

EVALUASI PERILAKU BALOK BAJA CASTELLA DENGAN VARIASI JARAK BUKAAN SINUSOIDAL

Dania Silsilatu Nissa¹, Aniendhita Rizki Amalia^{1*}

¹Program Studi Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan (FTSPK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111

e-mail : daniasilsilatu@gmail.com / 6012241007@student.its.ac.id, *aniendhita.ra@its.ac.id

ABSTRACT

Castella steel beams are among the most efficient solutions in steel construction; they can increase beam height, moment of inertia (I_x), and section modulus (S_x) without adding weight itself. Based on a previous study, sinusoidal openings have better structural performance than hexagonal openings due to their curved profile and minimal stress concentration. However, research on sinusoidal openings is still limited. This study uses the Finite Element Method (FEM) approach with ABAQUS software for a static load test. The numerical model was developed based on previous experimental studies and modified with variations in opening spacing of 100–300 mm (specimens A–E). The modeling was carried out on beams with spans of 2000 mm (short), 5000 mm (medium), and 10000 mm (long). The results of the study show that structural performance decreases as span length increases, with average load capacities of 140.14 kN, 116.99 kN, and 116.37 kN for short, medium, and long spans, respectively. Specimen D showed the highest ductility in all span variations. Based on the moment-curvature response and energy absorption, short-span beams performed the best, while long-span beams performed the worst. The span-to-beam height ratio recommendation is 0.56, because it has the best ductility performance.

Keywords: *Catellated Beam; Sinusoidal Opening; Opening Spacing; Static Load; Finite Element Method*

ABSTRAK

Balok baja castella merupakan salah satu solusi efisien dalam konstruksi baja, karena mampu meningkatkan tinggi balok, momen inersia (I_x), dan modulus elastis penampang (S_x) tanpa menambah berat. Berdasarkan studi terdahulu, bukaan sinusoidal, memiliki performa struktural lebih baik dibandingkan bukaan hexagonal karena sudutnya bukaan yang melengkung dan minim konsentrasi tegangan. Namun, penelitian mengenai bukaan sinusoidal masih terbatas. Penelitian ini menggunakan pendekatan Finite Element Method (FEM) dengan bantuan perangkat lunak ABAQUS dalam pengujian beban statis. Model numerik dikembangkan berdasarkan studi eksperimental terdahulu dan dimodifikasi dengan variasi jarak bukaan 100–300 mm (spesimen A–E). Pemodelan dilakukan pada balok dengan bentang 2000 mm (pendek), 5000 mm (menengah), dan 10000 mm (panjang). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja struktural menurun seiring bertambahnya panjang bentang balok, dengan rata-rata kapasitas beban sebesar 140.14 kN, 116.99 kN, dan 116.37 kN untuk bentang pendek, menengah, dan panjang. Spesimen D menunjukkan daktilitas tertinggi pada semua variasi bentang. Berdasarkan respons momen–kurvatur dan energi serapan, balok bentang pendek memiliki performa terbaik, sedangkan bentang panjang memiliki performa terendah. Disarankan nilai rasio jarak bukaan terhadap tinggi balok sebesar 0.56, karena memiliki performa daktilitas terbaik.

Kata kunci: *Balok Castella, Bukaan Sinusoidal; Jarak Bukaan; Beban Statis; Metode Elemen Hingga*

PENDAHULUAN

Balok baja memiliki peran penting sebagai elemen struktural karena mampu menahan beban besar dengan ketahanan tinggi. Seiring kemajuan teknologi

material, pemanfaatan baja dalam konstruksi terus berkembang, salah satunya melalui inovasi balok baja *castella* [1]. Balok baja *castella* merupakan jenis balok yang ditinggikan, dengan nama “*Castellated Beam*” yang berasal dari bentuknya menyerupai

dinding atas kastil dengan bagian terbuka. Balok ini dibuat dengan memotong balok baja konvensional secara *horizontal* pada bagian *web* mengikuti pola tertentu, kemudian digabungkan kembali melalui proses pengelasan sehingga menghasilkan balok dengan tinggi yang lebih besar dan bukaan berpola [2]. Struktur balok *castella* dengan bukaan pada *web* memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan profil asli, dan pengaturan pola bukaan dapat dioptimalkan untuk meningkatkan perilaku elastik-plastik serta kapasitas lentur [3]. Desain balok baja *castella* sangat bergantung pada pemahaman pengaruh geometri dan parameter struktural terhadap kinerja balok.

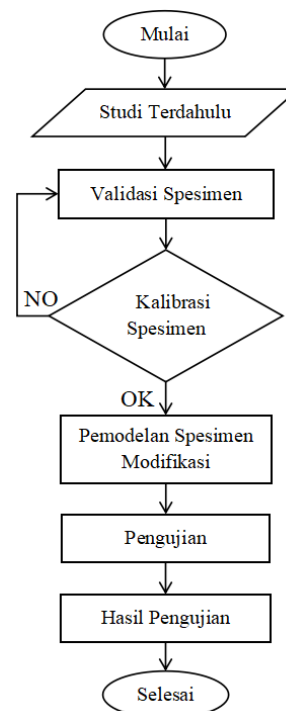
Berdasarkan penelitian terdahulu, berbagai jenis bukaan seperti *hexagonal*, *octagonal*, *diamond*, persegi, persegi panjang, *oval*, *circular*, dan *sinusoidal* telah banyak dikaji pada balok baja *castella*. Beberapa studi menunjukkan bahwa performa bukaan *sinusoidal* relatif sebanding dengan bukaan *hexagonal* dan *circular*, namun lebih unggul dalam distribusi tegangan, konsentrasi tegangan, kapasitas momen lentur, dan kapasitas geser [4]–[6]. Keberadaan bukaan pada *web* balok dan variasi geometrinya memungkinkan terjadinya mode kegagalan yang berbeda dibandingkan balok baja konvensional. Mode kegagalan tersebut dapat diklasifikasikan menjadi kegagalan yang menyerupai balok biasa, seperti *lateral-torsional buckling* dan *flexural mechanism*, serta kegagalan spesifik akibat bukaan, seperti *vierendeel mechanism*, *web-post buckling*, dan kegagalan pada sambungan las [7].

Meskipun demikian, kajian mengenai balok baja *castella* dengan bukaan *sinusoidal*, khususnya pada variasi kategori bentang dan kondisi pembebanan statis, masih terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu

berfokus pada balok *castella* dengan bentang pendek, sehingga pemahaman mengenai pengaruh variasi parameter geometrik terhadap kinerja balok baja *castella* pada berbagai kategori bentang belum sepenuhnya komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter geometrik terhadap kinerja balok baja *castella* bukaan *sinusoidal* menggunakan metode numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) dari hasil model validasi studi eksperimental terdahulu yang sudah dimodifikasi.

METODE PENELITIAN

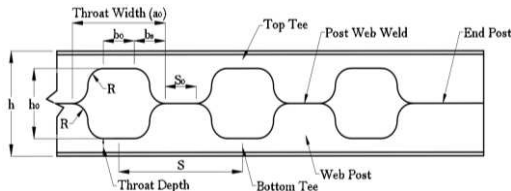
Penelitian ini dimulai dengan validasi model performa terbaik berdasarkan studi eksperimental terdahulu. Hasil dari pemodelan tersebut kemudian dimodifikasi dengan variasi jarak bukaan pada tipe bentang pendek, menengah, dan panjang. Variasi jarak bukaan yang digunakan meliputi spesimen A (100 mm), spesimen B (150 mm), spesimen C (200 mm), dan spesimen D (250 mm). Geometri pemodelan dapat dilihat pada **Tabel 2**.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Terminologi

Untuk mendesain balok baja *castella*, perlu diperhatikan beberapa istilah sebagai berikut. [8] **Gambar 2** menunjukkan terminologi balok *Castella*.



Gambar 2. Terminologi Balok *Castella* [8]

Dimana:

- R : Jari-jari sudut bukaan
- h_0 : Tinggi bukaan
- h : Tinggi balok keseluruhan
- S : Jarak as lubang bukaan
- S_0 : Jarak lubang bukaan
- b_0 : Lebar lubang bukaan
- b_s : Panjang sisi kanan/kiri bukaan
- a_0 : Lebar bukaan keseluruhan

Batasan Desain Geometrik

Berdasarkan *Eurocode 3* tabel 8.1, batasan dimensi untuk bukaan *sinusoidal* tanpa *stiffener*, sebagai berikut [8]:

1. Tinggi bukaan maksimal (h_0)
 $h_0 > 0.8 \cdot h$ (1)
2. Panjang bukaan maksimal (a_0)
 $a_0 > 5 \cdot h_0$ (2)
3. Jarak bukaan minimal (S_0)
 $S_0 < 0.25 \cdot h_0$ (3)
4. Tinggi minimal *tee in compression*
 $Tee_{comp} > \frac{a_{eff}}{12}$ (4)
5. Tinggi minimal *tee in tension* :
 $Tee_{ten} > \text{Max} (t_f + r + 10 \text{ mm}; t_f + 30 \text{ mm})$ (5)

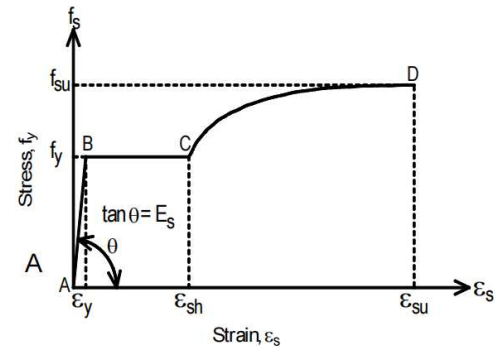
Batasan lebar *end-post* berdasarkan SCI P-355 tabel 2. 1, yaitu [9]:

$$\text{End - post} > 0.5 \cdot h_0 \quad (6)$$

Material

Untuk merepresentasikan perilaku material baja, hubungan tegangan-regangan mengacu pada formula usulan

Park dan Paulay [10]–[12]. Seperti terlihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Hubungan Tegangan-Regangan Baja [11]

1. Daerah AB ($0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$)

$$F_s = \varepsilon_s \cdot E_s \quad (7)$$

$$\varepsilon_y = \frac{F_y}{E_s}$$

2. Daerah BC ($\varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}$)

$$F_s = F_y \quad (8)$$

$$\varepsilon_{sh} = 16 \cdot \varepsilon_y \quad (9)$$

3. Daerah CD ($\varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su}$)

$$F_s = F_y \left[\frac{m(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2}{60(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right] \quad (10)$$

$$m = \frac{\left(\frac{f_{su}}{f_y}\right)(30r + 1)^2 + 60r - 1}{15r^2} \quad (11)$$

$$r = \varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh} \quad (12)$$

Four-Point Bending

Pengujian berdasarkan panduan ASTM F382-99 (2003), yaitu pembebanan *two-point loading* dipilih karena mampu menghasilkan zona momen murni di tengah bentang balok, sehingga gaya geser dapat diabaikan [13] [14]. *Set-up* pengujian validasi dapat dilihat pada **Gambar 6**, sedangkan untuk model modifikasi dapat dilihat pada **Gambar 7**.

Kapasitas Momen dan Kurvatur

Perhitungan momen tengah bentang untuk pengujian *four-point bending*, menggunakan rumus sebagai berikut [15]:

$$M = F \cdot a \quad (13)$$

Dimana:

F : Beban (kN)

a : Jarak antara *Load Cell* (mm)

Kurvatur merupakan ukuran yang berbanding terbalik terhadap jari-jari kelengkungan dari balok ketika menerima beban lentur. Kurvatur dan daktilitas dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut [15]–[17]:

$$R = \frac{y^2}{8x} + \frac{x}{2} \quad (14)$$

$$\varphi = \frac{1}{R} \quad (15)$$

$$\mu = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} \quad (15)$$

Dimana:

φ : Kurvatur (rad/mm)

R : Jari-jari kurvatur (mm)

x : Perpindahan (mm)

μ : Daktilitas

φ_u : Kurvatur kondisi ultimit

φ_y : Kurvatur kondisi leleh

Energi

Kapasitas penyerapan energi dihitung dari luas di bawah kurva beban-defleksi ($F-\Delta$) menggunakan metode *trapezoidal rule*, yang merepresentasikan kemampuan struktur dalam menyerap energi melalui deformasi elastis dan plastis hingga kegagalan. [18]–[20]

Kriteria Von Mises

Kriteria kegagalan *Von Mises* digunakan untuk menentukan mode kegagalan pada ABAQUS. Kegagalan terjadi ketika tegangan *Von Mises* mencapai atau melebihi tegangan leleh material, sehingga distribusi tegangan *Von Mises* digunakan untuk mengidentifikasi lokasi kegagalan struktur. [21]–[23]

Data Validasi

Pada model Validasi [4], balok yang digunakan adalah profil ISMB 150

material baja *grade* E250A, dengan *material properties* sebagai berikut:

ρ : 7850 kg/m³

E : 200,000 N/mm²

ν : 0.30

F_y : 250 N/mm²

F_u : 410 N/mm²

Element : *Shell – Type* S3R

Mesh : 20 mm – *Control Tri*

Parameter

Penentuan parameter berdasarkan panduan AISC, *Eurocode* 3, dan SCI-P355 dapat dilihat dalam **Tabel 2**. Panjang balok yang digunakan untuk seluruh variasi bentang adalah 10 m, sedangkan perbedaan antara bentang pendek dan bentang menengah terletak pada jarak pengaku lateral yang diterapkan. parameter untuk model.

