

ANALISIS PERBANDINGAN KAPASITAS BALOK KOMPOSIT STANDAR DENGAN BALOK KOMPOSIT KASTELELA MENGGUNAKAN APLIKASI MIDAS FEA NX

Darryl Sebastian¹ dan Sunarjo Leman²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
darryl.325200022@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
sunarjo@ft.untar.ac.id

Masuk: 29-12-2023, revisi: 12-01-2024, diterima untuk diterbitkan: 16-01-2024

ABSTRACT

The combination of several structural materials into a single structure is also known as a composite structure. A castellated beam is a beam structure made of cross-section steel either IWF (I-Beam Wide Flange) or HWF (H-Beam Wide Flange) that will be cut with a certain pattern on its web and will be joined by welding to increase the height of the beam. The increase in height of the beam causes the moment of inertia to be greater and increases the capacity of the beam without adding any structure's weight. In this research, we will compare the results of finite element analysis obtained from the MIDAS FEA NX application. 4 types of composite beam models will be analyzed with finite elements, there are 2 standard beam models and 2 castellated beam models. Based on this research, while converting a standard IWF beam into a castellated beam, the capacity increases by 16.14%, and by converting a standard HWF beam into a castellated beam, there is an increase in capacity of 3.7%. Every specimen in this research was analyzed up to the target displacement from the laboratory test results as the reference.

Keywords: composite structure; composite beam; castellated beam; finite element analysis

ABSTRAK

Penggabungan beberapa material struktural menjadi sebuah satu kesatuan disebut juga sebagai struktur komposit. Balok kastela merupakan struktur balok yang dibuat dari baja penampang baik IWF maupun HWF yang dipotong dengan pola tertentu pada bagian badannya dan akan disambung dengan las sehingga balok menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan balok standar. Pertambahan tinggi pada balok menyebabkan momen inersia menjadi lebih besar sehingga kapasitas balok menjadi bertambah tanpa adanya pertambahan berat sendiri balok. Dalam penelitian ini akan membandingkan antara hasil-hasil analisis elemen hingga yang diperoleh dari aplikasi MIDAS FEA NX. Terdapat 4 jenis model balok komposit yang akan dianalisis dengan elemen hingga, yang terdiri dari 2 model balok standar dan 2 model balok kastela. Berdasarkan penelitian ini diketahui bahwa pada saat mengubah balok standar IWF menjadi balok kastela terjadi peningkatan kapasitas sebesar 16,14% sedangkan pada saat mengubah balok standar HWF menjadi balok kastela terjadi peningkatan kapasitas sebesar 3,7%. Analisis untuk setiap model benda uji pada penelitian ini ditinjau sampai dengan target *displacement* sesuai dengan referensi hasil uji laboratorium.

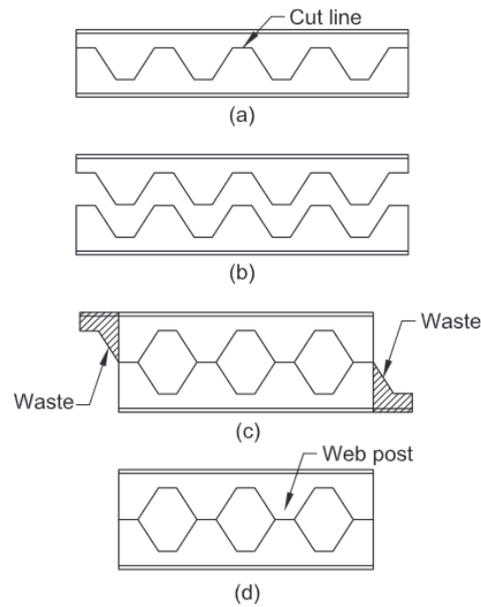
Kata kunci: struktur komposit; balok komposit; balok kastela; analisis elemen hingga; kapasitas

1. PENDAHULUAN

Latar belakang

Pada saat ini terdapat banyak sekali jenis material yang dapat digunakan dalam membangun sebuah struktur. Terdapat 2 material utama yang paling sering dijumpai pada sebuah bangunan yaitu beton dan baja. Kedua material tersebut memiliki sifat dan kegunaannya masing-masing, sebagai contoh beton yang memiliki kekuatan terhadap tekan tetapi lemah terhadap tarik dan baja yang memiliki keuntungan bersifat elastis dan daktilitas yang cukup tinggi (Tumimomor, Dapas, & Mondoringin, 2016).

Dalam sebuah struktur yang memerlukan bentang yang sangat panjang penggunaan balok baja standar sebagai penopang struktur menjadi tidak efisien karena memerlukan ukuran yang besar, sehingga para insinyur sipil terus berinovasi untuk menciptakan sebuah komponen struktur yang kuat dan efisien. Dari sanalah muncul sebuah teknologi yang dikenal dengan balok kastela. Balok kastela adalah sebuah baja IWF maupun HWF yang dipotong dengan pola tertentu menjadi 2 bagian yang sama besar yaitu bagian atas dan bagian bawah, kemudian 2 bagian tersebut akan ditumpuk dan disambung kembali dengan las seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses pembuatan balok kastela (Fares, Coulson, & Dinehart, 2016)

Al-Thabhawe (2022) membuat sebuah uji coba laboratorium untuk menganalisis perilaku komposit baja dan beton. Dalam penelitian ini berfokus pada membandingkan peningkatan kapasitas dari penampang balok standar, balok kastela simetris dan balok kastela asimetris seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk benda uji percobaan (Al-Thabhawe, 2022)

Berdasarkan percobaan yang dilakukan didapatkan hasil jika kapasitas *ultimate* yang dimiliki balok kastela yang dibuat dengan baja IWF lebih besar 46% dibanding balok standar, sedangkan untuk balok kastela dengan HWF memiliki peningkatan kekuatan sebesar 21% dibanding balok standarnya (Al-Thabhawe, 2022).

Rumusan masalah

Berikut beberapa permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penampang balok IWF dan HWF komposit terhadap deformasi struktur dan kapasitas dalam memikul beban.
2. Bagaimana pengaruh penampang balok kastela komposit simetris terhadap deformasi struktur dan kapasitas dalam memikul beban.

Tujuan penelitian

Berikut merupakan beberapa tujuan dari dilaksanakannya penelitian ini, sebagai berikut:

1. Mengetahui perilaku penampang balok IWF dan HWF terhadap deformasi struktur dan kapasitas dalam memikul beban.
2. Mengetahui perilaku penampang balok kastela simetris terhadap deformasi struktur dan kapasitas dalam memikul beban.

