

ANALISIS NUMERIKAL MODEL JEMBATAN DENGAN BEBAN EKSENTRIK – STUDI KASUS *BRIDGE DESIGN COMPETITION* NTU 2025

Krisna Febrian Anugerahputra¹, Stevan Joseph Tuhuleruw², Legat Bestari³

¹*Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jalan Sigura-Gura no. 2 Malang
Email: krisna@lecturer.itn.ac.id*

²*Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jalan Sigura-Gura no. 2 Malang
Email: stevantuhuleruw0@gmail.com*

³*Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang, Jalan Sigura-Gura no. 2 Malang
Email: bestarilegat2@gmail.com*

ABSTRACT

Eccentric loading is one of the critical loading conditions that can influence the structural performance of bridge systems because it generates a combination of bending and torsional responses as well as non-uniform internal force distribution. This study aims to analyze the structural behavior of a lightweight truss bridge model made of balsa wood designed for the Bridge Design Competition (BDC) at Nanyang Technological University (NTU) 2025 under eccentric loading conditions. The analysis was conducted using the Finite Element Method (FEM) through SAP2000 software with three-dimensional frame element modeling and linear elastic material assumptions. Static loading was applied incrementally with magnitudes of 225 N, 450 N, 675 N, and 900 N at an eccentric position located at two-thirds of the bridge span. The evaluated parameters include maximum deflection, axial force distribution, and indications of torsional structural response. The results show that the load–deflection relationship is linear, indicating that the structure remains within the elastic behavior range under the analyzed loading conditions. The maximum deflection recorded under a 900 N load was 0.2322 mm, resulting in a high span-to-deflection ratio, which reflects good global structural stiffness. Eccentric loading causes asymmetric axial force distribution among truss members and increases the torsional response of the structure. The application of layered main girders and lateral bracing systems proved effective in enhancing torsional stiffness and structural stability under asymmetric loading. Furthermore, the bridge model tested in the competition achieved a strength-to-weight efficiency ratio of 970, indicating high structural performance for a lightweight truss bridge. These findings confirm that numerical analysis is an effective approach for predicting structural responses and supporting the optimization of lightweight truss bridge design under eccentric loading conditions.

Keywords: truss bridge, eccentric loading, finite element method, torsional response, structural efficiency.

ABSTRAK

Beban eksentrik merupakan salah satu kondisi pembebanan yang dapat mempengaruhi kinerja struktur jembatan karena menimbulkan kombinasi respon lentur dan torsi serta distribusi gaya dalam yang tidak simetris. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku struktur model jembatan rangka ringan berbahan kayu balsa yang dirancang untuk Bridge Design Competition (BDC) Nanyang Technological University (NTU) 2025 terhadap pembebanan eksentrik. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) melalui perangkat lunak SAP2000 dengan pemodelan elemen rangka tiga dimensi dan asumsi perilaku material elastis linier. Pembebanan statik diberikan secara bertahap sebesar 225 N, 450 N, 675 N, dan 900 N pada posisi eksentrik di dua pertiga bentang jembatan. Parameter yang dianalisis meliputi lendutan maksimum, distribusi gaya aksial, serta indikasi respon torsional struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa hubungan antara beban dan lendutan bersifat linier yang mengindikasikan perilaku elastis struktur pada rentang pembebanan yang dianalisis. Lendutan maksimum yang terjadi pada pembebanan 900 N sebesar 0,2322 mm dengan rasio bentang terhadap lendutan yang tinggi, menunjukkan kekakuan global struktur yang baik. Pembebanan eksentrik menyebabkan distribusi gaya aksial yang tidak simetris pada elemen rangka serta meningkatkan respon torsional struktur. Penerapan konfigurasi gelagar induk berlapis dan sistem pengaku lateral terbukti mampu meningkatkan kekakuan torsional dan stabilitas struktur terhadap pembebanan tidak simetris. Selain itu, model jembatan yang diuji pada kompetisi menunjukkan rasio efisiensi kekuatan terhadap berat sebesar 970, yang menunjukkan kinerja struktural yang tinggi untuk jembatan rangka ringan. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa pendekatan analisis numerikal efektif digunakan untuk memprediksi respon struktur serta mendukung optimalisasi desain jembatan rangka ringan terhadap pembebanan eksentrik.

Kata kunci: jembatan rangka, beban eksentrik, metode elemen hingga, respon torsional, efisiensi struktur.

1. PENDAHULUAN

Jembatan merupakan salah satu elemen infrastruktur strategis yang berperan penting dalam mendukung konektivitas, mobilitas, serta pertumbuhan ekonomi suatu wilayah. Seiring berkembangnya teknologi rekayasa struktur, tuntutan terhadap desain jembatan tidak hanya terbatas pada aspek kekuatan dan keamanan, tetapi juga mencakup efisiensi material, stabilitas global, serta kemampuan struktur dalam merespon berbagai kondisi pembebanan yang kompleks. Salah satu kondisi pembebanan yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja struktur jembatan adalah beban eksentrik.

