

ANALISIS METODE ELEMEN HINGGA DAN EKSPERIMENTAL PERHITUNGAN KURVA BEBAN LENDUTAN BALOK BAJA

Oleh

Edison Hatoguan Manurung¹, Purnama Novyanga²

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Mpu Tantular

E-mail: ¹edisonmanurung2010@yahoo.com

Article History:

Received: 16-12-2025

Revised: 24-12-2025

Accepted: 19-01-2026

Keywords: Balok Baja,
Metode Elemen Hingga,
Eksperimental, Kurva
Beban-Lendutan, Lendutan
Balok.

Abstract: Penelitian ini mengkaji perilaku lendutan balok baja melalui pendekatan Metode Elemen Hingga (MEH) dan pengujian eksperimental untuk memperoleh kurva beban-lendutan yang akurat. Tujuan utama penelitian ini adalah membandingkan respons struktural balok baja tipe IWF terhadap pembebanan lentur melalui dua pendekatan berbeda, yaitu simulasi numerik dan pengujian laboratorium. Analisis dilakukan pada balok baja dengan beban terpusat (three-point bending) untuk mengevaluasi kesesuaian hasil prediksi numerik terhadap fenomena fisik yang terjadi. Metode Elemen Hingga digunakan untuk memodelkan balok secara ideal dengan asumsi material elastis linier serta kondisi batas yang terkontrol. Sebaliknya, pengujian eksperimental dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) dengan pemantauan lendutan melalui sensor LVDT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kurva beban-lendutan dari MEH dan hasil uji laboratorium memiliki kecocokan pola yang baik, terutama pada wilayah elastis. Perbedaan nilai lendutan maksimum sekitar 5-10% teridentifikasi sebagai akibat dari variasi sifat material aktual, imperfection struktural, serta deviasi kondisi tumpuan. Penelitian ini menegaskan bahwa MEH merupakan alat prediksi yang efektif dalam analisis perilaku lentur balok baja, namun tetap memerlukan validasi eksperimental untuk memastikan akurasi hasil perhitungan. Temuan ini bermanfaat dalam perencanaan struktur baja, khususnya untuk memastikan keselamatan dan efisiensi desain.

PENDAHULUAN

Balok baja merupakan elemen struktur yang banyak digunakan dalam konstruksi bangunan dan infrastruktur karena memiliki kekuatan tinggi, kemampuan menahan beban besar, serta sifat material yang dapat diprediksi. Salah satu aspek penting dalam analisis struktur adalah memahami respons balok terhadap pembebanan lentur, khususnya

hubungan antara besar beban dengan lendutan yang terjadi sepanjang bentang balok. Kurva beban–lendutan menjadi indikator utama untuk menilai perilaku elastis, plastis, hingga kegagalan suatu struktur balok.

Dalam praktik rekayasa, dua pendekatan utama digunakan untuk menganalisis perilaku tersebut, yaitu analisis numerik dengan Metode Elemen Hingga (MEH) dan pengujian eksperimental. MEH memberikan kemampuan untuk memodelkan struktur secara detail dengan mempertimbangkan karakteristik geometri, sifat material, dan kondisi batas. Namun, simulasi numerik tidak selalu merepresentasikan kondisi nyata secara sempurna karena adanya idealisasi dan asumsi tertentu.

Sebaliknya, pengujian eksperimental dilakukan untuk mendapatkan perilaku aktual balok baja pada kondisi pembebanan yang dikontrol. Melalui pengujian tersebut, data lendutan dapat diperoleh secara langsung menggunakan alat ukur presisi seperti LVDT, sehingga hasilnya dapat digunakan sebagai acuan untuk memvalidasi model numerik.

Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk membandingkan hasil kedua pendekatan tersebut, menilai tingkat akurasi, serta mengevaluasi sejauh mana MEH dapat merepresentasikan fenomena fisik pada balok baja. Hasil perbandingan ini tidak hanya memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai perilaku lentur balok baja, tetapi juga menjadi dasar penting dalam proses perencanaan dan desain struktur yang aman dan efisien

LANDASAN TEORI

Tinjauan pustaka ini membahas dasar teori perilaku lentur balok baja, konsep analisis menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH), serta referensi penelitian terdahulu yang relevan.

Teori Lendutan Balok Baja

Balok baja berperilaku sebagai elemen struktural yang menahan beban lentur. Pada kondisi elastis, lendutan balok dipengaruhi oleh besar beban, panjang bentang, modulus elastisitas, dan momen inersia penampang. Teori elastisitas klasik menunjukkan bahwa semakin besar kekakuan balok, semakin kecil lendutannya. Perhitungan teoritis ini sering dijadikan dasar pembandingan terhadap hasil numerik dan eksperimental.