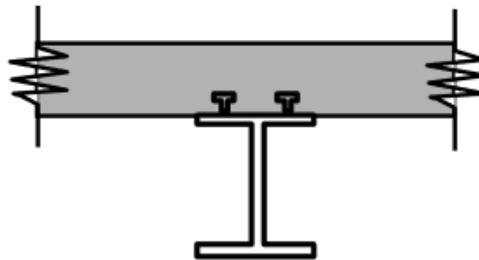
Balok kastela

Balok kastela adalah sebuah balok baja yang ditinggikan dari sebuah balok baja induk dan memiliki lubang bukaan di bagian badannya (Partono, Sukamta, Hardiyati, & Budi, 2018). Balok kastela memiliki banyak sekali manfaat dan keuntungan dalam penggunaannya seperti dengan adanya pertambahan tinggi ini maka inersia penampang dari balok kastela akan semakin besar dan meningkatkan kapasitas balok. Lubang yang terdapat pada balok kastela dapat dimanfaatkan sebagai tempat melintasnya pipa-pipa air, ventilasi, kelistrikan dan fasilitas lain yang bertujuan menunjang kegiatan pada sebuah bangunan, sehingga tidak diperlukan ruang lebih pada langit-langit ruangan yang dapat menyebabkan pengurangan tinggi *ceiling* ruangan.

Pengunaan utama dari balok kastela umumnya pada struktur dengan bentang yang panjang. Biasanya balok kastela digunakan sebagai balok dengan panjang lebih dari 9 meter dan balok kastela menjadi alternatif yang sangat ekonomis untuk bentang lebih dari 12 meter (Fares, Coulson, & Dinehart, 2016). Umumnya ketinggian balok bertambah menjadi 1,5x dari ukuran balok induknya dan lubang bukaan dengan ketinggian $\frac{2}{3}$ dari balok. Dengan ukuran tersebut dapat menghasilkan balok kastela yang sangat efisien untuk menahan *viereendel mechanism* (Liu & Chung, 2003).

Struktur komposit

Dalam sebuah bangunan dengan struktur baja biasanya tetap memerlukan komponen beton sebagai pelat lantai. Struktur dimana pelat beton dipikul oleh balok baja ini disebut juga sebagai struktur komposit. Struktur komposit pada dasarnya adalah struktur yang memiliki dua jenis atau lebih material yang berbeda dan bekerja sama sebagai satu kesatuan sehingga dapat menahan beban yang diterima oleh struktur tersebut (Tumimomor, Dapas, & Mondoringin, 2016).



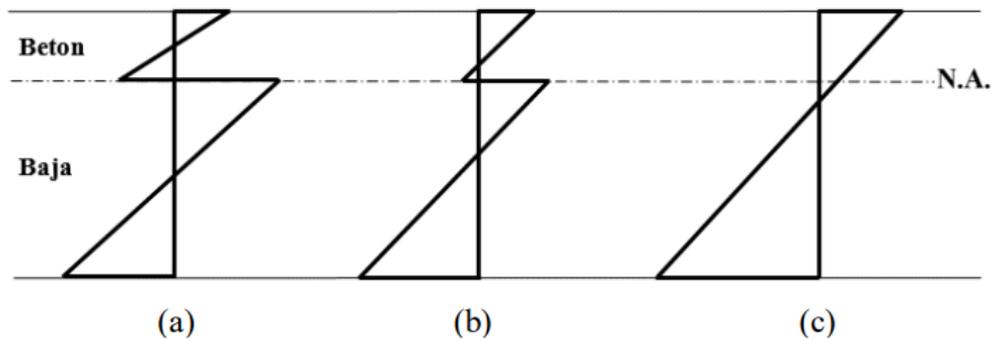
Gambar 3. Struktur komposit baja beton (Tumimomor, Dapas, & Mondoringin, 2016)

Pada struktur komposit antara balok baja dan pelat beton seperti pada Gambar 3, pelat beton sebagian besar akan menerima tegangan tekan yang terjadi pada struktur dan balok baja akan memikul hampir seluruh tegangan tarik yang terjadi. Selain itu dengan adanya pelat beton di atasnya maka struktur memiliki kekuatan tambahan terhadap gaya geser yang dapat mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan *viereendel* pada balok kastela (Bauer, 2021).

Shear connector

Pada sebuah struktur komposit biasanya terdapat gaya geser yang muncul akibat dari pembebanan pada struktur dan agar tidak terjadi pemisahan antar material diperlukan sebuah elemen yang disebut *shear connector*. *Shear connector* atau yang sering disebut juga penghubung geser harus bersifat cukup kaku agar kuat dalam menahan gaya geser yang terjadi dan struktur tetap menyatu. *Shear connector* yang paling umum digunakan adalah *stud*, yang disambung dengan cara las pada bagian atas sayap balok baja.

Jumlah dan kekuatan dari penghubung geser menjadi salah satu faktor yang menentukan apakah struktur tersebut bersifat nonkomposit, komposit parsial, ataupun komposit penuh. Kondisi komposit dari suatu struktur bisa dilihat melalui distribusi tegangan elastis dan plastis seperti pada Gambar 4. Struktur nonkomposit akan menunjukkan distribusi tegangan dimana setiap material bekerja secara individu sehingga terdapat perubahan arah tegangan tepat pada sumbu netral (Widjaya & Leman, 2023).



Gambar 4. Distribusi tegangan elastis untuk perilaku (a) Nonkomposit, (b) Komposit Parsial, (c) Komposit Penuh (Widjaya & Leman, 2023)

Elemen hingga

Metode elemen hingga atau yang sering dikenal dengan *finite element method* adalah sebuah metode numerik untuk menyelesaikan masalah matematika yang bentuknya pendekatan terhadap kondisi sesungguhnya. Pada sebuah masalah yang memiliki bentuk geometri, pembebanan, dan sifat material yang rumit hampir tidak mungkin untuk memperoleh solusi matematika yang dapat dipercaya, sehingga kita perlu bergantung pada metode numerik agar mendapatkan solusi yang dapat diterima. Dalam metode elemen hingga daripada menyelesaikan sebuah masalah dalam bentuk utuh dalam satu perhitungan, lebih baik dengan membagi bagian-bagian menjadi lebih sederhana dan digabungkan lagi untuk memperoleh solusi dalam bentuk yang utuh (Logan, 2011).

2. METODE PENELITIAN

Penulisan dalam penelitian ini didasarkan pada studi literatur terdahulu dan studi kasus yang diuji di laboratorium. Studi literatur digunakan sebagai dasar teori yang berkaitan seputar dengan hal-hal yang ada dalam percobaan, selain itu juga studi literatur bertujuan untuk menggali lebih dalam mengenai topik yang ditinjau agar memperoleh hasil penelitian yang lebih baik. Studi kasus dalam penelitian ini berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Al-Thabhwawee (2022) tentang perilaku komposit antara balok kastela simetris dan asimetris dengan pelat beton. Hasil yang diperoleh dari percobaan tersebut akan dibandingkan dan dikembangkan lebih lanjut dengan metode elemen hingga. Tahap-tahap dalam penelitian ini dapat dilihat seperti pada **Error! Reference source not found.**

Gambar 5. Diagram alir penelitian

Proses analisis akan menggunakan bantuan program MIDAS FEA NX, dimana setiap model pada Tabel 1 akan dimodelkan diatas perletakan sendi dan rol dengan bentang kotor 1,9 m dan jarak antar perletakan sejauh 1,8 m.

