

EVALUASI LENDUTAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN PENDEKATAN MATEMATIS: PENERAPAN TEORI EULER-BERNOULLI TERHADAP BATAS KEMAMPUAN LAYAN

EVALUATION OF REINFORCED CONCRETE BEAM DEFLECTION USING A MATHEMATICAL APPROACH: APPLICATION OF EULER-BERNOULLI THEORY TO SERVICEABILITY LIMIT STATES

Sherly Permata

^aPoliteknik Negeri Padang, Jurusan Teknik Sipil, Prodi D3 Teknik Sipil, Kampus Limau Manis Padang 25163, Telp. 0751-72590 Fax. 0751-72576, Indonesia

e-mail: sherly@pnp.ac.id

ABSTRACT

Accurate prediction of beam deflection is crucial in civil engineering structural design, ensuring both safety and functionality. This study investigates how the physical and material properties of a beam relate to the maximum deflection under various loading conditions. We used an analytical approach, applying classic deflection equations derived from Euler-Bernoulli beam theory, which assumes linear elasticity and small deformations. Our case study features a simply supported beam with a 4000 mm span. It's made of concrete with a 30 MPa compressive strength and reinforced with steel having a 390 MPa yield strength. The analysis includes common loading scenarios like concentrated and uniformly distributed loads to evaluate their impact on deflection. The calculations show a maximum deflection of 18.78 mm, which exceeds the allowable limit of 14.17 mm set by SNI 2847:2019. This study demonstrates that mathematical models reliably estimate structural behavior and are effective for design decision-making. These findings highlight the importance of analytical proficiency in structural engineering, especially during initial design and assessment phases. Integrating theoretical models with practical data improves the accuracy of structural analysis, contributing to safer and more efficient construction practices.

Keywords: Beam deflection, Mathematical modeling, Euler-Bernoulli theory, Analytical method, Structural mechanics

I. PENDAHULUAN

Lendutan pada balok merupakan salah satu bentuk deformasi yang terjadi akibat pembebanan, baik dari beban mati, beban hidup, maupun beban sementara lainnya. Secara fisik, lendutan muncul sebagai respons struktur terhadap momen lentur, yang menyebabkan perubahan bentuk dari kondisi awal. Struktur balok yang memiliki panjang bentang yang besar dengan dimensi penampang kecil akan mengalami kekakuan yang rendah, sehingga menghasilkan lendutan yang signifikan jika tidak direncanakan dengan baik [1].

Dalam konteks struktur beton bertulang, lendutan menjadi parameter penting karena dapat mempengaruhi kenyamanan pengguna, fungsi elemen non-struktural (seperti plafon, partisi, dan jendela), estetika bangunan, serta perilaku jangka panjang struktur akibat rangkakan dan susut beton. Dalam merancang struktur beton bertulang, kendali terhadap lendutan sangat penting untuk menjaga kemampuan layan bangunan. Lendutan yang berlebihan meskipun tidak menyebabkan keruntuhan struktural dapat menurunkan kenyamanan dan fungsi bangunan secara

signifikan [2]. Sesuai ketentuan SNI 2847:2013 Pasal 9.5, elemen lentur seperti balok harus dirancang dengan kekakuan yang cukup agar lendutan yang terjadi tidak menyebabkan gangguan terhadap fungsi struktur maupun kerusakan elemen non-struktural [3].

Hal ini diperkuat dalam SNI 1727:2020, yang menyebutkan bahwa lendutan berlebih dapat menyebabkan gangguan sistem arsitektural seperti pintu atau jendela yang tidak dapat dibuka, kerusakan partisi, serta genangan air pada atap datar [4]. Lendutan pada balok beton bertulang tidak hanya dipengaruhi oleh pembebanan awal, tetapi juga oleh efek jangka panjang seperti rangkakan (creep) dan susut (shrinkage). Oleh karena itu, regulasi teknis seperti SNI mewajibkan perhitungan dan pembatasan lendutan baik secara elastis maupun total selama umur rencana bangunan.

Selain faktor waktu, rasio tulangan pada balok beton bertulang juga memiliki peran krusial dalam menentukan perilaku lentur. Peningkatan rasio tulangan tidak hanya meningkatkan kapasitas beban lentur, tetapi juga memengaruhi distribusi

retak dan kekakuan balok secara keseluruhan. Temuan ini menegaskan pentingnya perencanaan rasio tulangan yang tepat untuk mengendalikan lendutan sekaligus menjaga performa struktural secara optimal.

Aspek kemampuan layan struktur, khususnya lendutan berlebih pada balok beton bertulang, merupakan isu penting dalam desain struktural modern. Evaluasi lendutan harus memperhatikan tidak hanya kondisi pembebanan awal, tetapi juga pengaruh jangka panjang seperti rangkak dan susut.

Untuk menjelaskan perilaku lendutan secara teoritis, digunakan Teori Balok Euler-Bernoulli, yang merupakan pendekatan dasar dalam mekanika struktur. Teori ini menyatakan bahwa deformasi lentur pada balok sebanding dengan momen lentur yang bekerja dan berbanding terbalik dengan kekakuan lentur balok, yaitu hasil kali modulus elastisitas (E) dan momen inersia penampang (I). Persamaan dasar teori ini adalah:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x) \tag{1}$$

atau dalam bentuk distribusi beban:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = w(x) \tag{2}$$

Dimana $y(x)$ adalah fungsi lendutan terhadap posisi x , $M(x)$ adalah momen lentur, $w(x)$ adalah beban terdistribusi sepanjang balok, E adalah modulus elastisitas material, dan I adalah momen inersia penampang. Teori ini mengasumsikan bahwa penampang balok tetap datar dan tegak selama deformasi, serta material bersifat elastis linear.

Dalam rekayasa struktur, pengendalian lendutan merupakan bagian dari persyaratan kemampuan layan (serviceability limit state), bukan sekadar kekuatan (strength). Artinya, meskipun struktur mampu menahan beban secara kekuatan, ia bisa dianggap gagal secara fungsi bila lendutan melebihi ambang batas kenyamanan dan keamanan. “Lendutan pada balok induk memiliki persyaratan yaitu lendutan maksimum (Δ_{maks}) memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan lendutan izin (Δ_{izin}) agar balok tersebut memiliki keamanan dan kenyamanan yang baik terhadap pengguna” [5].

Umumnya, batas lendutan yang diperbolehkan ditetapkan dalam rasio terhadap panjang bentang, seperti $L/240$ atau $L/360$, tergantung pada fungsi dan tipe struktur. Dirumuskan sebagai berikut:

$$\delta_{ijin} = \frac{L}{240} \tag{3}$$

atau

$$\delta_{ijin} = \frac{L}{360} \tag{4}$$

Dimana δ_{ijin} adalah batas ijin lendutan, L adalah bentang bersih balok.

Selain lendutan jangka pendek, SNI juga mensyaratkan perhitungan lendutan jangka panjang dengan mempertimbangkan faktor koreksi akibat rangkak dan susut, yang bergantung pada koefisien rangkak, rasio tulangan, dan kekakuan retak. Lendutan dapat dibagi menjadi dua, yaitu lendutan sesaat yang bersifat elastis dan sebanding dengan penambahan beban, serta lendutan jangka panjang yang dipengaruhi oleh waktu, termasuk faktor rangkak dan susut beton [2]. Dalam kasus tertentu, interpolasi grafik, penggunaan tabel desain, hingga simulasi numerik dibutuhkan untuk geometri dan beban yang kompleks.

Dengan pendekatan matematis yang tepat, insinyur struktur dapat memprediksi batas aman deformasi pada elemen bangunan dan menentukan beban maksimum yang diperbolehkan, sehingga lendutan yang terjadi tidak melebihi batas yang telah ditetapkan oleh standar nasional, seperti SNI 2847:2013 dan SNI 2847:2019. Perhitungan lendutan bukan sekadar proses hitung-menghitung, melainkan merupakan bagian integral dari penjaminan mutu bangunan, guna memastikan struktur tidak hanya kuat secara mekanis, tetapi juga layak secara fungsi dan kenyamanan pengguna.

Selain standar nasional seperti SNI 2847:2019, dokumen internasional seperti ACI 318-19 [6] juga menekankan pentingnya pengendalian lendutan dalam desain struktur beton bertulang. ACI 318-19 menyatakan bahwa elemen lentur harus dirancang agar lendutan tidak melebihi batas yang dapat mengganggu fungsi struktur atau menyebabkan kerusakan pada elemen non-struktural.

Penelitian mengenai lendutan balok beton bertulang umumnya menggunakan pendekatan numerik atau simulasi perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (FEM), yang memerlukan sumber daya komputasi dan pengalaman teknis tertentu. Sementara itu, pendekatan teoritis klasik seperti teori balok Euler-Bernoulli masih relevan sebagai alat analisis awal dalam perencanaan struktur, terutama dalam konteks pendidikan teknik sipil. Meskipun teori ini telah digunakan secara luas, aplikasinya secara langsung dalam menentukan beban maksimum berdasarkan kriteria kemampuan layan (serviceability limit state) sesuai dengan regulasi nasional seperti SNI 2847:2019 masih jarang dibahas secara sistematis di tingkat akademik maupun profesional di Indonesia.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada penerapan teori balok Euler-Bernoulli secara analitis untuk mengevaluasi lendutan maksimum balok beton bertulang dengan parameter material dan geometri aktual, serta membandingkannya secara eksplisit terhadap batas lendutan izin menurut SNI 2847:2019. Penelitian ini juga menyajikan penentuan beban maksimum yang diperbolehkan berdasarkan analisis kemampuan layan, bukan hanya kekuatan struktur. Selain itu, penyajian visualisasi grafik fungsi lendutan $Y(x)$ memberikan kontribusi edukatif dalam menjembatani teori matematis dengan praktik perencanaan struktur di bidang teknik sipil.

