

## Analisis Sensitivitas Kuat Leleh Tulangan Terhadap Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

Wachid Hasyim

Program Studi Teknik Sipil Universitas Wiralodra

Email: [wachidhasyim@unwir.ac.id](mailto:wachidhasyim@unwir.ac.id)

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v15i1.1223>

(Received: 23 December 2024 / Revised: 25 February 2025 / Accepted: 02 March 2025)

### Abstrak

Kuat lentur balok beton bertulangan tunggal dipengaruhi oleh karakteristik material baja tulangan, terutama kuat lelehnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sensitivitas kuat leleh ( $f_y$ ) baja tulangan terhadap kapasitas lentur ( $M_n$ ) balok beton, dengan mempertimbangkan ketidakpastian menggunakan metode simulasi Monte Carlo. Metode deskriptif numerik diterapkan untuk menghitung parameter statistik  $f_y$  dari data pengujian laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensitivitas kuat leleh bervariasi terkait dimensi balok, di mana balok B3 memiliki sensitivitas maksimum sebesar 1.70, menunjukkan potensi peningkatan kapasitas lentur yang signifikan. Kesimpulan dari penelitian ini menegaskan pentingnya pemilihan baja tulangan yang tepat untuk meningkatkan kinerja struktural. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mempertimbangkan variabel lain, seperti jenis tulangan dan kondisi beban, untuk mendapatkan gambaran kinerja yang lebih komprehensif.

Kata kunci: *kuat leleh, kuat lentur, analisis sensitivitas, ketidakpastian, simulasi Monte Carlo*

### Abstract

The flexural strength of singly reinforced concrete beams is influenced by the characteristics of the reinforcing steel, particularly its yield strength. This study aims to analyze the sensitivity of the yield strength ( $f_y$ ) of reinforcing steel to the flexural capacity ( $M_n$ ) of concrete beams, considering uncertainty using the Monte Carlo simulation method. A descriptive numerical method was applied to calculate the statistical parameters of  $f_y$  from laboratory test data. The study results indicate that the sensitivity of yield strength varies with the dimensions of the beams, where Beam B3 exhibits the maximum sensitivity of 1.70, indicating a significant potential increase in flexural capacity. The conclusion of this study emphasizes the importance of selecting the right reinforcing steel to enhance structural performance. Further research is recommended to consider other variables, such as the type of reinforcement and loading conditions, to obtain a more comprehensive performance overview.

Keywords: *yield strength, bending strength, sensitivity analysis, uncertainty, Monte Carlo simulation*

### 1. Latar Belakang

Kuat lentur balok beton bertulangan tunggal sangat dipengaruhi oleh karakteristik material baja tulangan, terutama kuat lelehnya. Baja tulangan dengan kuat leleh tinggi dapat meningkatkan kapasitas lentur balok beton, tetapi juga berisiko mengurangi daktilitas dan stabilitas struktur jika tidak dirancang dengan cermat (Hastono, 2017). Dalam praktik teknik sipil, pemilihan baja tulangan yang optimal menjadi penting untuk mencapai keseimbangan antara kapasitas lentur dan

keamanan struktur. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa baja mutu tinggi mampu meningkatkan kekuatan tarik dan lentur balok beton, namun memerlukan desain tulangan yang tepat untuk menghindari keruntuhan getas. Selain itu, faktor-faktor seperti rasio tulangan, dimensi balok, dan kualitas beton juga memengaruhi respons lentur balok.

Dalam konteks ini, analisis sensitivitas kuat leleh baja tulangan terhadap kuat lentur balok beton menjadi sangat penting untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter material terhadap perilaku struktur. Analisis sensitivitas terhadap kuat leleh baja tulangan sebagai variabel utama dalam desain balok beton bertulang sangat krusial untuk memahami kinerja struktur. Penelitian tentang analisis sensitivitas di bidang struktur telah dilakukan oleh (Sarkar and Dasgupta, 2024) dengan tujuan untuk menganalisis sensitivitas parameter permintaan teknik (EDP) pada bangunan dinding-rangka beton bertulang menggunakan pendekatan pembelajaran mesin berbasis regresi dan indeks sensitivitas Sobol.

Selanjutnya, penelitian oleh (Hastono, 2017) mengeksplorasi perilaku inelastik elemen balok beton bertulang yang menggunakan baja lunak dan baja mutu tinggi, menunjukkan bahwa kuat leleh mempengaruhi daktilitas dan rasio kuat tarik terhadap kuat leleh. Elfania Bastian meneliti pengaruh jenis tulangan, baik baja maupun GFRP, terhadap kinerja balok beton bertulang. Hasil analisis menunjukkan bahwa tulangan GFRP, meskipun memiliki elastisitas lebih rendah, dapat meningkatkan kapasitas beban hingga 24,27%, meskipun deformasi balok dengan tulangan GFRP lebih besar dibanding tulangan baja (Bastian, 2018). Penelitian oleh (Astuti, 2023) juga menekankan pentingnya mempertimbangkan faktor korosi pada baja tulangan, yang dapat mempengaruhi nilai kuat leleh dan kinerja balok beton bertulang.