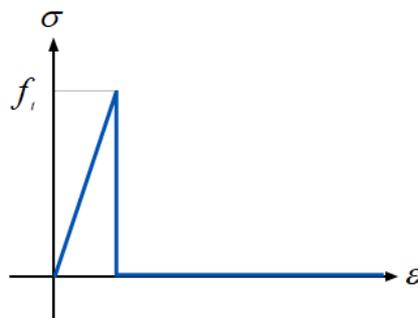
Tabel 1. Data spesimen benda uji

| Spesimen | Tipe Balok | Diameter tulangan (mm) | Tinggi Balok (mm) | Tebal Beton (mm) |
|----------|-----------------|------------------------|-------------------|------------------|
| BS-I-4 | Balok Standar I | 4 | 120 | 70 |
| BS-H-4 | Balok Standar H | 4 | 120 | 70 |
| BKS-I-4 | Balok Kastela I | 4 | 170 | 70 |
| BKS-H-4 | Balok Kastela H | 4 | 170 | 70 |

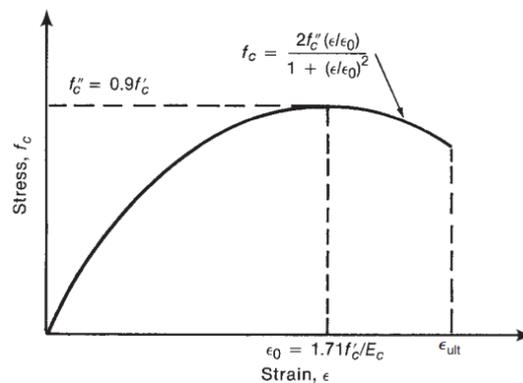
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Semua model benda uji akan dibuat secara 3D pada aplikasi Midas FEA NX. Pelat beton, balok baja, maupun *stud* dimodelkan dengan menggunakan elemen *solid* sedangkan tulangan perkuatan pada pelat beton (*reinforcement*) menggunakan elemen garis sebagai geometrinya. Setelah setiap benda uji dimodelkan, proses selanjutnya adalah benda uji dianalisis mengenai kapasitas dan juga deformasi yang terjadi apabila struktur tersebut dibebani. Dalam memodelkan mutu material yang digunakan pada aplikasi MIDAS FEA NX akan mengacu kepada informasi mutu material yang terdapat dalam jurnal Al-Thabthabee (2022).

Beton yang digunakan memiliki mutu sebesar 25 MPa yang diperoleh melalui hasil uji tekan laboratorium. Dimensi dari pelat beton yang dimodelkan memiliki ukuran 350x70x1900 mm yang akan berada diatas balok baja seperti pada Gambar 2. Material beton dimodelkan pada aplikasi MIDAS FEA NX dengan model *concrete smeared crack*. Selain itu material beton sendiri memiliki sifat terhadap tegangan tarik dan tegangan tekan yang berbeda, sehingga untuk sifat tarik beton menggunakan fungsi *brittle* seperti pada Gambar 6 dan tegangan tekan menggunakan multi-linear dengan Teori Todeschini seperti pada Gambar 7. Fungsi *brittle* dipilih karena sifat dasar beton yang kaku, sehingga apabila patah maka beton akan langsung gagal dan tidak memiliki kekuatan lagi, sedangkan pemilihan fungsi Todeschini karena memiliki hasil yang paling akurat apabila dibandingkan dengan uji lab pada jurnal. Fungsi Todeschini yang digunakan bersumber dari buku James K. Wight berjudul “Reinforced Concrete Mechanics & Design” (2012).



Gambar 6. Grafik fungsi *brittle*



Gambar 7. Grafik fungsi Todeschini (Wight, 2012)

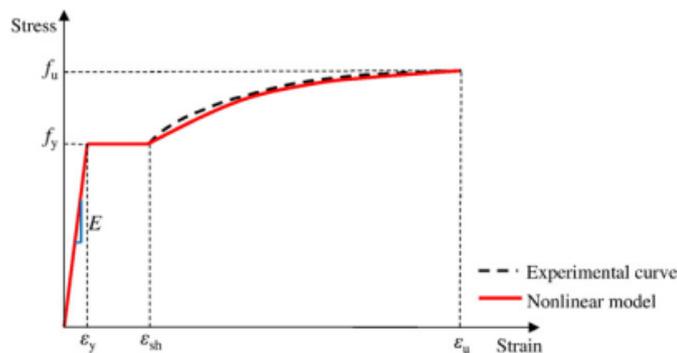
Material baja pada aplikasi MIDAS FEA NX dimodelkan dengan von mises dan untuk sifat tarik ataupun tekannya menggunakan kurva *stress strain*. Baja yang digunakan memiliki mutu nilai f_y (305,1 MPa), f_u (550,4 MPa) dan E (203.670 MPa) yang diperoleh dari hasil uji lab, sehingga dari hasil tersebut perlu diubah dalam bentuk kurva yang cukup menggambarkan material tersebut. Kurva *stress strain* untuk baja *hot rolled* dibuat dengan fungsi nonlinear berdasarkan mutu baja yang diketahui dengan memanfaatkan persamaan rumus 1 sampai rumus 3 menurut Yun & Gardner (2017) untuk menghasilkan kurva seperti pada Gambar 8.

$$f(\epsilon) = \begin{cases} E\epsilon & (\text{untuk } \epsilon < \epsilon_y) \\ f_y & (\text{untuk } \epsilon_y < \epsilon \leq \epsilon_{sh}) \\ f_y + (f_u - f_y) \left\{ 0.4 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{sh}}{\epsilon_u - \epsilon_{sh}} \right) + \frac{2 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{sh}}{\epsilon_u - \epsilon_{sh}} \right)^2}{\left[1 + 400 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_{sh}}{\epsilon_u - \epsilon_{sh}} \right)^5 \right]^{0.2}} \right\} & (\text{untuk } \epsilon_{sh} < \epsilon \leq \epsilon_u) \end{cases} \quad (1)$$

$$\epsilon_u = 0.6 \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right) \text{ tetapi } \epsilon_u \geq 0,06 \text{ untuk baja hot rolled} \quad (2)$$

