Analisis Sensitivitas

Indeks keandalan  $\beta$  dihitung untuk menilai tingkat keamanan struktur dengan membandingkan nilai rata-rata fungsi batas dengan simpangan baku fungsi batas. Berdasarkan hasil simulasi dan perhitungan analitis, indeks keandalan balok beton yang dihitung adalah 1,37. Nilai ini menunjukkan bahwa struktur tersebut memiliki keandalan yang cukup rendah, karena nilai  $\beta$  yang lebih kecil dari nilai target yang disarankan untuk kondisi batas ultimate, yaitu sekitar 3,5. Oleh karena itu, desain balok beton yang dianalisis belum memenuhi standar keandalan yang diinginkan. Faktor

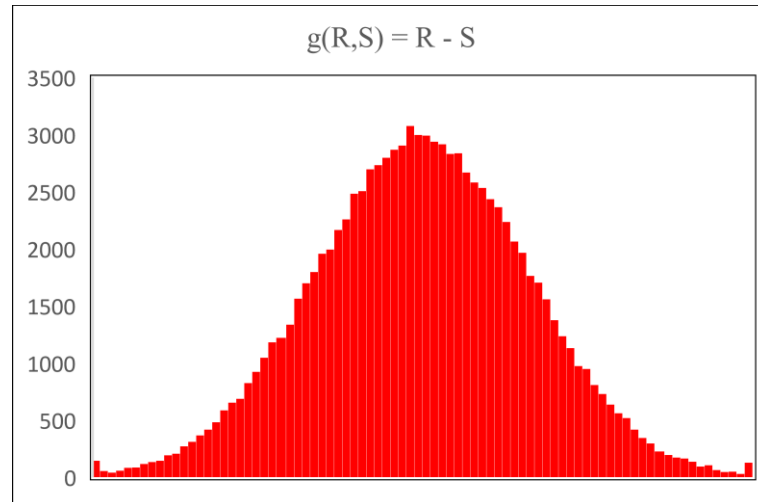
sensitivitas untuk momen resistensi  $R$  dan momen beban  $S$  dihitung untuk menentukan variabel mana yang paling berpengaruh terhadap keandalan struktur. Berdasarkan perhitungan faktor sensitivitas yang merujuk pada Persamaan 3 dan Persamaan 4 di Tinjauan Pustaka, diperoleh nilai faktor sensitivitas sebagai berikut:

- Faktor sensitivitas untuk momen resistensi ( $\alpha_R$ ): 0,55
- Faktor sensitivitas untuk momen beban ( $\alpha_S$ ): -0,83

Hasil ini menunjukkan bahwa ketidakpastian dalam momen beban memiliki dampak yang lebih besar terhadap keandalan struktur dibandingkan dengan ketidakpastian dalam momen resistensi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keandalan struktur, lebih efektif untuk mengurangi ketidakpastian pada momen beban, misalnya dengan memperbaiki akurasi estimasi beban yang diterima oleh struktur.

#### Perbandingan dengan Metode Deterministik

Sebagai perbandingan, faktor keamanan deterministik ( $SF$ ) dihitung dengan menggunakan nilai rata-rata momen resistensi dan momen beban. Berdasarkan perhitungan, diperoleh faktor keamanan  $SF$  sebesar 1,33. Meskipun faktor keamanan ini lebih besar dari 1, yang menunjukkan bahwa struktur secara teori aman, analisis keandalan probabilistik menunjukkan bahwa probabilitas kegagalan tetap ada. Hal ini menggarisbawahi pentingnya mempertimbangkan variabilitas dan ketidakpastian dalam desain struktur, di mana metode probabilistik memberikan gambaran yang lebih akurat tentang kemungkinan kegagalan daripada metode deterministik yang hanya mengandalkan nilai rata-rata. Untuk memperjelas hasil analisis, Gambar 2 menunjukkan grafik hasil simulasi Monte Carlo yang menggambarkan distribusi nilai  $g(R, S) = R - S$  berdasarkan 100,000 sampel acak. Grafik ini menunjukkan bagaimana nilai fungsi batas  $g(R, S)$  tersebar dalam interval yang berbeda, dengan frekuensi untuk setiap interval.



Gambar 2. Grafik hasil simulasi Monte Carlo – Distribusi  $g(R, S) = R - S$

Selain itu, Tabel 2 menampilkan hasil perhitungan probabilitas kegagalan, indeks keandalan, dan faktor sensitivitas yang diperoleh

dari simulasi Monte Carlo dan perhitungan analitis.