Sementara itu, metode simulasi Monte Carlo banyak diterapkan di berbagai bidang untuk memodelkan dan menganalisis sistem yang melibatkan risiko dan ketidakpastian. Dalam rekayasa struktur, penelitian tentang keandalan balok baja kantilever menggunakan metode simulasi Monte Carlo menunjukkan tidak terdapat kesalahan yang signifikan (Devi, 2022). Namun, penelitian mengenai sensitivitas kuat leleh ( $f_y$ ) terhadap kuat lentur balok beton bertulang ( $M_n$ ) masih terbatas. Penelitian ini melengkapi kekosongan tersebut dengan memanfaatkan simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi sensitivitas parameter material terhadap perilaku struktural secara probabilistik.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan pada pemahaman terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang yang dipengaruhi oleh kuat leleh baja tulangan yang memiliki ketidakpastian nilai nominal. Meskipun demikian, pendekatan yang dapat digunakan untuk penyelesaian hal tersebut dapat dilakukan dengan pendekatan simulasi Monte Carlo, seperti yang telah diuraikan dalam penelitian oleh (Pan, 2017). Dengan demikian, Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sensitivitas kuat leleh baja tulangan terhadap kuat lentur balok beton bertulangan tunggal dengan Metode Simulasi Monte Carlo.

## **2. Metode Penelitian**

Metode yang digunakan pada penelitian berupa deskriptif numerik di mana masing-masing variabel penelitian ditampilkan dihitung secara numerik. Beberapa yang diperhatikan dalam penelitian berupa model struktur, persamaan yang digunakan, dan teknik analisis data.

Model yang digunakan berupa balok bertulangan tunggal dengan tumpuan sederhana. Parameter-parameter yang berpengaruh terhadap struktur berupa: lebar balok, tinggi efektif, kuat tekan beton dan kuat leleh tulangan baja dengan memperhitungkan nilai statistik rerata dan simpangan baku. Adapun parameter model yang digunakan adalah seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter model balok

No	b (mm)	d (mm)	As (mm <sup>2</sup> )	f <sup>'</sup> c (Mpa)	fy (Mpa)
1	350	650	3550	25	400
2	300	550	2800	25	400
3	250	400	1700	20	400

Nilai momen kuat lentur (Mn) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$Mn = As \cdot fy \left( d - \frac{As \cdot fy}{1,70 f_c b} \right) \quad (1)$$

di mana

- b = lebar balok (mm)
- d = tinggi efektif (mm)
- As = luas tulangan (mm<sup>2</sup>)
- fc = kuat tekan beton (Mpa)
- fy = kuat leleh baja (Mpa)

## 2.1 Analisis Sensitivitas

Pada penelitian ini, dilakukan analisis sensitivitas di mana kuat leleh (fy) merupakan variabel yang mempengaruhi nilai momen (Mn). Dengan demikian, fy merupakan variabel bebas dan Mn adalah variabel terikat. Analisis sensitivitas dapat didefinisikan sebagai analisis yang dilakukan untuk meninjau perubahan variabel terikat sebagai akibat dari perubahan pada variabel bebas dari sebuah persamaan. (Prasetya, Sri and Sugiyarto, 2017), (Hizkia Huwae, Santoso and Setiadi, 2019), dan (Isya, Sugiyarto and Harja, 2021). Analisis sensitivitas dilakukan dengan mempertimbangkan ketidakpastian dan variabilitas dari parameter kuat leleh baja. (Buwono *et al.*, 2024). Nilai kuat leleh baja (fy) secara statistik didapatkan berdasarkan sejumlah data atau dataset hasil pengujian kuat tarik dan leleh di laboratorium. Adapun parameter statistik yang dihitung berupa rerata (*mean*) dan simpangan baku (*standar deviation*). Selanjutnya, nilai Mn dihitung dengan memasukkan nilai fy hasil bangkitan acak menggunakan simulasi Monte Carlo. Selain itu, hasil analisis sensitivitas pada suatu persamaan dapat memberikan panduan untuk mengetahui hasil terbaik dari sebuah analisis. (Khasanah and Setiyadi, 2019). Adapun sensitivitas kuat leleh baja tulangan terhadap kuat lentur (Mn) dapat dihitung menggunakan persamaan 2 berikut.

$$\text{Sensitivitas} = \frac{\Delta M_n}{\Delta f_y} \quad (2)$$

$$\Delta Fy = F_{y1} - F_{y_{n_i}} \quad (3)$$

$$\Delta Mn = M_{n_i} - M_{n_1} \quad (4)$$

di mana

- $\Delta M_n$  = perubahan Mn
- $\Delta f_y$  = perubahan fy
- $M_{n_i}$  dan  $f_{y_i}$  = momen ke i dan kuat leleh ke i
- $M_{n_1}$  dan  $f_{y_1}$  = momen ke 1 dan fy ke 1

## 2.2 Tahapan analisis data

Penelitian ini dimulai dengan membangun model balok beton bertulang tunggal yang dirancang untuk merepresentasikan sistem struktural yang akan dianalisis. Model ini mencakup parameter-parameter utama seperti lebar balok ( $b$ ), tinggi efektif ( $d$ ), luas tulangan ( $A_s$ ), kuat tekan beton ( $f'_c$ ), dan kuat leleh baja ( $f_y$ ). Persamaan kuat lentur ( $M_n$ ) digunakan untuk menghitung kapasitas lentur balok berdasarkan parameter-parameter tersebut. Model ini dirancang dengan asumsi bahwa balok memiliki tumpuan sederhana dan hanya menerima beban lentur.

