

Keandalan Lentur Balok Kastela dengan Simulasi Monte Carlo*The Flexural Reliability of Castellated Beams using Monte Carlo Simulation***Wachid Hasyim**

Teknik Sipil-Fakultas Teknik-Universitas Wiralodra Indramayu, Jawa Barat, Indonesia
Alamat korespondensi: Karanganyar, Kec. Indramayu, Kabupaten Indramayu, Jawa Barat
email: wachidhasyim@unwir.ac.id

Abstract

Castellated beams are a type of beam formed by modifying the WF profile by increasing the height of the profile. This modification increases the strength of the beam with the same profile weight. The advantages of castella beams include increasing the moment of inertia, increasing the strength of IWF beams and improving the ability to resist bending. This study aims to determine the value of structural failure probability and structural reliability index using Monte Carlo simulation. This study uses numerical analysis to measure the probability of failure and reliability of the structure, where the nominal value is calculated using the deterministic method and the reliability analysis uses the probabilistic method. The probability of failure was calculated by calculating the number of failures over all trials while the structural reliability index was measured using a specific equation. The results showed that the minimum and maximum nominal moments were 5651064 kgm and 6907704 kgm, respectively. The minimum and maximum failure probability values were 0.00018 and 0.000199, respectively. The minimum and maximum reliability indices are 3.5404 and 3.5569, respectively. In addition, the opening/profile height ratio (D_s/D_c) value is optimal at 0.18, and will be reliable as long as the beam bending and shear capacity values exceed the ultimate load value.

Keywords: *Castellated Beam; Reliability Analisis; Monte Carlo Simulation; Probability Of Failure; Reliability Index*

Abstrak

Balok kastela merupakan jenis balok yang terbentuk dari modifikasi profil WF dengan peningkatan ketinggian profilnya. Modifikasi ini meningkatkan kekuatan balok dengan berat profil yang sama. Keunggulan balok kastela termasuk meningkatkan efisiensi desain dengan momen inersia besar, meningkatkan kekuatan balok IWF dan meningkatkan kemampuan menahan lentur. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai probabilitas kegagalan struktur dan indeks keandalan struktur menggunakan simulasi Monte Carlo. Penelitian ini menggunakan analisis numerik untuk mengukur probabilitas kegagalan dan keandalan struktur, dimana nilai nominal dihitung menggunakan metode deterministik dan analisis keandalan menggunakan metode probabilistik. Nilai-nilai momen balok kastela didapatkan dengan menghitung tinggi bukaan, tinggi profil kastela, inersia profil kastela, dan modulus plastis profil kastela berdasarkan persamaan tertentu. Probabilitas kegagalan dihitung dengan menghitung jumlah kegagalan terhadap seluruh percobaan sedangkan indeks keandalan struktur diukur menggunakan persamaan tertentu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai momen nominal minimum dan maksimum masing-masing sebesar 5651064 kgm dan 6907704 kgm. Nilai probabilitas kegagalan minimum dan maksimum masing-masing sebesar 0.00018 dan 0.000199. Indeks keandalan minimum dan maksimum masing-masing sebesar 3.5404 dan 3.5569. Selain itu, nilai rasio tinggi bukaan/tinggi profil (D_s/D_c) optimal pada nilai 0.18, serta akan andal selama nilai kapasitas lentur dan geser balok melebihi nilai beban ultimit.

Kata Kunci: Balok Kastela; Analisis Keandalan; Simulasi Monte Carlo; Probabilitas Kegagalan; Indeks Keandalan

Please cite this article as:

Hasyim, W. (2024). Keandalan Lentur Balok Kastela dengan Simulasi Monte Carlo. *Media Teknik Sipil*, 22(2), 59-67. <https://doi.org/10.22219/jmts.v22i2.29839>

PENDAHULUAN

Balok kastela adalah jenis balok baja dimana web profil baja dipotong untuk membentuk lubang zigzag sepanjang web profil baja (Hocking, 2020). Balok kastela memiliki banyak keuntungan, diantaranya meningkatkan efisiensi desain. Peningkatan efisiensi desain disebabkan oleh momen inersia besar tanpa penambahan berat balok sendiri (Muhtarom, 2015). Balok kastela dinilai lebih kuat dan kaku dibandingkan dengan balok konvensional sebab dengan ketinggian profil yang ditingkatkan dapat menghasilkan momen inersia dan tahanan momen yang lebih besar (Hayati, 2013; Hocking, 2020).