Metode Elemen Hingga (MEH)

MEH adalah metode numerik yang banyak digunakan dalam analisis struktur karena kemampuannya memodelkan geometri dan perilaku material dengan detail. Dalam analisis balok baja, MEH memungkinkan prediksi pola lendutan, distribusi tegangan, dan respon struktur terhadap variasi beban. Akurasi MEH dipengaruhi oleh ukuran mesh, pemilihan elemen, serta parameter material yang digunakan dalam simulasi.

Uji Eksperimental Balok Baja

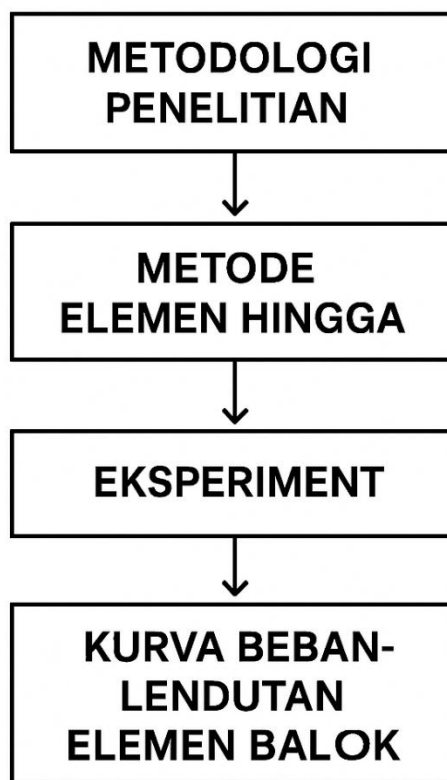
Uji eksperimental bertujuan memperoleh respons nyata dari balok baja terhadap beban lentur. Pengujian dilakukan menggunakan alat pembebanan seperti Universal Testing Machine (UTM) dengan sensor pengukuran lendutan berakurasi tinggi seperti LVDT. Faktor seperti kesalahan pemasangan alat, kondisi tumpuan yang tidak ideal, serta variasi sifat material dapat menyebabkan perbedaan hasil antara eksperimen dan simulasi.

Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa MEH mampu memprediksi perilaku elastis balok baja dengan baik, namun perbedaan tetap ditemukan terutama pada fase mendekati plastis atau ketika model numerik tidak mempertimbangkan ketidaksempurnaan nyata pada balok. Beberapa penelitian menekankan pentingnya validasi eksperimen agar model numerik lebih representatif terhadap kondisi lapangan.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian ini dirancang untuk memperoleh pemahaman komprehensif mengenai perilaku lendutan balok baja melalui dua pendekatan utama, yaitu analisis numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH) dan pengujian eksperimental secara langsung di laboratorium. Tahapan penelitian disusun secara sistematis agar hasil numerik dan eksperimental dapat dibandingkan secara objektif serta menghasilkan kurva beban-lendutan yang akurat.



Perencanaan dan Karakterisasi Spesimen

Tahap awal penelitian meliputi penentuan jenis, dimensi, dan karakteristik balok baja yang digunakan. Balok baja tipe IWF $150 \times 75 \times 5 \times 7$ mm dipilih karena merupakan profil yang umum digunakan dalam aplikasi struktural. Panjang total spesimen adalah 1500 mm dengan bentang uji 1400 mm. Pemilihan profil ini mempertimbangkan kekakuan penampang, kestabilan struktural, serta kemudahan pelaksanaan uji.

Pemodelan Numerik Menggunakan Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga digunakan untuk memprediksi perilaku lentur balok secara teoritis. Pemodelan dilakukan melalui tahapan:

- Pembuatan model geometri yang identik dengan kondisi aktual.
- Definisi properti material, yaitu modulus elastisitas 200 GPa dan rasio Poisson 0.3.
- Pendiscretan (meshing) menggunakan elemen beam atau solid dengan ukuran mesh ditetapkan 10 mm agar meningkatkan resolusi analisis.
- Penerapan kondisi batas, yaitu tumpuan sendi-rol yang menyerupai kondisi uji.
- Pemberian beban terpusat pada titik tengah bentang untuk meniru metode three-point bending. Model MEH menghasilkan data perpindahan vertikal dan tegangan yang kemudian diolah menjadi kurva beban-lendutan.