Beban eksentrik terjadi ketika garis kerja gaya tidak melalui sumbu simetri atau pusat geser struktur, sehingga menimbulkan kombinasi respons lentur dan torsi secara simultan. Pada sistem jembatan rangka, kondisi ini dapat menyebabkan distribusi gaya aksial yang tidak merata antar batang, peningkatan deformasi lateral, serta munculnya rotasi torsional yang berpotensi menurunkan stabilitas struktur. Dalam praktik rekayasa, pembebanan eksentrik dapat berasal dari distribusi lalu lintas yang tidak merata, variasi posisi kendaraan berat, ketidaksempurnaan konstruksi, maupun kondisi pengujian tertentu pada model skala laboratorium.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji perilaku struktur jembatan terhadap pembebanan asimetris menggunakan pendekatan analitik maupun numerikal. Metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) menjadi salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan karena mampu merepresentasikan interaksi kompleks antara gaya aksial, lentur, dan torsi dalam sistem struktur tiga dimensi. Meskipun demikian, sebagian besar studi lebih berfokus pada jembatan skala penuh berbahan baja atau beton, sementara kajian mengenai respon torsional dan efisiensi struktural pada model jembatan rangka ringan berbahan kayu balsa masih relatif terbatas, khususnya dalam konteks kompetisi desain jembatan.

Bridge Design Competition (BDC) NTU 2025 yang diselenggarakan oleh Nanyang Technological University merupakan ajang kompetisi internasional yang menekankan pada perancangan model jembatan dengan rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang optimal. Pada kompetisi ini, struktur diuji dengan kondisi pembebanan tertentu, termasuk beban eksentrik yang diaplikasikan pada sebagian bentang jembatan. Kondisi ini menuntut peserta untuk tidak hanya merancang struktur yang kuat secara lentur, tetapi juga memiliki kekakuan torsional yang memadai guna mengendalikan deformasi dan distribusi gaya dalam secara efisien. Meskipun analisis numerikal telah banyak digunakan dalam proses perancangan model jembatan kompetisi,

kajian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh beban eksentrik terhadap respon torsional, distribusi gaya aksial, serta implikasinya terhadap efisiensi struktural masih belum banyak dibahas secara sistematis. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mampu mengintegrasikan analisis respon struktur dengan evaluasi efisiensi berat untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai kinerja jembatan rangka ringan di bawah pembebanan eksentrik.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis numerikal terhadap model jembatan rangka berbahan kayu balsa yang dirancang untuk *Bridge Design Competition* (BDC) NTU 2025 dengan mempertimbangkan pengaruh beban eksentrik. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga melalui perangkat lunak SAP2000 untuk mengevaluasi lendutan, distribusi gaya aksial, serta indikasi respon torsional. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji efisiensi struktural berdasarkan rasio beban maksimum terhadap berat sendiri struktur sebagai parameter performa kompetitif. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan desain jembatan rangka ringan yang stabil, efisien, dan optimal terhadap pembebanan tidak simetris.

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi kuantitatif pengaruh eksentrisitas terhadap rasio kekakuan-berat pada model jembatan rangka balsa menggunakan pendekatan FEM tiga dimensi yang belum banyak dibahas dalam konteks kompetisi desain jembatan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Analisis numerikal dalam rekayasa jembatan

Analisis numerikal berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) telah menjadi pendekatan yang umum digunakan dalam studi perilaku struktur jembatan. Metode ini memungkinkan pemodelan struktur secara detail dengan mempertimbangkan geometri, sifat material, kondisi batas, dan variasi pembebanan. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) digunakan untuk menyelesaikan permasalahan struktur kompleks dengan mendiskritisasi sistem kontinu menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung pada titik nodal. Formulasi umum sistem struktur dalam FEM dinyatakan dalam bentuk matriks kekakuan global:

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

Dimana:

$[K]$ = matriks kekakuan global

$\{u\}$ = vektor perpindahan nodal

$\{F\}$ = vektor gaya nodal

Pada elemen frame tiga dimensi, setiap node memiliki enam derajat kebebasan (3 translasi dan 3 rotasi), sehingga metode ini mampu merepresentasikan

perilaku aksial, lentur dua arah, serta torsi secara simultan. Dalam analisis pembebanan eksentrik, FEM sangat efektif karena mampu menangkap distribusi gaya aksial yang tidak simetris, dapat memodelkan interaksi lentur–torsi, dan memungkinkan evaluasi deformasi global dan rotasi torsional secara bersamaan.