Data kuat leleh baja ( $f_y$ ) diperoleh dari pengujian laboratorium terhadap sampel tulangan baja dengan diameter 13 mm, 16 mm, dan 19 mm. Pengujian ini dilakukan sesuai standar yang berlaku untuk menentukan nilai kuat tarik dan leleh baja. Data yang dikumpulkan meliputi nilai kuat leleh dari setiap sampel, yang kemudian digunakan sebagai input dalam analisis statistik dan simulasi.

Tahapan selanjutnya adalah menghitung parameter statistik, yaitu rata-rata (*mean*) dan simpangan baku (*standard deviation*) dari nilai  $f_y$ . Parameter digunakan untuk menggambarkan distribusi probabilitas kuat leleh baja, yang akan digunakan dalam simulasi Monte Carlo. Uji Shapiro-Wilk dilakukan untuk memastikan bahwa data  $f_y$  berdistribusi normal, sehingga distribusi normal dapat digunakan sebagai pendekatan dalam simulasi.

Hubungan antara kuat leleh baja ( $f_y$ ) dan kuat lentur balok ( $M_n$ ) dianalisis menggunakan persamaan kuat lentur (persamaan 1). Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana variasi pada nilai  $f_y$  memengaruhi kapasitas lentur balok. Hasil simulasi Monte Carlo menunjukkan distribusi probabilitas  $M_n$ , yang kemudian dianalisis untuk menentukan nilai rata-rata dan deviasi standarnya. Selain itu, analisis sensitivitas dilakukan untuk mengukur seberapa besar perubahan  $f_y$  memengaruhi  $M_n$ , yang dihitung menggunakan persamaan 2.

## 2.3 Simulasi Monte Carlo

Simulasi Monte Carlo adalah metode stokastik serbaguna yang menggunakan pengambilan sampel acak untuk memodelkan sistem yang kompleks dan memprediksi hasil. (Pan, 2017), (Santony, 2020), dan (Syafitri and Dwi Arfika, 2024). Ini berlaku secara luas di berbagai bidang, termasuk fisika, keuangan, perawatan kesehatan, dan keandalan sistem. Kekuatan metode ini terletak pada kemampuannya untuk menangani ketidakpastian dan variabilitas, (Dewi, Harsono and others, 2024) dan (Maulana, 2024) menjadikannya alat yang berharga untuk pengambilan keputusan dan peramalan. Salah satu aspek yang diperhatikan berupaangkitan angka acak yang sesuai dengan probabilitas data dari sampel yang dikehendaki. (Desmyra, 2022) dan (Ramadhan and FG, 2024). Selanjutnya, beberapa hal yang harus diperhatikan dalam penelitian ini berupa data statistik kuat leleh baja tulangan yang digunakan dalam simulasi Monte Carlo diperoleh dari hasil pengujian laboratorium terbatas pada sampel baja dengan diameter 13 mm, 16 mm, dan 19 mm. Pembatasan ini dilakukan karena keterbatasan ketersediaan data pengujian dengan variasi dimensi tulangan yang lebih luas. Selain itu, simulasi Monte Carlo hanya mempertimbangkan distribusi normal sebagai pendekatan distribusi probabilitas, sehingga tidak mengakomodasi distribusi lain yang mungkin lebih sesuai untuk data kuat leleh baja tertentu. Selain itu, variabel yang dianalisis dalam penelitian ini hanya terbatas pada kuat leleh baja ( $f_y$ ) dan kuat lentur ( $M_n$ ). Variabel lain yang berpotensi mempengaruhi hasil, seperti kualitas material beton,

pelaksanaan konstruksi, dan kondisi lingkungan, tidak diperhitungkan. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mempertimbangkan faktor-faktor tersebut untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif.

Adapun proses simulasi Monte Carlo dilakukan dengan melalui tahapan sebagai berikut.

1. Menentukan distribusi data kuat leleh ( $f_y$ ) berdasarkan pengujian laboratorium. Data hasil pengujian laboratorium selanjutnya diuji menggunakan Saphiro Wilk.
2. Menentukan nilai parameter statistik rerata dan simpangan baku. Nilai statistik deskriptif dapat dihitung di Ms Excel dengan fungsi AVERAGE dan STDEV.S.
3. Menentukan fungsi persamaan kuat lentur balok beton bertulang. Fungsi persamaan yang digunakan untuk simulasi berupa persamaan 1.
4. Simulasi bangkitan angka acak berdasarkan distribusi data sebanyak 10.000 iterasi.(Hasyim, 2024) dan (Fikar et al., 2024). Simulasi dilakukan dengan memasukkan nilai rerata dan simpangan baku dari  $f_y$  sebagai variabel bebas, sementara variabel lainnya dianggap tetap.
5. Menampilkan hasil simulasi berupa rerata dan simpangan baku  $M_n$  dan histogram. Hasil simulasi yang ditampilkan dalam grafik histogram berupa data sebanyak 10.000 yang dihitung nilai statistik deskriptifnya, yaitu berupa rerata dan simpangan baku momen nominal ( $M_n$ ).