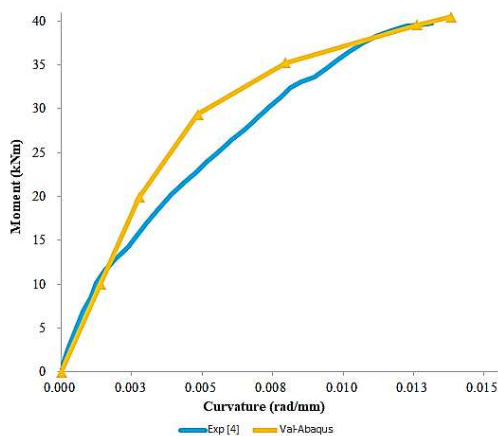
HASIL dan PEMBAHASAN

Validasi

Hasil validasi dari **Tabel 1** dan **Gambar 4** menunjukkan bahwa model numerik memiliki kesesuaian yang sangat baik dengan hasil eksperimen. Nilai momen maksimum hasil validasi sebesar 40.50 kNm mendekati hasil eksperimen sebesar 39.73 kNm dengan rasio Exp./Val sebesar 1.0192, sedangkan nilai kurvatur maksimum sebesar 0.0138 rad juga mendekati hasil eksperimen sebesar 0.0131 rad dengan rasio 1.0542. Besarnya nilai MAE, RMSE, dan persentase *error* yang sangat kecil menunjukkan tingkat kesalahan yang minimal. Selain itu, grafik momen–kurvatur memperlihatkan tren yang serupa antara hasil validasi dan eksperimen. Dengan demikian, model numerik dapat dinyatakan tervalidasi dengan baik dan layak digunakan untuk analisis selanjutnya.

Tabel 1. Perbandingan Validasi dengan Studi Terdahulu [4]

	Validasi	Exp. [4]	Exp./Val
Mom. (kNm)	40.50	39.73	1.0192
Curv. (Rad/mm)	0.0138	0.0131	1.0542
MAE			0.3826
RMSE			0.3823
% Error			0.09%

**Gambar 4.** Kurva Perbandingan Validasi dengan Studi Terdahulu [4]

Perilaku Lendut Balok

Berdasarkan hasil pengamatan pada **Gambar 8**, **Gambar 9**, dan **Gambar 13**, diperoleh beberapa bahasan sebagai berikut:

Pada balok bentang pendek, spesimen A dengan jarak bukaan 100 mm dan defleksi 130.47 mm menunjukkan kapasitas beban sebesar 62.93 kN pada kondisi leleh (*yield*) yang meningkat menjadi 110.20 kN pada kondisi ultimit, dengan rasio peningkatan (F_u/F_y) sebesar 1.75. Spesimen B dengan jarak bukaan 150 mm dan defleksi sebesar 139.422 mm memiliki kapasitas beban sebesar 61.27 kN pada kondisi leleh yang meningkat menjadi 113.83 kN pada kondisi ultimit, dengan rasio sebesar 1.85. Selanjutnya, spesimen C dengan jarak bukaan 200 mm dan defleksi 143.78 mm menunjukkan peningkatan

kapasitas beban dari 60.61 kN (*yield*) menjadi 115.82 kN (ultimit), dengan rasio sebesar 1.91. Sementara itu, spesimen D dengan jarak bukaan 250 mm dan defleksi 147.71 mm mengalami peningkatan kapasitas beban dari 57.22 kN (*yield*) menjadi 118.09 kN (ultimit), dengan rasio sebesar 2.06.

Pada balok bentang menengah, spesimen A dengan jarak bukaan 100 mm dan defleksi 105.95 mm menunjukkan kapasitas beban sebesar 55.27 kN pada kondisi leleh (*yield*) yang meningkat menjadi 89.65 kN pada kondisi ultimit, dengan rasio peningkatan sebesar 1.62. Spesimen B dengan jarak bukaan 150 mm dan defleksi 100.88 mm memiliki kapasitas beban sebesar 59.18 kN pada kondisi leleh yang meningkat menjadi 90.41 kN pada kondisi ultimit, dengan rasio sebesar 1.52. Selanjutnya, spesimen C dengan jarak bukaan 200 mm dan defleksi 120.52 mm menunjukkan peningkatan kapasitas beban dari 60.17 kN (*yield*) menjadi 92.44 kN (ultimit), dengan rasio sebesar 1.53. Sementara itu, spesimen D dengan jarak bukaan 250 mm dan defleksi 189.26 mm mengalami peningkatan kapasitas beban dari 60.06 kN (*yield*) menjadi 96.75 kN (ultimit), dengan rasio sebesar 1.61.

Pada balok bentang panjang, spesimen A dengan jarak bukaan 100 mm dan defleksi 105.95 mm menunjukkan kapasitas beban sebesar 55.24 kN pada kondisi leleh (*yield*) yang meningkat menjadi 89.15 kN pada kondisi ultimit, dengan rasio peningkatan sebesar 1.61. Spesimen B dengan jarak bukaan 150 mm dan defleksi 103.42 mm memiliki kapasitas beban sebesar 66.90 kN pada kondisi leleh yang meningkat menjadi 89.94 kN pada kondisi ultimit, dengan rasio sebesar 1.34. Selanjutnya, spesimen C dengan jarak bukaan 200 mm dan defleksi 118.38 mm menunjukkan peningkatan kapasitas beban dari 60.14 kN (*yield*) menjadi

91.75 kN (ultimit), dengan rasio sebesar 1.52. Sementara itu, spesimen D dengan jarak bukaan 250 mm dan defleksi 189.29 mm mengalami peningkatan kapasitas beban dari 64.67 kN (*yield*) menjadi 95.85 kN (ultimit), dengan rasio sebesar 1.48.

Perilaku Lentur Balok

Berdasarkan hasil pengamatan pada **Gambar 10**, **Gambar 11**, dan **Gambar 14**, diperoleh beberapa bahasan sebagai berikut:

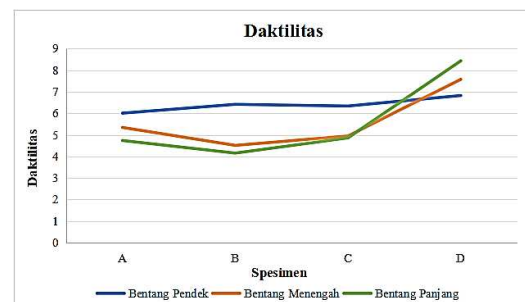
Pada balok bentang panjang, spesimen A dengan jarak bukaan 100 mm menunjukkan momen lentur sebesar 172.08 kNm pada kondisi leleh (*yield*) yang meningkat menjadi 275.49 kNm pada kondisi ultimit, dengan rasio peningkatan (M_u/M_y) sebesar 1.60. Spesimen B dengan jarak bukaan 150 mm memiliki momen lentur sebesar 175.92 kNm (*yield*) yang meningkat menjadi $M_u = 284.58$ kNm (ultimit), dengan rasio 1.62. Selanjutnya, spesimen C dengan jarak bukaan 200 mm menunjukkan peningkatan dari 158.04 kNm (*yield*) menjadi 289.54 kNm (ultimit), dengan rasio 1.83. Sementara itu, spesimen D dengan jarak bukaan 250 mm mengalami peningkatan dari 133.12 (*yield*) kNm menjadi 295.24 kNm (ultimit), dengan rasio 2.22.

Pada balok bentang menengah, spesimen A dengan jarak bukaan 100 mm menunjukkan momen lentur sebesar 176.73 kNm (*yield*) yang meningkat menjadi 224.09 kNm (ultimit) pada kondisi ultimit, dengan rasio peningkatan sebesar 1.27. Spesimen B dengan jarak bukaan 150 mm memiliki momen sebesar 181.97 kNm (*yield*) yang meningkat menjadi 226.18 kNm, dengan rasio 1.24. Selanjutnya, spesimen C dengan jarak bukaan 200 mm menunjukkan peningkatan dari 141.22 kNm (*yield*) menjadi 231.11 kNm (ultimit), dengan rasio 1.64. Sementara itu, spesimen D dengan jarak bukaan 250

mm mengalami peningkatan dari 114.85 kNm (*yield*) menjadi 241.88 kNm, dengan rasio 2.11.

Pada balok bentang panjang, spesimen A dengan jarak bukaan 100 mm menunjukkan momen lentur sebesar 138.09 kNm (*yield*) pada kondisi leleh (*yield*) yang meningkat menjadi 222.87 kNm (ultimit), dengan rasio peningkatan sebesar 1.61. Spesimen B dengan jarak bukaan 150 mm memiliki momen sebesar 167.26 kNm (*yield*) yang meningkat menjadi 224.84 kNm (ultimit), dengan rasio 1.34. Selanjutnya, spesimen C dengan jarak bukaan 200 mm menunjukkan peningkatan dari 150.34 kNm menjadi 229.38 kNm (ultimit), dengan rasio 1.53. Sementara itu, spesimen D dengan jarak bukaan 250 mm mengalami peningkatan dari 161.68 kNm (*yield*) menjadi 239.62 kNm (ultimit), dengan rasio 1.48.

Daktilitas Balok



Gambar 5. Grafik Daktilitas

Dari hasil pengamatan pada **Gambar 5**, dari semua variasi bentang balok, spesimen D menunjukkan nilai daktilitas tertinggi, yaitu sebesar 6.83 pada bentang pendek, 7.58 pada bentang menengah, dan 8.44 pada bentang panjang. Nilai daktilitas maksimum terjadi pada spesimen D dengan bentang panjang, yaitu sebesar 8.44. Sebaliknya, spesimen B pada bentang panjang menunjukkan nilai daktilitas terendah dibandingkan dengan spesimen dan variasi bentang lainnya. Secara umum, peningkatan jarak bukaan menyebabkan peningkatan daktilitas, masing-masing sebesar 11.99% pada bentang pendek,

40.43% pada bentang menengah, dan 50.75% pada bentang panjang. Peningkatan jarak bukaan memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan daktilitas balok, terutama pada bentang yang lebih panjang, dengan spesimen D menunjukkan performa daktilitas paling optimal di seluruh variasi bentang.

Kapasitas Energi

Berdasarkan hasil pengamatan pada **Gambar 12** dan **Gambar 15**, diperoleh beberapa bahasan sebagai berikut:

kapasitas energi yang diserap oleh balok menunjukkan kecenderungan menurun seiring bertambahnya panjang bentang. Pada balok bentang pendek, nilai energi tertinggi diperoleh pada spesimen B sebesar 699.16 J, diikuti oleh spesimen A sebesar 676.36 J, spesimen C sebesar 568.1 J, dan spesimen D sebesar 479.68 J dengan rata-rata penurunan 17.8%. Hal ini menunjukkan bahwa pada bentang pendek, peningkatan jarak bukaan tidak selalu diikuti oleh peningkatan kapasitas energi, bahkan cenderung mengalami penurunan pada variasi bukaan yang lebih besar.

Pada balok bentang menengah, kapasitas energi relatif lebih rendah dibandingkan bentang pendek, dengan nilai berturut-turut sebesar 291.20 J (spesimen A), 292.34 J (spesimen B), 273.29 J (spesimen C), dan 268,624 J (spesimen D) dengan rata-rata penurunan 5.01%. Pola yang ditunjukkan cenderung lebih stabil, meskipun terdapat sedikit penurunan energi pada spesimen dengan jarak bukaan yang lebih besar. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh variasi bukaan terhadap kapasitas penyerapan energi mulai berkurang pada bentang menengah.

Sementara itu, pada balok bentang panjang, kapasitas energi mengalami penurunan yang cukup signifikan dibandingkan kedua bentang lainnya,

dengan nilai sebesar 166.67 J (spesimen A), 156.97 J (spesimen B), 143.27 J (spesimen C), dan 136.93 J (spesimen D) dengan rata-rata penurunan 12.57%. Tren penurunan energi terhadap bertambahnya jarak bukaan terlihat lebih konsisten pada bentang ini. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada bentang panjang, peningkatan jarak bukaan cenderung menurunkan kemampuan struktur dalam menyerap energi.