Melalui FEM, respon struktur seperti lendutan, gaya dalam, tegangan, dan pola deformasi dapat dianalisis secara komprehensif. Berbagai studi menunjukkan bahwa analisis numerikal mampu memberikan hasil yang cukup akurat dalam memprediksi perilaku struktur jembatan, khususnya untuk kondisi pembebanan kompleks seperti beban eksentrik.

Teori dasar beban eksentrik pada struktur

Beban eksentrik terjadi ketika garis kerja gaya tidak melalui pusat geser (*shear center*) atau sumbu simetri penampang struktur, sehingga menghasilkan kombinasi respons lentur dan torsi secara simultan. Secara mekanis, beban eksentrik (F) dengan jarak eksentrisitas (e) terhadap sumbu pusat akan menghasilkan momen lentur dan momen torsi yang dapat dinyatakan sebagai:

$$M = F \cdot e$$

Selain menghasilkan momen lentur vertikal, eksentrisitas juga menimbulkan momen puntir (*torsional moment*) yang menyebabkan rotasi penampang terhadap sumbu longitudinal struktur. Pada sistem rangka tiga dimensi, fenomena ini memicu interaksi antara gaya aksial, lentur, dan torsi secara bersamaan.

Menurut Structural Analysis, pengaruh eksentrisitas beban dapat meningkatkan tegangan maksimum pada elemen struktur akibat superposisi tegangan lentur dan tegangan akibat torsi. Tegangan total pada elemen dapat dinyatakan sebagai kombinasi:

$$\sigma_{total} = \sigma_{aksial} + \sigma_{lentur}$$

Sedangkan untuk elemen yang mengalami torsi, tegangan geser akibat puntir dinyatakan sebagai:

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J}$$

Dimana:

T = momen torsi

r = jarak terhadap pusat geser

J = momen inersia polar

Pada struktur jembatan rangka ringan, distribusi gaya yang tidak simetris akibat eksentrisitas dapat memperbesar risiko ketidakstabilan lateral dan rotasi global struktur.

Efisiensi struktur dan rasio *strength-to-weight*

Pada kompetisi desain jembatan, parameter utama evaluasi performa adalah rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*). Konsep ini

menekankan optimalisasi kapasitas struktur dengan penggunaan material seminimal mungkin. Secara umum, rasio efisiensi dapat dinyatakan sebagai:

$$\mu = \frac{P_{maks}}{W}$$

Dimana:

P_{maks} = beban maksimum yang mampu ditahan

W = berat sendiri struktur

Menurut Bridge Engineering Handbook: Superstructure Design, desain jembatan efisien adalah desain yang mampu mengendalikan deformasi dalam batas servisabilitas tanpa peningkatan berat yang signifikan. Dalam konteks model jembatan berbahan kayu balsa, peningkatan kekakuan torsional melalui konfigurasi elemen rangka harus mempertimbangkan konsekuensi terhadap berat total struktur.

Oleh karena itu, optimasi desain tidak hanya ditinjau dari kapasitas beban maksimum, tetapi juga dari kemampuan struktur dalam mempertahankan kekakuan global dan stabilitas torsional dengan rasio berat yang minimum.

Interaksi lentur–torsi pada jembatan rangka ringan

Pada sistem jembatan rangka ringan dengan lebar relatif kecil terhadap bentang, eksentrisitas beban dapat memicu rotasi global struktur yang signifikan. Interaksi antara lentur dan torsi menyebabkan redistribusi gaya aksial antar batang, khususnya pada sisi yang menerima beban eksentrik.

Penelitian oleh Steel Structures: Design and Behavior menunjukkan bahwa ketidakseragaman distribusi gaya akibat torsi dapat meningkatkan risiko buckling lokal pada elemen tekan. Oleh karena itu, sistem pengaku lateral dan pengikat silang menjadi komponen penting dalam menjaga stabilitas global struktur.

Dalam model jembatan skala kecil, fenomena ini menjadi lebih kritis karena:

- modulus elastisitas material relatif rendah,
- dimensi penampang kecil,
- rasio kelangsingan elemen cukup tinggi.

Dengan demikian, analisis numerikal tiga dimensi menjadi pendekatan yang relevan untuk mengevaluasi interaksi kompleks antara gaya aksial, lentur, dan torsi secara simultan.

Model jembatan dan *bridge design competition (bdc)* ntu 2025

Kompetisi desain jembatan, seperti pada BDC NTU 2025, merupakan media pengujian konsep desain struktur secara praktis dan inovatif. Pada kompetisi ini, model jembatan dirancang dengan keterbatasan material dan dimensi tertentu, sehingga efisiensi struktur menjadi aspek utama penilaian. Studi-studi terkait kompetisi desain jembatan menunjukkan

bahwa pendekatan numerikal sangat membantu dalam tahap perencanaan desain untuk memprediksi kapasitas struktur dan mengoptimalkan konfigurasi elemen rangka sebelum dilakukan pengujian fisik.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Pemodelan numerikal

Pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 dengan pendekatan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Elemen struktur dimodelkan sebagai elemen frame tiga dimensi (3D frame element) yang mampu merepresentasikan perilaku aksial, lentur, dan torsi secara simultan.