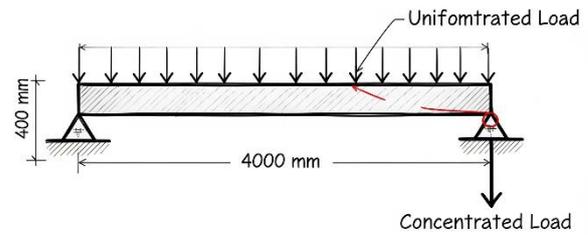
Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menentukan beban maksimum yang dapat diaplikasikan pada balok beton bertulang agar lendutan yang dihasilkan tetap berada dalam batas izin yang ditentukan oleh peraturan. Perhitungan dilakukan dengan pendekatan matematis yang mengacu pada prinsip-prinsip mekanika struktur serta ketentuan dalam Standar Nasional Indonesia.

Nilai lendutan yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan batas kemampuan layan struktur yang disyaratkan. Dengan demikian, tulisan ini diharapkan dapat memberikan dasar teknis dan argumentasi rasional yang mendukung pentingnya pengendalian beban melalui analisis lendutan, demi tercapainya struktur yang aman, nyaman, dan berfungsi optimal sepanjang umur layan bangunan.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analitis, bertujuan untuk menghitung lendutan maksimum balok beton bertulang menggunakan teori balok Euler-Bernoulli. Analisis dilakukan terhadap balok sederhana yang menerima beban terdistribusi sepanjang balok, berdasarkan rumus matematis yang berlaku. Sistem tumpuan dan pembebanan balok yang dianalisis dapat dilihat pada Gambar 1 (Skema Geometri Balok). Objek penelitian adalah balok dengan spesifikasi teknis sesuai standar bangunan gedung yang berlaku. Pendekatan analitis ini dipilih karena dinilai mampu memberikan estimasi lendutan yang cukup akurat.

Salah satu parameter material yang berpengaruh signifikan adalah modulus elastisitas beton. Oleh karena itu, pemilihan parameter material yang tepat sangat penting untuk memperoleh hasil perhitungan yang representatif terhadap kondisi aktual struktur.



Gambar 1. Skema Geometri Balok Beton Bertulang dengan Tumpuan Sederhana dan Kombinasi Beban

A. Penerapan Rumus Balok Euler-Bernoulli dalam Perhitungan Lendutan

Teori balok Euler-Bernoulli menyediakan kerangka matematis yang kuat untuk menghitung lendutan (defleksi) balok akibat beban. Inti dari teori ini adalah hubungan antara momen lentur yang bekerja pada balok dengan kurvatur (kelengkungan) yang dihasilkannya.

Persamaan diferensial dasar dari Teori Euler-Bernoulli (1) yang menggambarkan lendutan balok adalah:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x)$$

Untuk mendapatkan nilai lendutan $\delta(x)$, persamaan dasar ini perlu diintegrasikan dua kali.

Integrasi pertama (untuk Rotasi/Kemiringan) yaitu mengintegrasikan persamaan dasar sekali akan memberikan kita persamaan untuk rotasi (kemiringan) balok, dy/dx :

$$EI \frac{dy}{dx} = \int M(x) dx + C_1$$

Di mana C_1 adalah konstanta integrasi pertama.

Integrasi kedua (untuk lendutan/defleksi) yaitu mengintegrasikan lagi persamaan kemiringan akan menghasilkan persamaan untuk lendutan $\delta(x)$:

$$EI\delta(x) = \iint M(x) dx dx + C_1x + C_2$$

Atau, jika EI dipindahkan ke ruas kanan menghasilkan

$$\delta(x) = \frac{1}{EI} \iint M(x) dx dx + C_1x + C_2$$

Di mana C_2 adalah konstanta integrasi kedua.

Nilai dari konstanta integrasi C_1 dan C_2 ditentukan oleh kondisi batas (*boundary conditions*) balok, yaitu bagaimana balok tersebut ditumpu. Contoh kondisi batas meliputi:

1. Tumpuan Sederhana (*Pin Support*): Lendutan (δ) adalah nol.
2. Tumpuan Rol (*Roller Support*): Lendutan (δ) adalah nol.
3. Tumpuan Jepit (*Fixed Support*): Lendutan (δ) adalah nol dan rotasi (dy/dx) juga nol.
4. Ujung Bebas (*Free End*): Momen lentur (M) adalah nol dan gaya geser (V) adalah nol.

Untuk balok sederhana dengan bentang L yang menerima beban terdistribusi merata w (misalnya, dalam kN/m), momen lentur $M(x)$ dapat dinyatakan sebagai berikut

$$M(x) = \frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2}$$

Dengan mensubstitusikan $M(x)$ ini ke dalam persamaan integrasi dan menerapkan kondisi batas ($\delta=0$ pada $x=0$ dan $x=L$), kita akan mendapatkan rumus lendutan maksimum (5) di tengah bentang sebagai berikut:

$$\delta_{maks} = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (5)$$

Dimana δ adalah lendutan, L adalah bentang bersih balok, w adalah beban terdistribusi sepanjang balok, E adalah modulus elastisitas material, dan I adalah momen inersia penampang.

B. Desain Penelitian

Jenis penelitian ini adalah studi analitis berbasis teori elastisitas dan mekanika teknik, yang bertujuan mengevaluasi lendutan struktur akibat pembebanan statis. Perhitungan dilakukan dengan metode manual menggunakan rumus teoritis, serta divisualisasikan dalam bentuk grafik hubungan antar variabel.

C. Data dan Parameter Struktur

Penelitian menggunakan parameter sebagai berikut:

- a) Bentang total balok: 4000 mm
- b) Bentang bersih balok: 3400 mm
- c) Mutu beton (f_c'): 30 MPa
- d) Modulus elastisitas beton (E) [3]: dihitung dari rumus (6)

$$E = 4700\sqrt{f_c'} \quad (6)$$

- e) Mutu baja tulangan (f_y): 390 MPa
- f) Penampang balok: 200 mm \times 300 mm ($b \times h$)
- g) Momen inersia penampang (I): dihitung dari rumus (7)

$$I = \frac{1}{12} \times b \times h^3 \quad (7)$$

- h) Beban terdistribusi sepanjang balok (w) dengan w_1 : 1,5 kN/m dan w_2 : 1,0 kN/m

D. Prosedur Perhitungan

- a) Menentukan parameter geometri dan material balok.
- b) Menghitung nilai modulus elastisitas dan momen inersia.
- c) Menggunakan rumus pada persamaan 5 yaitu lendutan maksimum untuk balok sederhana dengan beban terdistribusi sepanjang balok.
- d) Membandingkan hasil lendutan dengan batas ijin menurut SNI 2847, yaitu dengan rumus pada persamaan 3.

- e) Menyusun grafik hubungan antara panjang bentang dengan lendutan maksimum.

E. Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan dengan perhitungan manual menggunakan formula matematis. Hasilnya disajikan dalam bentuk numerik dan visualisasi grafik. Validitas hasil dibandingkan terhadap standar batas lendutan yang ditentukan dalam SNI 2847:2019. Metode ini memastikan bahwa hasil dapat diverifikasi dan diaplikasikan dalam perencanaan struktur secara praktis.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung lendutan maksimum pada balok beton bertulang menggunakan pendekatan matematis berbasis teori balok Euler-Bernoulli. Analisis dilakukan terhadap balok sederhana yang menerima beban terdistribusi sepanjang balok sebesar 1 kN/m, dengan panjang bentang bersih sebesar 3400 mm.

A. Perhitungan Parameter Struktur

Modulus elastisitas beton ditentukan dari rumus pada persamaan 6 yaitu:

$$\begin{aligned} E &= 4700\sqrt{f_c'} \\ &= 4700\sqrt{30} \\ &= 25,732 \times 10^3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Penampang balok diasumsikan berbentuk persegi panjang berukuran 200 mm \times 300 mm, sehingga momen inersia penampang (I) berdasarkan persamaan 7 adalah:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{12} \times b \times h^3 \\ &= \frac{1}{12} \times 0,2 \times (0,3)^3 \\ &= 5,4 \times 10^{-6} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Dengan beban terdistribusi sepanjang balok w_1 : 1,5 kN/m dan panjang bentang $L=3,4$ m, lendutan maksimum dihitung dengan rumus pada persamaan (5) yaitu:

$$\delta_{maks1} = \frac{5wL^4}{384EI}$$

$$\delta_{maks1} = \frac{5 \times 1500 \times (3,4)^4}{384 \times 25732 \times 10^3 \times 5,4 \times 10^{-6}}$$

$$\approx 0,01878 \text{ m}$$

$$= 18,78 \text{ mm}$$

Dengan beban terdistribusi sepanjang balok w_2 : 1,0 kN/m dan panjang bentang $L=3,4$ m,

lendutan maksimum dihitung dengan rumus pada persamaan (5) yaitu:

$$\delta_{maks2} = \frac{5wL^4}{384EI}$$

$$\begin{aligned} \delta_{maks2} &= \frac{5 \times 1000 \times (3,4)^4}{384 \times 25732 \times 10^3 \times 5,4 \times 10^{-6}} \\ &\approx 0,01252m \\ &= 12,52 \text{ mm} \end{aligned}$$

B. Evaluasi terhadap Batas Lendutan SNI

Menurut SNI 2847:2019, batas lendutan untuk balok dengan fungsi umum (misalnya lantai) menggunakan persamaan 3 yaitu:

$$\delta_{ijin} = \frac{L}{240} = \frac{3400}{240} = 14,17 \text{ mm}$$

Dari hasil perhitungan, ketika menggunakan beban w_1 (1,5 kN/m) ternyata lendutan maksimum yang dihasilkan sekitar 18,87 mm yakni melebihi batas ijin lendutan. Secara kekuatan, balok mungkin masih aman (tidak runtuh), tetapi secara kemampuan layan (*serviceability*), balok gagal, sehingga bisa menyebabkan plafon retak, dinding *non-struktural* bergeser/pecah, pintu/jendela tidak bisa ditutup, atau penurunan kenyamanan penghuni. Ketika beban diturunkan menjadi w_2 (1,0 kN/m) lendutan maksimum sebesar 12,52 mm masih berada di bawah batas ijin, sehingga desain struktur dinyatakan memenuhi syarat kemampuan layan (*serviceability*).

“Balok anak yang menumpu pada balok induk menyebabkan momen lentur yang lebih besar daripada struktur Tipe Kontrol karena bertambahnya beban yang diterima oleh balok induk.”[6]. Hal ini sejalan dengan temuan yang menunjukkan bahwa panjang sambungan tulangan memengaruhi besarnya lendutan, di mana balok dengan sambungan lewatan lebih pendek cenderung mengalami defleksi yang lebih besar [7].

Selain itu, Penambahan luas tulangan tarik secara signifikan dapat mengurangi lendutan seketika yang terjadi, sehingga memperkuat pentingnya perencanaan rasio tulangan yang tepat dalam pengendalian lendutan balok [8]. Temuan ini diperkuat oleh hasil perhitungan lendutan dengan asumsi penampang balok T dan tumpuan jepit-jepit memberikan hasil yang paling mendekati lendutan aktual dari uji beban, menegaskan bahwa kondisi penampang dan sistem tumpuan sangat mempengaruhi perilaku lendutan balok [9].

Selain itu, penggunaan metode numerik seperti Runge Kutta terbukti menghasilkan perhitungan lendutan yang sangat mendekati hasil analitik, menunjukkan keandalannya dalam menganalisis struktur yang kompleks secara matematis [10]. Hasil tersebut juga diperkuat oleh pernyataan bahwa semakin ringan berat beton, semakin besar nilai lendutan relatif (Δ/L) yang terjadi [11]. Oleh karena itu, penggunaan beton ringan dengan rasio λ di bawah 0,90 memerlukan perhatian khusus terhadap dimensi penampang untuk menghindari keruntuhan akibat lendutan berlebihan.

Selain itu, metode numerik seperti Metode Elemen Hingga juga terbukti efektif dalam menganalisis lendutan pada penampang yang kompleks. Penggunaan SAP2000 untuk analisis balok non-prismatis menghasilkan hasil yang mendekati nilai eksak, dan lebih akurat dibandingkan metode analitik untuk bentuk geometri rumit [12].

Selanjutnya akan dihitung maksimal beban yang dapat ditahan oleh balok, berdasarkan batas ijin lendutan.

$$\delta_{ijin} \geq \frac{5wL^4}{384EI}$$

$$0,01417 \geq \frac{5 \times w \times (3,4)^4}{384 \times 25732 \times 10^3 \times 5,4 \times 10^{-6}}$$

$$w \leq 1,130 \text{ kN/m}$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan batas ijin lendutan, diperoleh bahwa beban maksimum yang dapat ditahan oleh balok adalah lebih kecil atau sama dengan 1,130 kN/m.

C. Visualisasi Grafik Lendutan

Grafik fungsi lendutan $Y(x)$ pada balok sederhana dengan beban merata menunjukkan distribusi deformasi vertikal sepanjang bentang balok. Lendutan dihitung berdasarkan teori balok Euler–Bernoulli, yang memperhitungkan respons elastis material akibat momen lentur yang ditimbulkan oleh beban terdistribusi. Secara spesifik, fungsi lendutan $Y(x)$ pada balok sederhana dengan beban merata w di sepanjang bentang L dihitung menggunakan Rumus (5) yang diturunkan dari Teori Euler-Bernoulli.

Grafik dari fungsi ini akan membentuk kurva parabola yang simetris, dengan lendutan maksimum terjadi tepat di tengah bentang ($x=L/2$). Kurva ini secara visual merepresentasikan seberapa jauh setiap titik pada balok bergerak ke bawah akibat beban yang bekerja, memberikan gambaran jelas tentang profil deformasi balok.

Nilai lendutan pada posisi-posisi lain secara bertahap menurun menuju nol pada kedua ujung

tumpuan. Pola ini sesuai dengan perilaku teoritis balok dua tumpuan yang menerima beban merata, di mana lendutan maksimum terjadi di titik tengah sebagai akibat dari momen maksimum. Grafik ini memberikan gambaran visual penting bagi perancang struktur dalam memahami seberapa besar deformasi yang terjadi dan di mana letaknya, sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi kenyamanan, kestabilan elemen non-struktural, dan pemenuhan persyaratan kemampuan layan bangunan.

Dari Gambar 2, Grafik ini menampilkan profil lendutan (*defleksi*) sebuah balok sepanjang bentangnya. Sumbu horizontal menunjukkan "Panjang Balok (m)", dari 0.0 m hingga sekitar 3.5 m. Sumbu vertikal menunjukkan "Lendutan (mm)", dari 0.0 mm hingga 17.5 mm. Kurva biru merepresentasikan lendutan balok pada setiap titik sepanjang bentang.

Puncak Kurva (Lendutan Maksimum) balok terjadi di tengah bentang. Dari Gambar 2, terlihat jelas bahwa lendutan mencapai nilai tertinggi sekitar 18.78 mm pada panjang balok sekitar 1.75 m. Ini menunjukkan bahwa balok mengalami deformasi terbesar di titik tengahnya, yang merupakan karakteristik umum untuk balok yang diberi beban di tengah bentang atau beban merata. Dapat diamati bahwa lendutan maksimum sebesar 18,78 mm telah melampaui batas izin lendutan yang diperbolehkan

Titik Tumpuan ($x = 0.0$ m dan $x \approx 3.5$ m): Pada kedua ujung balok, yaitu pada panjang balok 0.0 m dan sekitar 3.5 m, nilai lendutan adalah 0.0 mm. Ini sesuai dengan kondisi balok yang ditumpu sederhana di kedua ujungnya, di mana tidak ada lendutan yang terjadi pada titik tumpuan.

Pada sekitar titik $x \approx 0.875$ m (seperempat bentang dari kiri), lendutan balok berada di kisaran 10.0 mm hingga 12.5 mm, lebih tepatnya sekitar 11-12 mm. Pada sekitar titik $x \approx 2.625$ m (seperempat bentang dari kanan), lendutan balok juga menunjukkan nilai yang simetris, yaitu sekitar 11-12 mm.

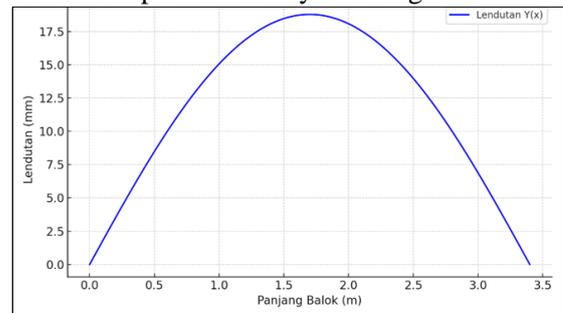
Sedangkan dari Gambar 3, terlihat jelas bahwa lendutan mencapai nilai tertinggi sekitar 12.5 mm pada posisi balok sekitar 1.75 m. Titik Tumpuan pada kedua ujung balok, yaitu pada posisi balok 0.0 m dan sekitar 3.5 m, nilai lendutan adalah 0.0 mm. Ini konsisten dengan kondisi balok yang ditumpu sederhana di kedua ujungnya, di mana tidak ada lendutan yang terjadi pada titik tumpuan.

Titik Seperempat Bentang ($x \approx 0.875$ m dan $x \approx 2.625$ m) lendutan balok berada di kisaran 8.0 mm hingga 10.0 mm, lebih tepatnya sekitar 9.5-10 mm. Dapat disimpulkan bahwa lendutan maksimum sebesar 12,52 mm menunjukkan

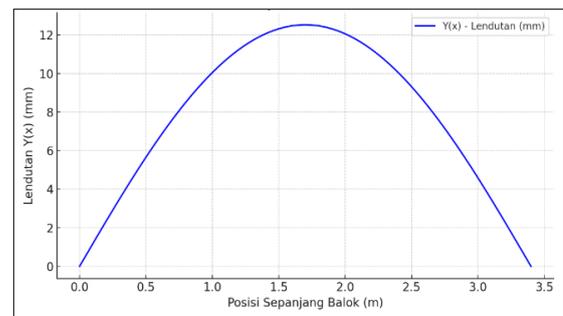
bahwa balok tersebut masih layak menahan beban sebesar 1,0 kN/m.

Adapun pada Gambar 4, terlihat jelas bahwa lendutan mencapai nilai tertinggi sekitar 14.0 mm (tepat di garis 14 mm) pada panjang balok sekitar 1.75 m. Terlihat bahwa nilai lendutan maksimum yang terjadi pada balok mendekati dan nyaris melampaui batas izin lendutan yang ditetapkan, yaitu sebesar 14,17 mm.