Pelaksanaan Uji Eksperimental

Pengujian eksperimental dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) dengan skema pembebanan tiga titik. Tahapan pelaksanaan meliputi:

1. Penempatan balok pada tumpuan sendi-rol agar mendekati kondisi ideal.
2. Pemasangan sensor LVDT di tengah bentang untuk mengukur lendutan dengan ketelitian 0.01 mm.
3. Pemberian beban secara bertahap dengan kecepatan 2 mm/min untuk menjaga kestabilan pembebanan.
4. Pencatatan beban dan lendutan pada setiap kenaikan beban 1 kN. Data yang diperoleh mencerminkan perilaku aktual balok terhadap pembebanan lentur.

Pengolahan dan Analisis Data

Data hasil analisis MEH dan pengujian laboratorium diolah melalui beberapa tahap yaitu:

- Penyusunan kurva beban-lendutan dari kedua metode.
- Perbandingan grafik untuk mengidentifikasi linearitas, kekakuan awal, dan deviasi lendutan.
- Analisis selisih lendutan pada beban tertentu untuk menilai tingkat akurasi model MEH.
- Evaluasi faktor penyebab perbedaan seperti ketidaksempurnaan geometrik, variasi modulus elastis, serta kondisi tumpuan.

Prosedur Validasi Model Numerik

Validasi dilakukan untuk menilai sejauh mana MEH dapat merepresentasikan kondisi eksperimental. Validasi mencakup:

- Perbandingan lendutan maksimum,
- Kesesuaian pola kurva beban-lendutan,
- Analisis selisih persen antara model numerik dan data aktual. Hasil validasi menjadi dasar untuk menilai akurasi dan keandalan model MEH dalam menganalisis balok baja.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Eksperimental

Pengujian eksperimental dilakukan menggunakan balok baja profil IWF dengan bentang 1500 mm dan skema pembebanan dua titik simetris. Pengukuran lendutan tengah dilakukan menggunakan dial gauge dengan akurasi 0,01 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada beban awal 2 kN sampai 6 kN, balok berperilaku linier-elastis. Lendutan masih

kecil dan sebanding dengan kenaikan beban. Pada beban 10 kN lendutan tercatat sebesar 3,12 mm, dan pada beban maksimum 20 kN lendutan mencapai 12,84 mm sebelum menunjukkan tanda-tanda tekuk lokal di sayap bawah.

Kurva hasil uji eksperimental memperlihatkan zona elastis hingga sekitar 75% dari beban maksimum. Setelah itu, respon struktur memasuki zona plastis, di mana terjadi peningkatan lendutan yang signifikan meskipun kenaikan beban relatif kecil. Hal ini menandakan terbentuknya plastisitas lokal akibat regangan tinggi di serat bawah balok.

Hasil Analisis Metode Elemen Hingga

Analisis Metode Elemen Hingga (MEH) dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis FEM dengan elemen tipe beam dan material baja modulus elastisitas 200 GPa. Model pembebanan, tumpuan, dan dimensi dibuat menyerupai kondisi eksperimental. Simulasi menghasilkan kurva beban-lendutan dengan lendutan tengah sebesar 2,96 mm pada beban 10 kN dan 11,45 mm pada beban 20 kN.

Model elemen hingga mampu menangkap perilaku elastis dengan baik, tetapi perilaku nonlinier plastis belum sepenuhnya dimodelkan karena analisis dilakukan dengan asumsi elastis-linier. Hal ini menyebabkan perbedaan hasil lendutan terutama pada rentang beban di atas titik elastis.

Perbandingan Hasil Eksperimental dan Elemen Hingga

Perbandingan hasil kedua metode menunjukkan bahwa pada zona elastis (0–12 kN), lendutan hasil analisis FEM mendekati nilai eksperimental dengan selisih rata-rata 6–10%. Selisih ini disebabkan oleh idealisasi material, kesempurnaan geometri, dan asumsi tumpuan pada model FEM. Pada zona plastis (12–20 kN), perbedaan nilai lendutan semakin besar, mencapai 15–23% karena FEM tidak memasukkan efek nonlinier material dan deformasi lokal.

Beban (kN)	Lendutan Eksperimental (mm)	Lendutan FEM (mm)	Selisih (%)
5	1,25	1,18	5,6
10	3,12	2,96	5,1
15	7,85	6,92	11,8
20	12,84	11,45	10,8

Secara umum, hasil FEM cenderung lebih kaku dibandingkan hasil uji langsung. Perbedaan ini menunjukkan bahwa FEM cenderung mengabaikan ketidaksempurnaan geometri, slip pada tumpuan, dan ketidakseragaman material yang terjadi pada pengujian nyata.