Setiap batang rangka diasumsikan memiliki sifat material homogen, isotropik, dan berperilaku elastis linear. Material kayu balsa dimodelkan berdasarkan parameter mekanik berikut:

- Modulus elastisitas (E): $\pm 3.000\text{--}4.000$ MPa (sesuai literatur kayu balsa struktural)
- Poisson's ratio (ν): 0,3
- Berat jenis rata-rata: disesuaikan dengan spesifikasi material kompetisi

Penampang batang dimodelkan sesuai dimensi aktual kayu balsa $3/16 \times 3/16$ inch, dengan asumsi sambungan antar batang bersifat sendi (*pinned connection*), kecuali pada elemen yang dirancang sebagai pengaku lateral.

Kondisi batas (*boundary conditions*)

Struktur dimodelkan dengan sistem tumpuan sendi–sendi (*pinned–pinned support*), sesuai dengan ketentuan pengujian pada *Bridge Design Competition* (BDC) NTU 2025.

Satu tumpuan diasumsikan sebagai sendi tetap (menahan translasi arah x , y , z), sedangkan tumpuan lainnya sebagai rol (menahan translasi vertikal dan lateral tertentu) untuk menghindari overconstraint dan memastikan sistem statis tertentu.

Dimensi jembatan

Dimensi jembatan yang digunakan pada *Bridge Design Competition* (BDC) NTU 2025 antara lain:

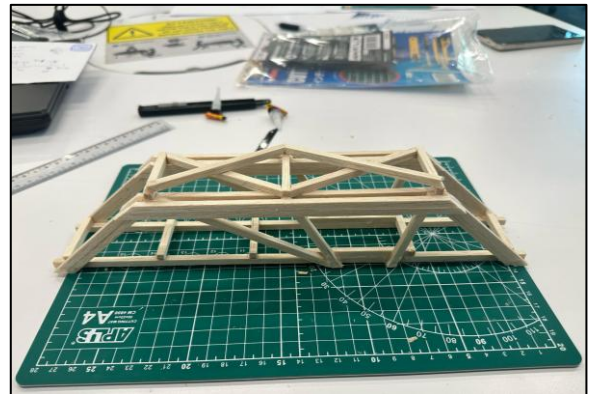
- Bentang jembatan : 310 mm
- Lebar jembatan : 52 mm
- Tinggi jembatan : 60 mm

Material yang digunakan adalah kayu balsa berukuran $3/16 \times 3/16 \times 36$ inch, dengan dimensi plat pembebanan jembatan 49 mm $\times$ 55 mm.

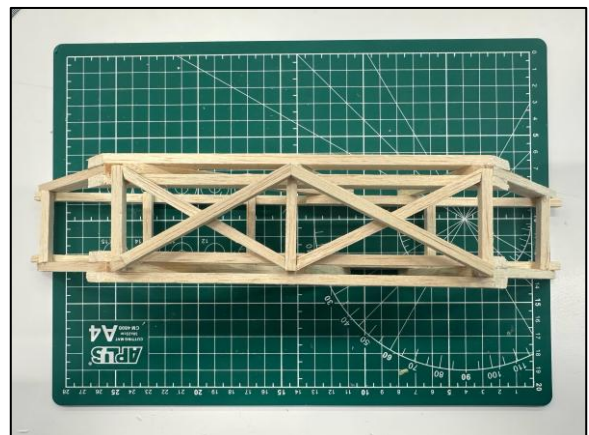
Desain jembatan

Berdasarkan studi yang berkaitan dengan kompetisi tersebut, desain jembatan yang digunakan dalam perlombaan dibuat untuk menahan beban eksentrik dimana bentang jembatan dibagi hanya 2/3 untuk menahan beban ketika dilakukan uji coba. Pada gelagar induk yang merupakan gelagar utama pada jembatan didesain dengan 2 lapis kayu balsa agar

mampu menahan eksentrisitas beban yang diikuti dengan momen torsi dan ketidakseragaman tegangan pada elemen struktur. Gelagar melintang yang diposisikan di tengah jembatan berfungsi untuk menjaga stabilitas jembatan agar gelagar induk tidak mengalami deformasi yang berlebihan. Ikatan angin pada bagian atas dirancang sebagai pengaku lateral untuk menahan beban lateral, serta memastikan gelagar induk dan elemen rangka lain tetap kuat dan stabil dalam menahan beban eksentrik.