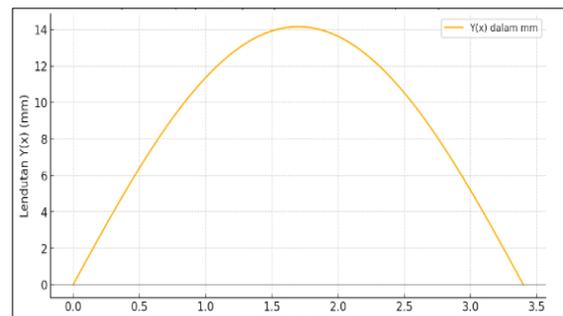
Pada kedua ujung balok, yaitu pada panjang balok 0.0 m dan sekitar 3.5 m, nilai lendutan adalah 0.0 mm. Pada sekitar titik $x = 0.875$ m (seperempat bentang dari kiri), lendutan balok berada di kisaran 9.0 mm hingga 10.0 mm, lebih tepatnya sekitar 9.5 mm. Pada sekitar titik $x = 2.625$ m (seperempat bentang dari kanan), lendutan balok juga menunjukkan nilai yang simetris, yaitu sekitar 9.5 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa balok berada pada batas kemampuan layan, sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap beban atau dimensi penampang untuk memastikan struktur tetap aman dan nyaman digunakan.



Gambar 2. Grafik Fungsi Lendutan $Y(x)$ Sepanjang Balok Sederhana dengan Beban Merata $w=1,5$ kN/m



Gambar 3. Grafik Fungsi Lendutan $Y(x)$ Sepanjang Balok Sederhana dengan Beban Merata $w=1,0$ kN/m



Gambar 4. Grafik Fungsi Lendutan $Y(x)$ Sepanjang Balok Sederhana dengan Beban Merata $w=1,130$ kN/m

Perbandingan nilai lendutan dari ketiga kondisi beban yang telah ditampilkan dalam grafik sebelumnya dapat dilihat lebih jelas pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Lendutan Maksimum Balok Beton Bertulang pada Berbagai Kondisi Beban Merata

Skenario Pembebanan	Lendutan Maksimum (mm)	Batas Izin Lendutan SNI 2847:2019 (mm)	Status Lendutan
Beban 1.5 kN/m	18.78	14.17	Melebihi Batas
Beban 1.0 kN/m	12.5	14.17	Memenuhi Batas
Beban 1.130 kN/m	14	14.17	Memenuhi Batas

Seiring meningkatnya kombinasi beban yang bekerja pada struktur, nilai lendutan dan gaya dalam (momen dan geser) turut meningkat, yang mengindikasikan pentingnya desain dimensi dan kekakuan yang memadai untuk menjaga batas lendutan tetap dalam nilai yang diizinkan [1].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis menggunakan Teori Balok Euler–Bernoulli, dapat disimpulkan bahwa besar lendutan balok beton bertulang sangat dipengaruhi oleh besarnya beban terdistribusi, panjang bentang, kekakuan material (modulus elastisitas), dan momen inersia penampang. Pada kasus balok sederhana dengan panjang bentang 3,4 meter dan beban merata sebesar 1,5 kN/m, diperoleh lendutan maksimum sebesar ±18,78 mm. Angka ini melebihi batas lendutan izin menurut SNI 2847:2019, yaitu 14,17 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur tidak memenuhi persyaratan kemampuan layan dan memerlukan penyesuaian desain.

Namun, ketika beban dikurangi menjadi 1,0 kN/m, lendutan maksimum menurun signifikan menjadi ±12,52 mm, yang berada di bawah batas izin SNI, menandakan struktur memenuhi kriteria kenyamanan dan kinerja layan.

Ketika beban mendekati nilai 1,13 kN/m, nilai lendutan maksimum nyaris melampaui batas izin 14,17 mm, menunjukkan bahwa balok berada pada batas kemampuan layan. Oleh karena itu, evaluasi lebih lanjut terhadap dimensi penampang atau beban kerja sangat diperlukan agar struktur tetap aman dan nyaman.

Analisis ini menggunakan pendekatan Euler-Bernoulli yang mengabaikan deformasi geser, sebuah asumsi yang valid untuk balok langsing seperti yang umum digunakan. Meskipun teori balok Timoshenko dan pendekatan orde tinggi lainnya menawarkan akurasi yang lebih tinggi dengan memperhitungkan efek geser, kesederhanaan dan efisiensi Euler-Bernoulli tetap

menjadi dasar kuat untuk desain awal dan sebagian besar aplikasi rekayasa sipil.