Balok kastela dinilai lebih menguntungkan sebab kemampuan menahan lentur lebih tinggi dikarenakan peningkatan momen inersia akibat peninggian balok (Priskasari et al., 2018). Selain itu, balok kastela lebih ekonomis dan kuat jika dibandingkan dengan profil IWF tanpa treatment (Hocking, 2020).

Selain kekuatan, kekakuan balok kastela cukup tinggi dibandingkan profil asal. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa jarak antar lubang yang optimum adalah 200 mm dengan nilai kekakuan sebesar 1,5 kali lipat dari balok baja IWF (Partono et al., 2018).

Kekuatan dan kekakuan komponen struktur harus dapat dipenuhi pada setiap desain struktur. Selain itu, keandalan komponen struktur harus dapat dipenuhi sebab kegagalan pada komponen struktur tidak diijinkan terjadi pada saat masa layan. Pada komponen balok, kekuatan lentur mutlak dipenuhi selain kuat geser dan lendutan.

Penelitian terdahulu membandingkan tentang kuat lentur balok kastela bukaan circular menggunakan software ANSYS Workbench dan manual ditemukan bahwa hasil analisis software dan manual tidak terlampu berbeda (Alghifari & Desimaliana, 2023). Perbandingan kuat lentur dan defleksi bukaan kastela *CSB* (*Castellated Steel Beam*) berupa bukaan web hexagonal, lingkaran, dan diamond menggunakan software FEM Abaqus ditemukan bahwa bukaan diamond lebih baik dengan perbedaan peningkatan kapasitas beban 13.72% dan penurunan lendutan 36.14% (Patil & Kumbhar, 2023). Perbandingan kuat lentur balok baja bukaan hexagonal dan lingkaran dibandingkan

dengan pengujian empiris dan analisis numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS didapatkan nilai optimal rasio D_s/D_c pada balok kastela bukaan lingkaran sebesar 0.71, sedangkan pada bukaan heksagonal sebesar 0.19 pada sudut bukaan 45° (Barkiah & Darmawan, 2021). Perbandingan kinerja balok kastela dengan variasi bukaan terhadap beban siklik quasistatic diidentifikasi menggunakan analisis numeris Metode Elemen Hingga (MEH) (Frans, 2020).

Analisis numeris MEH dilakukan secara manual maupun dengan software, sementara hasil pengujian eksperimental mengkonfirmasi perilaku dari balok kastela. Pendekatan analisis perilaku balok kastela pada penelitian terdahulu menggunakan analisis deterministik dimana analisis dilakukan dengan memperhitungkan satu parameter representatif dari kasus yang ditinjau.

Pada penelitian ini, digunakan pendekatan analisis yang berbeda, yaitu analisis probabilistik. Analisis probabilistik dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan realistis dibandingkan dengan analisis deterministik, karena mempertimbangkan variasi dan ketidakpastian yang mungkin terjadi (Rofikun et al., 2019).

Keandalan lentur dari balok kastela dapat diukur menggunakan Simulasi Monte Carlo. Simulasi dilakukan dengan memberikan fungsi persamaan kuat batas keandalan dan pembangkitan data acak simulasi berdasarkan probabilitas variabel data yang menyusun persamaan kuat batas (Setiawan, 2006). Penelitian yang mengeksplorasi pengaruh variasi ketebalan lapisan dan modulus elastisitas material perkerasan menggunakan simulasi Monte Carlo menunjukkan bahwa perubahan koefisien variasi (COV) memengaruhi keandalan perkerasan lentur, khususnya pada ketebalan dan modulus elastis lapisan atas (Toan et al., 2023). Simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi keterkaitan keandalan perkerasan beton dengan faktor keamanan (SF) menunjukkan bahwa metode ini lebih konsisten secara umum serta keberhasilan atau kegagalan perkerasan lentur bergantung pada akurasi prediksi yang dipengaruhi oleh data material dan lalu lintas yang terjadi (Ioannides & Tingle, 2021). Analisis keandalan rangka beton bertulang dengan Metode Elemen Hingga (MEH) untuk mengevaluasi ketidakpastian respon struktur