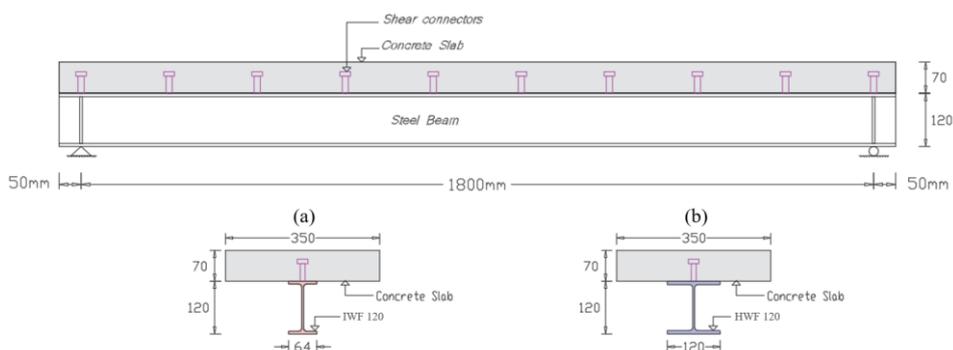
$$\epsilon_{sh} = 0.1 \frac{f_y}{f_u} - 0,055 \text{ tetapi } 0,015 \leq \epsilon_{sh} \leq 0,03 \quad (3)$$

Dengan E = modulus elastisitas (MPa), ϵ_y = regangan *yield/leleh*, ϵ_{sh} = regangan *strain hardening*, ϵ_u = regangan *ultimate*, f_y = tegangan *yield/leleh* (MPa), f_u = tegangan *ultimate* (MPa)

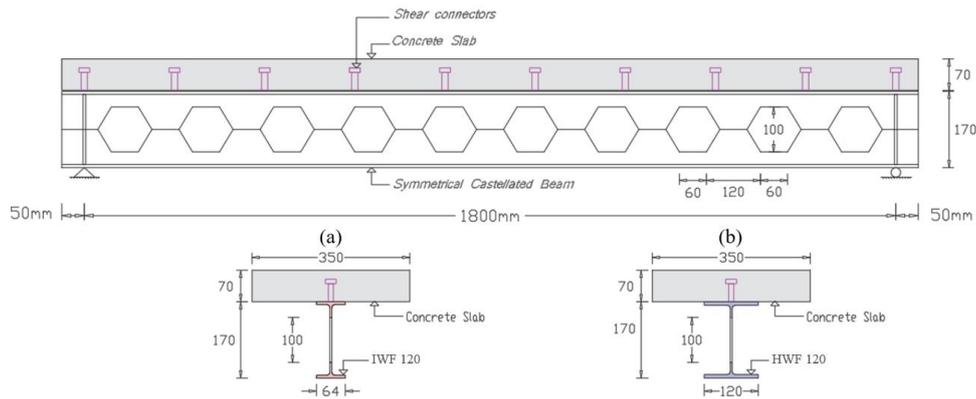


Gambar 8. Kurva stress strain untuk baja *hot rolled*

Terdapat 2 jenis balok baja yang digunakan dalam penelitian ini yaitu IWF 120 dan HWF 120. Balok IWF 120 memiliki ukuran dimensi seperti berikut tinggi balok 120 mm, lebar sayap 64 mm, tebal badan 4,4 mm, dan tebal sayap 6,3 mm, sedangkan balok HWF 120 yang digunakan memiliki ukuran dimensi seperti tinggi balok 120 mm, lebar sayap 120 mm, tebal badan 5 mm, dan tebal sayap 8 mm. Kedua balok standar tersebut juga akan diubah menjadi balok kastela yang nantinya juga akan dianalisis kapasitasnya. Balok kastela yang diuji akan memiliki tinggi yaitu 170 mm dan pelat beton setebal 70 mm. Sehingga balok komposit benda uji ini memiliki tinggi 240 mm, dengan dimensi tinggi bukaan pada balok yaitu 100 mm dengan jarak antar bukaan sejauh 180 mm. Dimensi ukuran model benda uji dan penampang untuk balok komposit standar dapat dilihat pada Gambar 9 dan balok komposit kastela dapat dilihat pada Gambar 10.



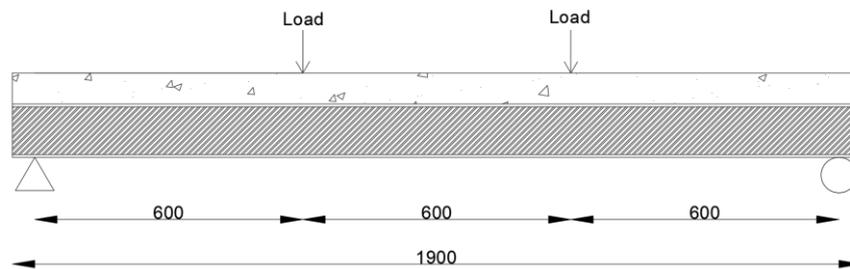
Gambar 9. Detail dimensi model (a) BS-I-4 (b) BS-H-4 (Al-Thabthabee, 2022)



Gambar 10. Detail dimensi model (a) BKS-I-4 (b) BKS-H-4 (Al-Thabthab, 2022)

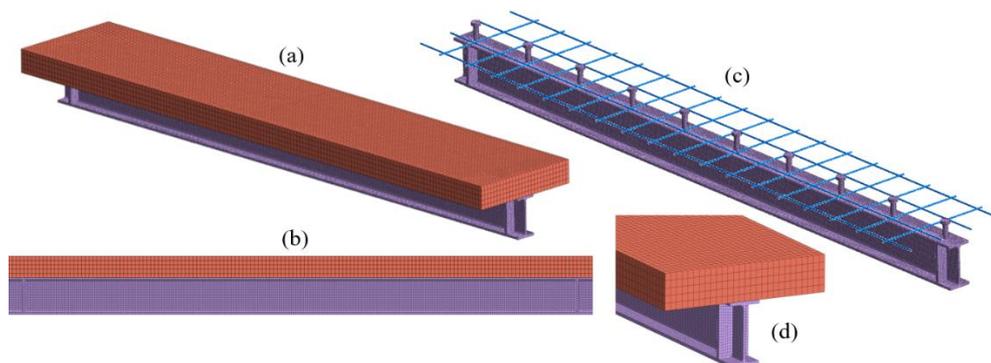
Tulangan baja yang digunakan sebagai perkuatan pada pelat beton menggunakan *wiremesh* dengan ukuran diameter 4 mm dengan jarak 100 mm untuk setiap arahnya yang memiliki mutu tegangan leleh (f_y) yaitu 410 MPa dan tegangan *ultimate* (f_u) sebesar 550 MPa. Selain itu stud yang digunakan sebagai *shear connector* memiliki diameter 14 mm dan tinggi 50 mm yang dipasang dengan jarak 200 mm untuk setiap stud. Stud yang digunakan terbuat dari baja dengan mutu tegangan leleh (f_y) 350 MPa dan tegangan *ultimate* (f_u) sebesar 450 MPa.

Meshing menggunakan *mesh hybrid tetra mesher* dimana mencampurkan antara *mesh* persegi dan segitiga secara otomatis. Pada material beton menggunakan *mesh* dengan ukuran 12,5 x 12,5 x 14 mm sedangkan untuk material baja menggunakan *mesh* dengan ukuran 5 x 5 x 5 mm. Setiap model benda uji dibebani dengan dua (2) titik pembebanan yang masing-masing berjarak 0,6 m dari setiap perletakan, penggunaan 2 titik pembebanan ini agar tercipta *pure bending moment* pada struktur benda uji seperti pada Gambar 11.

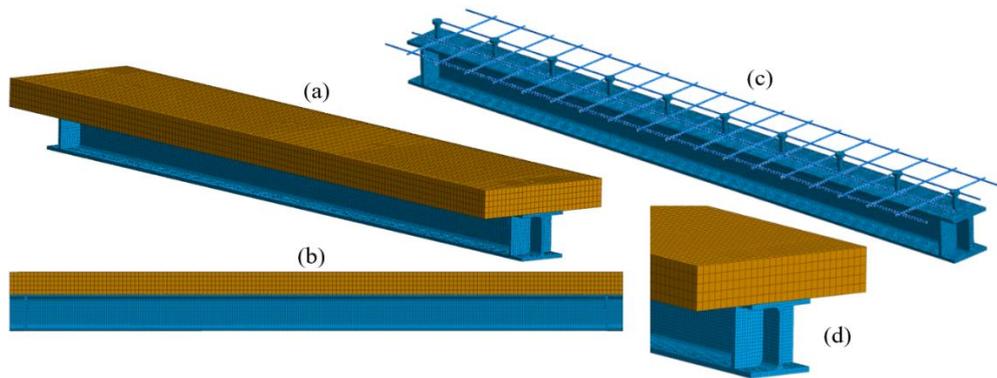


Gambar 11. Ilustrasi titik pembebanan pada model

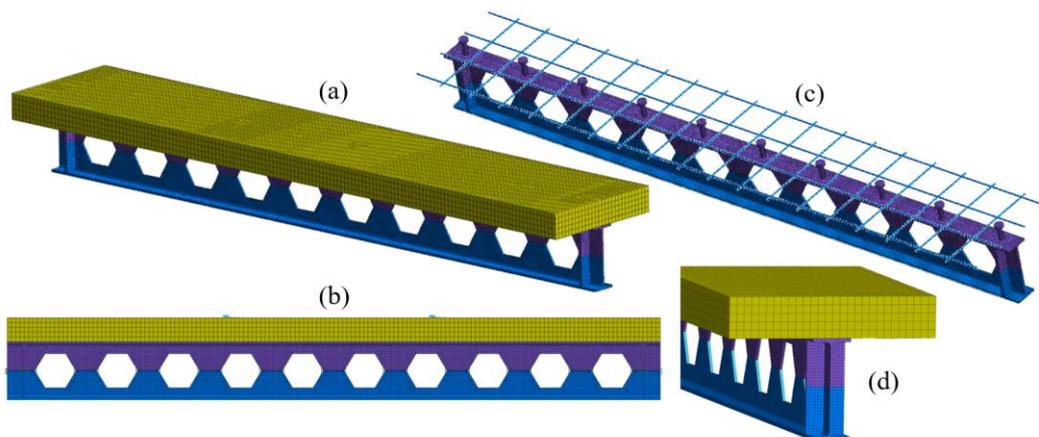
Pada saat proses analisis benda uji akan dianalisa dengan solusi tipe nonlinear statik. Nonlinear statik dipilih karena pada tipe analisa ini mempertimbangkan perubahan sifat material seperti perubahan fase dari elastis menjadi plastis. Selain itu analisa nonlinear statik juga akan memberikan hasil yang lebih akurat apabila dibandingkan dengan linear statik pada struktur yang mengalami deformasi dalam memahami perilaku yang terjadi. Detail permodelan untuk setiap benda uji dapat dilihat pada Gambar 12 sampai Gambar 15.



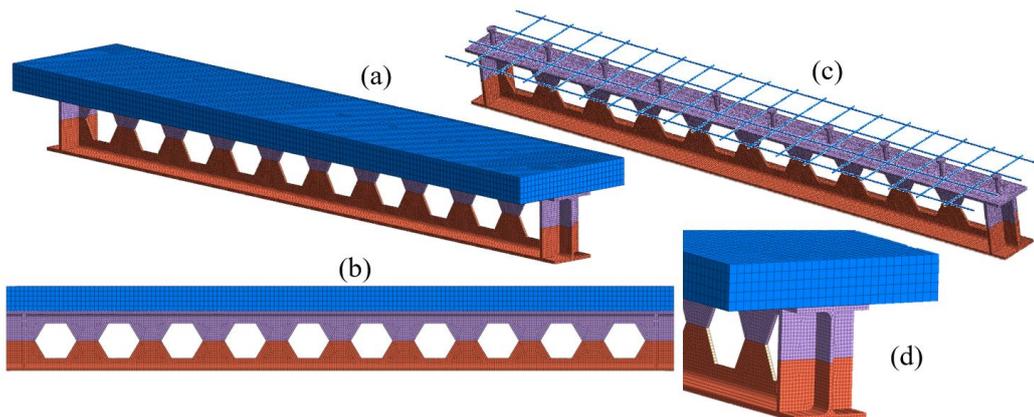
Gambar 12. Permodelan BS-I-4 (a) tampak 3 dimensi (b) tampak depan (c) penulangan pelat beton (d) tampak samping



Gambar 13. Permodelan BS-H-4 (a) tampak 3 dimensi (b) tampak depan (c) penulangan pelat beton (d) tampak samping

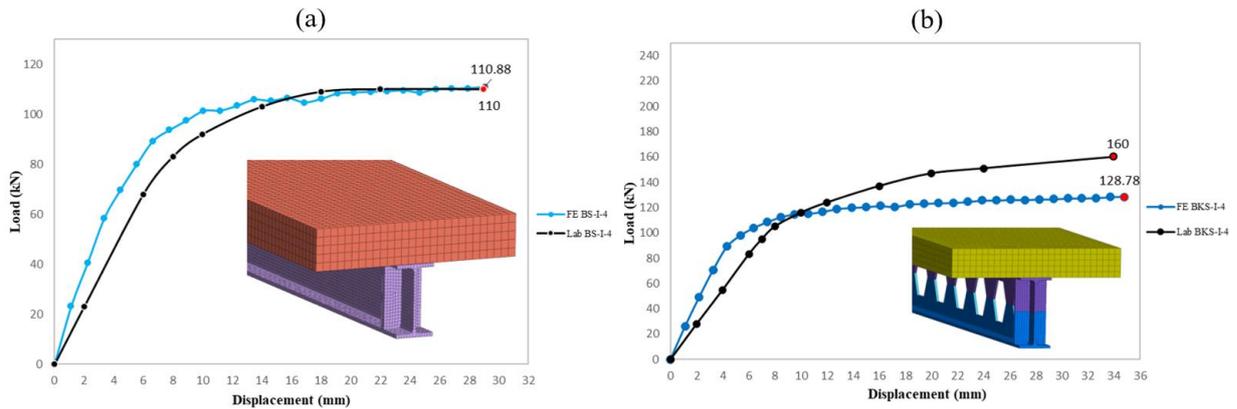


Gambar 14. Permodelan BKS-I-4 (a) tampak 3 dimensi (b) tampak depan (c) penulangan pelat beton (d) tampak samping

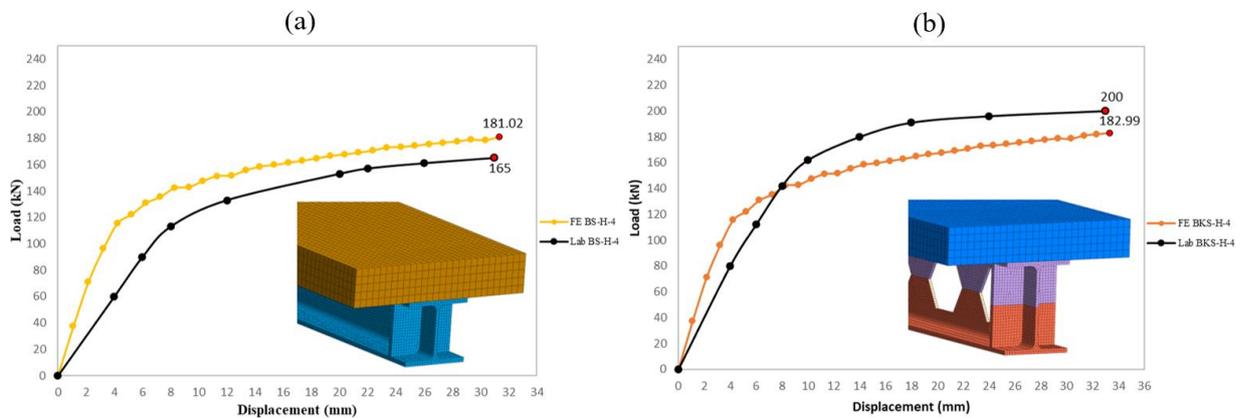


Gambar 15. Permodelan BKS-H-4 (a) tampak 3 dimensi (b) tampak depan (c) penulangan pelat beton (d) tampak samping

Setelah dilakukan analisis elemen hingga dengan bantuan aplikasi MIDAS FEA NX, akan diperoleh kapasitas untuk setiap model spesimen. Setiap model akan dianalisis hingga mencapai *displacement* yang terjadi saat pengujian kapasitas di laboratorium yang dilakukan oleh Al-Thabhwae (2022). Hasil analisis untuk setiap model spesimen dapat dilihat pada Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16. Perbandingan kapasitas FE dan laboratorium antara (a) balok standar I vs (b) balok kastela I



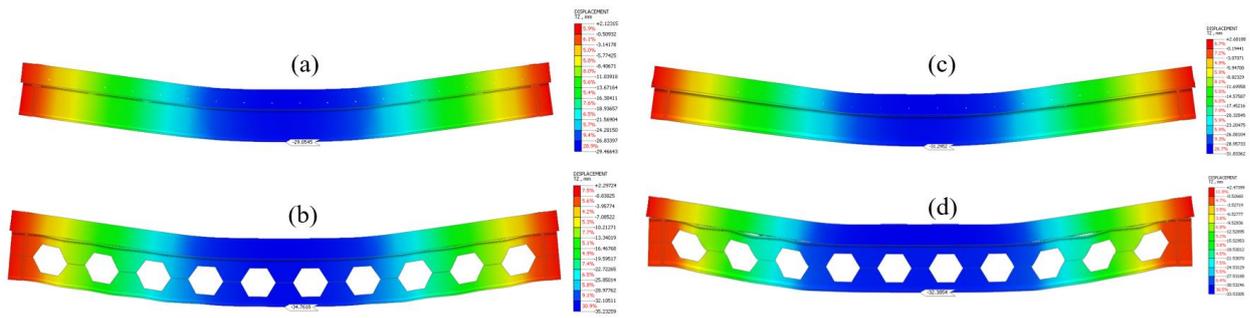
Gambar 17. Perbandingan kapasitas FE dan laboratorium antara (a) balok standar H vs (b) balok kastela H

Setelah dilakukan perbandingan terhadap hasil uji lab dan analisis *finite element*, terdapat *error* atau perbedaan hasil untuk setiap benda uji diatas seperti yang tertera pada Tabel 2. Hasil kapasitas uji laboratorium merukapakan kapasitas maksimum yang diperoleh saat dilakukan pembebanan pada sampel benda uji di laboratorium sebelum terjadinya kegagalan pada balok seperti kegagalan beton, *vierendeel bending*, dan tekuk pada *web-post*.

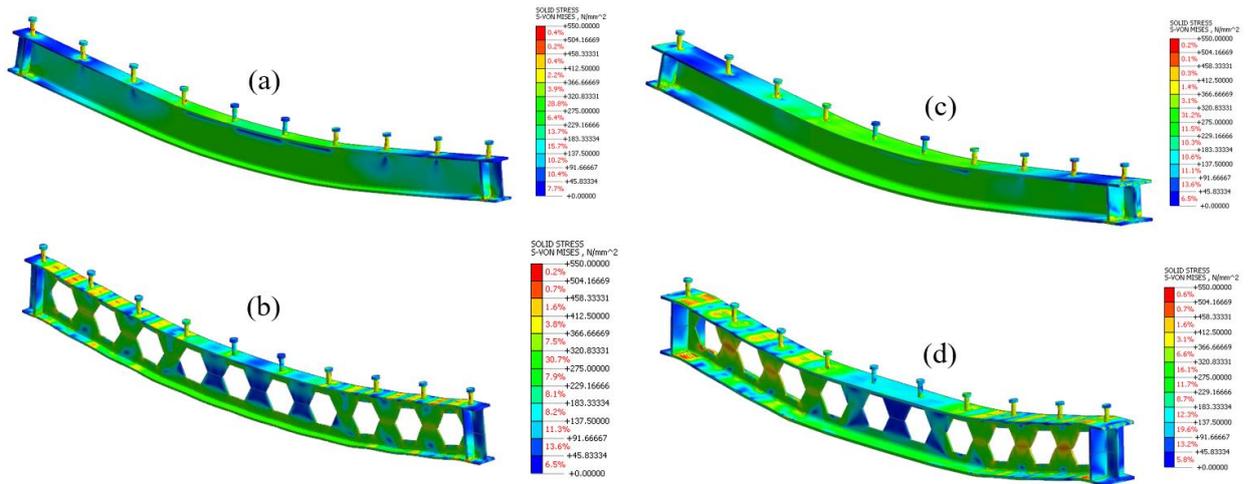
Tabel 2 Perbandingan kapasitas uji laboratorium dan MIDAS FEA

| Spesimen | Kapasitas Uji Laboratorium (kN) | Hasil MIDAS (kN) | Error (%) |
|----------|---------------------------------|------------------|-----------|
| BS-I-4 | 110 | 110,87 | 0,79 |
| BS-H-4 | 165 | 176,46 | 6,94 |
| BKS-I-4 | 160 | 128,78 | 19,51 |
| BKS-H-4 | 200 | 182,99 | 8,50 |

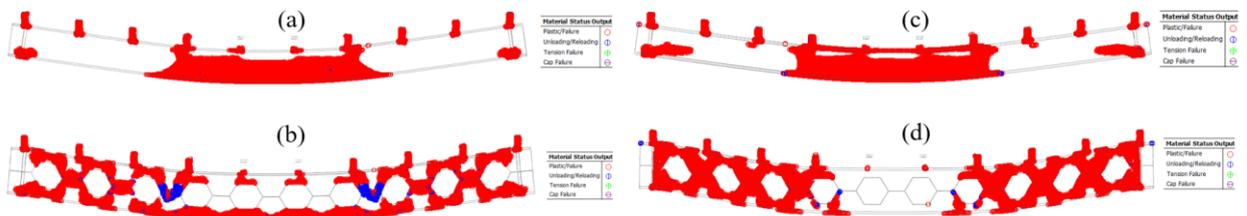
Selain memperoleh perbandingan antara kapasitas dengan defleksi yang terjadi pada model spesimen dapat juga diperoleh perilaku model benda uji seperti *displacement*, tegangan von mises, status plastis pada balok, kondisi keretakan beton yang dapat dilihat pada Gambar 18 sampai Gambar 22.



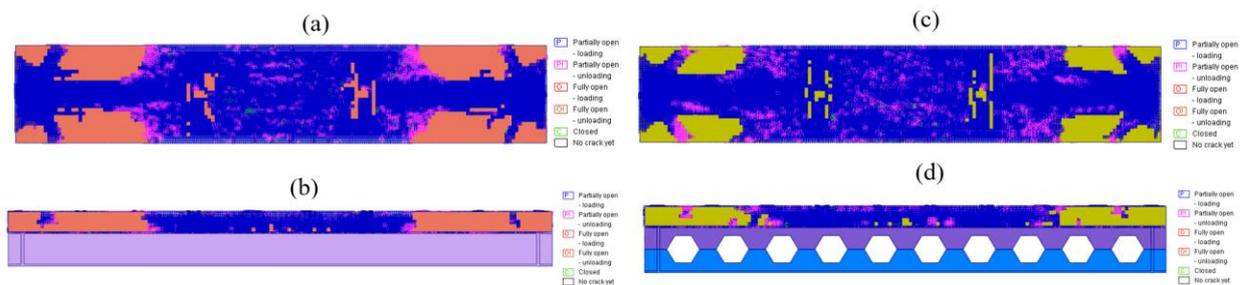
Gambar 18. Perpindahan (displacement) untuk model (a) BS-I-4 (b) BKS-I-4 (c) BS-H-4 (d) BKS-H-4



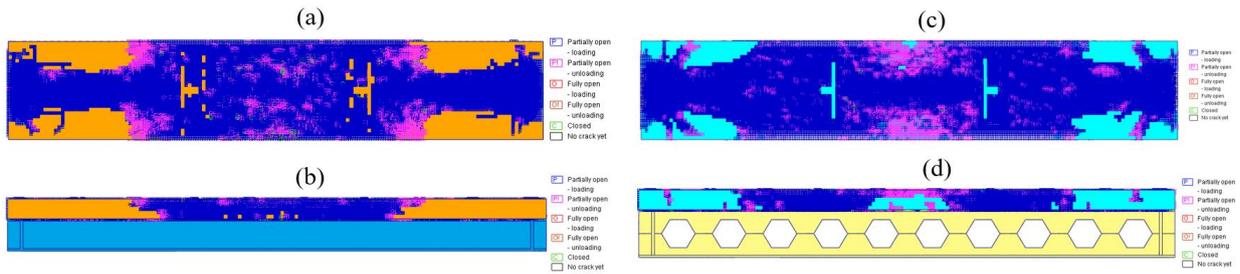
Gambar 19. Tegangan von mises untuk model (a) BS-I-4 (b) BKS-I-4 (c) BS-H-4 (d) BKS-H-4



Gambar 20. Status plastis untuk model (a) BS-I-4 (b) BKS-I-4 (c) BS-H-4 (d) BKS-H-4



Gambar 21. Kondisi retakan beton untuk model (a) tampak atas BS-I-4 (b) tampak depan BS-I-4 (c) tampak atas BKS-I-4 (d) tampak depan BKS-I-4

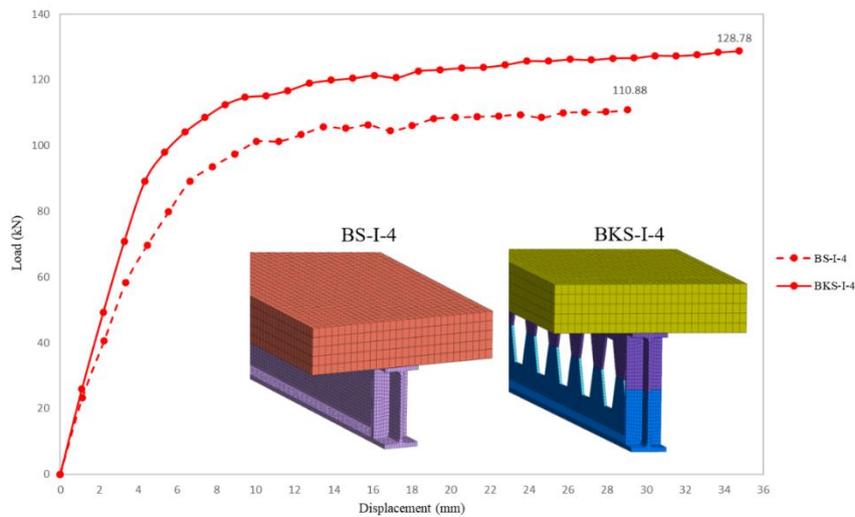


Gambar 22. Kondisi retakan beton untuk model (a) tampak atas BS-H-4 (b) tampak depan BS-H-4 (c) tampak atas BKS-H-4 (d) tampak depan BKS-H-4

Berdasarkan Gambar 20 dapat diketahui bahwa sebagian besar balok baik untuk balok standar maupun kastela sudah mencapai fase plastis, selain itu dapat dilihat juga dari deformasi yang terjadi bahwa balok mengalami kegagalan vierendeel akibat beban yang bekerja. Sedangkan pada pelat beton untuk semua benda uji seperti yang dapat dilihat pada Gambar 21 dan Gambar 22 sudah retak dan hancur, yang menyebabkan kegagalan pada struktur.