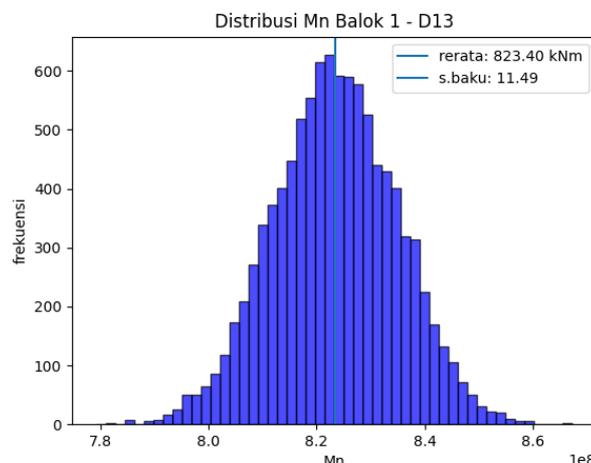
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil

Berdasarkan hasil pengolahan data pengujian tarik dan leleh baja tulangan, didapatkan nilai statistik berupa rerata dan simpangan baku dari baja. Nilai masing-masing dari rerata dan simpangan baku baja yang memiliki probabilitas data yang berdistribusi normal dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Data statistik tulangan baja

No	Diameter (mm)	Kuat leleh ( $f_y$ )	
		Rerata	Simpangan baku
1	13	477.13	8.65
2	16	474.27	7.89
3	19	474.40	9.68



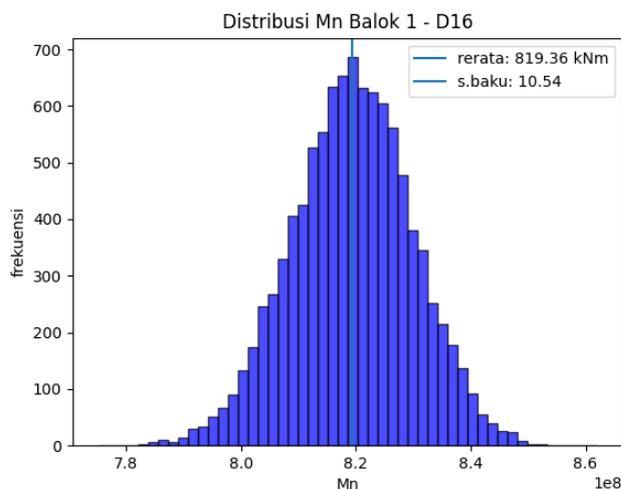
Gambar 1 Distribusi  $M_n$  balok 1-D13

Selanjutnya dilakukan simulasi Monte Carlo yang menghasilkan nilai dari kuat lentur balok ( $M_n$ ) yang dapat dihitung menggunakan persamaan 1. Hasil simulasi berupa nilai parameter statistik dari kuat lentur berupa rerata dan simpangan baku serta distribusi dari data kuat lentur ( $M_n$ ). Nilai-nilai rerata, simpangan baku, dan distribusi dari data dengan model balok 1 dan kuat leleh model 1 hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 1.

Berdasarkan analisis, distribusi momen ( $M_n$ ) pada Balok 1 - D13 menunjukkan bahwa nilai rata-rata momen adalah 823.40 kNm dengan standar deviasi sebesar 11.49 kNm. Hal ini mengindikasikan performa struktur yang baik, di mana rata-rata momen yang diterima cenderung stabil dan tidak banyak variasi signifikan antar pengukuran. Grafik histogram menunjukkan puncak distribusi yang jelas antara nilai 8.1 dan 8.2, menandakan konsistensi data yang tinggi. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa Balok 1 - D13 memiliki karakteristik yang baik dalam menahan momen.

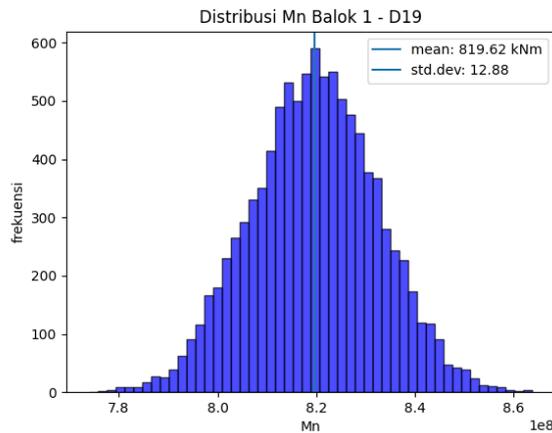
Simulasi Monte Carlo dilakukan untuk menghitung nilai rerata dan simpangan baku dari model 1 dengan tulangan berdiameter 16 mm. Gambar 3 menggambarkan distribusi momen ( $M_n$ ) yang terjadi pada Balok 1, khususnya dengan tulangan D16. Dari analisis yang dilakukan, diperoleh rata-rata nilai momen sebesar 819.36 kNm dan standar deviasi sebesar 10.54 kNm. Angka rata-rata ini mencerminkan bahwa secara umum, momen yang dialami oleh balok tersebut berada dalam kisaran yang cukup stabil dan dapat dikatakan memadai untuk mendukung performa struktural yang diharapkan. Selain itu, nilai standar deviasi yang relatif kecil menunjukkan bahwa terdapat variasi yang tidak terlalu besar antara nilai-nilai momen yang terukur, menandakan bahwa pengukuran yang dilakukan cukup konsisten dan homogen.