Penambahan jumlah tulangan utama secara signifikan meningkatkan kapasitas lentur balok dan mengurangi lendutan yang terjadi pada beban yang sama, serta meningkatkan kemampuan balok dalam menahan beban sebelum mengalami kegagalan struktural [13]. Hal ini mendukung pentingnya perencanaan rasio tulangan yang tepat sebagaimana dianalisis dalam penelitian ini. Hal ini sejalan dengan temuan yang menekankan bahwa nilai lendutan harus ditinjau secara menyeluruh karena berpengaruh langsung pada keamanan pengguna bangunan serta kekuatan struktur, sebagaimana dipersyaratkan dalam SNI 2847:2019 [14]. Oleh karena itu, penggunaan model matematika yang mempertimbangkan efek-efek ini sangat penting untuk memprediksi perilaku truktur secara akurat sepanjang umur layan bangunan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Satwarnirat, S.T., M.T., Ketua Jurusan Teknik Sipil, dan Bapak Aguskar, S.T., M.Eng., Ketua Prodi D3 Teknik Sipil Politeknik Negeri Padang, atas dukungan dan bimbingannya selama penulisan artikel ini. Apresiasi juga disampaikan kepada Ibu Ir.Badzlina Nesya Harvy, S.T., M.T., serta rekan-rekan dosen dan staf yang telah memberikan ide, masukan, dan bantuan teknis, termasuk Ibu Putri Kumala Sari, S.T., M.T., atas kemudahan dalam proses submit. Terima kasih khusus penulis sampaikan kepada keluarga tercinta, terutama suami tercinta, atas doa, dukungan moral, dan pengorbanan waktu yang menjadi sumber kekuatan utama dalam menyelesaikan karya ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. J. Priyanto, “Kajian Kekuatan pada Struktur Balok Grid Persegi,” 2016.
- [2] M. K. Zakaria, A. A. Soeparlan, and Mahfud, “Analisa Pengaruh Perubahan Letak Tulangan terhadap Lendutan Seketika dan Jangka Panjang pada Pelat Satu Arah Lantai Dua,” 2019.
- [3] Badan Standardisasi Nasional, “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung,” *Sni 2847-2019*, no. 8, p. 720, 2019.
- [4] S. 1727-2020, “Penetapan Standar Nasional Indonesia 1727 : 2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur,” *Badan Standarisasi Nas. 17272020*, no. 8, pp. 1–336, 2020.

- [5] I. Indriyani, N. Nindyawati, and M. Sulton, "Analisis Momen-Lendutan Pada Balok Induk Dengan Variasi Penempatan Balok Anak Beton Bertulang," *J. Inov. Teknol. dan Edukasi Tek.*, vol. 4, no. 4, p. 2, 2024, doi: 10.17977/um068.v4.i4.2024.2.
- [6] I. Units, *318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. 2019. doi: 10.14359/51716937.
- [7] S. Prayitno, E. Rismunarsi, and K. Wirastuti, "Pengaruh Panjang Sambungan Lewatan Tulangan Baja Polos Sepanjang 300 mm, 325 mm, dan 350 mm Pada Balok Beton Bertulang dengan Mutu Normal Terhadap Kuat Lentur Maksimum," *e-Journal MATRIKS Tek. SIPIL*, no. September, pp. 799–805, 2016.
- [8] D. Wiyono and W. Trisina, "Analisis Lendutan Seketika Dan Lendutan Jangka Panjang Pada Struktur Balok," *J. Tek. Sipil Maranatha*, vol. 9, no. 1, pp. 20–37, 2013.
- [9] Tri Handayani and Yudi Irawadi, "Analisis lendutan balok beton secara eksperimental dan perhitungan metode elemen hingga (MEH) dengan aplikasi SNI 2847 : 2013," *Maj. Ilm. Pengkaj. Ind.*, vol. 12, no. 3, pp. 127–134, 2018, doi: 10.29122/mipi.v12i3.3073.
- [10] A. Prihatiningsih and F. Itang, "Analisis Perhitungan Putaran Sudut dan Lendutan Menggunakan Metode Analitik dan Numerik," vol. 2507, no. February, pp. 1–9, 2020.
- [11] M. F. Hidayattulloh, P. Priyono, and M. Muhtar, "Studi Pengaruh Lendutan Terhadap Beton Ringan Yang Tetap Terjaga Berat Penampang," *J. Smart Teknol.*, vol. 5, no. 1, pp. 136–143, 2023.
- [12] O. A. Pala'biran, R. S. Windah, and R. Pandaleke, "Perhitungan Lendutan Balok Taper Kantilever Dengan Menggunakan SAP2000," *J. Sipil Statik*, vol. 7, no. 8, pp. 1039–1048, 2019.
- [13] P. Sangadji, M. Amir Sultan, E. Riaky Ahadian, and J. I. Jusuf Abdulrahman Kampus Gambesi Kota Ternate Selatan, "CLAPEYRON :JurnalIlmiah Teknik Sipil 2(1): 27-33," vol. 2, no. 1, pp. 27–33, 2019.
- [14] N. A. Lie and V. M. Alo, "Analisis Perbandingan Nilai Lendutan Pelat Lantai Beton Bertulang Menggunakan Analisa Struktur Berdasarkan SNI 2847:2019 dan Abaqus Cae," *G-Smart*, vol. 8, no. 1, pp. 28–38, 2024, doi: 10.24167/gsmart.v8i1.11589.