Tabel 2. Hasil simulasi Monte Carlo dan perhitungan keandalan

Parameter	Nilai
Probabilitas Kegagalan (Pf)	0,084
Indeks Keandalan ( $\beta$ )	1,37
Faktor Sensitivitas $\alpha R$	0,55
Faktor Sensitivitas $\alpha S$	-0,83
Faktor Keamanan (SF)	1,33

### V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pendekatan probabilistik dengan simulasi Monte Carlo memberikan gambaran yang lebih realistis tentang keandalan balok beton dibandingkan dengan pendekatan deterministik. Hasil simulasi menunjukkan probabilitas kegagalan sekitar 8,40%, yang sebanding dengan perhitungan manual menggunakan distribusi normal standar, yaitu 8,53%. Indeks keandalan ( $\beta$ ) yang dihitung adalah 1,37, yang menunjukkan bahwa struktur yang dianalisis belum memenuhi standar keandalan yang diinginkan, dengan target  $\beta$  sekitar 3,5. Faktor sensitivitas untuk momen resistensi ( $\alpha R$ ) dan momen beban ( $\alpha S$ ) menunjukkan bahwa ketidakpastian pada momen beban memberikan dampak yang lebih besar terhadap keandalan struktur dibandingkan dengan momen resistensi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keandalan struktur, disarankan untuk mengurangi ketidakpastian dalam estimasi beban, baik melalui perbaikan dalam akurasi perhitungan maupun dalam pengendalian kualitas material. Metode probabilistik dan simulasi Monte Carlo yang digunakan dalam penelitian ini

dapat diterapkan lebih luas untuk analisis keandalan struktur lainnya, memberikan gambaran lebih baik tentang ketidakpastian yang ada dalam desain dan memfasilitasi pengambilan keputusan yang lebih baik dalam perencanaan struktur yang aman dan efisien.

### DAFTAR PUSTAKA

- Cheng, J., Cai, C. S., & Xiao, R. C. (2007). Probabilistic response analysis of cracked prestressed concrete beams. *Advances in Structural Engineering*, 10(1), 1-10.
- Choi, B. S., & Kwon, Y. W. (2000). Probabilistic analysis of reinforced concrete beam and slab deflections using Monte Carlo simulation. *KCI Concrete Journal*, 12(2), 11-21.
- del Caño, A., Gómez, D., & de la Cruz, M. P. (2012). Uncertainty analysis in the sustainable design of concrete structures: A probabilistic method. *Construction and Building Materials*, 37, 865-873.
- Dewi, S. M., Dobana, K., & Zacoeb, A. (2018). *Keandalan Struktur dan Infrastruktur*. Universitas Brawijaya Press.
- Eamon, C. D., & Jensen, E. (2012). Reliability analysis of prestressed concrete beams exposed to fire. *Engineering Structures*, 43, 69-77.
- Hasibuan, S. A. R. S., Notodiharjo, F., Bella, F., Bayu, A., & Dos Santos, J. (2020). Perbandingan Analisis Kapasitas Beban Maksimum Silinder Beton antara

- SNI 2847: 2019 dan Simulasi Monte Carlo. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 9(2), 114-126.
- Hasyim, W. (2015). Keandalan komponen struktur kolom gedung dengan kerusakan dan penurunan pondasi (Studi Kasus: Gedung Perpustakaan Universitas Wiralodra, Indramayu). *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 1(2), 52-64.
- Hasyim, W. (2024). Keandalan lentur balok kastela dengan simulasi Monte Carlo. *Media Teknik Sipil*, 22(2), 59-67.
- Khaleel Ibrahim, S., & Movahedi Rad, M. (2023). Reliability based probabilistic numerical plastically limited analysis of reinforced concrete haunched beams. *Scientific Reports*, 13(1), 2670.
- Kirk, B. G., & da Silva, L. A. (2016). Reliability analysis of a steel beam using the monte carlo method. *Revista Interdisciplinar De Pesquisa Em Engenharia*, 2, 15-25.
- Lee, T. H., & Mosalam, K. M. (2004). Probabilistic fiber element modeling of reinforced concrete structures. *Computers & Structures*, 82(27), 2285-2299.
- Lu, R., Luo, Y., & Conte, J. P. (1994). Reliability evaluation of reinforced concrete beams. *Structural Safety*, 14(4), 277-298.
- Martins Gomes, H., & Miguel Awruch, A. (2005). Reliability analysis of concrete structures with neural networks and response surfaces. *Engineering computations*, 22(1), 110-128.
- Pattipawaej, O., & Budiarto, B. (2007). Respon struktur dua derajat kebebasan dengan kekakuan sebagai parameter ketidakpastian. *Jurnal Teknik Sipil*, 3(1), 14-27.
- Szép, J., Habashneh, M., Lógó, J., & Movahedi Rad, M. (2023). Reliability assessment of reinforced concrete beams under elevated temperatures: a probabilistic approach using finite element and physical models. *Sustainability*, 15(7), 6077.S