Grafik histogram dengan batang-batang yang berbentuk simetris memperlihatkan distribusi frekuensi yang puncaknya terletak antara nilai 8.1 dan 8.2. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar pengukuran momen terjadi pada rentang tersebut, yang memberikan indikasi positif terhadap kinerja balok dalam menahan beban dan momen. Secara keseluruhan, dari hasil analisis ini dapat disimpulkan bahwa Balok 1 - D16 memiliki karakteristik yang baik dalam menahan momen.



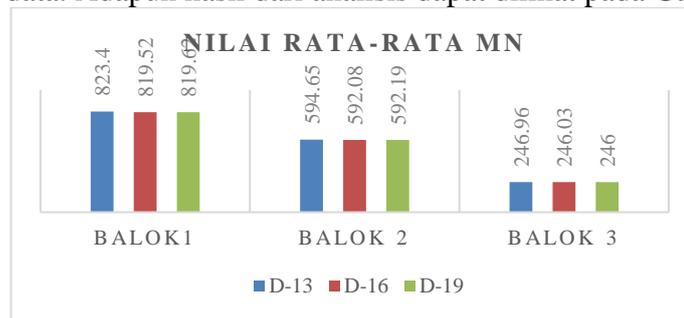
Gambar 2 Distribusi Mn balok 1-D16

Selanjutnya, simulasi Monte Carlo dilakukan pada balok model 1 dengan tulangan berdiameter 19 mm. Berdasarkan hasil analisis, didapatkan nilai rerata dan simpangan baku masing-masing sebesar 819.62 kNm dan 12.80 seperti terlihat pada gambar 3.



Gambar 3 Distribusi Mn balok B1-D19

Nilai rerata dan simpangan baku dari kuat lentur balok (Mn) dari balok-balok lainnya dapat dianalisis dengan simulasi Monte Carlo sesuai dengan nilai parameter statistik input data. Adapun hasil dari analisis dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Grafik nilai rerata Mn balok

Berdasarkan hasil analisis, nilai rerata masing-masing balok dengan variasi diameter tulangan dapat dilihat pada gambar 2. Pada balok 1 nilai rerata Mn pada masing-masing variasi diameter 13,16 mm dan 19 mm adalah sebesar 823.40 kNm, 819.52 kNm, dan 819.62 kNm. Sementara itu, pada balok 2 masing-masing memiliki nilai Mn sebesar 594.65 kNm, 592.08 kNm, dan 592.19 kNm sedangkan pada balok 3, nilai Mn masing-masing sebesar 246.96 kNm, 246.03 kNm, dan 246.00 kNm.

Secara lengkap nilai rerata dan simpangan baku dari kuat lentur (Mn) pada model balok dengan variasi diameter tulangan, dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Nilai rerata dan simpangan baku Mn balok

No	Balok	Diameter	Rerata	Simpangan baku
1	B1	13	823.40	11.49
		16	819.52	10.57
		19	819.62	12.80

2	B2	13	594.65	8.28
		16	592.08	7.49
		19	592.19	9.25
3	B3	13	249.96	3.09
		16	246.03	2.80
		19	246.00	3.48

### 3.2 Analisis sensitivitas

Sensitivitas dari kuat leleh tulangan baja ( $f_y$ ) terhadap nilai kuat lentur balok ( $M_n$ ) dapat diukur dengan meninjau perubahan masing-masing nilai. Perubahan nilai variabel kuat leleh ( $\Delta f_y$ ) dihitung dengan persamaan 3, di mana nilai  $f_{yi}$  didapatkan dengan menambahkan nilai rerata dan simpangan baku dari variabel  $f_y$  dan selanjutnya disebut sebagai tepi atas. Selain itu, nilai  $f_{yj}$  didapatkan dengan mengurangi nilai rerata kuat leleh dan simpangan baku, selanjutnya disebut sebagai tepi bawah. Dengan demikian, nilai  $M_{n1}$  dan  $M_{n2}$  dapat dihitung berdasarkan input nilai kuat leleh ( $f_y$ ) terhadap persamaan 2 dan pengukuran nilai perubahan  $M_n$  menurut persamaan 3.