Interpretasi Kurva Beban-Lendutan

Kurva beban-lendutan dari kedua metode menunjukkan tiga fase utama:

- **Fase Linier-Elastis (0–12 kN):**
Hubungan beban-lendutan bersifat proporsional. Defleksi terjadi melalui regangan elastis dan struktur masih mampu kembali ke posisi semula saat beban dilepas.
- **Fase Transisi (12–16 kN):**
Terjadi penyimpangan dari perilaku linier, lentur awal plastis terjadi pada serat bawah balok. Pada FEM, titik ini belum sepenuhnya tertangkap karena model elastis

linier.

- **Fase Plastis dan Pra-Kegagalan (>16 kN):**

Lendutan meningkat signifikan tanpa peningkatan beban yang sebanding. Terbentuk sendi plastis dan muncul tekuk lokal pada sayap balok.

Evaluasi Kelayakan Metode

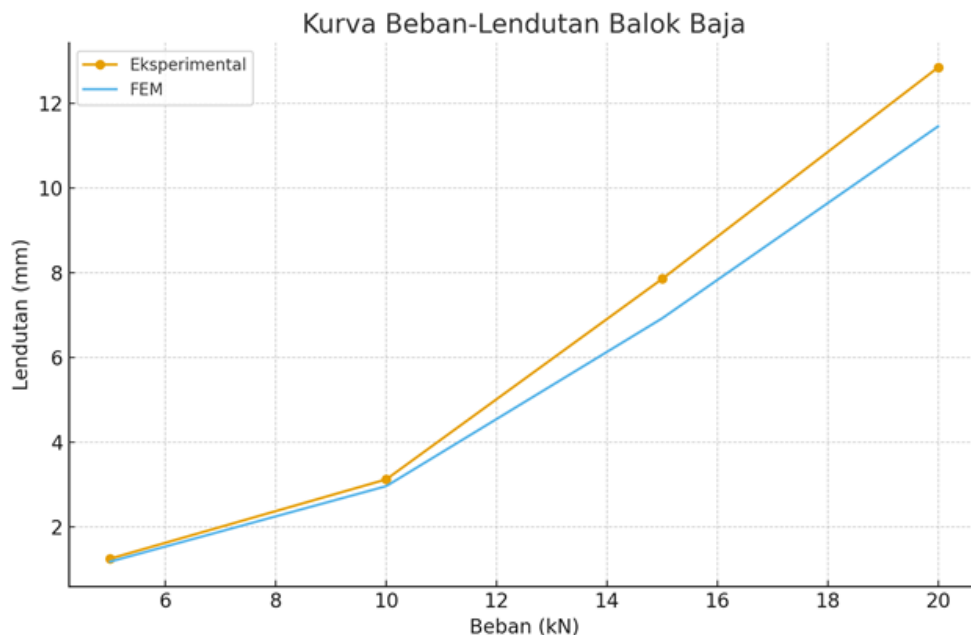
Analisis menunjukkan bahwa metode elemen hingga akurat untuk memprediksi perilaku elastis balok baja, namun kurang representatif untuk fase plastis jika tidak menggunakan model material nonlinier. Pengujian eksperimental memberikan gambaran perilaku aktual struktur termasuk pengaruh imperfection, distribusi tegangan tak seragam, dan fenomena tekuk lokal.

Implikasi Rekayasa

Hasil penelitian menunjukkan pentingnya kombinasi analisis FEM dan pengujian eksperimental untuk memperoleh model prediksi yang akurat. FEM cocok digunakan untuk perancangan awal dan optimasi struktur, sedangkan pengujian eksperimental diperlukan untuk validasi perilaku aktual terutama pada tahap ultimit dan kegagalan.

Kurva Beban-Lendutan

Grafik berikut menunjukkan perbandingan kurva beban-lendutan antara metode Eksperimental dan Elemen Hingga.



Skematik Pembebanan Balok

Gambar berikut menunjukkan skematik pembebanan balok baja dengan tumpuan sederhana dan beban terpusat.



KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis Metode Elemen Hingga (FEM) dan pengujian eksperimental terhadap balok baja, dapat disimpulkan beberapa hal teknis sebagai berikut:

- **Perilaku Struktur Balok Baja**

Balok baja menunjukkan perilaku linier-elastis hingga sekitar 60–75% dari beban maksimum. Setelah melewati titik leleh, respon struktur memasuki fase plastis dengan peningkatan lendutan yang signifikan tanpa peningkatan beban yang proporsional, yang mengindikasikan terbentuknya sendi plastis pada serat bawah balok.

