

Analisis Simulasi Numerik Defleksi Balok Baja ST60 dengan Variasi Pembebanan dan Tumpuan

Muhammad Syaiful Fadly^{1*}, Mustafa², Muhammad Ikram Kido³, Muhammad Ghazali Arrahim⁴

^{1,2} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Tadulako

³ Program Studi Perawatan dan Perbaikan Mesin, Politeknik Bosowa

⁴ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Widyagama Malang

^{1,2} Jl. Soekarno Hatta No.KM. 9, Tondo, Kec. Mantikulore, Kota Palu, Sulawesi Tengah 94148, Indonesia

³Jalan Kapasa Raya No.23 Kapasa Kecamatan Tamalanrea, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90245, Indonesia

⁴Jl. Borobudur No.35, Mojolangu, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65142, Indonesia

E-mail: muhsyaifulfadly@gmail.com¹, musds@gail.com², ikramkd23@gmail.com³, mghazal234@gmail.com⁴

Abstrak

Info Naskah:

Naskah masuk: 31 Maret 2024

Direvisi: 28 Mei 2024

Diterima: 3 juni 2024

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis defleksi yang terjadi secara simulasi numerik dengan Software Ansys dalam pemodelan static structural pada balok persegi Baja ST 60. Variabel dalam penelitian ini adalah pembebanan sebesar 10, 15 dan 20 N serta jenis tumpuan yaitu jepit-jepit, jepit-rol dan engsel-rol. Hasil menunjukkan bahwa semakin besar beban maka defleksi yang terjadi juga semakin meningkat. Defleksi maksimum yaitu pada pemberanakan 20 N. Tumpuan jepit-jepit dan engsel-rol defleksi maksimum yaitu pada jarak 400 mm sedangkan tumpuan jepit-rol defleksi maksimum terjadi pada jarak 450 mm. Dari ketiga jenis tumpuan yang digunakan dalam penelitian ini, tumpuan sederhana (engsel-rol) menghasilkan defleksi yang lebih besar dibandingkan dengan tumpuan jepit-jepit maupun (jepit-rol). Dengan tumpuan (engsel-rol) menghasilkan defleksi sebesar 1,212 mm, tumpuan (jepit-rol) sebesar 0,541 mm dan tumpuan (jepit-jepit) sebesar 0,302 mm.

Abstract

Keywords:

deflection;
numerical simulations;
support;
load.

This research aims to analyze the deflection that occurs through numerical simulation using Ansys Software in static structural modeling on an ST 60 steel square beam. The variables in this study are loads of 10, 15, and 20 N, as well as the types of supports, namely fixed-fixed, fixed-roller, and hinge-roller. The results show that the larger the load, the greater the deflection that occurs. The maximum deflection occurs at a load of 20 N. The fixed-fixed and hinge-roller supports show maximum deflection at a distance of 400 mm, while the fixed-roller support shows maximum deflection at a distance of 450 mm. Among the three types of supports used in this study, the simple support (hinge-roller) results in greater deflection compared to the fixed-fixed and fixed-roller supports. The hinge-roller support results in a deflection of 1.212 mm, the fixed-roller support results in a deflection of 0.541 mm, and the fixed-fixed support results in a deflection of 0.302 mm.

*Penulis korespondensi:

Muhammad Syaiful Fadly

E-mail: muhsyaifulfadly@gmail.com

1. Pendahuluan

Simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS untuk pemodelan struktur statis defleksi balok baja ST60 dalam berbagai kondisi pembebanan dan tumpuan merupakan pendekatan lanjutan dalam penelitian teknik struktur. Metode ini memanfaatkan kemampuan ANSYS untuk memberikan wawasan terperinci tentang perilaku balok baja dalam berbagai skenario, sehingga menghasilkan hasil yang presisi dan andal. Pemanfaatan perangkat lunak ANSYS untuk simulasi numerik memungkinkan pemodelan perilaku struktur statis yang rumit. Pendekatan ini menjadi penting dalam memprediksi dan memahami karakteristik defleksi material seperti baja ST60, yang penting untuk memastikan integritas struktural dan keamanan berbagai konstruksi.

Balok merupakan komponen utama yang digunakan dalam representasi model sistem mekanik [1], [2]. Dalam tulisan ini, akan dibahas perilaku balok dan elemen padat dengan menggunakan analisis tegangan Von-Mises dan lendutan sebagai akibat beban terpusat yang diterapkan pada balok berpenampang persegi panjang dengan menggunakan variasi jenis tumpuan. Ketika suatu bagian mengalami momen lentur dan gaya geser, ia akan mengalami deformasi tertentu. Material struktural akan memberikan resistansi atau tekanan terhadap deformasi ini [3], [4], [5].

Dalam perencanaan struktur, salah satu aspek yang sangat penting untuk diperhatikan adalah perhitungan defleksi atau lendutan pada elemen-elemen ketika mereka dikenai beban. Hal ini memiliki signifikansi yang tinggi terutama dalam konteks kekuatan dan kekakuan struktur. Misalnya, pada batang horizontal yang diberi beban secara lateral, akan mengalami defleksi yang perlu diperhitungkan secara cermat.

Defleksi pada elemen-elemen yang mengalami beban harus tetap dalam batas yang diperbolehkan, karena jika melampaui batas tersebut, dapat menyebabkan kerusakan pada elemen tersebut atau bahkan pada elemen lainnya. Sebagai contoh, pada poros transmisi, jika defleksi cukup besar, hal ini dapat menghasilkan amplitudo getaran yang meningkat, menyebabkan resonansi, dan mengakibatkan suara dan getaran yang kasar pada sistem transmisi. Selain itu, defleksi yang berlebihan juga dapat merusak poros itu sendiri, menyebabkan keausan yang cepat pada bantalan yang menopang poros, serta kerusakan pada gigi-gigi roda gigi [6], [7], [8].

Baja dalam struktur adalah hasil dari berbagai keunggulan dan sifat material yang dimiliki oleh baja. Baja telah lama menjadi pilihan utama dalam konstruksi struktur bangunan, jembatan, kendaraan, dan berbagai aplikasi lainnya [9], [10]. Baja merupakan jenis bahan bangunan yang dipilih berdasarkan pertimbangan ekonomi, sifat, dan kekuatannya yang cocok untuk menahan beban struktural. Itulah sebabnya baja banyak digunakan sebagai bahan dalam konstruksi struktur, seperti kolom dan balok dalam rangka utama bangunan bertingkat, sistem penyangga atap dengan bentangan panjang seperti gedung olahraga, hanggar, menara antena, jembatan, penahan tanah, tiang pancang fondasi, bangunan pelabuhan, struktur lepas pantai, dinding perkuatan pada reklamasi pantai, tangki minyak, pipa untuk transportasi minyak, air, atau gas.

Defleksi atau lendutan pada batang dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk geometri batang, bahan yang digunakan, beban yang diterapkan, dan kondisi batas. Faktor-faktor ini harus dianalisis dengan hati-hati dalam perencanaan dan perhitungan struktur untuk memastikan bahwa lendutan batang tetap dalam batas yang aman dan dapat diterima. Dalam analisis lendutan batang, digunakan konsep tegangan dan regangan. Tegangan adalah gaya internal yang bekerja pada batang, sedangkan regangan adalah perubahan bentuk yang terjadi dalam batang tersebut. Hubungan antara tegangan dan regangan dikenal sebagai hukum hooke, yang berlaku untuk bahan elastis. Dalam perencanaan konstruksi teknik, penting untuk dapat menentukan beban maksimum yang dapat ditangani oleh sebuah struktur. Dalam konteks rekayasa, hal ini harus disesuaikan dengan pertimbangan ekonomi dan teknis, seperti kekuatan, kekakuan, dan kestabilan [11]. Pemilihan atau desain batang sangat tergantung pada faktor-faktor teknis tersebut, yaitu kekuatan, kekakuan, dan kestabilan. Dalam kriteria kekuatan, desain batang harus cukup kuat untuk menahan gaya geser dan momen lentur. Sementara dalam kriteria kekakuan, desain batang harus cukup kaku untuk mengendalikan defleksi agar batang tidak mengalami lendutan yang melebihi batas yang diizinkan.

Representasi ANSYS yang baik terhadap dunia nyata telah mendorong penggunaannya untuk verifikasi dan validasi model. Dalam beberapa tahun terakhir, metode eksperimental digunakan untuk memvalidasi desain. Namun, penggunaan eksperimen terbukti tidak layak dan mahal untuk situasi yang semakin kompleks. Saat ini, para peneliti dan insinyur mengandalkan perangkat lunak FEA seperti ANSYS untuk verifikasi dan validasi desain/produk mereka. Hasil yang akurat, representasi yang baik dari situasi kompleks di dunia nyata, waktu penyelesaian yang singkat dan kemudahan simulasi adalah beberapa di antara banyak keuntungan yang menjadikan peralihan ke penggunaan ANSYS untuk kelancaran validasi [12].

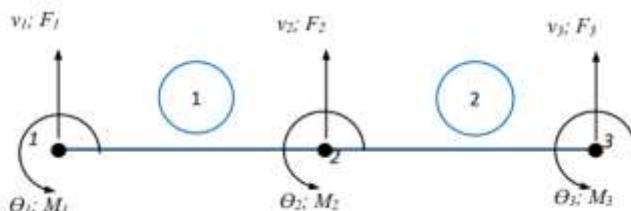
Dalam aplikasi teknik, struktur elemen seperti balok memiliki kepentingan praktis ketika geometri balok dan karakteristik material tidak seragam sepanjang panjangnya untuk meningkatkan rasio kekuatan terhadap berat atau untuk meningkatkan stabilitas struktur [13]. Model adalah dasar untuk semua prediksi dan karenanya merupakan elemen penting dalam desain teknik. Untuk melakukan perancangan, perilaku sistem yang dirancang harus diprediksi terlebih dahulu, dan hal ini hanya dapat dilakukan melalui penggunaan model, baik secara eksplisit maupun implisit [14].

Analisis simulasi numerik digunakan untuk memodelkan dan memprediksi defleksi pada balok baja dengan memanfaatkan teknik komputasi dan metode elemen hingga [15], [16]. Metode ini memungkinkan para insinyur dan perancang untuk memvisualisasikan dan memahami bagaimana balok baja akan berperilaku ketika dikenai beban. Penggunaan simulasi numerik defleksi pada balok baja memungkinkan identifikasi potensi masalah dan kekurangan dalam desain sebelum implementasi fisik. Dengan demikian, hal ini membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih baik dalam perencanaan struktur dan memastikan keamanan serta kinerja yang optimal. Metode ini memungkinkan

penelitian mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi defleksi, memungkinkan perancang untuk mengambil keputusan yang tepat guna memastikan kekuatan, kekakuan, dan kestabilan yang sesuai dalam balok baja khususnya baja ST60. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan dan memahami besarnya defleksi yang terjadi pada batang persegi dengan variasi jenis tumpuan dan beban dengan simulasi numerik pemodelan static structural. Meskipun telah banyak penelitian yang membahas tentang perilaku defleksi balok baja, termasuk jenis baja ST60, kebanyakan studi masih terbatas pada analisis teoritis dan eksperimental dengan kondisi pembebahan dan tumpuan yang relatif sederhana. Namun, terdapat kekurangan dalam literatur yang membahas secara komprehensif bagaimana variasi pembebahan dan jenis tumpuan mempengaruhi defleksi balok baja ST60 melalui pendekatan simulasi numerik model static structural dengan software ANSYS. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan melakukan analisis simulasi numerik yang mendetail terhadap defleksi balok baja ST60, mempertimbangkan berbagai variasi pembebahan dan tumpuan, guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam dan akurat mengenai perilaku struktural material ini dalam kondisi yang lebih kompleks dan realistik, seperti distribusi tegangan, regangan, dan deformasi disepanjang balok baja ST 60.

2. Metode

Penelitian dilakukan dengan analisis simulasi numerik menggunakan software ANSYS 16.0 Workbench dalam pemodelan *static structural*. Untuk menunjukkan cara penyelesaian balok menggunakan Metode Elemen Hingga maka akan dianalisis seperti pada Gambar 1 yaitu diagram benda bebas balok dengan dua tumpuan dan pembebahan pada tengah balok.



Gambar 1. Diagram benda bebas balok yang dibebani

dengan:

v = Defleksi vertical

F = Gaya geser

Θ = Slope defleksi

M = Moment bending

Terdapat 3 node dan 2 elemen pada diagram benda bebas dan di setiap node perlu mempertimbangkan keempat faktor tersebut. Modulus elastisitas dan momen inersia kedua elemen balok adalah sama. Sekarang harus dihitung defleksi titik simpul untuk kedua elemen balok menggunakan matriks kekakuan. Matriks kekakuan yang umum untuk elemen balok adalah:

$$[K] = \frac{E \cdot I}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Karena kumpulan data yang sama untuk kedua elemen (panjang elemen, modulus elastisitas, dan momen inersia), matriks kekakuan untuk kedua elemen akan sama. Selanjutnya untuk kedua element digabungkan menjadi matriks kekakuan global. Persamaan metode elemen hingga sebagai berikut:

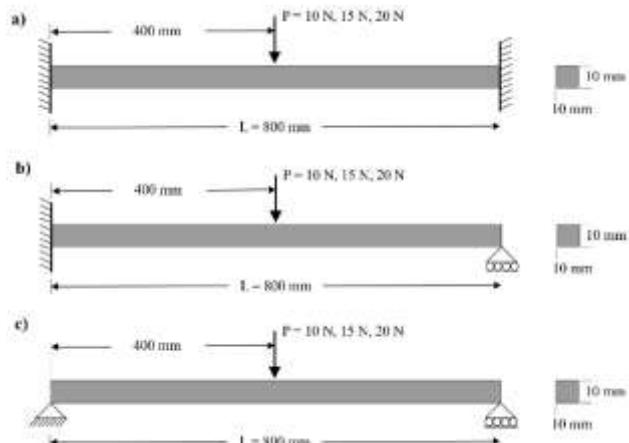
$$[K] = [u] \cdot [F] \quad (2)$$

dengan:

u = Vector perpindahan

F = Vector deformasi

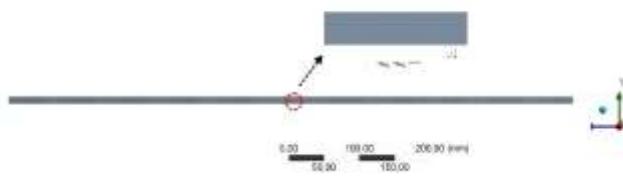
Sampel pengujian defleksi menggunakan material Baja ST 60, nilai input engineering data yaitu modulus elastisitas sebesar 211.300 Mpa dan poison rasio sebesar 0,33 [6]. Pemodelan geometri sampel uji defleksi berbentuk segi empat dengan ukuran 10x10 mm dan panjang bentangan sebesar 800 mm. Batang uji ditutup pada masing-masing ujungnya dengan variasi jenis tumpuan yaitu tumpuan jepit-jepit, tumpuan jepit-rol, dan tumpuan engsel-rol. Beban yang diberikan pada balok adalah beban terpusat sebesar 10 N, 15 N, dan 20 N pada jarak L/2. Skema simulasi numerik defleksi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



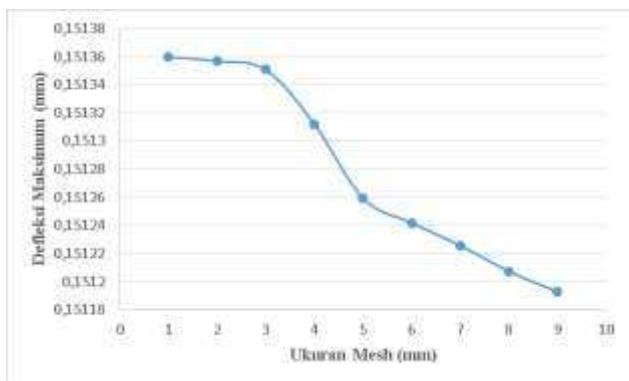
Gambar 2. Skema uji defleksi Baja ST60 dengan variasi tumpuan; a) tumpuan jepit-jepit, b) tumpuan jepit-rol, c) tumpuan engsel-rol.

Setelah proses pemodelan kondisi awal dan kondisi batas yaitu beban dan jenis tumpuan, selanjutnya masuk ke proses meshing element. Tujuan utama dari meshing dalam metode elemen hingga adalah untuk mengubah domain kontinu menjadi suatu representasi diskrit yang terdiri dari elemen-elemen diskret [17]. Meshing yang digunakan adalah dengan ukuran 2 mm dan bentuk meshing *equiangular quad* seperti pada Gambar 3. Hasil meshing menghasilkan jumlah nodes sebesar 52.896 dan jumlah element 10.000. Dalam penelitian ini dilakukan uji konvergensi pada Gambar 4 untuk memvalidasi simulasi numerik dan elemen meshing

yang dimodelkan. Beberapa ukuran mesh dipilih untuk mengetahui hasil defleksi maksimum pada balok baja ST60. Hasil konvergensi menunjukkan ukuran mesh 2 mm kebawah tidak signifikan mempengaruhi hasil simulasi. Sehingga dipilih ukuran mesh 2 mm yang memiliki batas *grid independency* <5%.



Gambar 3. Mesh size dengan element hexahedron pada balok Baja ST 60

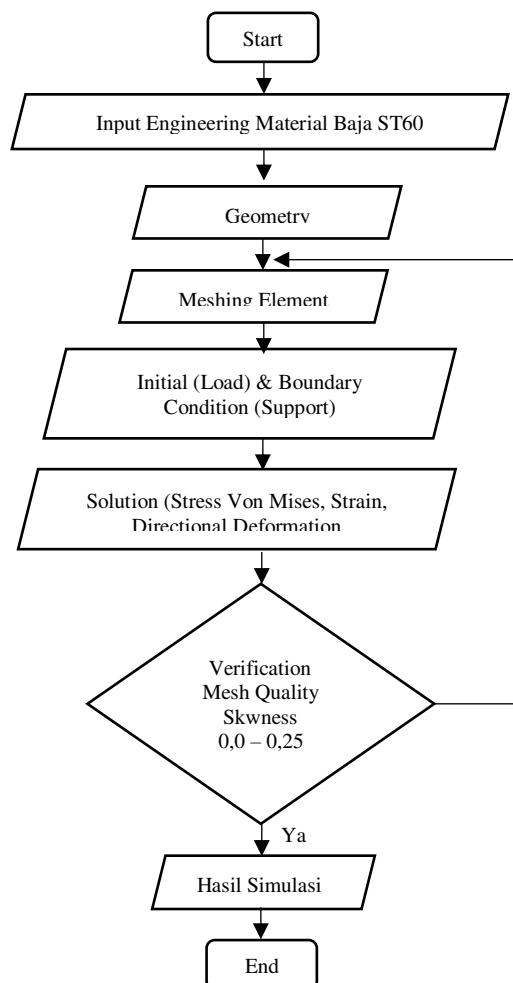


Gambar 4. Hasil uji konvergensi pada balok tumpuan jepit-jepit beban 10 N

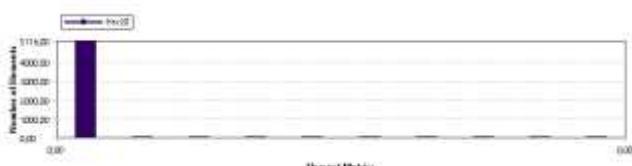
Flowchart tahapan penelitian seperti pada Gambar 5. Model verifikasi dari simulasi dengan ASNYS dilakukan dengan melakukan pengecekan kualitas dari mesh. Kualitas mesh yang baik akan menghasilkan akurasi tinggi pada hasil simulasi, sebaliknya, kualitas mesh yang buruk akan menghasilkan akurasi yang rendah. Verifikasi yang dilakukan yaitu dengan menggunakan model skewness atau kemencengan yang digunakan untuk menunjukkan seberapa miring suatu mesh tersebut. Hasil *mesh metric skewness* dari simulasi ditunjukkan pada Gambar 6.

Hasil *mesh metric* dengan maximum elemen sebesar $1,3133e^{-10}$. Hasil menunjukkan kualitas mesh yang *excellent* untuk simulasi yang dilakukan. *Mesh metric* yang semakin mendekati nilai 1 memiliki kualitas mesh yang buruk. Kondisi awal dan kondisi batas uji defleksi seperti pada Gambar 7.

Kondisi awal yang digunakan yaitu beban pada tengah balok sebesar 10, 15 dan 20 N. Sedangkan kondisi batas yaitu tumpuan pada kedua ujung balok. Hasil simulasi diplot untuk mengetahui *directional* deformasi menggunakan *path geometry* disepanjang balok. Selain itu juga mengetahui distribusi tegangan pada balok setelah menerima beban



Gambar 5. Flowchart penelitian



Gambar 6. Mesh metric skewness



Gambar 7. Kondisi awal dan kondisi batas tumpuan jepit-jepit dan pembebanan 10 N

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi numerik dari defleksi Baja ST 60 dengan variasi beban dan jenis tumpuan memperlihatkan tegangan von mises, regangan dan safety factor setelah balok mengalami pembebahan dengan variasi pembebahan dan jenis tumpuan seperti diperlihatkan pada Tabel 5.

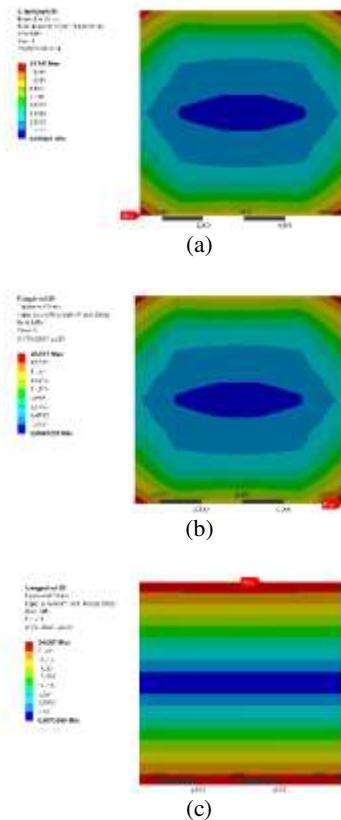
Tabel 1. Tegangan von mises, regangan

Tumpuan	Beban (N)	Tegangan von mises (MPa)	Regangan (MPa)
Jepit-Jepit	10	6,6736	3,15e-5
	15	10,01	4,73e-5
	20	13,347	6,31e-5
Jepit-Rol	10	10,008	4,73e-5
	15	15,013	7,10e-5
	20	20,017	9,47e-5
Engsel-Rol	10	12,043	5,70e-5
	15	18,065	8,55e-5
	20	24,087	1,14e-5

Tabel 1 memperlihatkan pada beban yang sama tumpuan engsel-rol menghasilkan tegangan dan regangan yang lebih besar kemudian diikuti oleh tumpuan jepit-rol dan jepit-jepit. Dengan jenis tumpuan yang sama, semakin besar beban yang diberikan maka tegangan dan regangan yang dihasilkan juga semakin besar. Untuk semua jenis tumpuan dan beban nilai safety factor yang terjadi sebesar 15 ul. Distribusi tegangan von mises pada penampang melintang balok ditunjukkan pada Gambar 8.

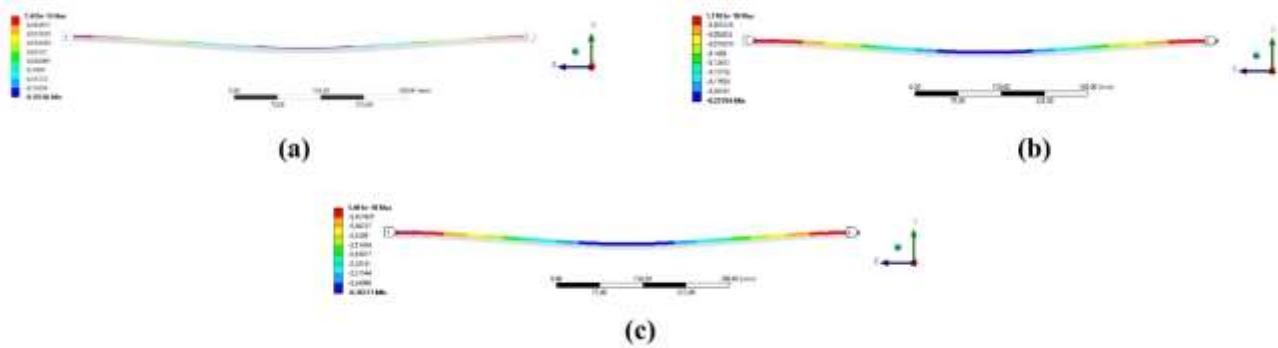
Perbedaan distribusi tegangan untuk variasi jenis tumpuan adalah, pada tumpuan jepit-jepit dan jepit-rol tegangan maksimum terjadi pada tumpuan jepit. Hal ini berbeda dengan tumpuan engsel-rol yang mana tegangan maksimum terjadi ditengah balok pada jarak $L/2$. *Directional deformation* seperti pada Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11 yang menunjukkan deformasi arah sumbu Y akibat pemberian beban terpusat pada tengah balok baja ST 60. Deformasi diukur pada permukaan atas disepanjang balok. Pada tumpuan jepit-jepit dan engsel-rol nilai defleksi terbesar yaitu pada tengah balok jarak $L/2$. Beban yang semakin besar juga menyebabkan deformasi yang terjadi semakin meningkat. Sedangkan untuk tumpuan jepit-rol defleksi maksimum yaitu pada jarak 450 mm. Hasil nilai defleksi terhadap jarak untuk masing-masing variasi beban dan jenis tumpuan seperti ditunjukkan pada Gambar 12.

Gambar 12 memperlihatkan bahwa untuk tumpuan jepit-jepit dan engsel-rol, defleksi yang terjadi semakin besar ketika menjauh dari tumpuan hingga mencapai tengah balok $L/2$ pada Baja ST 60, kemudian defleksi mengalami penurunan hingga mencapai tumpuan selanjutnya. Sedangkan tumpuan jepit-rol defleksi maksimum terjadi pada jarak 450 mm dari tumpuan jepit dan terjadi penurunan hingga mencapai tumpuan rol.

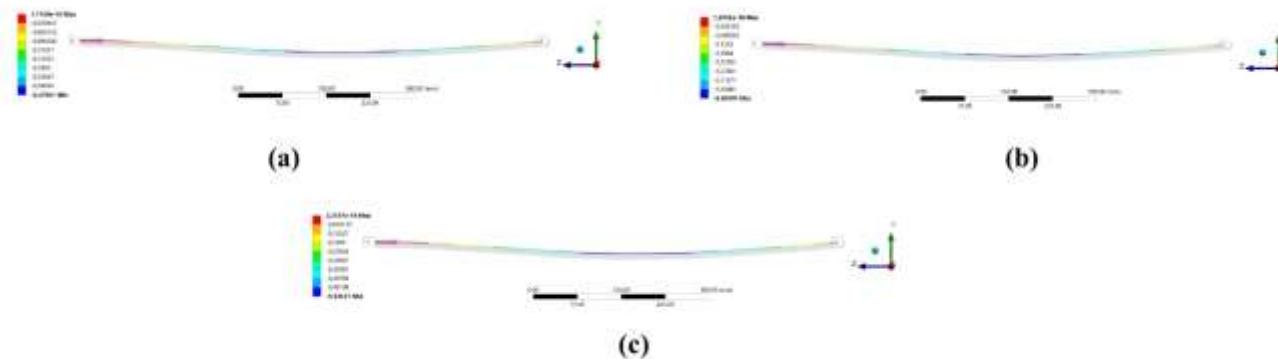


Gambar 8. Distribusi tegangan von mises penampang melintang balok dengan beban 20 N; a) jepit-jepit, b) jepit-rol, c) engsel-rol

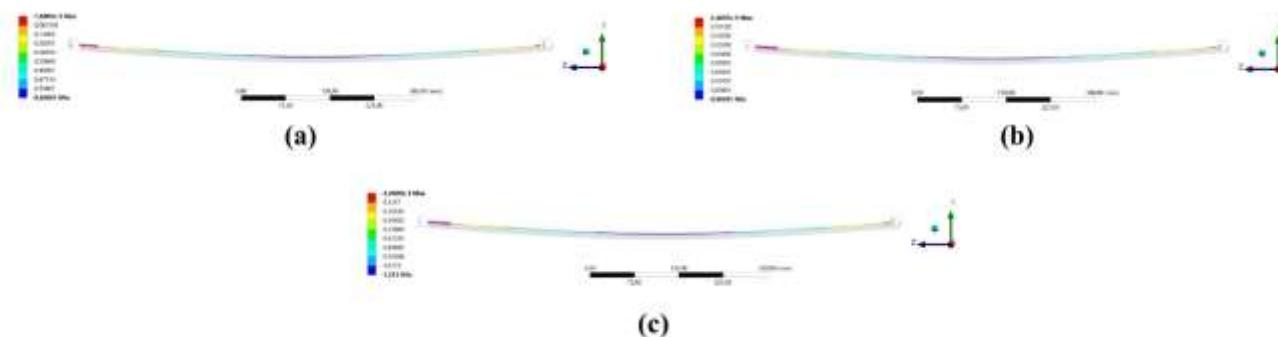
Gambar 13 menunjukkan defleksi maksimum yang terjadi pada balok, defleksi maksimum diambil pada jarak 400 mm untuk tumpuan jepit-jepit dan engsel-rol sedangkan untuk tumpuan jepit-rol diambil pada jarak 450 mm. Hasil menunjukkan bahwa defleksi yang terjadi semakin besar seiring dengan meningkatnya nilai beban yang diberikan pada pertengahan balok. Hal ini terjadi untuk semua variasi jenis tumpuan yang digunakan. Defleksi terbesar yaitu pada beban 20 N dengan tumpuan engsel-rol sebesar 1,212 mm, diikuti oleh tumpuan jepit-rol sebesar 0,541 mm, dan yang terakhir yaitu tumpuan jepit-jepit sebesar 0,302 mm. Defleksi yang terjadi pada semua variabel jenis tumpuan dan pembebahan masih masuk dalam batas aman dengan material Baja ST60. Tegangan yang terjadi setelah pembebahan dibawah nilai tegangan yang diizinkan oleh balok baja ST60. Dari ketiga jenis tumpuan yang digunakan dalam penelitian ini, tumpuan sederhana (engsel-rol) menghasilkan defleksi yang lebih besar daripada tumpuan jepit-jepit dan tumpuan jepit-rol. Hal ini terjadi karena tumpuan engsel-rol tidak memiliki momen perlawanan terhadap gaya yang diberikan akibat beban, baik beban terpusat maupun beban terbagi rata. Oleh karena itu, defleksi pada tumpuan ini lebih besar dibandingkan dengan tumpuan jepit-rol, di mana adanya momen perlawanan pada tumpuan jepit-rol menyebabkan defleksi terdistribusi ke arah tumpuan rol. Sementara itu, tumpuan jepit-jepit memberikan defleksi yang paling kecil karena pada kedua tumpuannya terdapat momen perlawanan terhadap gaya yang bekerja. Hubungan defleksi terhadap beban seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



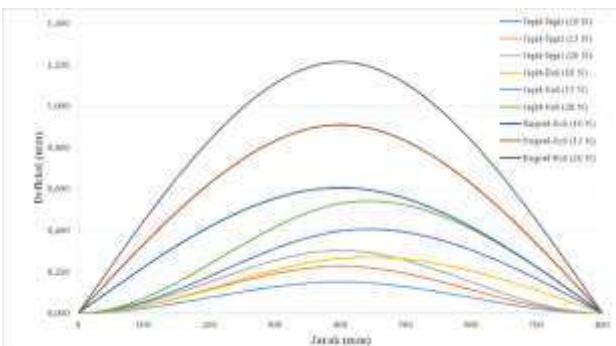
Gambar 9. Directional deformation tumpuan jepit-jepit; (a) beban 10 N, (b) beban 15 N, (c) beban 20 N



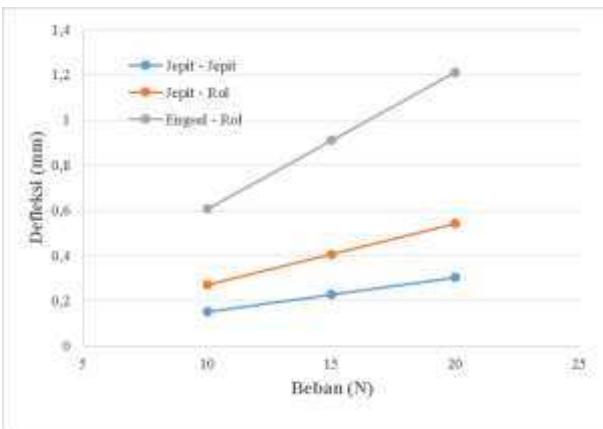
Gambar 10. Directional deformation tumpuan jepit-rol; (a) beban 10 N, (b) beban 15 N, (c) beban 20 N



Gambar 11. Directional deformation tumpuan engsel-rol; (a) beban 10 N, (b) beban 15 N, (c) beban 20 N