Gambar 1. Tampak Samping Jembatan



Gambar 2. Tampak Atas Jembatan

Skema pembebanan

Pembebanan dilakukan secara statik bertahap dengan variasi:

- 225 N
- 450 N
- 675 N
- 900 N

Beban diberikan secara eksentrik pada 2/3 bentang jembatan sesuai regulasi kompetisi. Beban diaplikasikan sebagai concentrated load pada pelat pembebanan, kemudian didistribusikan ke simpul rangka.

Eksentrisitas beban menyebabkan timbulnya kombinasi:

- Gaya lentur vertikal
- Gaya aksial tarik–tekan

- Momen torsi

Analisis dilakukan dalam kondisi pembebanan statik linier.

Parameter evaluasi

Respon struktur yang dianalisis meliputi:

1. Lendutan maksimum (*maximum vertical displacement*).
2. Distribusi gaya aksial pada batang.
3. Pola deformasi struktur.
4. Indikasi respon torsional akibat eksentrisitas beban.

Evaluasi lendutan dilakukan pada titik tengah bentang dan pada sisi struktur yang menerima eksentrisitas beban untuk mengidentifikasi potensi rotasi torsional.

Prosedur analisis

Tahapan analisis dilakukan sebagai berikut:

1. Pemodelan geometri struktur sesuai desain aktual.
2. Penentuan properti material dan penampang.
3. Pemberian kondisi batas.
4. Aplikasi beban eksentrik bertahap.
5. Running analisis statik linier.
6. Ekstraksi data lendutan dan gaya dalam.
7. Analisis hubungan beban–lendutan.

Hubungan beban dan lendutan dianalisis menggunakan pendekatan regresi linier untuk mengidentifikasi karakteristik elastis struktur.

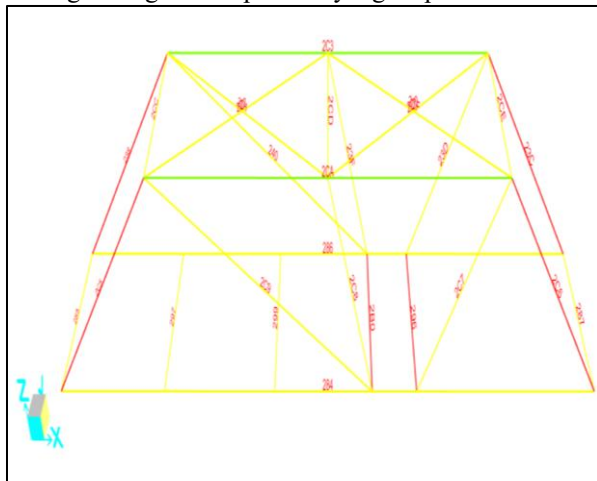
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis struktur menggunakan sap2000

Analisis pada struktur jembatan menggunakan SAP2000 mengikuti model jembatan pada *Bridge Design Competition* (BDC) NTU 2025. Berikut tahapan serta hasil analisis struktur jembatan menggunakan software SAP2000:

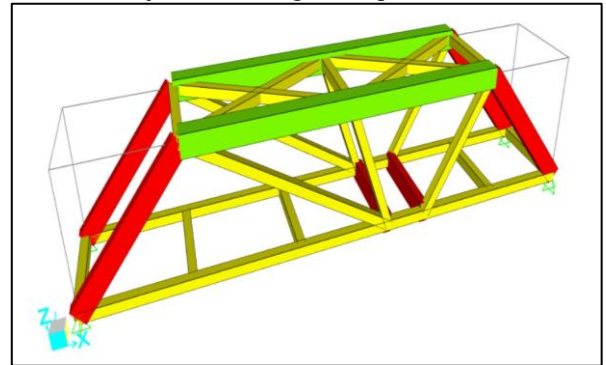
A. Kode batang jembatan.

Pemberian kode batang ini dilakukan untuk memudahkan identifikasi terhadap respon masing-masing batang terhadap beban yang diaplikasikan.



Gambar 3. Kode Batang pada Jembatan

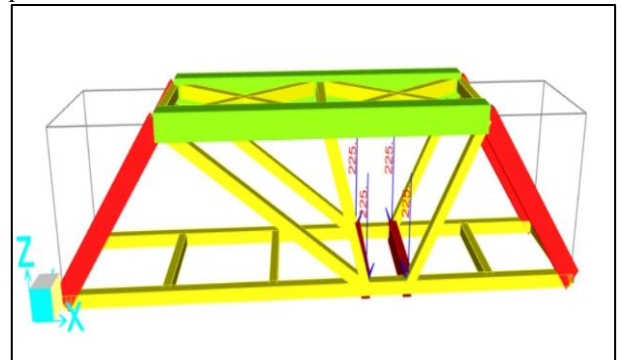
b. 3D model jembatan dengan tumpuan sendi-sendi.



Gambar 4. Model Jembatan dalam 3D

c. Skema pembebanan jembatan (satuan Newton).

Pembebanan dilakukan secara eksentrik pada 2/3 bentang jembatan sesuai dengan desain dan ketentuan atau TOR pada *Bridge Design Competition* (BDC) NTU 2025. Pembebanan yang diberikan untuk model jembatan mempunyai variasi kenaikan yaitu 225 N, 450 N, 675 N, dan 900 N. Pembebanan dilakukan secara bertahap bertujuan untuk mengetahui perbedaan lendutan pada masing-masing variasi pembebanan.



Gambar 5. Skema Pembebanan Jembatan

d. Hasil lendutan pada jembatan.

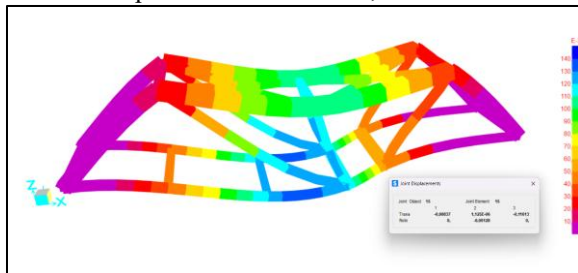
Lendutan adalah perubahan posisi vertikal atau pembengkokan komponen struktur dari posisi awalnya akibat beban yang diberikan. Berikut adalah hasil lendutan dari masing-masing variasi pembebanan.

- Lendutan pada beban 225 N = 0,058 mm



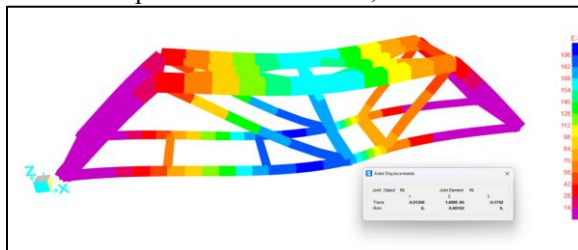
Gambar 6. Hasil Lendutan Jembatan pada Pembebanan 225 N

- Lendutan pada beban 450 N = 0,1161 mm



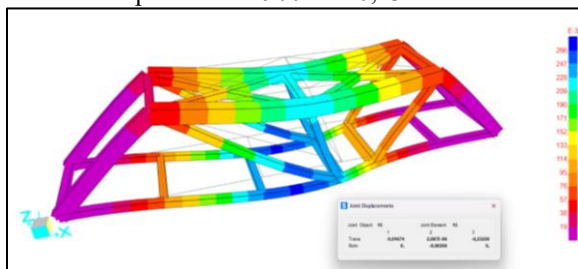
Gambar 7. Hasil Lendutan Jembatan pada Pembebanan 450 N

- Lendutan pada beban 675 N = 0,1742 mm



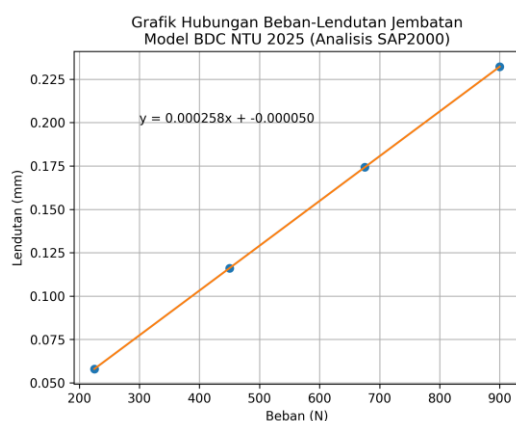
Gambar 8. Hasil Lendutan Jembatan pada Pembebanan 675 N

- Lendutan pada beban 900 N = 0,2322 mm



Gambar 9. Hasil Lendutan Jembatan pada Pembebanan 900 N

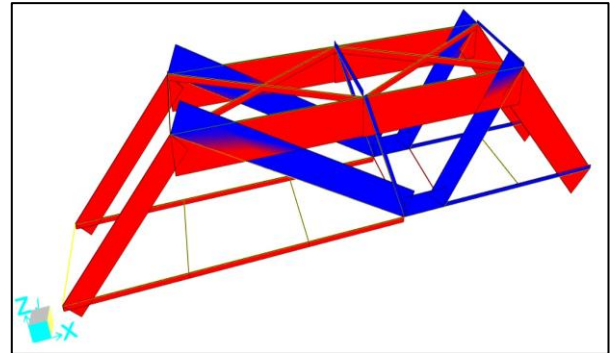
Hubungan beban-lendutan menunjukkan kecenderungan linear dengan koefisien determinasi mendekati 1, yang mengindikasikan perilaku elastis struktur masih dominan pada rentang pembebanan yang dianalisis.



Gambar 10. Grafik Hubungan Beban-Lendutan

e. Axial Force.

Axial Force (Gaya Aksial) adalah beban yang bekerja sejajar dengan sumbu memanjang suatu elemen struktur. Berikut gaya aksial yang terjadi pada model jembatan *Bridge Design Competition* (BDC) NTU 2025:



Gambar 11. Gaya Aksial pada Jembatan

Implikasi desain dan kontribusi studi

a. Implikasi Desain

Hasil analisis numerikal menunjukkan bahwa pembebanan eksentrik menghasilkan respon struktur yang tidak hanya berupa lendutan vertikal, tetapi juga memicu efek torsional akibat ketidaksimetrian distribusi beban. Hubungan beban-lendutan yang bersifat linear mengindikasikan bahwa struktur masih bekerja dalam rentang elastis pada variasi pembebanan hingga 900 N. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi rangka yang digunakan memiliki kekakuan yang memadai terhadap pembebanan eksentrik.

Nilai lendutan maksimum sebesar 0,2322 mm pada beban 900 N menghasilkan rasio lendutan terhadap bentang (L/δ) yang relatif tinggi, sehingga secara kriteria kekakuan global struktur masih tergolong aman dan efisien. Dengan bentang 310 mm, rasio L/δ berada pada kisaran yang menunjukkan performa kekakuan yang baik untuk model jembatan skala kecil berbahan kayu balsa.

Penggunaan gelagar induk berlapis dan sistem ikatan angin pada bagian atas terbukti meningkatkan kekakuan lateral dan torsional. Secara konseptual, konfigurasi ini efektif dalam mengurangi konsentrasi gaya pada sisi yang menerima eksentrisitas beban, sehingga distribusi gaya aksial antar batang menjadi lebih seimbang. Hal ini memberikan implikasi bahwa pada desain jembatan dengan potensi pembebanan tidak simetris, peningkatan kekakuan torsional harus menjadi pertimbangan utama selain kapasitas lentur.

b. Kontribusi Studi

Studi ini memberikan beberapa kontribusi dalam pengembangan desain jembatan rangka skala model,

khususnya pada konteks kompetisi desain jembatan internasional:

1. Memberikan evaluasi kuantitatif mengenai pengaruh beban eksentrik terhadap respon lendutan dan distribusi gaya aksial menggunakan pendekatan metode elemen hingga.
2. Menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan lateral dan torsional melalui modifikasi konfigurasi elemen rangka dapat meningkatkan stabilitas struktur terhadap pembebanan tidak simetris.
3. Menyediakan pendekatan numerikal sebagai alat optimasi desain sebelum dilakukan pengujian eksperimental, sehingga proses perancangan menjadi lebih efisien dan berbasis data.
4. Menjadi referensi teknis bagi peserta kompetisi desain jembatan dalam merancang struktur dengan rasio kekakuan terhadap berat yang optimal pada kondisi pembebanan eksentrik.

Secara akademik, penelitian ini memperkuat pemahaman mengenai interaksi antara lentur dan torsi pada sistem rangka ringan serta menegaskan pentingnya analisis numerikal sebagai bagian integral dalam proses desain struktur modern.

Rekapitulasi hasil analisis jembatan

Respons struktur yang diperoleh dari model jembatan melalui software SAP2000 akan dirangkum dalam tabel-tabel berikut. Respon struktur yang dianalisis pada jembatan ini mencakup Normal Force diagram, dan Stress diagram.

Tabel 1.1 *Normal Force Diagram* pada Gelagar Utama Jembatan

Batang	Pu (kN)
2C5	-0.246
2CA	-0.423
2C6	-0.405
238	-0.246
2C3	-0.423
23C	-0.405

Tabel 1.2 *Stress Diagram* pada Gelagar Utama Jembatan

Batang	σ (MPa)	$\sigma < \sigma$ Ijin (Rasio)	Kontrol
2C5	-14.92	-0.014 < 1	Aman
2CA	-15.25	-0.015 < 1	Aman
2C6	-15.24	-0.015 < 1	Aman
238	-14.92	-0.014 < 1	Aman
2C3	-15.43	-0.015 < 1	Aman

23C	-15.24	-0.015 < 1	Aman
-----	--------	------------	------

Tabel 1.3 *Normal Force Diagram* pada Gelagar Memanjang Jembatan

Batang	Pu (kN)
284	0.242
286	0.242

Tabel 1.4 *Stress Diagram* pada Gelagar Memanjang Jembatan

Batang	σ (MPa)	$\sigma < \sigma$ Ijin (Rasio)	Kontrol
284	30.91	0.030 < 1	Aman
286	30.91	0.030 < 1	Aman

Tabel 1.5 *Normal Force Diagram* pada Batang Diagonal

Batang	Pu (kN)
2C7	0.324
2C8	0.048
2C9	0.323
240	0.323
23F	0.048
23D	0.324

Tabel 1.6 *Stress Diagram* pada Batang Diagonal

Batang	σ (MPa)	$\sigma < \sigma$ Ijin (Rasio)	Kontrol
2C7	28.81	0.028 < 1	Aman
2C8	14.02	0.014 < 1	Aman
2C9	21.80	0.021 < 1	Aman
240	21.80	0.021 < 1	Aman
23F	14.02	0.014 < 1	Aman
23D	28.81	0.028 < 1	Aman