terhadap gempa menggunakan pendekatan probabilistik menunjukkan bahwa analisis keandalan dengan MEH dalam konteks *Probabilistic Seismic Performance-Based Engineering (PBEE)* dapat mengukur ketidakpastian geometri dan material struktur (Grubišić et al., 2023). Metode sampling Simulasi Monte Carlo direkomendasikan, walaupun metode *First Order Reliability Method (FORM)* juga dapat diterapkan dengan tingkat akurasi yang tinggi.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan berupa analisis numerik untuk mengukur nilai keandalan struktur dan probabilitas kegagalan. Balok kastela yang dibentuk dari hasil pemotongan profil yang disusun ulang harus direncanakan terhadap kekuatan dan kekakuan yang dipersyaratkan oleh SNI 03-1729-2020.

Desain balok kastela diawali dengan penentuan tinggi bukaan. Pada balok dengan lubang di badan atau kastela, maka tinggi lubang, tinggi balok kastilasi, inersia profil, dan momen plastis profil kastela dapat dihitung (N. I. K. Astariani, 2014).

Balok baja yang dianalisis merupakan balok dengan profil WF 500x200x8x10 dibentuk menjadi kastela heksagonal dengan membuat tinggi bukaan lubang (D_s) secara inkremental dari 100 mm hingga 380 mm. Tinggi bukaan dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$D_s = 2 \left(A - (2t_f + 2D_{tee}) \right) \quad (1)$$

Tinggi profil kastela :

$$D_c = (2t_f) + (2D_{tee}) + D_s \quad (2)$$

Inersia profil profil kastela :

$$I_x = I_{br} - I_{op} \quad (3)$$

Modulus plastis profil kastela :

$$Z_x = \left\{ t_f B (D_c - t_f) \right\} + \left\{ \left(\frac{D_c - 2t_f - D_s}{2} \right) \right\} + \left\{ t_w \left(\frac{D_c - 2t_f - D_s}{2} \right) \right\} \quad (4)$$

Keterangan :

D_s : tinggi bukaan (mm)

D_{tee} : tinggi sisi bawah profil terhadap bukaan (mm)

D_c : tinggi profil kastilasi (mm)

t_f : tinggi sayap profil (mm)

A : luas profil (mm^2)

B : lebar profil (mm)

I_x : inersia arah x (mm^4)

I_{br} : inersia bruto (mm^4)

I_{op} : inersia bukaan (mm^4)

Z_x : modulus plastis sumbu x (mm^3)

Momen nominal lentur

Tahanan nominal lentur atau momen nominal lentur dari balok harus dipilih berdasarkan nilai momen nominal kritis dari dua kondisi, yaitu leleh dan tekuk torsi lateral (Badan Standardisasi Nasional, 2020).

Momen nominal untuk balok terkekang lateral dengan penampang kompak dalam keadaan leleh (momen plastis) menggunakan persamaan:

$$M_n = M_p = Z_x \cdot F_y \quad (5)$$

Bresing pada balok dianggap seperti pada balok terbreis yang dapat menahan perpindahan lateral sayap atau menahan puntir pada sisi melintang balok (Badan Standardisasi Nasional, 2020).

Kondisi tekuk lentur dapat dihitung ketika $L_r < L_b < L_r$, menurut persamaan:

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (6)$$

Keterangan :

M_n : momen nominal lentur (kNm)

M_p : momen plastis (kNm)

F_y : kuat leleh baja (Mpa)

Z_x, S_x : modulus penampang plastis sumbu x (mm^3)

C_b : faktor modifikasi tekuk torsi lateral

L_b : panjang antara titik-titik (mm)

L_p : batas panjang tak terbreis lateral untuk keadaan batas leleh (mm)

L_r : batas panjang tak terbreis untuk keadaan batas pada tekuk torsi-lateral inelastik (mm).

Pada syarat batas $L_b > L_r$, persamaan yang digunakan untuk menghitung momen nominal adalah:

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \quad (7)$$

Pada syarat batas $L_b \leq L_p$, maka keadaan batas tekuk torsi lateral tidak berlaku.