Secara keseluruhan, kapasitas energi terbesar terjadi pada bentang pendek dan menurun secara signifikan pada bentang menengah dan panjang. Selain itu, peningkatan jarak bukaan cenderung menurunkan kapasitas energi, terutama pada bentang panjang. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar jarak bukaan dan semakin panjang bentang, maka kemampuan balok dalam menyerap energi berkurang akibat menurunnya kekakuan dan stabilitas struktur, sehingga perilaku plastis yang terjadi menjadi kurang efektif dalam menyerap energi hingga kondisi runtuh.

Mode Kegagalan

Dilihat dari **Tabel 3**, **Tabel 4**, dan **Tabel 5**, *lateral torsional buckling* (LTB) teridentifikasi sebagai mode keruntuhan yang dominan pada seluruh spesimen. Temuan ini mengonfirmasi bahwa fenomena ketidakstabilan struktur, yang melibatkan interaksi antara deformasi *lateral* dan puntir, menjadi faktor pengontrol dalam mekanisme keruntuhan balok pada semua variasi bentang.

Dilihat dari **Tabel 6**, **Tabel 7**, dan **Tabel 8**, diperoleh pola perbedaan lokasi daerah kritis antara *web* dan *flange*. Pada spesimen A ($S_o = 100$ mm), daerah kritis pada bentang pendek teridentifikasi berada pada *web*. Namun, dengan meningkatnya panjang bentang balok, lokasi daerah kritis berpindah ke *flange*. Pada spesimen B ($S_o = 150$ mm), seluruh variasi bentang menunjukkan bahwa

daerah kritis secara konsisten berada pada *flange*, tanpa adanya pergeseran lokasi kegagalan. Pada spesimen C ($S_0 = 200$ mm), daerah kritis pada bentang pendek berada pada *flange*, tetapi mengalami pergeseran ke *web* seiring dengan bertambahnya panjang bentang. Pada spesimen D ($S_0 = 250$ mm), daerah kritis pada bentang pendek dan menengah terletak pada *web*, sedangkan pada bentang panjang berpindah ke *flange*. Perbedaan pola ini menunjukkan adanya interaksi antara parameter S_0 dan panjang bentang dalam menentukan mekanisme kegagalan struktur.

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, peningkatan jarak bukaan meningkatkan daktilitas dan kapasitas plastis, namun menurunkan kapasitas energi dan stabilitas struktur, terutama pada bentang panjang. Mode kegagalan didominasi oleh lateral torsional buckling (LTB) pada seluruh spesimen. Lokasi daerah kritis pada balok dipengaruhi secara signifikan oleh panjang bentang dan nilai S_0 . Secara umum, peningkatan panjang bentang cenderung menggeser mekanisme kegagalan dari dominasi geser (*web*) menuju dominasi lentur (*flange*). Namun, pengaruh nilai S_0 menunjukkan bahwa pergeseran tersebut tidak selalu linier dan bergantung pada konfigurasi spesimen. Dengan demikian, terdapat interaksi kompleks antara parameter geometrik dan kondisi pembebanan dalam menentukan lokasi keruntuhan balok. Spesimen D dengan jarak bukaan 250 mm, rasio h/S_0 sebesar 0.56, dan rasio panjang *end-post*/ h sebesar 3.08 menunjukkan kinerja struktural yang paling unggul dalam penelitian ini, ditinjau dari kapasitas beban, kapasitas momen, dan daktilitas. Oleh karena itu, konfigurasi parameter tersebut direkomendasikan untuk diterapkan, khususnya pada balok bentang panjang,

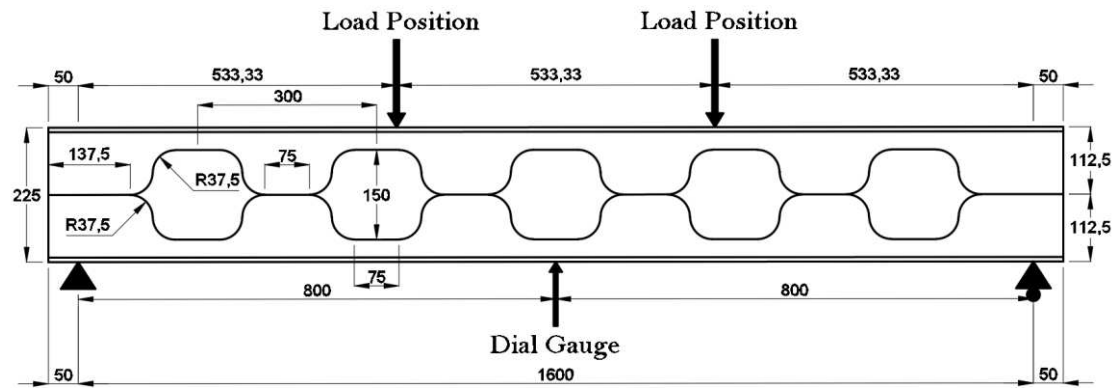
karena mampu menghasilkan kapasitas deformasi plastis yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. T. Rijal, E. Priskasari, and H. S. Indra, "Perencanaan Portal Baja Gedung Pusat Kegiatan Fakultas Hukum Universitas Brawijaya Malang Dengan Menggunakan Kolom Baja Wf Dan Balok Baja Castella (Honey Comb Beam)," *J. Tek. Sipil dan Teknol. Konstr.*, vol. 7, no. 2, p. 11, 2015.
- [2] J. P. Boyer, "Castellated Beams - New Developments," *Eng. J.*, vol. 1, no. 3, pp. 104–108, 1964.
- [3] A. R. Darmawan and I. Barkiah, "Optimalisasi Kapasitas Lentur Balok Kombinasi Castellated dan Tapered Menggunakan Simulasi ANSYS," *J. Konstr.*, vol. 23, no. 1, pp. 108–115, 2025.
- [4] A. J. Mehetre and R. S. Talikoti, "Effect of Fillet Radii on Moment Carrying Capacity of Sinusoidal Web Opening Castellated Steel Beams in Comparison with Hexagonal Web Openings," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.*, vol. 44, no. April 2020, pp. 151–161, 2020.
- [5] M. S. Mutentu, B. G. M. Horacio, and Y. Yang, "Investigation on the Fire Resistance of Cellular Steel Beam with Sinusoidal Openings," *Open J. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 04, pp. 637–663, 2023.
- [6] P. Wang, X. Wang, and N. Ma, "Vertical shear buckling capacity of web-posts in castellated steel beams with fillet corner hexagonal web openings," *Eng. Struct.*, vol. 75, pp. 315–326, 2014.
- [7] D. Kerdal and D. A. Nethercott, "Failure Modes for Castellated Beams," vol. 4, pp. 295–315,

- 1984.
- [8] CEN, "EN 1993-1-13: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-13: Beams with large web openings. Final document, Brussels," 2024.
- [9] R. M. Lawson and S. J. Hicks, *Design of Composite Beams With Large Web Openings*. 2011.
- [10] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *J. Struct. Eng.*, vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826, 1988.
- [11] R. Park and T. Paulay, *Reinforced Concrete Structures*. Canada: John Wiley and Sons, Inc., 1975.
- [12] A. Tata, "STRESS-STRAIN RELATION AND NONLINEAR BEHAVIOR OF," pp. 255–268, 2008.
- [13] ASTM International, "ASTM F382-99: Standard Specification and Test Method for Metallic Bone Plates," West Conshohocken, PA, 2003.
- [14] M. A. Busman, M. J. Rachman, and M. I. Maming, "Analisa Perencanaan Peningkatan Balok Baja Profil WF (Wide Flange) dan Balok Castella Bertumpuan Sederhana," Universitas Negeri Makassar, 2021.
- [15] D. A. Pregawati and H. Purnomo, "KAJI EKSPERIMENTAL BALOK SEDERHANA BAJA CANAI DINGIN BOKS TERTUTUP 32 MM X 31 MM X 0 , 3 MM TERHADAP PEMBEBANAN LENTUR 4 TITIK Strength Method (DSM) yang tercantum Kapasitas Momen dan Curvature perilaku lentur elemen CFS . Elbacklesh (N)," vol. 7, no. 2, 2025.
- [16] B. S. Nasional, "SNI 8399:2017 Profil rangka baja ringan," Jakarta, 2017.
- [17] D. Quirion, M. Manna, S. Hidalgo, and G. Pellegrini, "Manufacturability and Stress Issues in 3D Silicon Detector Technology at IMB-CNM," 2020.
- [18] H. Kwak and S. Kim, "Simplified monotonic moment – curvature relation considering fixed-end rotation and axial force effect," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 1, pp. 69–79, 2010.
- [19] H. Chung and H. Kwak, "International Journal of Impact Engineering A simple yet effective approach to generate P-I diagrams for RC beams," vol. 207, no. July 2025, 2026.
- [20] K. N. Cahyani, J. T. Sipil, and P. N. Malang, "Jurnal sondir," vol. 8, no. 2, pp. 39–46, 2024.
- [21] D. F. Beer, Ferdinand P. and Johnston, E. Russell and DeWolf, John T. and Mazurek, *Mechanics of materials*, 6th ed. McGraw-Hill Companies, 2012.
- [22] P. D. Kumbhar and A. M. Jamadar, "Optimization of Opening Size for Castellated Beam With Sinusoidal Openings," *Int. J. Optim. Civ. Eng. Int. J. Optim. Civ. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 301–313, 2015.
- [23] T. W. Swastika, H. Sugihardjo, and B. Suswanto, "Studi Perilaku Web Post Buckling Dan Vierendeel Mechanism Pada Castellated Beams," *J. Poli-Teknologi*, vol. 14, no. 1, 2016.

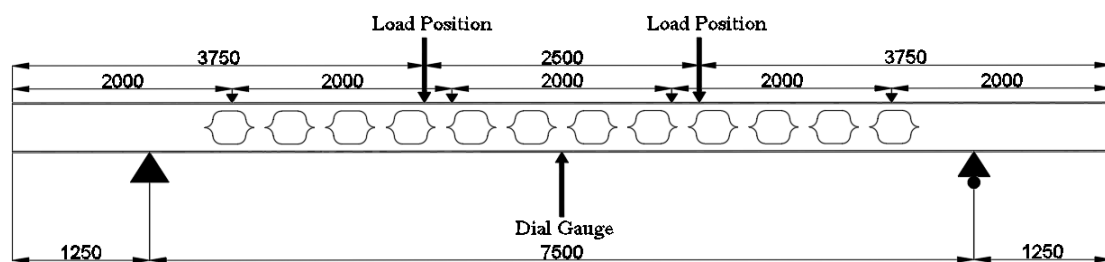
DAFTAR TABEL DAN GAMBAR



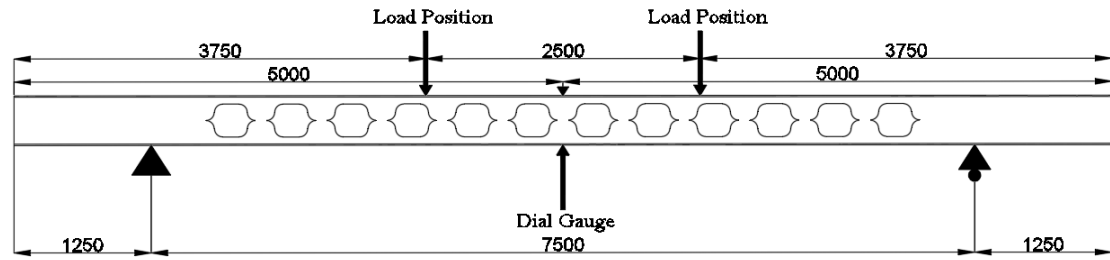
Gambar 6. Sketsa Model Validasi [4]

Tabel 2. Geometri *Model*

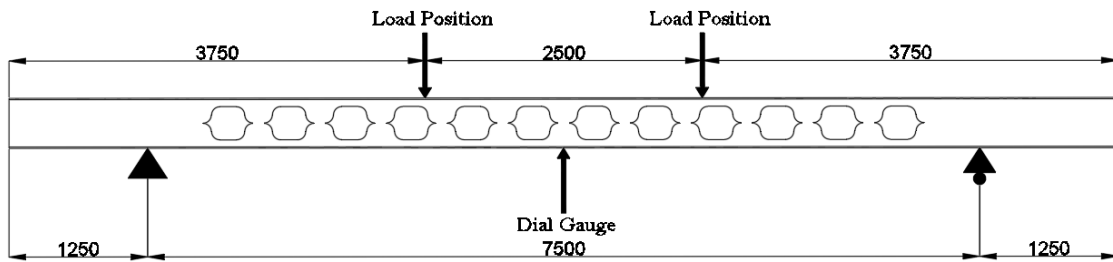
L (m)	Lateral Brace (m)	Tipe	Dimensi (mm)									
			h_0	R	(b) h	(a) S_0	b_0 & b_s	a_0	end post	(a)/(b)	Tee top & bot	S
10	2 Bentang Pendek	A	300	75	450	100	150	450	1750	0.22	75	550
		B	300	75	450	150	150	450	1475	0.33	75	600
		C	300	75	450	200	150	450	1200	0.44	75	650
		D	300	75	450	250	150	450	925	0.56	75	700
		E	300	75	450	300	150	450	650	0.67	75	750
	5 Bentang Menengah	A	300	75	450	100	150	450	1750	0.22	75	550
		B	300	75	450	150	150	450	1475	0.33	75	600
		C	300	75	450	200	150	450	1200	0.44	75	650
		D	300	75	450	250	150	450	925	0.56	75	700
		E	300	75	450	300	150	450	650	0.67	75	750
	- Bentang Panjang	A	300	75	450	100	150	450	1750	0.22	75	550
		B	300	75	450	150	150	450	1475	0.33	75	600
		C	300	75	450	200	150	450	1200	0.44	75	650
		D	300	75	450	250	150	450	925	0.56	75	700
		E	300	75	450	300	150	450	650	0.67	75	750



(a)

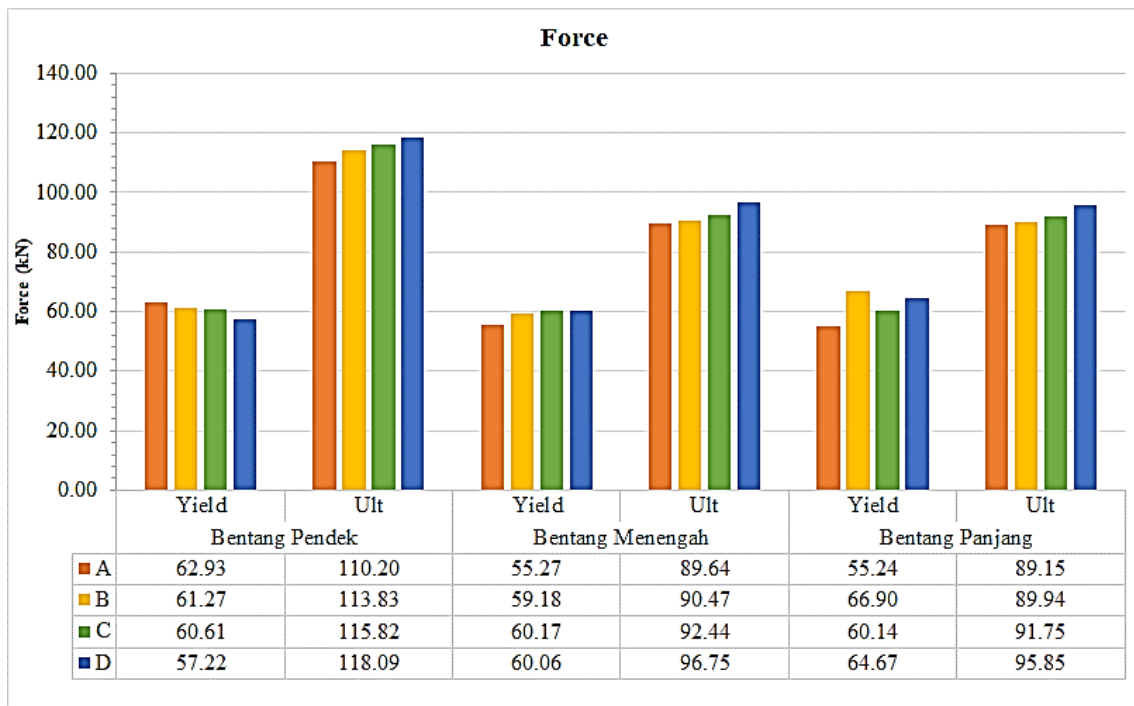


(b)

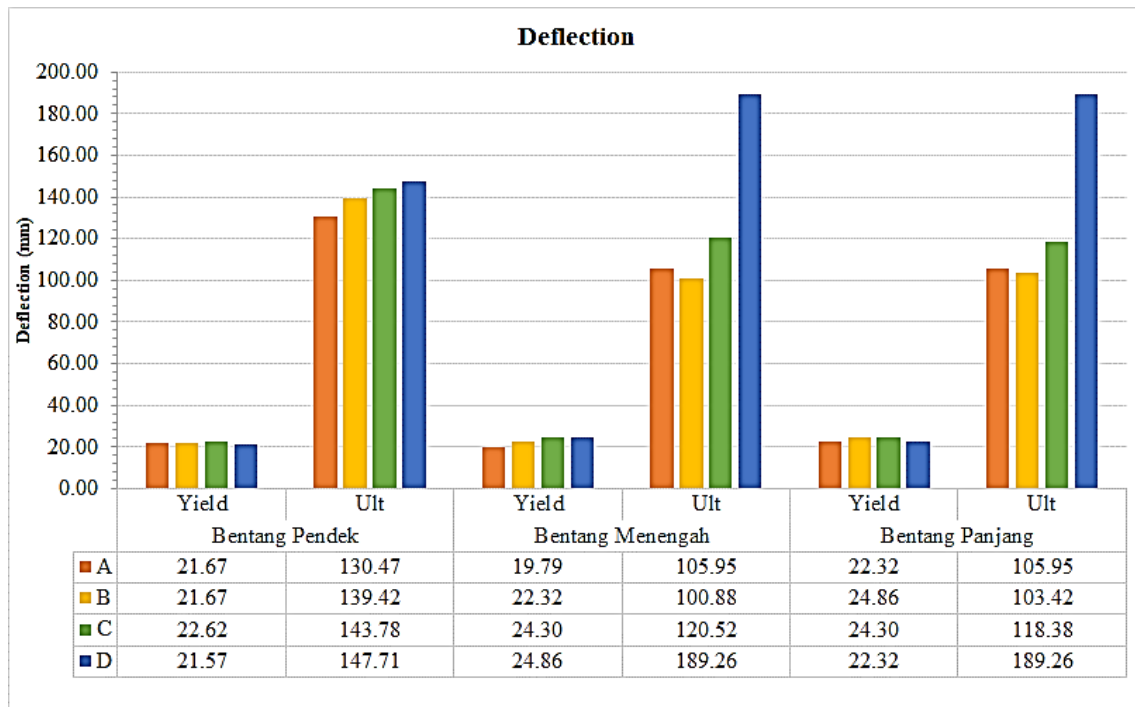


(c)

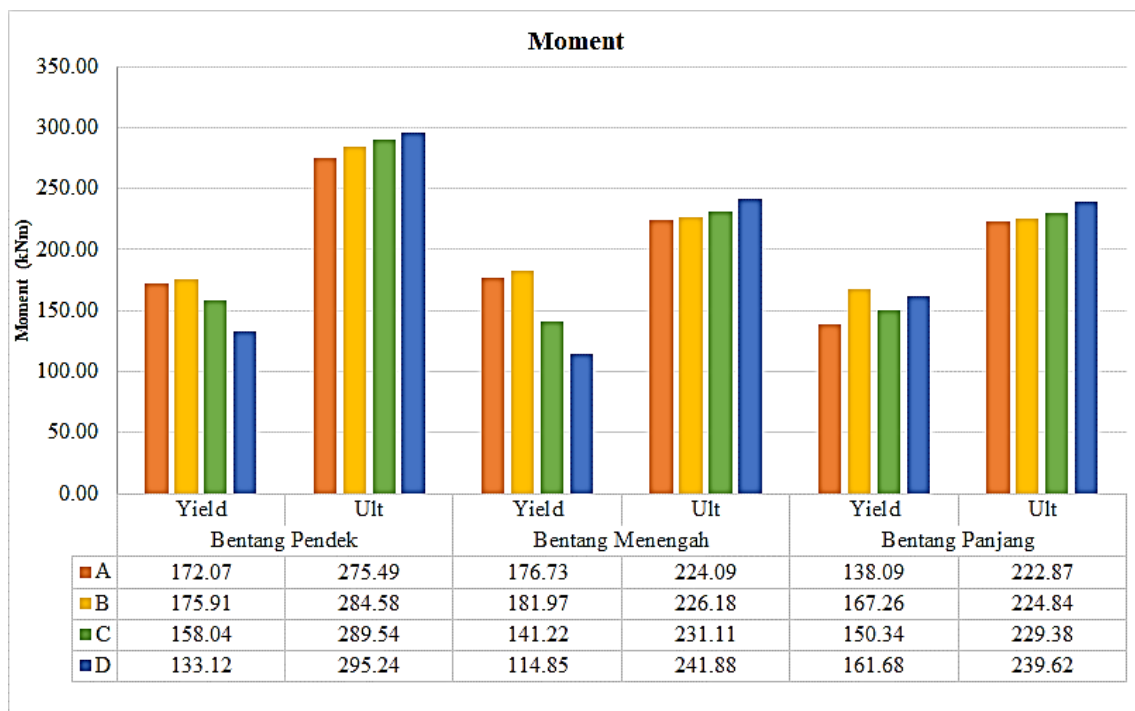
Gambar 7. Pengujian Balok (a) Bentang Pendek, (b) Bentang Menengah, (c) Bentang Panjang



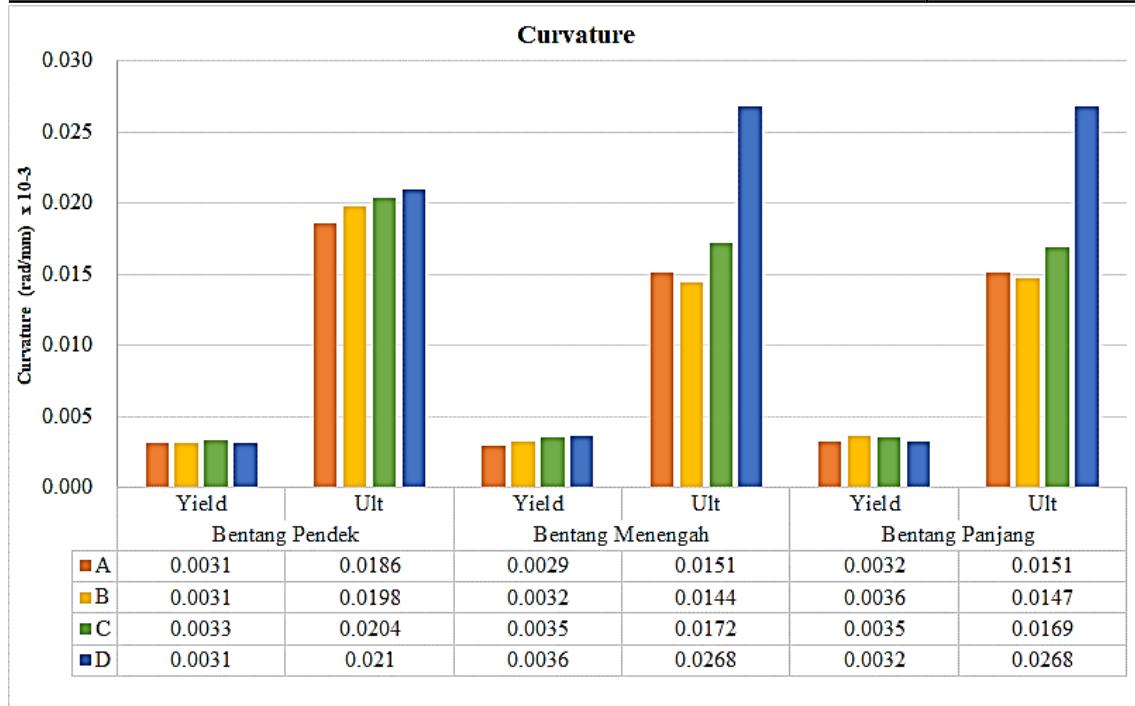
Gambar 8. Diagram Perbandingan Beban Semua Jenis Bentang Balok



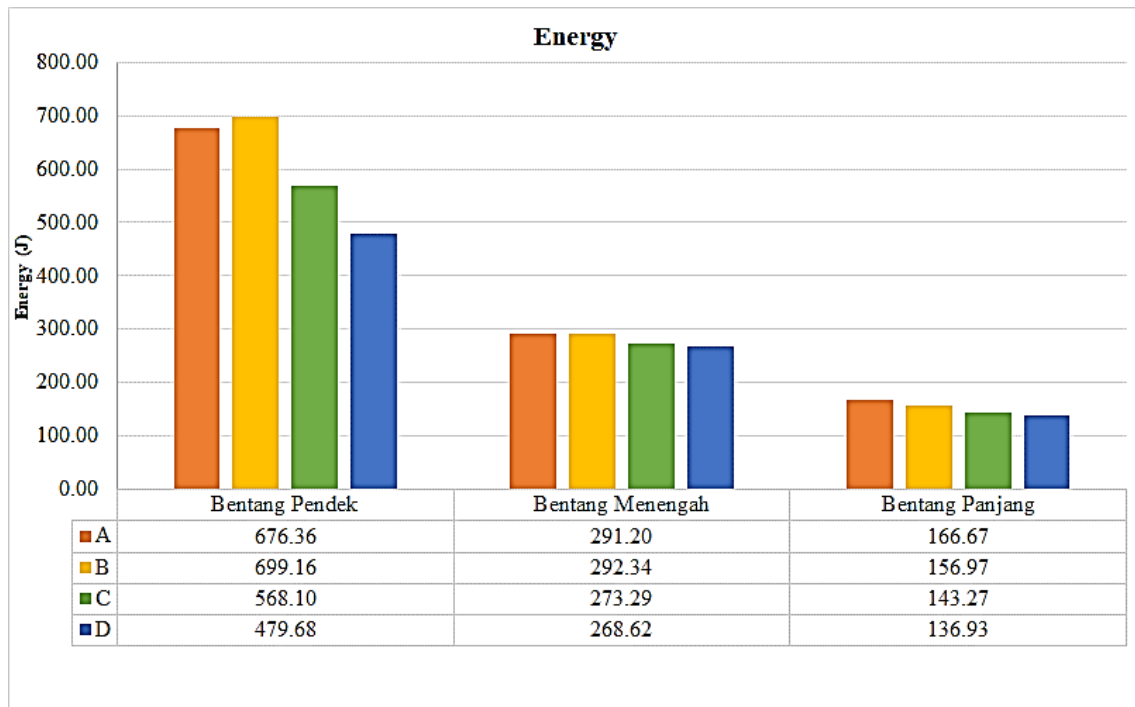
Gambar 9. Diagram Perbandingan Defleksi Semua Jenis Bentang Balok



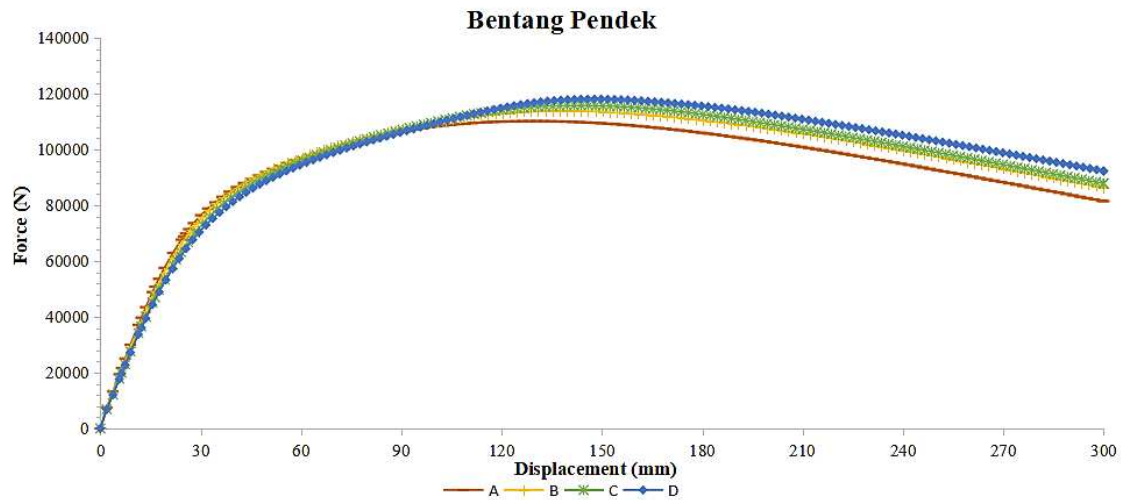
Gambar 10. Diagram Perbandingan Momen Semua Jenis Bentang Balok



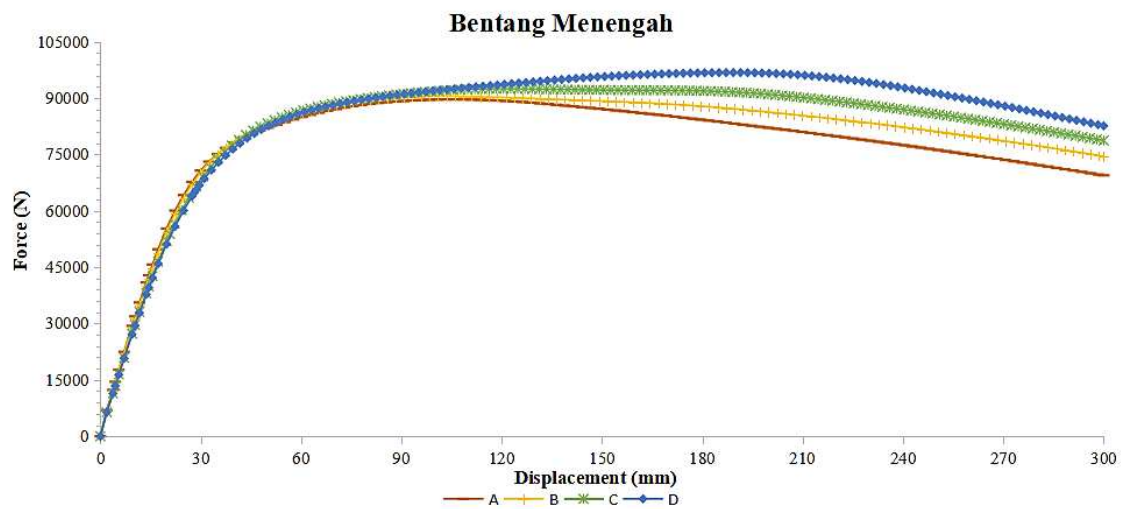
Gambar 11. Diagram Perbandingan Kurvatur Semua Jenis Bentang Balok



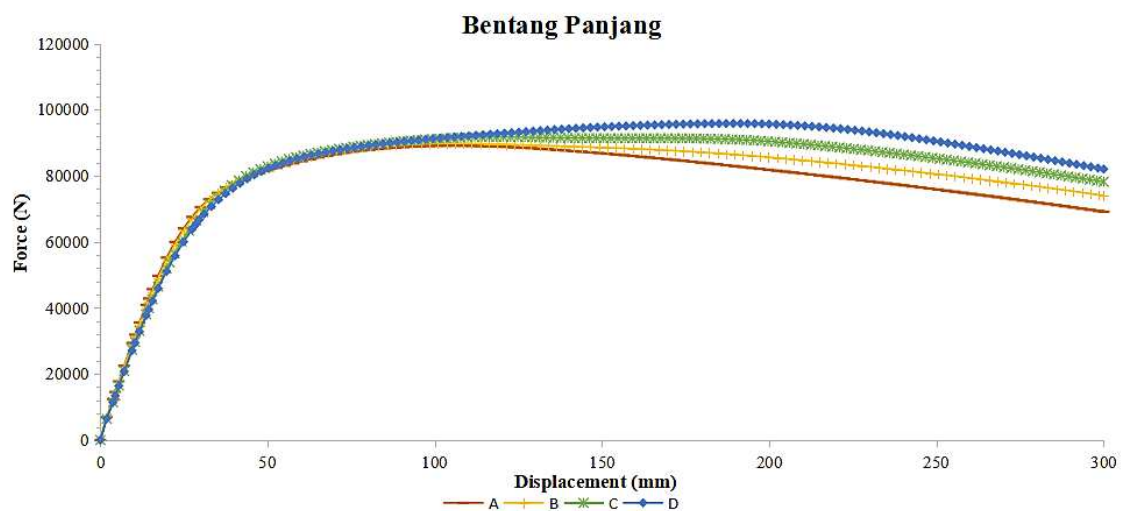
Gambar 12. Diagram Perbandingan Energi Semua Jenis Bentang Balok



(a)

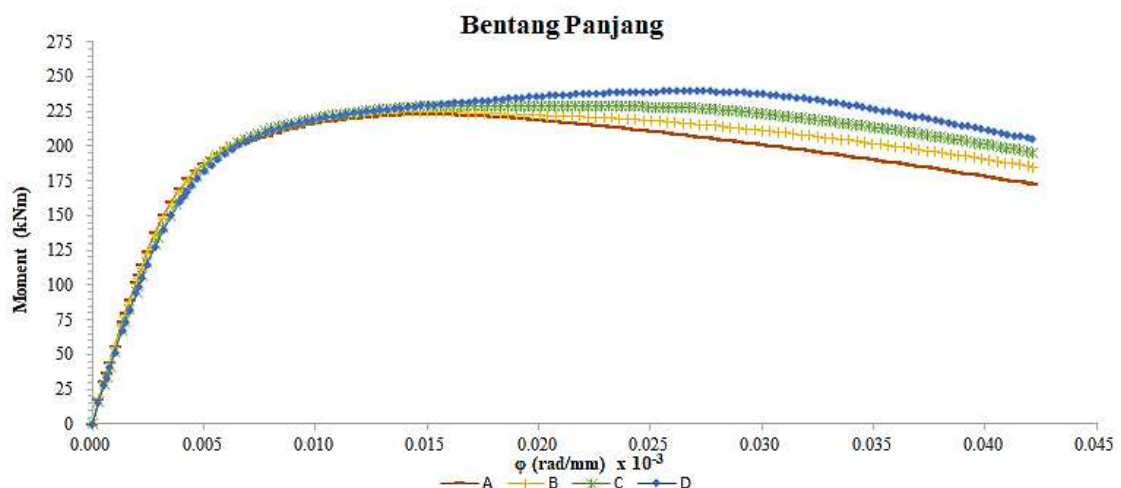
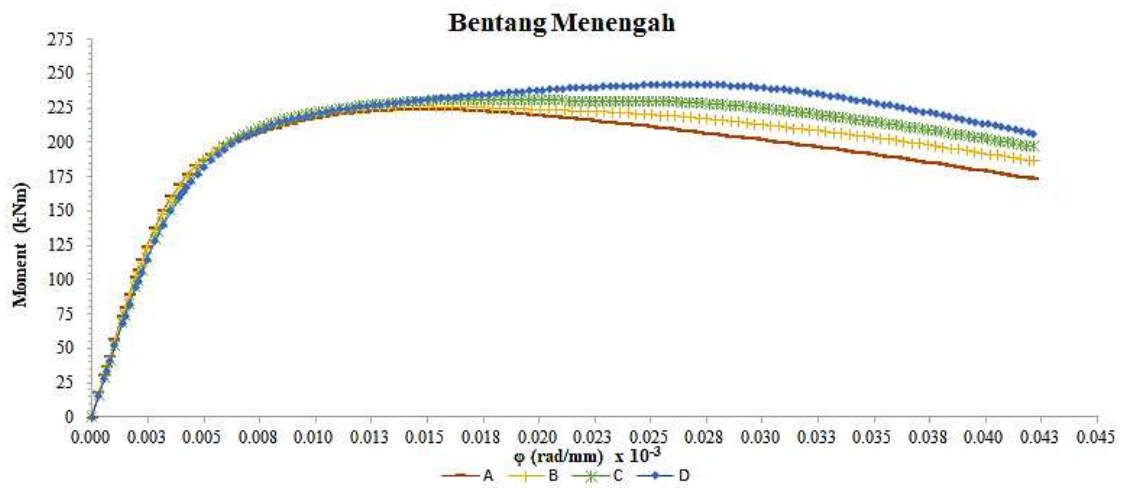
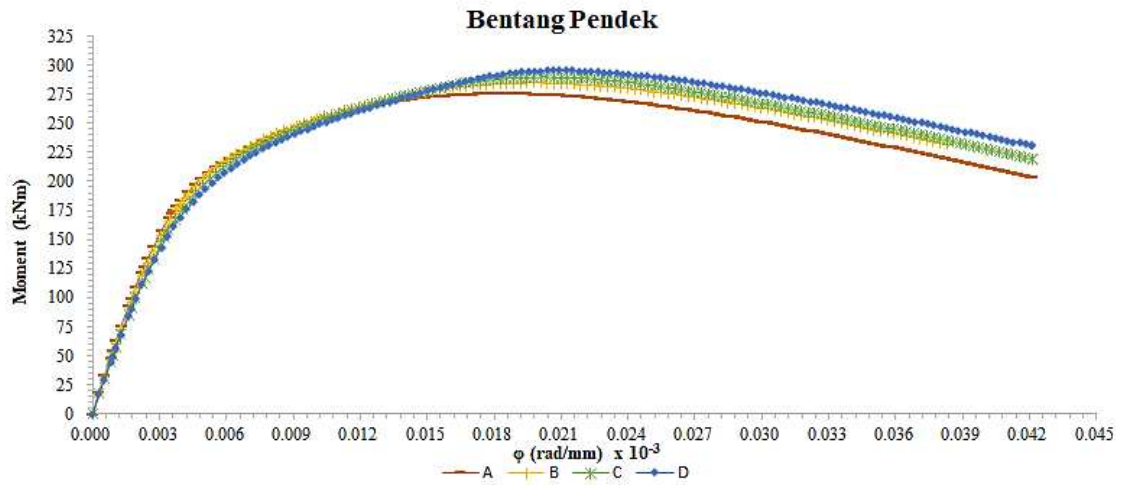


(b)

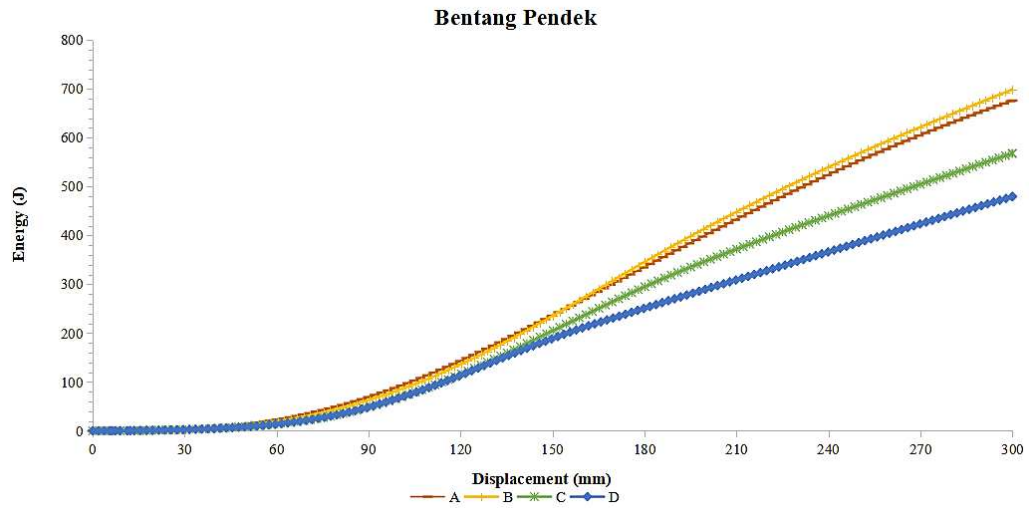


(c)

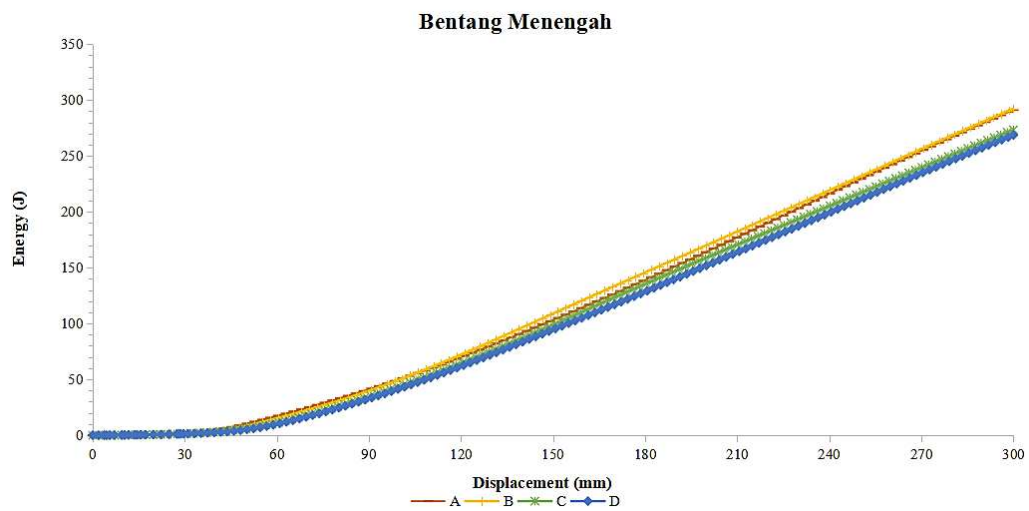
Gambar 13. Grafik Beban-Defleksi Balok (a) Bentang Pendek, (b) Bentang Menengah, (c) Bentang Panjang



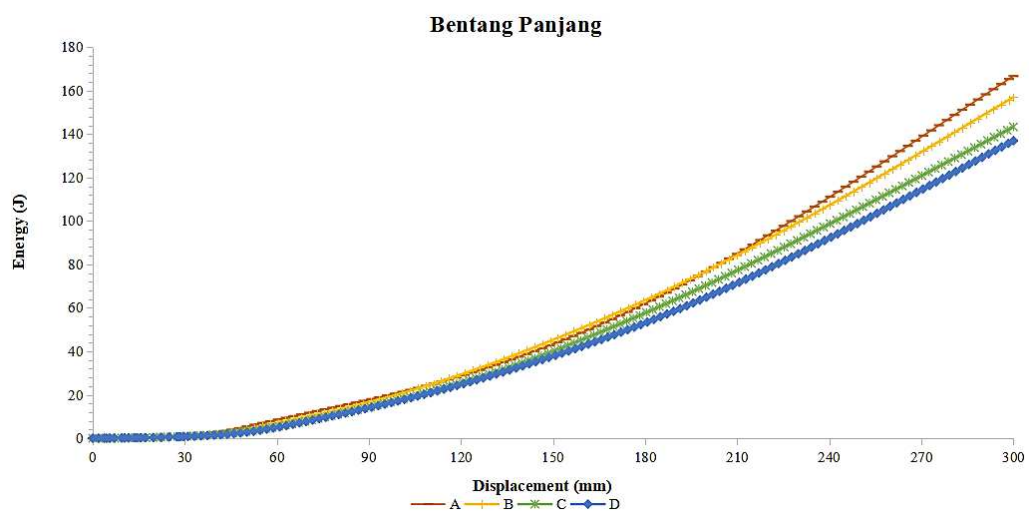
Gambar 14. Grafik Momen-Kurvatur Balok (a) Bentang Pendek, (b) Bentang Menengah, (c) Bentang Panjang



(a)



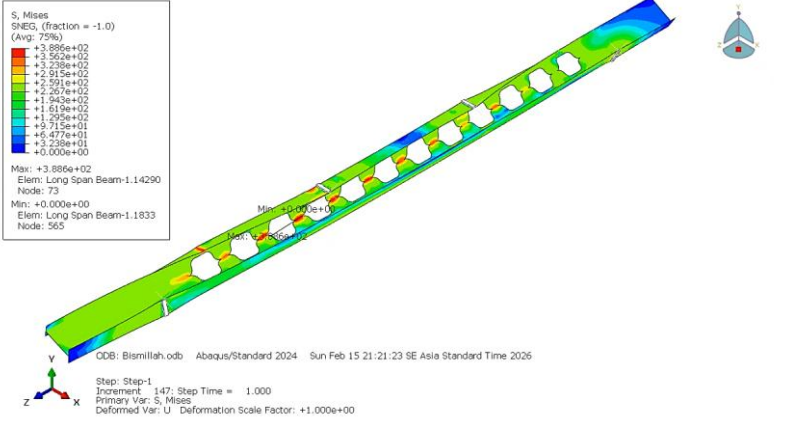
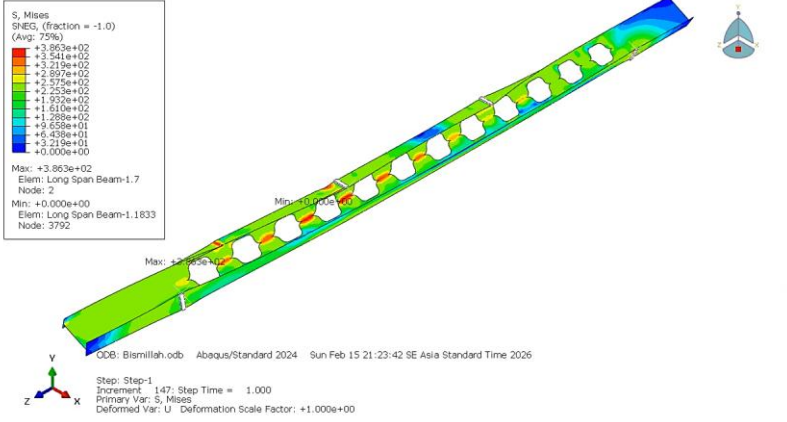
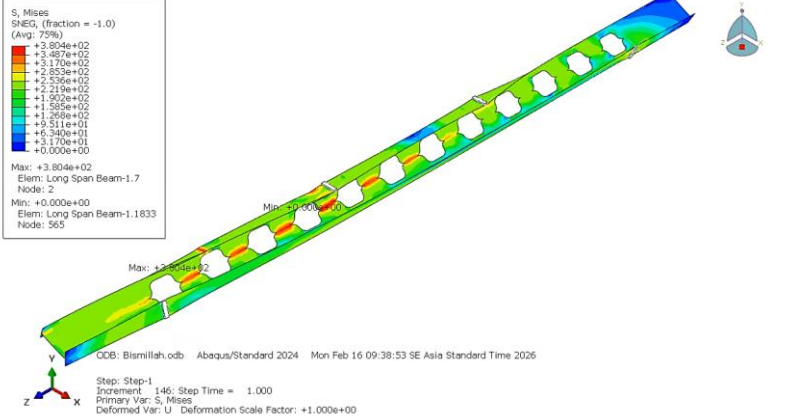
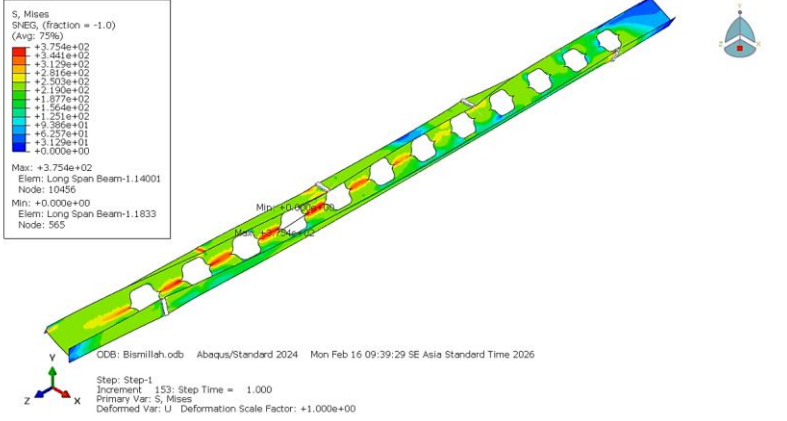
(b)



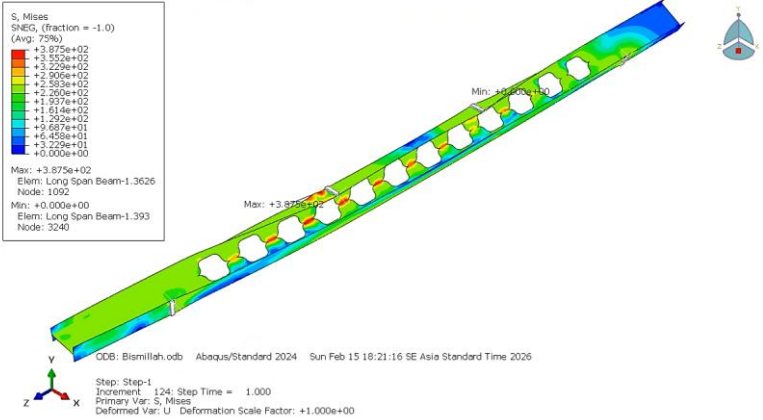
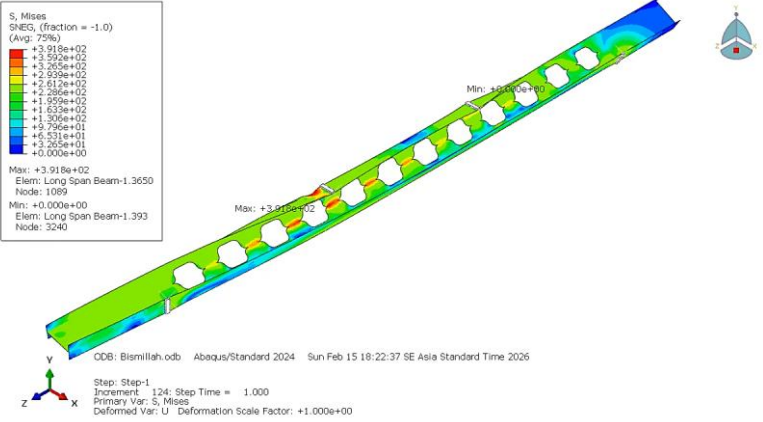
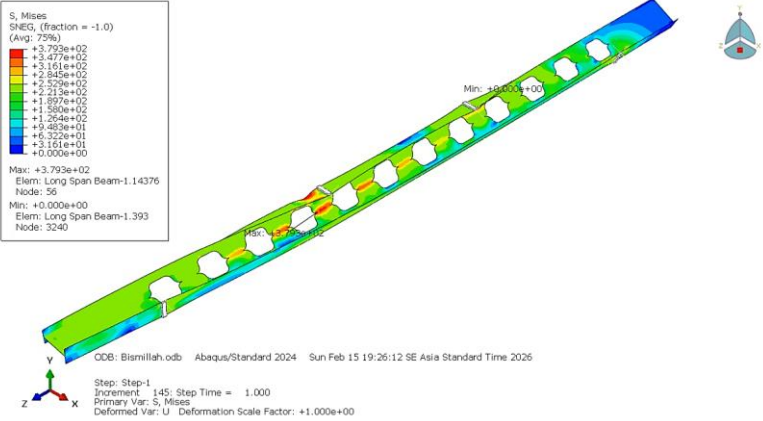
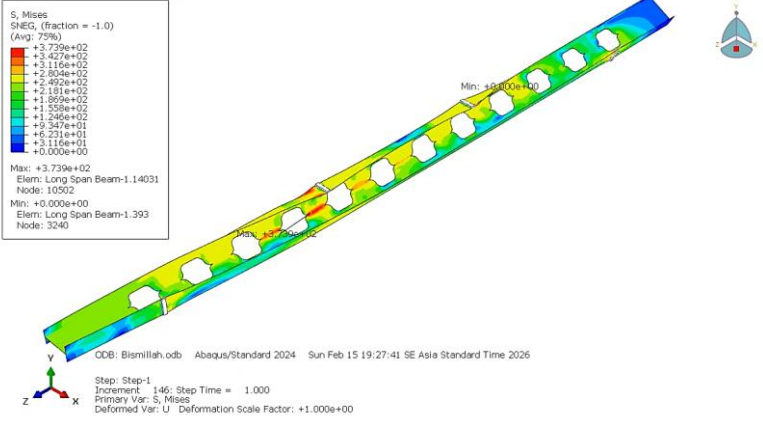
(c)

Gambar 15. Grafik Energi-Defleksi Balok (a) Bentang Pendek, (b) Bentang Menengah, (c) Bentang Panjang

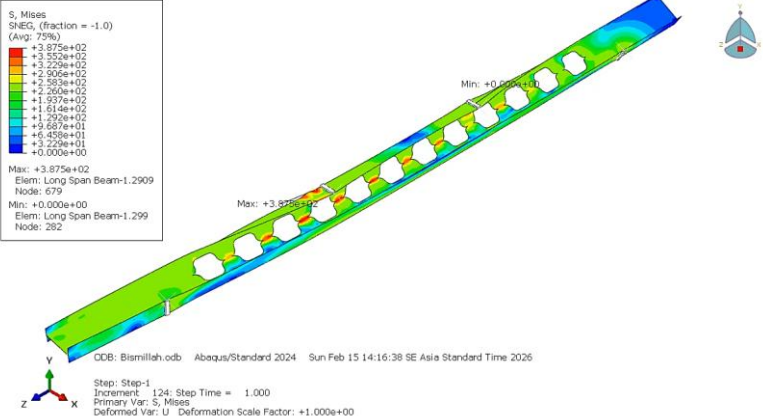
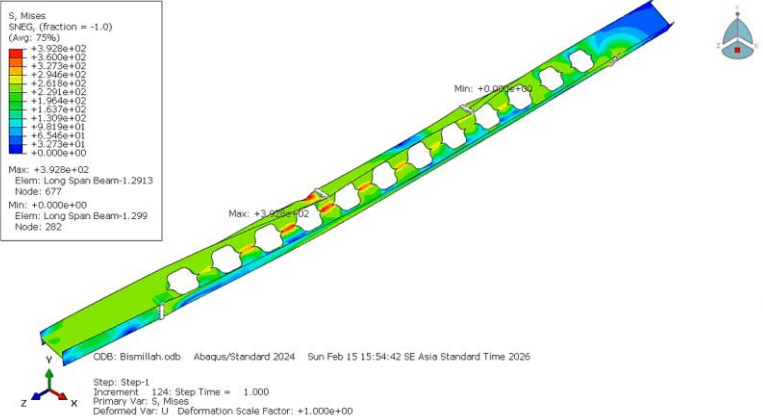
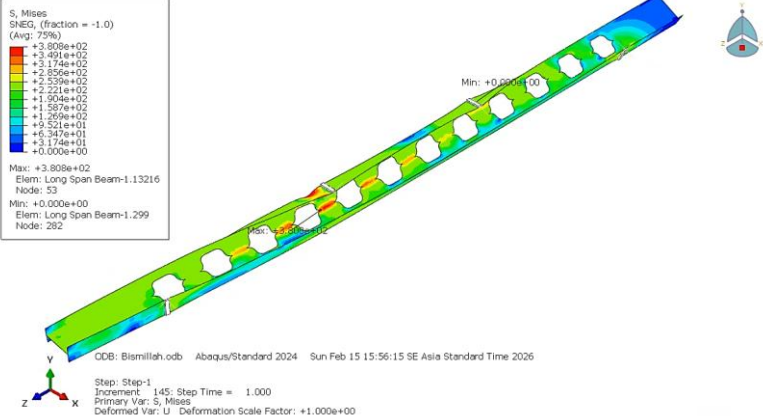
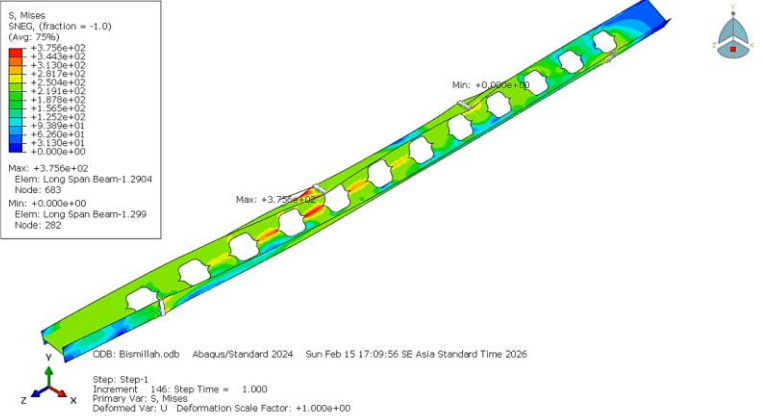
Tabel 3. Mode Kegagalan - S Misses Balok Bentang Pendek

SPECIMEN	S MISSES
A	 S, Misses SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.886e+02 Elem: Long Span Beam-1.14290 Node: 73 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.1833 Node: 565 OCB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 21:21:23 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 147; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00
B	 S, Misses SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.863e+02 Elem: Long Span Beam-1.7 Node: 2 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.1833 Node: 3792 OCB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 21:23:42 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 147; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00
C	 S, Misses SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.804e+02 Elem: Long Span Beam-1.7 Node: 2 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.1833 Node: 565 OCB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Mon Feb 16 09:38:53 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 146; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00
D	 S, Misses SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.754e+02 Elem: Long Span Beam-1.14001 Node: 10456 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.1833 Node: 565 OCB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Mon Feb 16 09:39:29 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 153; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00

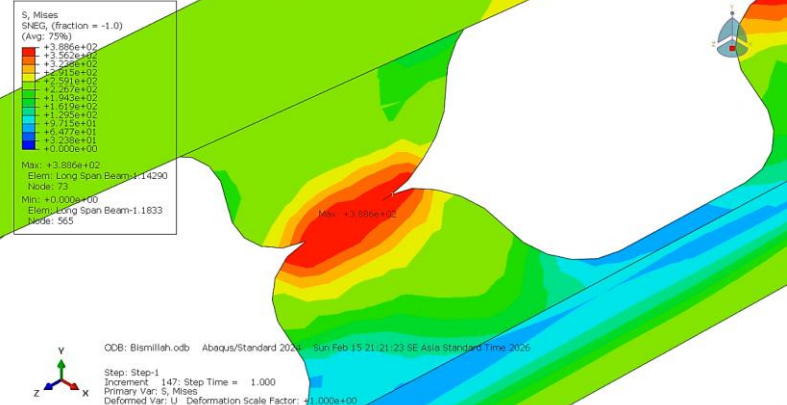
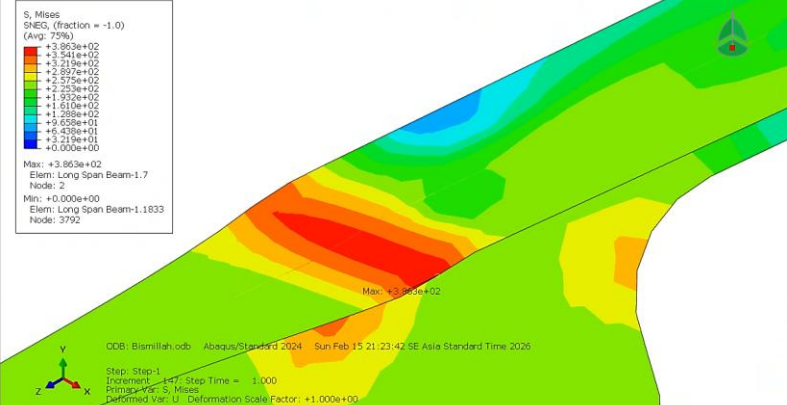
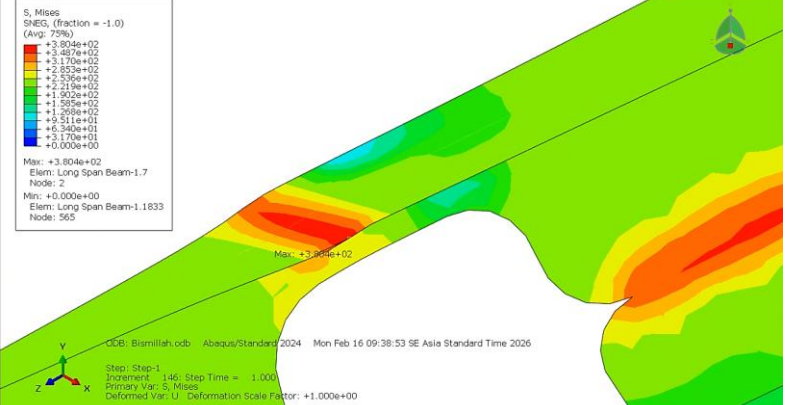
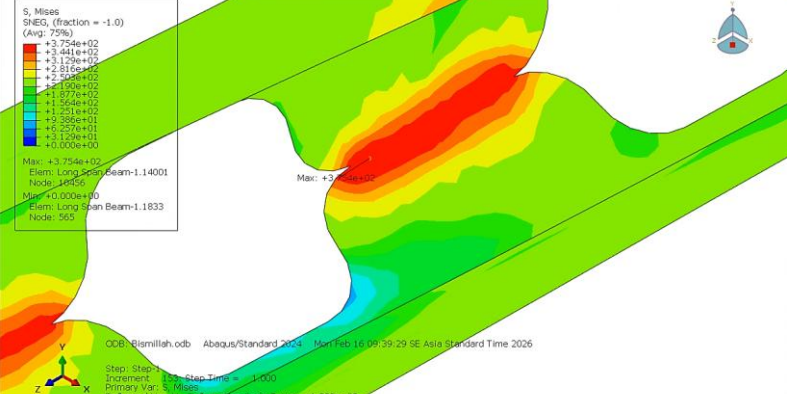
Tabel 4. Mode Kegagalan - S Misses Balok Bentang Menengah

SPECIMEN	S MISSES
A	 S, Misses SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.875e+02 Elem: Long Span Beam-1.3626 Node: 1092 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.393 Node: 3240 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 18:21:16 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 124; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
B	 S, Misses SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.918e+02 Elem: Long Span Beam-1.3650 Node: 1089 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.393 Node: 3240 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 18:22:37 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 124; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
C	 S, Misses SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.793e+02 Elem: Long Span Beam-1.14376 Node: 56 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.393 Node: 3240 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 19:26:12 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 145; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
D	 S, Misses SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.739e+02 Elem: Long Span Beam-1.14031 Node: 10502 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.393 Node: 3240 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 19:27:41 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 146; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

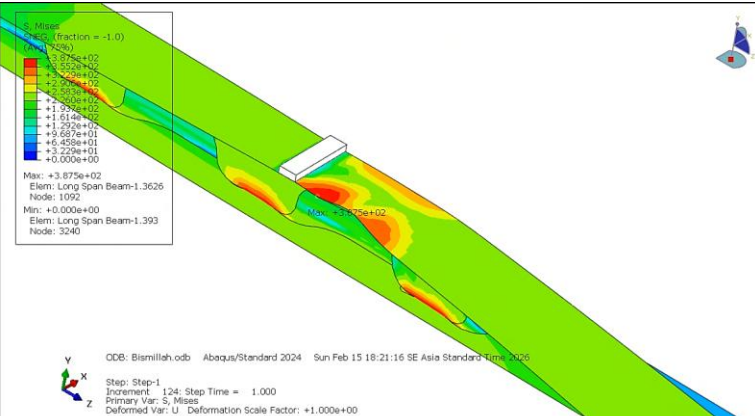
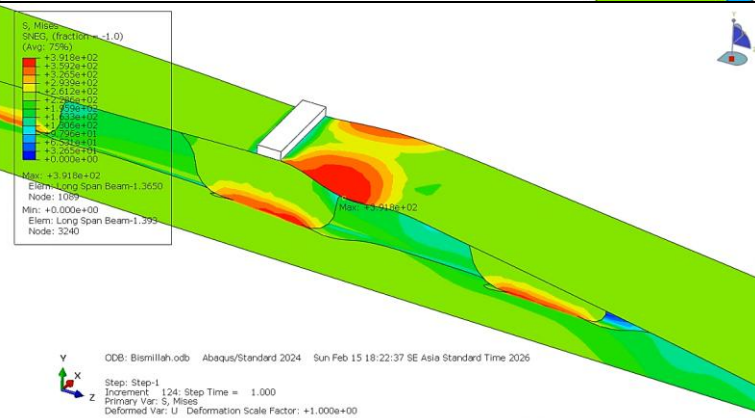
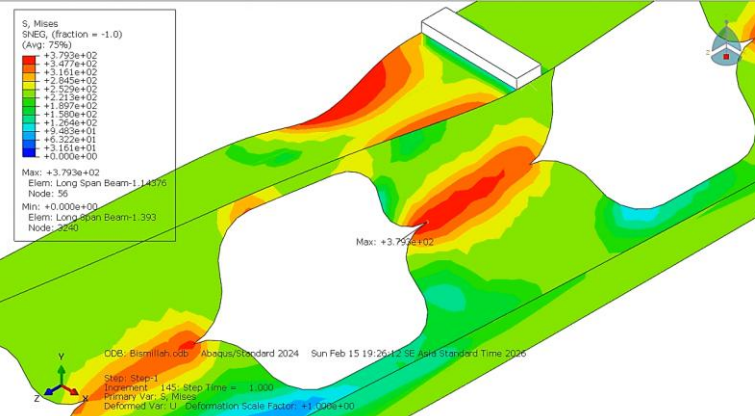
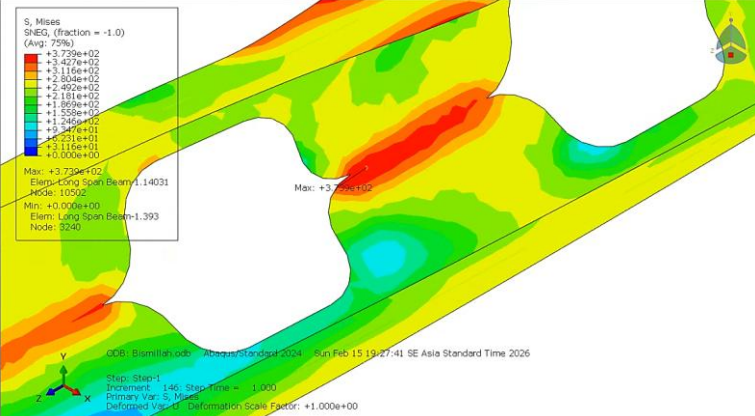
Tabel 5. Mode Kegagalan - S Misses Balok Bentang Panjang

SPECIMEN	S MISSES
A	 S, Misses SHEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.875e+02 Elem: Long Span Beam-1.2909 Node: 679 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.299 Node: 282 COB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 14:16:38 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 124; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
B	 S, Misses SHEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.928e+02 Elem: Long Span Beam-1.2913 Node: 677 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.299 Node: 282 COB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 15:54:42 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 124; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
C	 S, Misses SHEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.808e+02 Elem: Long Span Beam-1.13216 Node: 53 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.299 Node: 282 COB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 15:56:15 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 145; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00
D	 S, Misses SHEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.756e+02 Elem: Long Span Beam-1.2904 Node: 683 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.299 Node: 282 COB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 17:09:56 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 146; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Misses Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

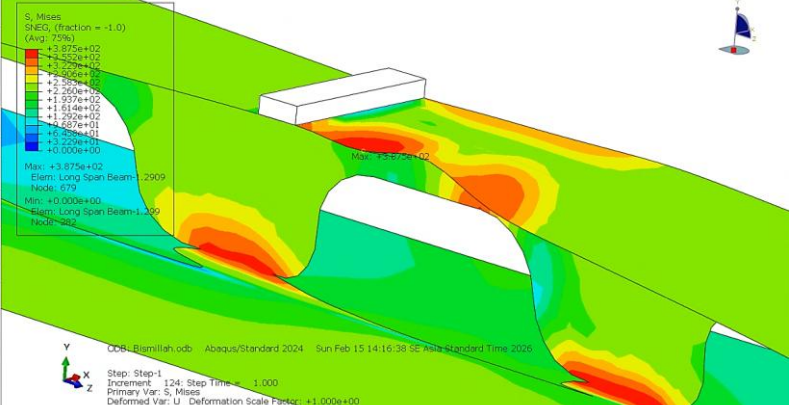
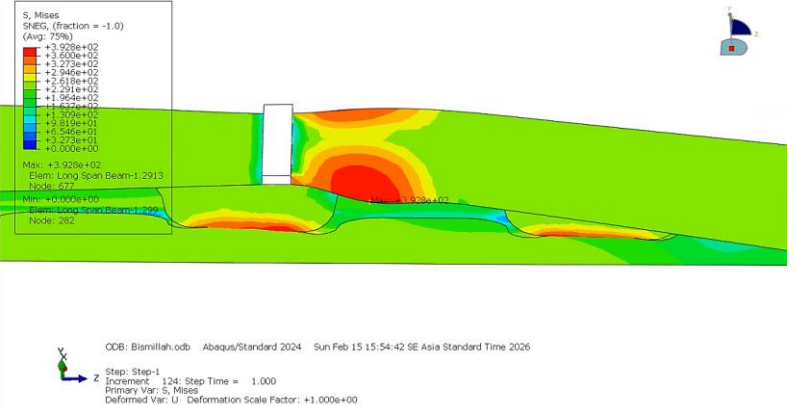
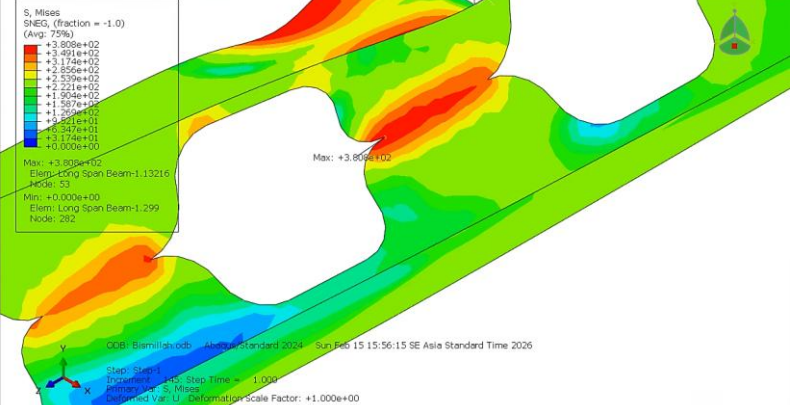
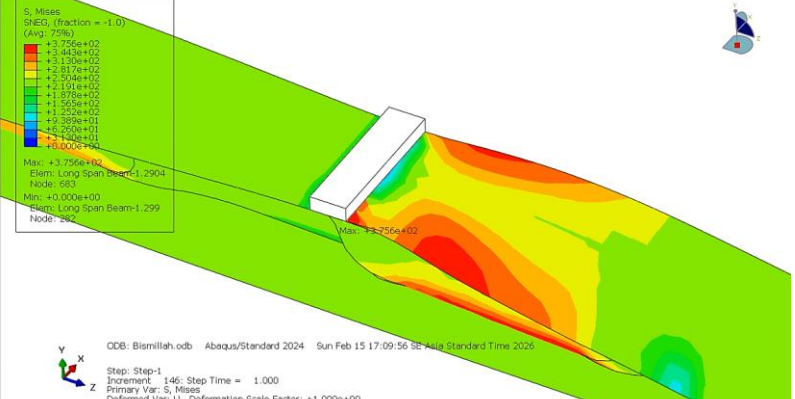
Tabel 6. Lokasi Tegangan Kritis Balok Bentang Pendek

SPEC.	FAILURE MODES	LOC.
A	 S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.886e+02 Elem: Long Span Beam-1.14290 Node: 73 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.1833 Node: 565 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 21:21:23 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 147; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	WEB
B	 S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.863e+02 Elem: Long Span Beam-1.7 Node: 2 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.1833 Node: 3792 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 21:23:42 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 147; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	FLANGE
C	 S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.804e+02 Elem: Long Span Beam-1.7 Node: 2 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.1833 Node: 565 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Mon Feb 16 09:38:53 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 146; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	FLANGE
D	 S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) Max: +3.754e+02 Elem: Long Span Beam-1.14001 Node: 16556 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.1833 Node: 565 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Mon Feb 16 09:39:29 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 146; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	WEB

Tabel 7. Lokasi Tegangan Kritis Balok Bentang Menengah

SPEC.	FAILURE MODES	LOC.
A	 S, Mises SHEQ, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) +3.875e+02 +3.552e+02 +3.229e+02 +2.906e+02 +2.583e+02 +2.260e+02 +1.937e+02 +1.614e+02 +1.291e+02 +9.687e+01 +6.458e+01 +3.229e+01 +0.000e+00 Max: +3.875e+02 Elem: Long Span Beam-1.3626 Node: 1092 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.393 Node: 3240 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 18:21:16 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 124; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	FLANGE
B	 S, Mises SHEQ, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) +3.918e+02 +3.595e+02 +3.272e+02 +2.949e+02 +2.626e+02 +2.303e+02 +1.980e+02 +1.657e+02 +1.334e+02 +1.011e+02 +6.882e+01 +3.653e+01 +0.000e+00 Max: +3.918e+02 Elem: Long Span Beam-1.3650 Node: 1007 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.393 Node: 3240 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 18:22:37 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 124; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	FLANGE
C	 S, Mises SHEQ, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) +3.792e+02 +3.477e+02 +3.161e+02 +2.845e+02 +2.529e+02 +2.213e+02 +1.897e+02 +1.580e+02 +1.264e+02 +9.473e+01 +6.322e+01 +3.161e+01 +0.000e+00 Max: +3.792e+02 Elem: Long Span Beam-1.14026 Node: 56 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.393 Node: 3250 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 19:26:42 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 145; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	WEB
D	 S, Mises SHEQ, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) +3.739e+02 +3.427e+02 +3.116e+02 +2.804e+02 +2.492e+02 +2.181e+02 +1.869e+02 +1.556e+02 +1.244e+02 +9.346e+01 +6.221e+01 +3.116e+01 +0.000e+00 Max: +3.739e+02 Elem: Long Span Beam-1.14031 Node: 10508 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.393 Node: 3240 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 19:27:41 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 146; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	WEB

Tabel 8. Lokasi Tegangan Kritis Balok Bentang Panjang

SPEC.	FAILURE MODES	LOC.
A	 S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) +3.875e+02 +3.525e+02 +3.225e+02 +2.925e+02 +2.55e+02 +2.25e+02 +1.975e+02 +1.614e+02 +1.25e+02 +87e+01 +52.7e+01 +3.225e+01 +0.000e+00 Max: +3.875e+02 Elem: Long Span Beam-1.2909 Node: 679 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.299 Node: 282 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 14:16:38 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 124; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	FLANGE
B	 S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) +3.928e+02 +3.600e+02 +3.275e+02 +2.946e+02 +2.618e+02 +2.291e+02 +1.954e+02 +1.627e+02 +1.300e+02 +91e+01 +54.5e+01 +27.3e+01 +0.000e+00 Max: +3.928e+02 Elem: Long Span Beam-1.2913 Node: 677 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.299 Node: 282 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 15:54:42 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 124; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	FLANGE
C	 S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) +3.808e+02 +3.491e+02 +3.174e+02 +2.856e+02 +2.539e+02 +2.221e+02 +1.904e+02 +1.587e+02 +1.269e+02 +921e+01 +547e+01 +174e+01 +0.000e+00 Max: +3.808e+02 Elem: Long Span Beam-1.13210 Node: 53 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.299 Node: 282 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 15:56:15 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 124; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	WEB
D	 S, Mises SNEG, (fraction = -1.0) (Avg: 75%) +3.756e+02 +3.443e+02 +3.133e+02 +2.817e+02 +2.504e+02 +2.191e+02 +1.878e+02 +1.565e+02 +1.252e+02 +939e+01 +560e+01 +33e+01 +0.000e+00 Max: +3.756e+02 Elem: Long Span Beam-1.2904 Node: 685 Min: +0.000e+00 Elem: Long Span Beam-1.299 Node: 282 ODB: Bismillah.odb Abaqus/Standard 2024 Sun Feb 15 17:09:56 SE Asia Standard Time 2026 Step: Step-1 Increment: 146; Step Time = 1.000 Primary Var: S, Mises Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00	FLANGE