Gambar 12. Hubungan jarak dan defleksi pada variasi beban dan jenis tumpuan



Gambar 13. Hubungan defleksi maksimum dan beban pada balok Baja ST 60

4. Kesimpulan

Defleksi yang diperoleh secara simulasi numerik menunjukkan bahwa tumpuan engsel-rol menghasilkan defleksi terbesar dibandingkan dengan jenis tumpuan jepit-rol dan jepit-jepit. Nilai beban yang semakin meningkat juga menyebabkan defleksi yang terjadi ditengah balok Baja ST 60 semakin besar. Defleksi maksimum dengan beban 20 N yaitu sebesar 1,212 mm dengan menggunakan tumpuan engsel-rol, kemudian tumpuan jepit-rol sebesar 0,541 mm dan defleksi terendah yaitu sebesar 0,302 mm dengan tumpuan jepit-jepit. Defleksi terbaik yaitu pada tumpuan jepit-jepit dengan pembebanan 10 N sebesar 0,151 mm.

Daftar Pustaka

- [1] J. Frischkorn and S. Reese, "A solid-beam finite element and non-linear constitutive modelling," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 265, pp. 195–212, 2013.
- [2] J. Frischkorn and S. Reese, "Solid-beam finite element analysis of Nitinol stents," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 291, pp. 42–63, 2015.
- [3] L. Ombres, "Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material," *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 1, pp. 143–155, 2011.
- [4] A. Choudhury, C. Ochei, and R. Rice, "Simulation for the study of beam deflection in strength of materials," in 2001 Annual Conference, 2001, pp. 6–877.
- [5] M. Alam, J. P. Parmigiani, and J. J. Kruzic, "An experimental assessment of methods to predict crack deflection at an interface," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 181, pp. 116–129, 2017.
- [6] M. Mustafa, "Kaji Numerik Dan Eksperimental Lendutan Balok Baja Karbon St 60 Dengan Tumpuan Engsel-Rol," *J. Mek.*, vol. 3, no. 1.
- [7] M. S. Fadly, M. Iqbal, and R. Magga, "Efek Variasi Arus Dan Waktu Pencelupan Pada Proses Electroplating Plat Baja Komersil Terhadap Ketebalan Lapisan Dan Laju Korosi," *J. Mek.*, vol. 10, no. 1, 2019.
- [8] M. G. Arrahim, M. S. Fadly, E. A. Saputra, M. Mutmainah, and M. Rasyiid, "Pengaruh perendaman cryogenic terhadap sifat kekerasan dan struktur mikro pada FCD-45," *J. Mek.*, vol. 13, no. 2, 2022.
- [9] M. S. Fadly, A. Purnowidodo, and P. H. Setyarini, "Karakteristik Fiber Metal Laminate Akibat Beban Impak Balistik Dari Peluru Kaliber 9 mm Full Metal Jacket (FMJ)," *J. Rekayasa Mesin*, 2021, doi: 10.21776/ub.jrm.2021.01.01.12.
- [10] M. S. Fadly, B. Bakri, K. Anwar, and S. Chandrabakty, "Evaluation of Projectile Penetration Position on Perforated Plate on Ballistic Resistance of Composite Sandwich Panels," in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2023, vol. 1157, no. 1, p. 12033.
- [11] M. A. Dweib, B. Hu, A. O'donnell, H. W. Shenton, and R. P. Wool, "All natural composite sandwich beams for structural applications," *Compos. Struct.*, vol. 63, no. 2, pp. 147–157, 2004.
- [12] Ufe, M. M., Iorliam, A. Y. and Odeh, O. B. "Validation of Rayleigh-Ritz Deflection Equation for a Tapered Cantilever Beam using ANSYS Finite Element Software", *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 120-130, 2023.
- [13] Al-Raheem, S. K., Zainy, H. Z., Almawash, A. D., Alansari, L. S., & Ali, S. W. M. "Static deflection of pre-twisted beam subjected to transverse load", *Results in Engineering*, vol. 21, 2024.
- [14] Bakri, B., Fadly, M. S., Anwar, K., & Chandrabakty, S. "Numerical research on the impacts of composite panel ballistic using perforated plate for combat vehicle", In 4th International Seminar on Science and Technology, pp. 15-25, 2023.
- [15] V. K. R. Kodur and M. Dwaikat, "A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 5, pp. 431–443, 2008.
- [16] K. M. A. Sohel, J. Y. R. Liew, and C. G. Koh, "Numerical modelling of lightweight Steel-Concrete-Steel sandwich composite beams subjected to impact," *Thin-Walled Struct.*, vol. 94, pp. 135–146, 2015.
- [17] M. S. Fadly, A. Purnowidodo, and P. H. Setyarini, "Deformation and energy absorption of fiber metal laminates (FMLs) after ballistic impact load," in Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta, 2019, vol. 5, pp. 49–58.