Indeks keandalan

Indeks keandalan dapat diukur menggunakan persamaan (Bushinskaya & Timashev, 2017; Stanojev & Stojic, 2014; Suprobo, 2017) :

$$\beta = \frac{\mu Z}{\sigma Z} \quad (8)$$

Selain itu, nilai indeks keandalan dapat dihasilkan berdasarkan nilai probabilitas kegagalan (Adewumi et al., 2017; Ghasemi, 2014; Ghasemi & Nowak, 2017; Suprobo, 2017) :

$$\beta = -\Phi^{-1}[P_f] \quad (9)$$

Selanjutnya berdasarkan persamaan 8, dapat diuraikan menjadi beberapa persamaan sebagai berikut.

$$\beta = \frac{\mu R - \mu S}{\sqrt{\sigma R^2 + \sigma S^2}} \quad (10)$$

$$\mu R = \lambda_R \cdot R_n \quad (11)$$

$$\mu S = \lambda_S \cdot S_n \quad (12)$$

$$\sigma R = \lambda_R \cdot R_n \cdot V_R \quad (13)$$

$$\sigma S = \lambda_S \cdot S_n \cdot V_S \quad (14)$$

Keterangan

- β : indeks reliabilitas/keandalan
 μ_R dan μ_S : rerata tahanan dan rerata beban
 σ_R dan σ_S : simpangan baku tahanan dan beban
 λ_R dan λ_S : faktor bias tahanan dan beban
 V_R dan V_S : koefisien variasi beban dan tahanan

Nilai parameter statistik tahanan lentur balok baja berupa I_R dan V_R masing-masing sebesar 1.07 dan 0.13 (Galambos et al, 1982; Nowak, 2017b) sedangkan nilai faktor bias (λ_s) dan koefisien variasi (V_s) dari variabel beban masing-masing sebesar 1.05 dan 0.1 (Nowak, 2017a).

Simulasi monte carlo

Simulasi Monte Carlo merupakan perhitungan matematis yang memprediksi kemungkinan hasil dari suatu peristiwa dengan ketidakpastian. Simulasi tersebut dapat dilakukan untuk mendapatkan nilai numerik walaupun tanpa melakukan tes fisik (Pranata & Tanuwijaya, 2019). Pada simulasi Monte Carlo, keakuratan hasil tergantung

pada jumlah percobaan yang dilakukan. Semakin banyak percobaan yang dilakukan, semakin akurat hasil yang diperoleh. Kerangka kerja dari simulasi monte carlo dapat dilihat pada Gambar 1.

Kuat batas lentur

Kuat batas yang digunakan untuk mengukur tingkat keandalan lentur balok kastela didapatkan dengan membandingkan nilai tahanan terhadap nilai beban. Persamaan kuat batas yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Z = \frac{R}{S} \quad (15)$$

Keterangan :

- Z : Nilai kuat batas
R : Nilai tahanan
S : Nilai beban

Nilai Z akan menggambarkan kemampuan struktur dalam menerima beban. Nilai kuat batas dapat memiliki besaran lebih dari 1 atau kurang sehingga besaran tersebut menjadi ukuran kegagalan struktur dalam menerima beban. Selanjutnya, persamaan kuat batas digunakan untuk mengukur tingkat keandalan struktur dimana nilai-nilai nominal dari R dan S diuji menggunakan data yang banyak dan dengan distribusi probabilitas data tertentu.

Probabilitas kegagalan

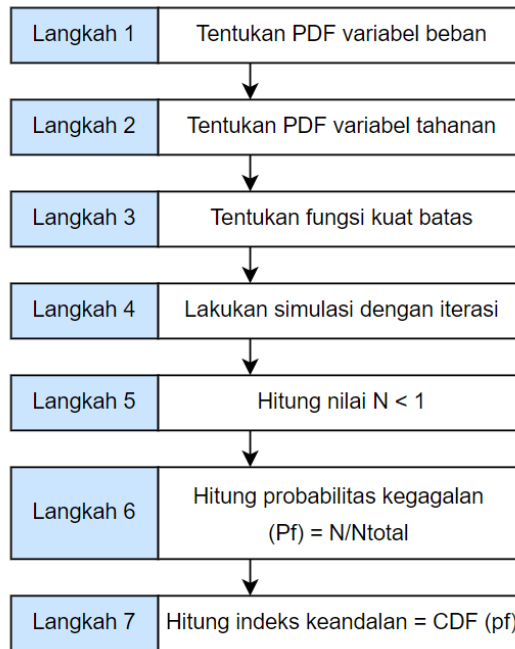
Probabilitas kegagalan merupakan ukuran kemungkinan kejadian yang tidak diharapkan atau kegagalan dalam sebuah komponen atau sistem. Probabilitas kegagalan menunjukkan kemampuan struktur dalam performa layanan sesuai fungsi yang direncanakan. Pengukuran dilakukan dengan memperhatikan jenis distribusi data tahanan maupun beban serta nilai probabilitas dari data.

Persamaan probabilitas kegagalan dapat diukur dengan menghitung jumlah kegagalan ($Z < 1$) terhadap keseluruhan data percobaan (Devi, 2023) :

$$P_f = \frac{N_i}{\sum N} \quad (16)$$

Keterangan :

- N_i : jumlah simulasi dengan $Z < 1$
N : jumlah simulasi total



Gambar 1. Kerangka kerja Simulasi Monte Carlo

Probabilitas kegagalan juga dapat dihitung dengan memperhatikan hubungan dengan indeks keandalan. Probabilitas kegagalan dihitung menurut persamaan berikut (Adewumi et al., 2017; Bushinskaya & Timashev, 2017; Ghasemi & Nowak, 2017; Stanojev & Stojic, 2014; Suprobo, 2017) :

$$Pf = \Phi [-\beta] \tag{17}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan dilakukan pada balok kastela baik bersifat deterministik maupun probabilistik.

Nilai momen ultimit

Momen ultimit balok kastela yang bekerja pada profil IWF 500x200x8x10 berdasarkan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 1 (Astariani, 2014).

Tabel 1. Nilai momen ultimit dari profil baja I WF 500x200

No	Ds (mm)	Dc (mm)	Mu (kg.cm)
1.	100	550	5085957,60
2.	120	560	5187801,60
3.	140	570	5286405,60
4.	160	580	5381769,60
5.	180	590	5473893,60
6.	200	600	5562777,60
7.	220	610	5648421,60

No	Ds (mm)	Dc (mm)	Mu (kg.cm)
8.	240	620	5730825,60
9.	260	630	5809989,60
10.	280	640	5885913,60
11.	300	650	5958597,60
12.	320	660	6028041,60
13.	340	670	6094245,60
14.	360	680	6157209,60
15.	380	690	6216933,60

Nilai momen nominal lentur

Momen nominal balok kastela didapatkan dari perhitungan momen ultimit yang dibagi dengan nilai faktor reduksi sebesar 0,90. Momen lentur balok kastela dari profil IWF 500 x 200 x 8 x 10 berdasarkan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2 (Astariani, 2014).

Tabel 2. Nilai momen tahanan lentur dari profil baja I WF 500x200

No	Ds (mm)	Dc (mm)	Mn (kg.m)
1	100	550	5651064
2	120	560	5764224
3	140	570	5873784
4	160	580	5979744
5	180	590	6082104
6	200	600	6180864
7	220	610	6276024
8	240	620	6367584
9	260	630	6455544

No	Ds (mm)	Dc (mm)	Mn (kg.m)
10	280	640	6539904
11	300	650	6620664
12	320	660	6697824
13	340	670	6771384
14	360	680	6841344
15	380	690	6907704

Nilai kuat lentur yang akan dilakukan analisis keandalan, digunakan sebanyak 15 buah yang berbeda pada tinggi bukaan lubang kastela (Ds). Analisis yang dilakukan pada balok dengan bukaan setinggi 100 mm sampai 380 mm tidak didapati permasalahan, tetapi pada kenaikan berikutnya yaitu pada tinggi bukaan lubang dengan nilai Ds = 400 mm, didapati bahwa kapasitas geser profil kastela tidak memenuhi atau tidak mampu menahan beban geser ultimit. Berdasarkan hal tersebut, maka analisis keandalan balok kastela dengan profil IWF 500 x 200 x 8 x 10 dilakukan hanya pada bukaan setinggi 100 mm sampai 380 mm.

Besaran lain yang dijadikan pertimbangan dalam analisis berupa nilai rasio tinggi lubang/tinggi profil (Ds/Dc). Nilai rasio dari hasil perhitungan balok kastela didapati nilai antara 0.18 sampai 0.55. Hal tersebut tidak jauh berbeda dengan nilai rasio hasil penelitian yang dilakukan Barkiah dan Darmawan (2021), yang menyebutkan bahwa nilai optimal rasio Ds/Dc pada balok kastela bukaan lingkaran sebesar 0.71, sedangkan pada bukaan heksagonal sebesar 0.19 pada sudut bukaan 45°.

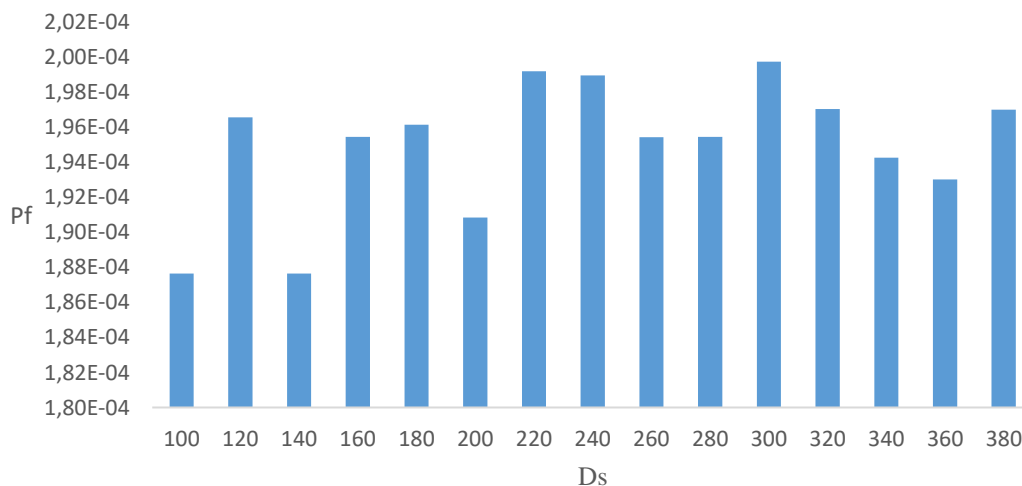
Nilai probabilitas kegagalan struktur

Probabilitas kegagalan diukur dengan melakukan Simulasi Monte Carlo, dimana pengujian dilakukan menggunakan data bangkitan angka acak sebanyak 10.000 data. Nilai probabilitas kegagalan balok kastela dapat dilihat pada Gambar 2.

Berdasarkan hasil analisis, nilai minimum dari probabilitas kegagalan adalah sebesar 0.00018 yang terjadi pada tinggi bukaan (Ds) sebesar 100 mm. selain itu, nilai Pf minimum terjadi pada Ds=100 mm dengan nilai sebesar 0.00018. Nilai maksimum dari probabilitas kegagalan terjadi pada nilai tinggi bukaan 300 mm, yaitu dengan nilai Pf = 0.000199. besaran nilai Pf akan mempengaruhi nilai indeks keandalan balok kastela.

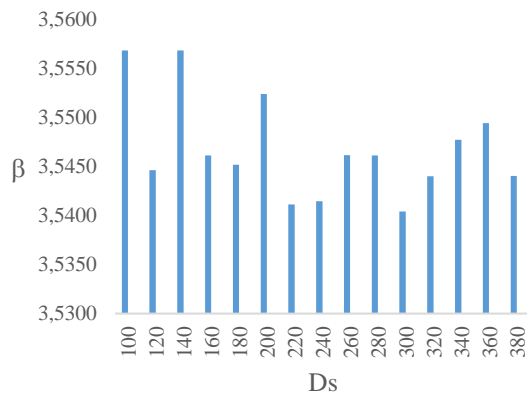
Nilai keandalan struktur

Berdasarkan hasil analisis probabilitas kegagalan dan indeks keandalan balok kastela, didapatkan nilai minimum dan maksimum yang terjadi pada balok dengan tinggi bukaan, Ds=300 mm dan Ds=100 mm. nilai indeks keandalan maksimum, $\beta=3.5569$ sedangkan nilai indeks keandalan minimum, $\beta=3.5404$. Selisih nilai indeks keandalan minimum dan maksimum sebesar 0.0165 sehingga dapat dianggap tidak terlalu signifikan secara khusus. Berdasarkan nilai tersebut, maka tinggi bukaan pada balok kastela tidak memberikan perbedaan keandalan terlalu tinggi.



Gambar 2. Tinggi bukaan dan probabilitas kegagalan

Nilai keandalan balok kastela secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tinggi bukaan dan indeks keandalan

Nilai indeks keandalan target dari struktur baru dengan konsekuensi kegagalan sedang dan kondisi normal adalah $\beta_T=3,3$ (Steenbergen, 2018). Berdasarkan nilai indeks keandalan target tersebut, maka balok kastela dengan profil IWF 500 x 200 x 8 x 10 dinyatakan aman sebab memiliki nilai β yang melebihi $\beta_T=3,3$. Nilai β hasil analisis memiliki variasi yang dipengaruhi oleh tinggi bukaan balok (D_s), sehingga apabila dikehendaki maka nilai tinggi bukaan minimum yaitu $D_s=100$ mm menjadi pilihan yang optimal disebabkan efektifitas dan efisiensi balok kastela.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, maka rasio D_s/D_c optimal pada nilai 0.18. hal tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil dari penelitian Barkiah dan Darmawan (2021) bahwa nilai rasio tinggi bukaan dan tinggi profil (D_s/D_c) sebesar 0.19.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, didapatkan beberapa hal yang menjadi kesimpulan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Nilai momen ultimit (M_u) terkecil dan terbesar dan masing-masing sebesar 5085957.6 kgm dan 6216933.6 kgm pada tinggi bukaan 100 mm dan 380 mm.
2. Nilai momen nominal (M_n) terkecil dan terbesar masing-masing sebesar 5651064 kgm dan 6907704 kgm pada tinggi bukaan 100 mm dan 380 mm.
3. Tinggi bukaan balok dibatasi oleh kemampuan balok dalam menerima beban geser ultimit.

4. Nilai probabilitas kegagalan lentur (P_f) terkecil dan terbesar masing-masing sebesar 0.00018 dan 0.000199 pada tinggi bukaan 100 mm dan 300 mm.
5. Nilai keandalan struktur terkecil dan terbesar pada kapasitas lentur masing-masing sebesar 3.5404 dan 3.5569 pada tinggi bukaan 300 mm dan 100 mm.
6. Nilai indeks keandalan target, $\beta_T=3,3$ dimana hasil analisis diasumsikan berupa struktur baru dengan konsekuensi kegagalan sedang dan dalam kondisi normal.
7. Nilai indeks keandalan optimal didapatkan pada nilai $D_s=100$ mm yaitu sebesar $\beta=3.5569$ dan dengan probabilitas kegagalan, $P_f=0.00018$.
8. Nilai rasio tinggi bukaan/tinggi profil D_s/D_c hasil analisis berkisar antara 0.18 sampai 0.55. Nilai rasio D_s/D_c optimal pada nilai 0.18 dengan tinggi bukaan, $D_s=100$ mm, Indeks keandalan, $\beta=3.5669$ dan probabilitas kegagalan (P_f)= $1.88.10^{-4}$.
9. Indeks keandalan (β) dan probabilitas kegagalan (p_f) dari balok kastela akan aman selama nilai kapasitas lentur dan geser balok melebihi nilai beban ultimit yang bekerja.

DAFTAR PUSTAKA

- Adewumi, O. J., Oluwatuyi, O. E. & Afolayan, O. J. (2017). Reliability assessment of BS 8110 (1997) ultimate limit state design requirements for reinforced concrete columns. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 11(3), 512–524.
- Alghifari, S. L. & Desimaliana, E. (2023). Analisis Kuat Lentur Balok Kastela Bukaan Lingkaran. 690–695.
- Astariani, N. K. (2014). ANALISIS TINGGI LUBANG BAJA KASTILASI DENGAN PENGAKU BADAN PADA PROFIL BAJA IWF 500 X 200. *GANEC SWARA*, 8(1), 96–102. <https://unmasmataram.ac.id/wp/wp-content/uploads/14.-Kadek-Astariani.pdf>
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural. *Sni 1729-2020*, 8, 1–336.
- Barkiah, I. & Darmawan, A. R. (2021). COMPARISON BEHAVIOR OF

- FLEXURAL CAPACITY CASTELLATED BEAM OF HEXAGONAL OPENING WITH CIRCLE OPENING. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IJCIET)*, 12(8). <https://doi.org/10.34218/ijciet.12.8.2021.003>
- Bushinskaya, V. A. & Timashev, S. A. (2017). Assessment of Probability of Failure of Building Structures in Uncertainty Conditions Assessment of Probability of Failure of Building Structures in Uncertainty Conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering PAPER*, 262, 1–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012056>
- Devi, M. T. (2023). *Reliability of Cantilever Steel Beam Using FOSM and Simulation Methods*. May.
- Frans, R. (2020). Analisis Perilaku Balok Kastella Dengan Variasi Jenis Bukaannya. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 4(2), 138–146. <https://doi.org/10.35334/be.v4i2.1382>
- Galambos et al, T. V. (1982). *Probability Based Load Criteria: Assessment of Current Design Practice*. 959–977.
- Ghasemi, S. H. (2014). *Target Reliability Analysis for Structures*.
- Ghasemi, S. H. & Nowak, A. S. (2017). Reliability index for non-normal distributions of limit state functions. *Structural Engineering and Mechanics*, 62(3), 365–372. <https://doi.org/10.12989/sem.2017.62.3.365>
- Grubišić, M., Ivošević, J. & Grubišić, A. (2023). RELIABILITY ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAME BY FINITE ELEMENT METHOD. *2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering – 2CroCEE*, 542–553. <https://doi.org/10.5592/CO/2CroCEE.2023.16>
- Hayati, M. N. (2013). Pengaruh Lebar Potongan Profil (e) Terhadap Perilaku Lentur Pada Balok Baja Kastella (Castellated Beam). *Jurnal Teknik Sipil*, 1–12.
- Hocking, B. (2020). Analisa Efisiensi Desain Antara Balok Kastella Dengan Balok Konvensional (Studi Kasus: Workshop Smelter Tanjung Uncang). *Journal of Civil Engineering and Planning*, 1(1), 16. <https://doi.org/10.37253/jcep.v1i1.732>
- Ioannides, A. M. & Tingle, J. S. (2021). Monte Carlo Simulation for Flexible Pavement Reliability. *Airfield and Highway Pavements 2021*, 13–25. <https://doi.org/10.1061/9780784483503.002>
- Muhtarom, A. (2015). *STUDI PERILAKU BALOK KASTELA BENTANG PENDEK MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA*. 4(1), 7–13.
- Nowak, A. S. (2017a). *Reliability of Structures – Part 4*.
- Nowak, A. S. (2017b). *Reliability of Structures – Part 5*.
- Partono, W., Hardiyati, S. & Budi, L. (2018). *Optimasi Distribusi Lubang Pada Balok Baja Kastela*. 39(1), 1–8. <https://doi.org/10.14710/teknik.v39n1.12234>
- Patil, S. S. & Kumbhar, P. D. (2023). Comparative study on the behaviour of castellated beams provided with hexagonal, circular, and diamond-shaped web openings. *Asian Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00780-5>
- Pranata, Y. A. & Tanuwijaya, P. S. (2019). Reliability of The Specific Gravity (SG) Value of Three Indonesian Hardwoods Using Experimental Test and Monte Carlo Simulation. *Jurnal Teknik Sipil*, 4(2), 125–134. <https://doi.org/10.28932/jts.v4i2.1302>
- Priskasari, E., Rahmadhani, N. R. & Wedyantadji, B. (2018). *PERENCANAAN STRUKTUR BAJA KOLOM ENCASE DAN BALOK CASTELLA PADA GEDUNG KULIAH TERPADU III FK UB DI RSSA MALANG DENGAN GAYA GEMPA DINAMIS*. 2(2), 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.36040/sondir.v2i2.2584>
- Rofikun, A., Sophian, R. I., Zakaria, Z. & Pranantya, P. A. (2019). Kesenjangan Batas Deterministik Vs Probabilistik Metode Morgenstern-Price Di Bendungan Nadra, Cilegon. *Padjadjaran Geoscience Journal*, Vol. 3 No.(2597–4033), 428–436.
- Setiawan, S. P. A. (2006). *Keandalan Struktur*

Balok Sederhana Dengan Simulasi Monte Carlo.

- Stanojev, M. & Stojic, D. (2014). Reliability analysis of structures. *Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering*, 12(3), 265–272. <https://doi.org/10.2298/FUACE1403265S>
- Steenbergen, R. D. J. M. (2018). *Target reliability of new and existing structures - A general framework for code making*. 63(3), 219–242.
- Suprobo, P. (2017). *Analisa Resiko dan Keandalan Edisi Ke 2* (Issue November).
- Toan, T. D., Long, N. H., Wong, Y. D. & Nguyen, T. (2023). Effects of variability in thickness and elastic modulus on the reliability of flexible pavement structural performance. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(2). <https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2039923>