Tabel 1.7 *Normal Force Diagram* pada Gelagar Melintang Jembatan

Batang	Pu (kN)
285	0
287	0
296	0.00008361
297	0.00001296
299	-0.000002909

2B0	-0.0001154
2CC	0.033
2CD	0.065
2CE	0.034

Tabel 1.6 *Stress Diagram* pada Gelagar Melintang Jembatan

Batang	σ (MPa)	$\sigma < \sigma_{ijin}$ (Rasio)	Kontrol
285	0.4	$0.00004 < 1$	Aman
287	0.046	$0.000046 < 1$	Aman
296	0.029	$0.000029 < 1$	Aman
297	0.0083	$0.000008359 < 1$	Aman
299	-0.0016	$-0.000001601 < 1$	Aman
2B0	-0,0054	$-0.000005481 < 1$	Aman
2CC	1.46	$0.001467 < 1$	Aman
2CD	3.27	$0.003277 < 1$	Aman
2CE	1.51	$0.001514 < 1$	Aman

Hasil perhitungan efisiensi dan rasio *strenght-to-weight*

Dengan rumus rasio efisiensi sebagai berikut :

$$\mu = \frac{P_{maks}}{W}$$

Dimana:

P_{maks} = beban maksimum yang mampu ditahan

W = berat sendiri struktur.

Dengan hasil beban maksimum yang mampu ditahan dalam lomba BDC NTU adalah 176 Newton=17.94 kg, dan berat jembatan = 18.37 gram.

Dengan menggunakan rumus rasio efisiensi:

$$\mu = \frac{17940}{18.37} = 970$$

Maka, didapatkan hasil efisiensi jembatan pada lomba BDC NTU = 970.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerikal model jembatan pada studi kasus *Bridge Design Competition* (BDC) NTU 2025 menggunakan SAP2000, dapat disimpulkan bahwa:

1. Beban eksentrik memberikan pengaruh signifikan terhadap respon struktur jembatan, khususnya dalam meningkatkan efek torsional dan deformasi lateral akibat ketidaksimetrian pembebanan.
2. Hasil analisis menunjukkan bahwa lendutan meningkat secara linier terhadap kenaikan beban. Pada pembebanan 225 N, 450 N, 675 N, dan 900 N, lendutan berturut-turut sebesar 0,058 mm;

0,1161 mm; 0,1742 mm; dan 0,2322 mm. Hal ini menunjukkan bahwa struktur masih berada dalam rentang perilaku elastis pada variasi beban yang diberikan.

3. Distribusi gaya aksial pada elemen rangka menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara batang yang berada dekat dengan titik eksentrisitas beban dan batang pada sisi lainnya. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya kombinasi gaya tekan, tarik, dan torsi yang mempengaruhi kinerja elemen struktural.
4. Peningkatan kekakuan lateral dan torsional melalui penggunaan gelagar induk berlapis serta sistem ikatan angin terbukti berperan penting dalam mengontrol deformasi dan meningkatkan stabilitas struktur terhadap beban eksentrik.
5. Analisis numerikal berbasis metode elemen hingga efektif digunakan untuk memprediksi respon struktur secara komprehensif, sehingga dapat menjadi dasar dalam optimalisasi desain sebelum dilakukan pengujian fisik pada kompetisi.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2020). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (9th ed.). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Bathe, K. J. (2014). *Finite Element Procedures*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Chen, W. F., & Duan, L. (2014). *Bridge Engineering Handbook: Superstructure Design*. Boca Raton: CRC Press.
- Hibbeler, R. C. (2017). *Structural Analysis* (9th ed.). Boston: Pearson Education.
- Kim, S. E., & Park, J. S. (2015). Numerical analysis of torsional behavior in bridge structures subjected to eccentric loading. *Journal of Bridge Engineering*, 20(6), 04014093.
- Megson, T. H. G. (2019). *Structural and Stress Analysis* (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Nanyang Technological University. (2025). *NTU Bridge Design Competition 2025: Rules and Specifications*. Singapore: Nanyang Technological University.
- Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2009). *Steel Structures: Design and Behavior* (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Sapountzakis, E. J., & Katsikadelis, J. T. (2018). Torsional effects in bridge structures under asymmetric loading conditions. *Engineering Structures*, 165, 273–285.
- Setiawan, A., & Nugroho, S. (2021). Analisis numerik perilaku struktur jembatan rangka terhadap pembebanan tidak simetris. *Jurnal Teknik Sipil*, 28(2), 101–110.