Pembahasan dan analisis

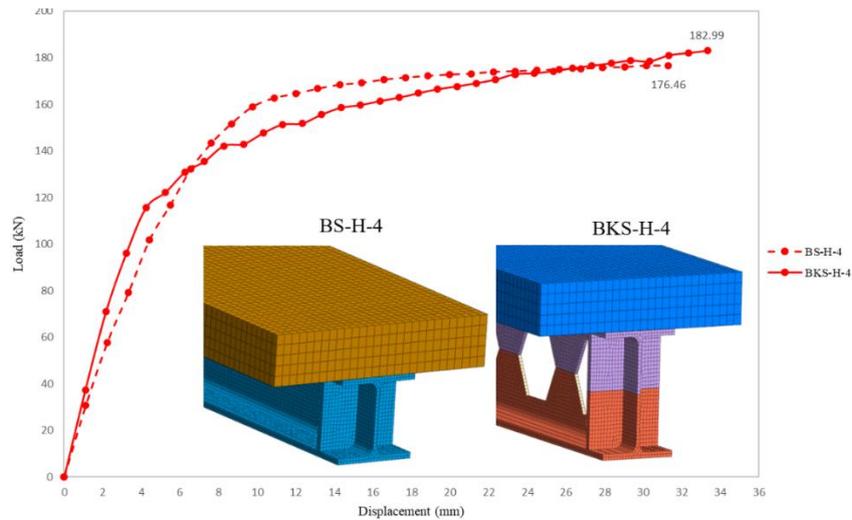
Berdasarkan hasil *finite element* yang diperoleh dapat diketahui terjadi peningkatan kapasitas antara balok standar IWF dengan balok kastela yang terbuat dari IWF. Pada balok standar (BS-I-4) memiliki kapasitas sebesar 110,88 kN, sedangkan pada balok kastela (BKS-I-4) memiliki kapasitas sebesar 128,78 kN. Sehingga dapat dikatakan dengan mengubah balok standar menjadi balok kastela dapat diperoleh peningkatan kapasitas sebesar 17,9 kN atau 16,14% dibandingkan dengan balok standarnya. Hasil perbandingan kapasitas antara balok standar IWF dengan balok kastela yang terbuat dari IWF dapat dilihat pada Gambar 23.



Gambar 23. Perbandingan kapasitas antara BS-I-4 dan BKS-I-4

Berdasarkan hasil *finite element* yang diperoleh dapat diketahui terjadi peningkatan kapasitas antara balok standar HWF dengan balok kastela yang terbuat dari HWF. Pada balok standar (BS-H-4) memiliki kapasitas sebesar 176,46 kN, sedangkan pada balok kastela (BKS-H-4) memiliki kapasitas sebesar 182,99 kN. Sehingga dapat dikatakan dengan mengubah balok standar menjadi balok kastela dapat diperoleh peningkatan kapasitas sebesar 6,53 kN atau 3,7% dibandingkan dengan balok standarnya.

Pada perbandingan balok HWF ini mungkin apabila dilihat secara sekilas tidak memiliki peningkatan kapasitas yang signifikan. Walaupun pada balok standar HWF pada mulanya memiliki kekakuan awal yang lebih tinggi dibandingkan balok kastelanya, akan tetapi setelah melewati tegangan lelehnya kapasitas balok standar HWF tidak mengalami peningkatan yang signifikan ketika balok kastela terus meningkat sampai target *displacement* yang ditinjau. Hasil perbandingan kapasitas antara balok standar IWF dengan balok kastela yang terbuat dari IWF dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24. Perbandingan kapasitas antara BS-H-4 dan BKS-H-4

Rangkuman peningkatan kapasitas pada model benda uji dapat dilihat sesuai dengan Tabel 3.

Tabel 3. Peningkatan kapasitas antara balok standar dan kastela

| Benda Uji | MIDAS FEA (kN) | Peningkatan (%) |
|-----------|----------------|-----------------|
| BS-I-4 | 110,88 | - |
| BKS-I-4 | 128,78 | 16,14 |
| BS-H-4 | 176,46 | - |
| BKS-H-4 | 182,99 | 3,7 |

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang diperoleh selama penelitian, didapatkan beberapa kesimpulan seperti berikut:

1. Model balok standar IWF komposit dengan tulangan wiremesh dengan ukuran 4 mm yang berjarak setiap 100 mm untuk setiap arahnya (BS-I-4) diperoleh kapasitas sebesar 110,88 kN.
2. Model balok standar HWF komposit dengan tulangan wiremesh dengan ukuran 4 mm yang berjarak setiap 100 mm untuk setiap arahnya (BS-H-4) diperoleh kapasitas sebesar 176,46 kN.
3. Model balok kastela IWF komposit dengan tulangan wiremesh dengan ukuran 4 mm yang berjarak setiap 100 mm untuk setiap arahnya (BKS-I-4) diperoleh kapasitas sebesar 128,78 kN.
4. Model balok kastela HWF komposit dengan tulangan wiremesh dengan ukuran 4 mm yang berjarak setiap 100 mm untuk setiap arahnya (BKS-H-4) diperoleh kapasitas sebesar 182,99 kN.
5. Dengan mengubah balok standar menjadi balok kastela dapat meningkatkan kapasitas dari balok tersebut, seperti saat mengubah balok IWF standar menjadi balok kastela terdapat peningkatan kapasitas sebesar 16,14% dan pada balok HWF standar ketika diubah menjadi balok kastela terjadi peningkatan sebesar 3,7%.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Thabhawe, H. W. (2022). Experimental investigation of composite steel–concrete beams using symmetrical and asymmetrical castellated beams. *Curved and Layered Structures*, 9, 227-235. <https://doi.org/10.1515/cls-2022-0019>
- Bauer, K. (2021). *Design of castellated steel beams*. Kansas.
- Fares, S. S., Coulson, J., & Dinehart, D. W. (2016). *Castellated and cellular beam design*. American Institute of Steel Construction.
- Liu, T. C., & Chung, K. F. (2003). Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: finite element investigation. *Journal of Constructional Steel Research*, 59, 1159–1176. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00030-0)
- Logan, D. L. (2007). *A first course in the finite element method*. Thomson.

- Partono, W., Sukamta, Hardiyati, S., & Budi, L. (2018). Optimasi distribusi lubang pada balok baja kastela. *Jurnal Teknik*, 39(1), 1-8. <https://doi.org/10.14710/teknik.v39i1.12234>
- Tumimomor, M. E., Dapas, S. O., & Mondoringin, M. R. (2016). Analisis penghubung geser (shear connector) pada balok baja dan pelat beton. *Jurnal Sipil Statik*, 4(8), 461-470.
- Widjaya, R., & Leman, S. (2023). Analisis kapasitas balok komposit dengan variasi tulangan pelat terhadap keruntuhan kolom menggunakan aplikasi MIDAS FEA. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*.
- Wight, J. K. (2012). *Reinforce concrete mechanics & design*. New Jersey: Pearson Education.
- Yun, X., & Gardner, L. (2017). Stress-strain curves for hot-rolled steels. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.024>