Tabel 4 Nilai kuat leleh

No	Rerata	Simpangan baku	$f_{yi}$	$f_{yj}$
1	823.40	11.49	834.89	811.91
2	819.52	10.57	830.09	808.95
3	819.62	12.80	832.42	806.82
4	594.65	8.28	602.93	586.37
5	592.08	7.49	599.57	584.59
6	592.19	9.25	601.44	582.94
7	249.96	3.09	253.05	246.87
8	246.03	2.80	248.83	243.23
9	246.00	3.48	249.48	242.52

Sedangkan nilai tepi atas dan tepi bawah dari kuat leleh ( $f_y$ ) dan kuat lentur ( $M_n$ ) dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Nilai  $f_y$  dan  $M_n$

No	Balok	Diameter (mm)	$f_y$ (Mpa)	$f_{yi}$ (Mpa)	$f_{yj}$ (Mpa)	$M_n$ (kNm)	$M_{ni}$ (kNm)	$M_{nj}$ (kNm)
1	B1	13	823.4	834.89	811.91	1179.433	1187.764	1170.878
		16	819.52	830.09	808.95	1176.569	1184.311	1168.638
		19	819.62	832.42	806.82	1176.643	1185.992	1167.017
2	B2	13	594.65	602.93	586.37	967.018	976.253	957.666
		16	592.08	599.57	584.59	964.128	972.519	955.641
		19	592.19	601.44	582.94	964.252	974.600	953.758
3	B3	13	249.96	253.05	246.87	479.480	484.745	474.199
		16	246.03	248.83	243.23	472.761	477.551	467.957
		19	246	249.48	242.52	472.709	478.661	466.737

Selanjutnya, nilai perubahan  $f_y$  dan  $M_n$  serta nilai sensitivitas dari masing-masing balok ditampilkan dalam Tabel 6. Nilai perubahan  $f_y$  dan  $M_n$  dihitung menggunakan persamaan 3 dan 4.

Tabel 6 Nilai perubahan  $f_y$  dan  $M_n$

No	Balok	Diameter	$\Delta f_{y_i}$	$\Delta f_{y_j}$	$\Delta M_{n_i}$	$\Delta M_{n_j}$
1	B1	13	11.49	11.49	8.33	8.55
		16	10.57	10.57	7.74	7.93
		19	12.80	12.80	9.35	9.63
2	B2	13	8.28	8.28	9.24	9.35
		16	7.49	7.49	8.39	8.49
		19	9.25	9.25	10.35	10.49
3	B3	13	3.09	3.09	5.26	5.28
		16	2.80	2.80	4.79	4.80
		19	3.48	3.48	5.95	5.97

Berdasarkan hasil analisis, nilai  $\Delta f_y$  dan  $\Delta M_n$  didapatkan pada masing-masing balok dengan variasi diameter tulangan. Selanjutnya, dihitung nilai sensitivitas kuat leleh tulangan terhadap kuat lentur balok dengan persamaan 2. Adapun hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Nilai sensitivitas  $f_y$  terhadap  $M_n$

No	Balok	Diameter	$\Delta M_{n_i}/\Delta f_{y_i}$	$\Delta M_{n_j}/\Delta f_{y_j}$
1	B1	13	0.73	0.74
		16	0.73	0.75
		19	0.73	0.75
2	B2	13	1.12	1.13
		16	1.12	1.13
		19	1.12	1.13
3	B3	13	1.70	1.71
		16	1.71	1.72
		19	1.71	1.72

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas, nilai kuat leleh tulangan ( $f_y$ ) pada masing-masing balok menunjukkan hubungan positif terhadap kuat lentur balok ( $M_n$ ). Pada balok B1 nilai sensitivitas pada tepi atas memiliki nilai serupa yaitu 0.73, sedangkan pada tepi bawah nilai sensitivitas antara 0.74 dan 0.75. Pada balok B2 nilai sensitivitas pada tepi atas dan bawah antara 1.12 dan 1.13, sementara itu pada balok B3 nilai sensitivitas antara 1.70 dan 1.72.

### 3.3 Pembahasan

Kuat leleh tulangan baja sebagai input analisis kuat lentur biasa menggunakan nilai deterministik. (Purboyo and Santoso, 2022). Namun, pada kenyataannya nilai kuat leleh baja tidak seperti yang direncanakan. Berdasarkan hal tersebut, dilakukan pengujian terhadap tulangan baja untuk mengetahui berapa nilai kuat tarik dan kuat leleh tulangan baja. Nilai kuat leleh dari hasil pengujian memiliki nilai bervariasi, sehingga nilai kuat lentur yang digunakan berupa nilai rerata dari hasil pengujian. Pada analisis sensitivitas, rerata dan simpangan baku kuat leleh menunjukkan ketidakpastian nilai sehingga dalam analisis harus mempertimbangkan faktor tersebut agar dapat merepresentasikan kondisi faktual.

Ketidakpastian dalam hasil analisis kuat lentur balok tidak hanya dipengaruhi oleh variasi kuat leleh tulangan baja, tetapi juga oleh faktor-faktor lain seperti kualitas pelaksanaan konstruksi. (Hutauruk, 2024). Pada praktiknya, nilai kuat leleh

tulangan yang sebenarnya seringkali berbeda dengan nilai yang tertera dalam spesifikasi, baik lebih kecil maupun lebih besar. Oleh karena itu, untuk memperhitungkan ketidakpastian ini, perlu dilakukan analisis statistik terhadap data kuat leleh tulangan hasil pengujian laboratorium.

Salah satu metode yang umum digunakan untuk memperhitungkan ketidakpastian ini adalah simulasi Monte Carlo. Dalam simulasi ini, nilai kuat leleh tulangan akan dibangkitkan secara acak berdasarkan distribusi statistik yang diperoleh dari hasil pengujian, dengan mempertimbangkan nilai rata-rata dan simpangan bakunya. Dengan demikian, kita dapat memperoleh rentang nilai kuat lentur yang lebih realistis, sehingga desain struktur dapat dilakukan dengan memperhitungkan tingkat risiko yang lebih tepat.

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui seberapa sensitif kuat leleh tulangan baja terhadap kuat lentur balok beton bertulang. Berdasarkan hasil analisis, ditemukan bahwa sensitivitas kuat leleh ( $f_y$ ) terhadap kuat lentur ( $M_n$ ) pada masing-masing balok memiliki nilai yang bervariasi. Pada balok dengan penampang besar seperti pada balok B1, nilai sensitivitas cenderung kecil di mana setiap kenaikan  $f_y$  sebesar 1 Mpa maka akan menghasilkan nilai  $M_n$  sebesar 0.73 kNm. Selanjutnya, Apabila ditinjau sensitivitas dari tepi bawah nilai, maka nilai  $f_y$  akan sensitif sebesar 0.74 atau 0.75 kNm pada diameter tulangan sebesar 13 mm dan 16 mm. Hal tersebut berbeda dengan balok B2 dan B3, di mana nilai sensitivitas  $f_y$  memiliki nilai lebih besar. Nilai sensitivitas terbesar terjadi pada balok B3, di mana pada setiap kenaikan  $f_y$  sebesar 1 Mpa akan menyebabkan kenaikan  $M_n$  sebesar 1.70 kNm atau 1.72 kNm. Dengan demikian, peningkatan nilai  $f_y$  akan memberikan dampak kenaikan  $M_n$  yang signifikan pada balok dengan dimensi lebih kecil.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, sensitivitas kuat leleh tulangan terhadap kuat lentur balok beton bertulang menunjukkan hubungan yang bervariasi tergantung pada dimensi balok. Namun, analisis ini hanya mempertimbangkan variabel kuat leleh ( $f_y$ ) sebagai parameter bebas utama. Faktor-faktor lain seperti kualitas beton, rasio tulangan, atau pengaruh panjang bentang balok, belum dimasukkan dalam model analisis karena keterbatasan data yang tersedia. Oleh karena itu, hasil ini perlu ditafsirkan dengan hati-hati dalam konteks desain struktural yang melibatkan banyak variabel kompleks.

#### **4. Kesimpulan dan Saran**

##### **4.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisis, nilai sensitivitas balok B1 untuk diameter 13, 16, dan 19 mm masing-masing adalah 0.73, 0.74, 0.74, dan 0.75. Di sisi lain, balok B2 menunjukkan sensitivitas dengan nilai 1.12 dan 1.13 untuk diameter yang sama. Untuk balok B3, nilai sensitivitas pada diameter 13 mm mencapai 1.70 dan 1.71, sedangkan untuk diameter 16 mm dan 19 mm adalah 1.71 dan 1.72. Temuan ini menunjukkan bahwa tingkat sensitivitas cenderung lebih tinggi pada balok dengan penampang yang lebih kecil. Meskipun demikian, kesimpulan tersebut didasarkan pada tinjauan satu variabel, sehingga generalisasi hanya dapat dilakukan pada variabel kuat leleh terhadap kuat lentur. Variabel-variabel lain juga dapat berpengaruh terhadap peningkatan nilai kuat lentur, sehingga penting untuk mempertimbangkan sensitivitas variabel-variabel tersebut terhadap kuat lentur balok.

## 4.2 Saran

Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi sensitivitas parameter pada struktur yang lebih kompleks. Selain itu layak untuk mempertimbangkan pengaruh variabel-variabel lain seperti tinggi efektif balok, tinggi blok tekan, kuat tekan beton, faktor profesionalisme pekerjaan dan pembebanan.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT. Putra Baja Deli atas dukungan dan kerjasama yang telah diberikan dalam menyediakan data hasil uji kuat tarik dan leleh tulangan baja. Data tersebut sangat berharga bagi kelancaran dan keberhasilan penelitian ini, menghargai komitmen dan profesionalisme tim PT. Putra Baja Deli dalam memberikan informasi yang diperlukan. Semoga kerjasama yang baik ini dapat terus terjalin di masa mendatang.

## Daftar Kepustakaan

- Astuti, P. (2023) 'Perilaku Lentur Struktur Balok Beton Bertulang Dengan Korosi Tulangan Hingga 50%', *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 19(1), p. 14. Available at: <https://doi.org/10.25077/jrs.19.1.14-21.2023>.
- Bastian, E. (2018) 'Pengaruh Jenis Tulangan Terhadap Efektifitas Kinerja Balok Beton Bertulang', *Rang Teknik Journal*, 1(2). Available at: <https://doi.org/10.31869/rj.v1i2.763>.
- Buwono, H.K. *et al.* (2024) 'Perilaku Oprit Jembatan Akibat Beban Kendaraan Terhadap Stabilitas Abutment Menggunakan Midas Soilworks', *AGREGAT*, 9(2), pp. 1178–1184.
- Desmyra, E. (2022) *Penerapan Metode Monte Carlo Pada Pengaruh Resiko Penambahan Biaya Konstruksi Proyek Pembangunan Puskesmas Werabur TT - Application Of Monte Carlo Method To The Effect Of The Risk Of Additional Construction Costs For The Werabur Health Center*. Universitas Hasanuddin.
- Devi, M.T. (2022) 'Reliability of Cantilever Steel Beam Using FOSM and Simulation Methods', *GIS Science Journal*, 9(2), pp. 383–393.
- Dewi, I.C., Harsono, I. and others (2024) 'Manajemen Risiko Dalam Pengambilan Keputusan Bisnis'. PT. Arunika Aksa Karya.
- Fikar, M.Z. *et al.* (2024) 'Construction Supply Chain Risk Analysis in Bima: Construction Supply Chain Risk Analysis in Bima', *Jurnal Media Informatika*, 6(2), pp. 453–459.
- Hastono, K.B. (2017) 'Studi Experimental Perilaku Inelastik Baja Lunak Dan Baja Mutu Tinggi Akibat Beban Siklik', *Jurnal Teknik Sipil Unitomo*, 1(1), pp. 35–48.
- Hasyim, W. (2024) 'Keandalan Lentur Balok Kastela dengan Simulasi Monte Carlo', *Jurnal Media Teknik Sipil*, 22(2), pp. 59–67. Available at: <https://doi.org/10.22219/jmts.v22i2.29839>.
- Hizkia Huwae, Santoso, I.B. and Setiadi, M. (2019) 'Analisis Risiko Investasi Pada Pembangunan Gedung Perkantoran', *Jurnal Muara Sains, Teknologi*,

- Kedokteran, dan Ilmu Kesehatan*, 2(1), pp. 107–115.
- Hutauruk, L.N.D. (2024) ‘Pengaruh Posisi Tulangan Dengan Luas Tulangan Yang Sama Terhadap Kapasitas Balok (Studi Literatur)’.
- Isya, M., Sugiarto, S. and Harja, J. (2021) ‘Sensitivitas Kelayakan Ekonomi Pada Rencana Pembangunan Jembatan Lawe Alas – Pedesi Kabupaten Aceh Tenggara Provinsi Aceh’, *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), p. 140. Available at: <https://doi.org/10.29103/tj.v11i1.411>.
- Khasanah, F. and Setiyadi, D. (2019) ‘Uji Sensitivitas Metode Simple Additive Weighting Dan Weighted Product Dalam Menentukan Laptop’, *BINA INSANI ICT JOURNAL*, 6(2), pp. 55–64. Available at: <https://ejournal-binainsani.ac.id/index.php/BIICT/article/view/1230>.
- Maulana, R. (2024) ‘Aplikasi Metode Monte Carlo Dalam Analisis Prediksi Impor Beras Dari Pakistan’, *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(4), pp. 6021–6027.
- Pan, Q. (2017) ‘An efficient reliability method combining adaptive Support Vector Machine and Monte Carlo Simulation’, *Structural Safety*, 67, pp. 85–95. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.04.006>.
- Prasetya, H., Sri, F. and Sugiarto (2017) ‘Analisis Teknis dan Finansial Proyek Pembangunan Apartemen U-Residence 3 Karawaci Tangerang Selatan’, *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 5(3), pp. 990–998.
- Purboyo, A.H. and Santoso, H.T. (2022) ‘Stabilitas Pilar Beton Pracetak Segmental Pada Jembatan Standar Terhadap Beban Dinamik’, *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 11(1), pp. 7–16.
- Ramadhan, A.T. and FG, F.H. (2024) ‘Pendekatan Metode Monte Carlo untuk Simulasi Pergerakan Harga Saham’, *Mars: Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Ilmu Komputer*, 2(3), pp. 46–55.
- Santony, J. (2020) ‘Simulasi Penjadwalan Proyek Pembangunan Jembatan Gantung dengan Metode Monte Carlo’, *Jurnal Informasi & Teknologi*, pp. 36–42. Available at: <https://doi.org/10.37034/jjdt.v2i1.34>.
- Sarkar, N. and Dasgupta, K. (2024) ‘Machine learning-based sensitivity analysis of engineering demand parameters for a reinforced concrete wall-frame building’, *Structures*, 70, p. 107477. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107477>.
- Syafitri, I. and Dwi Arfika, D. (2024) ‘Penerapan Metode Monte Carlo Pada Simulasi Prediksi Permintaan Mobil’, *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(4), pp. 5820–5826. Available at: <https://doi.org/10.36040/jati.v8i4.10050>.