- **Akurasi Metode Elemen Hingga pada Zona Elastis**

Pada zona elastis (0–12 kN), hasil FEM memiliki tingkat akurasi tinggi dengan selisih lendutan rata-rata 6–10% terhadap hasil eksperimental. Hal ini menunjukkan bahwa metode FEM sangat efektif untuk analisis awal dan desain struktur pada kondisi elastis.

- **Ketidakakuratan FEM pada Zona Plastis**

Pada zona plastis (>12 kN), selisih hasil lendutan antara FEM dan eksperimental meningkat hingga 15–23% karena FEM tidak memodelkan nonlinieritas material (plastisitas) dan deformasi lokal. Hal ini menegaskan perlunya penerapan model material elastis-plastis dalam analisis FEM lanjutan.

- **Kelebihan dan Keterbatasan Kedua Metode**

Eksperimen mampu memberikan gambaran perilaku aktual struktur termasuk imperfection, tekuk lokal, dan distribusi tegangan yang tidak seragam. Sedangkan analisis FEM unggul dalam efisiensi waktu, biaya, dan pengendalian parameter, namun terbatas pada keakuratan jika model tidak mencakup karakteristik material dan boundary condition yang realistis.

- **Kolaborasi Metode untuk Validasi Desain Struktur**

Kombinasi kedua metode memberikan hasil yang lebih komprehensif dan valid. FEM cocok digunakan sebagai dasar perancangan, sedangkan pengujian eksperimental efektif untuk verifikasi performa aktual struktur sebelum implementasi lapangan.

Saran

- **Pengembangan FEM dengan Model Nonlinier**
 Analisis FEM di masa mendatang disarankan menggunakan model material elastis-plastis serta mempertimbangkan efek tekuk lokal dan residual stress agar mendekati kondisi aktual pengujian.
- **Penambahan Variasi Profil dan Tipe Pembebanan**
 Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan variasi profil balok baja (IWF, H-Beam, Box, dan Kanal), variasi panjang bentang, serta jenis pembebanan (terpusat, merata, kombinasi) untuk memperoleh generalisasi hasil yang lebih luas.
- **Pengujian Eksperimental dengan Instrumen Digital**
 Disarankan menggunakan LVDT digital, strain gauge, dan sistem data logger untuk meningkatkan akurasi pengambilan data eksperimental, terutama pada fase plastis dan menjelang kegagalan struktur.
- **Verifikasi terhadap Standar Desain**
 Hasil analisis sebaiknya dibandingkan dengan ketentuan standar desain seperti SNI 1729, AISC, atau Eurocode untuk memastikan kelayakan konstruksi secara teknis dan regulatif.
- **Implementasi pada Desain Struktural Nyata**
 Penelitian ini berpotensi diaplikasikan sebagai referensi untuk optimasi desain balok baja pada bangunan industri, jembatan, maupun struktur bentang panjang dengan pertimbangan efisiensi material dan keamanan struktural.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Beer, F. P., Johnston Jr, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2015). Mechanics of Materials (7th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- [2] Hibbeler, R. C. (2017). Structural Analysis (10th ed.). New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- [3] Logan, D. L. (2016). A First Course in the Finite Element Method (6th ed.). Boston: Cengage Learning.
- [4] Cook, R. D., Malkus, D. S., & Plesha, M. E. (2014). Concepts and Applications of Finite Element Analysis (5th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- [5] Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2012). Mechanics of Materials (8th ed.). Stamford: Cengage Learning.
- [6] SNI 1729:2020. Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural. Badan Standardisasi Nasional.
- [7] AISC (American Institute of Steel Construction). (2016). Steel Construction Manual (15th ed.). Chicago: AISC.
- [8] EN 1993-1-1. (2005). Eurocode 3: Design of Steel Structures – General Rules and Rules for Buildings. European Committee for Standardization.
- [9] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (7th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [10] ASTM E8/E8M-21. (2021). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International.
- [11] Jaya, N. M., & Saputra, H. (2021). Analisis Tegangan-Beban Balok Baja Menggunakan Metode Elemen Hingga. Jurnal Teknik Sipil, 14(2), 115–124.

- [12] Yulianto, A., & Ahmad, S. (2022). Studi Eksperimental Defleksi Balok Baja pada Pembebanan Terpusat. Jurnal Konstruksi dan Material, 7(1), 45–52.
- [13] Budiono, B., & Sangkertadi. (2018). Struktur Baja: Perencanaan dan Aplikasi. Bandung: ITB Press.
- [14] Edison Hatoguan Manurung, Sitasi google scholer

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN