

**PERILAKU MEKANIK MODEL *CASTELLATED BEAM* PADA STRUKTUR GIRDER BAJA
PEDESTRIAN BRIDGE DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

***MECHANICAL BEHAVIOR OF CASTELLATED BEAM MODEL IN STEEL GIRDER STRUCTURE
OF PEDESTRIAN BRIDGE USING FINITE ELEMENT METHOD***

Yulistiawan^{*1}, Syahril Taufik²

¹ Alumni, Magister Teknik Sipil, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Indonesia

² Dosen, Magister Teknik Sipil, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Indonesia

Korespondensi: yulistiawan793@gmail.com

ABSTRAK

Castellated Beam merupakan inovasi struktur baja yang efisien, namun memiliki potensi *Local Buckling* akibat lubang pada *web*. Pembentukan profil *Castellated Beam* dari profil *Hot Rolled Section* WF 350x175x11x7 menjadi CB 525x175x11x7. Penelitian menganalisis perilaku model *Castellated Beam* dengan variasi sudut potong lubang heksagonal, geometri struktur datar, camber dan konfigurasi *hybrid*. Analisis metode elemen hingga ANSYS R2025 aplikasi struktur *steel girder* dimodelkan 3D *Shell Element* SHELL181. *Shell Model* lebih akurat dalam merepresentasikan respon struktur *Castellated Beam* serta lebih efisien dan mudah dalam proses pemodelan komputasi, lebih sesuai untuk analisis struktur *Castellated Beam*. Hasil penelitian sudut potong 52° menghasilkan kekuatan maksimum. *Castellated Beam* camber dengan *stiffener* meningkatkan beban ultimit 88,78% dan menurunkan deformasi 40,36%. Konfigurasi *hybrid* dengan meningkatkan mutu *top flange* dapat meningkatkan performa struktur 40,38% dengan menurunkan tegangan maksimum 10%. Penambahan diafragma pada *double hybrid Castellated Beam un-camber* bentang 12 m dan jarak antar girder 2,65 m dapat menurunkan deformasi sebesar 33,41%. Hybrid *Castellated Beam* camber sangat optimal dalam meningkatkan performa struktur secara efisien. Didapatkan penambahan kekuatan struktural dengan peningkatan beban maksimum yang menghasilkan tegangan lentur mendekati tegangan leleh masing-masing elemen hybrid *Castellated Beam* sekitar 90%-95%.

Kata Kunci: *Castellated beam*, Baja Hybrid, Camber, ANSYS, Metode Elemen Hingga.

ABSTRACT

Castellated Beam is an efficient steel structure innovation, but it has the potential for *Local Buckling* due to holes in the *web*. Formation of *Castellated Beam* profiles from *Hot Rolled Section* WF 350x175x11x7 profiles to CB 525x175x11x7. The study analyzed the behavior of *Castellated Beam* models with variations in hexagonal hole cutting angles, flat structure geometry, camber and *hybrid* configurations. Element method analysis up to ANSYS R2025 steel girder structure application modeled 3D *Shell Element* SHELL181. The *Shell Model* is more accurate in representing the *Castellated Beam* structural response and is more efficient and easy in the computational modeling process, more suitable for the analysis of the *Castellated Beam* structure. The results of the 52° cutting angle study resulted in maximum strength. *Castellated Beam* camber with *stiffener* increases the ultimate load by 88.78% and decreases deformation by 40.36%. Hybrid configuration

by improving the quality of the top flange can increase the performance of the structure by 40.38% by lowering the maximum voltage by 10%. The addition of a diaphragm to a *double hybrid Castellated Beam un-camber* span of 12 m and a distance between girders of 2.65 m can reduce deformation by 33.41%. Hybrid *Castellated Beam* camber is optimal in improving the performance of the structure efficiently. An increase in structural strength is obtained with an increase in maximum load that results in a bending stress close to the melting stress of each *Castellated Beam hybrid element* of about 90%-95%.

Keywords: *Castellated beam, Hybrid Steel, Camber, ANSYS, Finite Element Method*

PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, tuntutan global terhadap efisiensi dan keberlanjutan infrastruktur mengalami peningkatan yang signifikan, terutama pada sektor transportasi dan pergerakan pejalan kaki di lingkungan perkotaan. Dalam perkembangan dunia konstruksi saat ini, teknologi struktur pada konstruksi terus berkembang untuk memungkinkan penggunaan material yang efisien tanpa mengurangi kualitas dan kekuatan struktur.

Salah satu inovasi yang semakin populer dalam desain struktur balok baja adalah tipe struktur *Castellated beam*. *Castellated beam* ini memiliki keunggulan utama yaitu dapat meningkatkan kapasitas lentur dengan volume/berat yang lebih kecil dibandingkan dengan balok profil baja WF (*Wide Flange*). *Castellated beam* merupakan hasil modifikasi dari profil baja WF (*Wide Flange*) dengan cara memotong dan menyambung kembali profil tersebut sehingga menghasilkan bukaan berbentuk heksagonal atau persegi pada badan balok. Struktur *Castellated beam* ini mampu meningkatkan ketinggian balok bertambah sekitar 50% hingga 70%, sehingga kekuatan dan kekakuan meningkat sekitar 20% hingga 30% tanpa menambah berat balok (Mehetre&Talikota, 2019)

Desain struktur *Castellated beam* pada dunia konstruksi memiliki beberapa bentuk bukaan pada badan profil/web yaitu heksagonal, lingkaran, persegi, Namun dalam hal meningkatkan ketinggian balok maka dapat menggunakan bentuk bukaan heksagonal dan persegi. Nilai defleksi yang paling rendah untuk lubang pelat badan berbentuk heksagonal dibandingkan dengan bentuk persegi. Selain itu, kapasitas menahan beban juga lebih tinggi pada bentuk heksagonal dibandingkan persegi (Nimmi&Krishnachandran, 2016). *Castellated beam* dengan bentuk heksagonal dapat menggunakan sudut pemotongan berkisar antara 45 derajat hingga 70 derajat (Kumaragurubaran dkk, 2021).

Metode Analisis Elemen Hingga (Finite

Element Analysis) adalah teknik numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku struktur dan komponen teknik dengan membagi objek menjadi elemen-elemen kecil yang disebut mesh. Pendekatan ini untuk memprediksi respons struktur terhadap berbagai jenis beban dan kondisi lingkungan, sehingga sangat penting dalam perancangan dan evaluasi kekuatan struktur (Wokanubun, 2023). FEA banyak digunakan dalam berbagai aplikasi teknik, termasuk analisis struktur, transfer panas, aliran fluida, dan masalah elektromagnetik (Samudro, 2024).

Dari uraian diatas penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan perilaku mekanik model struktur balok kastela (*Castellated beam*) untuk konstruksi jembatan penyeberangan orang (JPO) atau *pedestrian bridge* yang dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga bantuan aplikasi komputasi ANSYS dengan pendekatan 3D *Shell element* untuk memperoleh hasil analisa yang valid dari penggunaan aplikasi maka terlebih dahulu dilakukan analisa validasi aplikasi dengan melakukan analisa pemodelan dari hasil pengujian eksperimental sebelumnya yang telah dilakukan dilaboratorium.

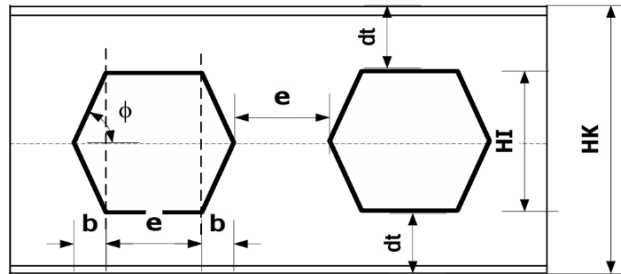
TINJAUAN PUSTAKA

A. *Castellated beam*

Castellated beam merupakan jenis struktur balok baja yang memiliki pelat badan/web berlubang, yang diperoleh melalui proses pemotongan bagian tengah pelat badan secara zig-zag. Bagian bawah hasil potongan kemudian diputar dan digeser sedemikian rupa agar membentuk lubang heksagonal ketika disambungkan kembali dengan bagian atas, lalu kedua bagian tersebut disatukan kembali melalui proses pengelasan. Gagasan mengenai balok berlubang ini pertama kali diperkenalkan oleh H.E. Horton dari Chicago Iron Works sekitar tahun 1910, dan kini dikenal sebagai metode Castella (Wiyono, 2023; Kaveh & Fakoor, 2020). Jika pemotongan pelat badan dilakukan secara zig-zag, maka selain

meningkatkan tinggi profil balok, juga akan terbentuk lubang-lubang pada pelat badan serta memperluas area pelat tersebut. Terminologi dasar yang digunakan dalam desain *Castellated beam*

adalah sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Terminologi dasar dalam desain balok baja tipe *Castellated beam*

Sumber: Partono, dkk (2018)

Di mana:

- HI = Tinggi lubang (mm)
- HK = Tinggi profil (mm)
- e = Jarak bersih antar lubang (mm)
- d_t = Jarak tepi lubang dengan Web (mm)
- ϕ = Sudut Potong Heksagonal (derajat)

Menurut Partono, dkk (2018) Jarak antar lubang optimum pada *Castellated beam* dengan model heksagonal sudut bukaan antara 450 sampai 700 maka jarak antar lubang optimum adalah antara 0.1 sampai 0.4 dari tinggi profil baja WF atau antara 0.1 sampai 0.25 dari tinggi profil *Castellated beam*.

B. Finite Element Method dengan ANSYS

Finite Element Analysis (FEA) merupakan suatu teknik kuantitatif berbasis komputer yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan serta perilaku struktur bangunan. Metode ini mampu menganalisis berbagai respon struktural, seperti defleksi, tegangan, perilaku tekuk, dan berbagai fenomena mekanik lainnya. FEA dapat digunakan untuk mengkaji deformasi dalam skala kecil maupun akibat beban yang bekerja pada struktur, serta untuk mensimulasikan pengaruh perubahan atau penggantian desain. Analisis ini mencakup deformasi elastis yang bersifat sementara hingga deformasi plastis permanen. Penggunaan komputer menjadi sangat penting karena proses ini memerlukan perhitungan numerik dalam jumlah besar, terutama untuk struktur yang kompleks dan berukuran besar. Kemajuan teknologi serta ketersediaan perangkat komputer yang semakin kuat dan terjangkau telah menjadikan FEA sebagai alat yang dapat dengan mudah digunakan dalam berbagai bidang rekayasa dan penelitian dunia konstruksi.

Model elemen hingga (*Finite Element Models*) dapat diklasifikasikan ke dalam dua dimensi (2D) atau tiga dimensi (3D), tergantung pada karakteristik geometri dan kebutuhan analisis. Pemilihan dimensi model dan jenis elemen yang digunakan sangat menentukan pendekatan yang paling praktis dalam pembuatan model, terutama untuk permasalahan yang membutuhkan tingkat akurasi tinggi. Perangkat lunak ANSYS menyediakan berbagai jenis model, antara lain 2D *solid models*, 3D *Shell models*, dan 3D *solid models* (Taufik, 2006).

Shell Model merupakan elemen nonlinier yang dapat digunakan untuk menganalisis struktur *Shell* datar maupun melengkung, baik tipis maupun setebal sedang (*moderately thick*). Elemen ini memiliki enam derajat kebebasan di setiap simpul, yaitu translasi dalam arah x, y, dan z, serta rotasi terhadap sumbu x, y, dan z. Elemen ini mendukung deformasi linier baik dalam bidang (*in-plane*) maupun luar bidang (*out-of-plane*). Model ini menggunakan pendekatan kekakuan garis singgung (*tangential stiffness*), dengan opsi untuk memilih antara kekakuan garis singgung utama atau kekakuan tekanan tetap (*pressure-stiffness*). *Shell Model* ideal digunakan dalam analisis deformasi besar dengan rotasi terbatas. Elemen ini didefinisikan oleh empat simpul, masing-masing dengan ketebalan dan properti bahan ortotropik. *SHELL* juga mendukung variasi kepekatan massa (*mass density*) yang dapat berubah secara halus di seluruh area elemen, dengan nilai kepekatan dimasukkan pada setiap simpul sudut.

C. Model Castellated beam (Shell Element)

Aminullah et al (2014) menyatakan bahwa elemen solid lebih sesuai digunakan untuk

pemodelan struktur dengan tingkat kompleksitas yang rendah, sementara elemen *Shell* lebih tepat diterapkan pada struktur yang kompleks. Hal ini dikarenakan elemen *Shell* memiliki kelenturan tambahan yang memungkinkan pemodelan lenturan permukaan datar secara lebih akurat. Elemen *Shell* merupakan kelas khusus dari elemen yang dirancang untuk efisiensi pemodelan pada struktur tipis, dengan memanfaatkan karakteristik bahwa gaya geser hanya terjadi pada permukaan bebas dalam suatu bidang. Umumnya, permukaan tengah (*mid-surface*) dari elemen *Shell* diasumsikan datar, meskipun tidak selalu harus demikian. Oleh karena itu, variasi regangan pada bidang melalui ketebalan elemen tidak dapat dimodelkan secara lebih kompleks dari bentuk linier.

METODE PENELITIAN

Pendekatan Sistem

Penelitian ini dilakukan dengan cara Pemodelan balok baja struktur *Castellated beam* dengan menggunakan analisis elemen hingga dengan bantuan komputasi ANSYS. Hasil analisis yang akan diperoleh berupa *nodal displacement, elements forces and moments, deflection, dan diagram Stress Contour*.

Perancangan model *Castellated beam* dibuat secara 3D dengan bantuan komputasi software ANSYS sesuai dengan dimensi sebenarnya. Model ini diharapkan mampu menggambarkan tegangan dan lendutan yang terjadi akibat pengaruh beban ultimit terhadap variasi Sudut potong heksagonal (45°, 48°, 50°, 51°, 52°, 53°, 53.5°, 54°, 55°, 60°, 65°, 70°), pada *Castellated beam* serta melakukan modifikasi struktur *Castellated beam* dengan membandingkan bentuk struktur balok datar dan camber serta melakukan Penambahan Pengaku (*Stiffener*) dan Penambahan Penutup pada lubang

heksagonal dan melakukan konfigurasi model *hybrid Castellated beam*.

Prosedur Pelaksanaan Analisis

Pembuatan model profil baja *Castellated beam* pada penelitian ini menggunakan Software ANSYS dilakukan melalui beberapa tahapan yang sistematis untuk memperoleh hasil analisis yang akurat. Dalam model penelitian ini model material profil baja *Castellated beam* menggunakan analisis model elemen hingga (*fined elements*).

Analisis model balok baja *Castellated beam* menggunakan analisis elemen hingga dengan bantuan komputasi ANSYS. Untuk model profil baja *Castellated beam* menggunakan material *Shell* 181.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Model Validasi

Pada model validasi ini membandingkan hasil eksperimental yang dilakukan pada laboratorium oleh Mehetre dan Talikoti (2021) dibandingkan dengan hasil analisis aplikasi ANSYS. Adapun hasil pada model validasi *Castellated beam* dengan sudut bukaan lubang heksagonal sudut 60° dengan dimensi balok *Castellated beam* 225x75x8x5 panjang 1727 mm (Modifikasi Baja WF 150x75x8x5 panjang 2000 mm) Mutu Baja BJ41 yaitu mempunyai kuat leleh (f_y) 250 MPa dan Kuat tarik (f_u) 410 MPa dengan dengan jarak antar bukaan lubang 75 mm. Berdasarkan hasil Analisis metode elemen hingga menggunakan aplikasi ANSYS dengan hasil defection atas pembenan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 2 sebagaimana ditampilkan berikut ini.

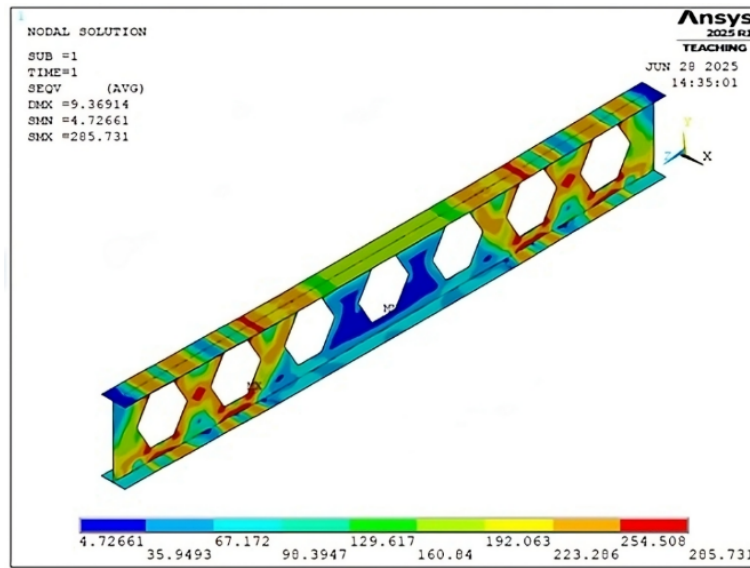
Tabel 1. Perbandingan Hasil Eksperimen (Mehetre & Talikoti, 2021) dan Simulasi ANSYS terhadap Defleksi

Model	Eksperimental		ANSYS	
	Load (kN)	Deformasi (mm)	Load (kN)	Deformasi (mm)
<i>Castellated beam</i> Heksagonal Sudut 60° Ukuran 225x75x8x5 Panjang Bentang (L) 1727 mm	120	9,500	120	9,369

Hasil pengujian eksperimental menunjukkan bahwa balok mampu menahan beban hingga 120 kN dengan defleksi sebesar 9,500 mm, sedangkan hasil simulasi ANSYS menghasilkan defleksi sebesar 9,369 mm pada beban yang sama. Selisih defleksi antara keduanya adalah 0,131 mm, yang setara dengan 1,38% lebih rendah dibandingkan hasil

eksperimen. Perbedaan ini tergolong sangat kecil dan dapat diterima, menunjukkan bahwa model numerik ANSYS cukup akurat dalam memprediksi respons struktural balok.

Hasil output analisis ANSYS dapat disajikan dalam Gambar 2 sebagaimana ditampilkan berikut ini:

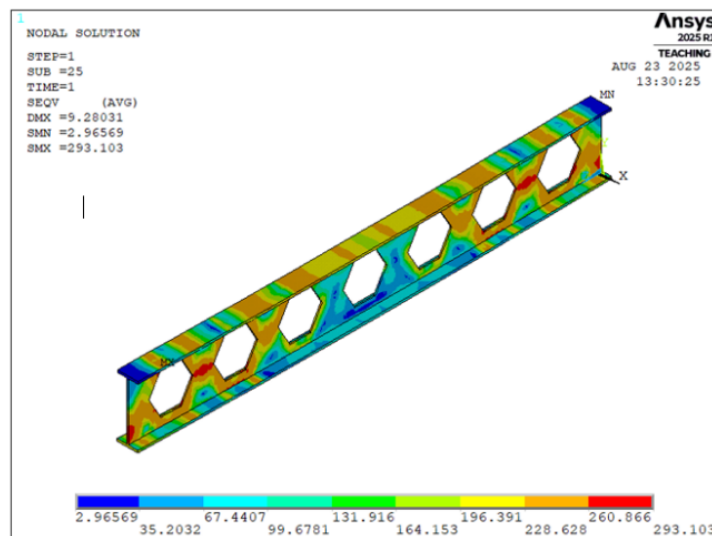


Gambar 2. *Stress Contour Shell Element Analisis ANSYS Model Validasi (Mehetre & Talikoti, 2021)*

Berdasarkan Gambar 2 di atas menunjukkan perilaku *Castellated beam* dengan nilai deformasi maksimum (DMX) sebesar 9,369 mm terjadi di tengah bentang balok, serta nilai tegangan maksimum (SMX) mencapai 285,731 MPa, yang terletak di sekitar tepi lubang heksagonal.

Penambahan *Solid Model* dalam penelitian ini dilakukan sebagai pembandingan terhadap *Shell Model* yang telah dibuat sebelumnya, dengan tujuan untuk mengevaluasi tingkat akurasi masing-masing pendekatan dalam merepresentasikan perilaku *Castellated Beam*. *Solid Model* dipilih sebagai pembandingan karena mampu menggambarkan detail geometri dan distribusi tegangan secara lebih rinci,

terutama di sekitar bukaan heksagonal. Namun, setelah dilakukan analisis perbandingan, hasil menunjukkan bahwa *Shell Model* lebih akurat dalam merepresentasikan respon struktur *Castellated Beam* yang divalidasi dari pengujian eksperimental. Selain itu, *Shell Model* lebih efisien secara komputasi dan lebih mudah dalam proses pemodelan sehingga lebih sesuai digunakan dalam analisis numerik. Adapun hasil analisis validasi menggunakan *Solid Model* dapat dilihat pada Gambar 3 sebagaimana berikut:

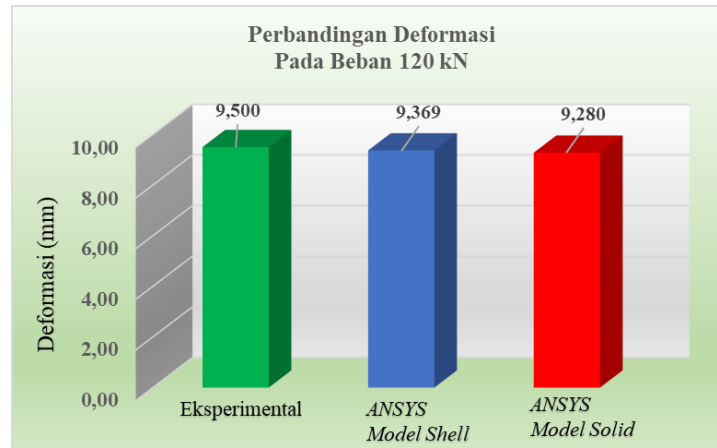


Gambar 3. *Stress Contour Solid Element Analisis ANSYS Model Validasi (Mehetre & Talikoti, 2021)*

Berdasarkan Gambar 3 di atas menunjukkan perilaku *Castellated beam* dengan nilai deformasi maksimum (DMX) sebesar 9,280 mm terjadi di tengah bentang balok, serta nilai tegangan maksimum (SMX) mencapai 293,103 MPa, yang

terletak di sekitar tepi lubang heksagonal.

Adapun perbandingan *Shell Model* dan *Solid Model* disajikan dalam Gambar 4 sebagaimana ditampilkan berikut:

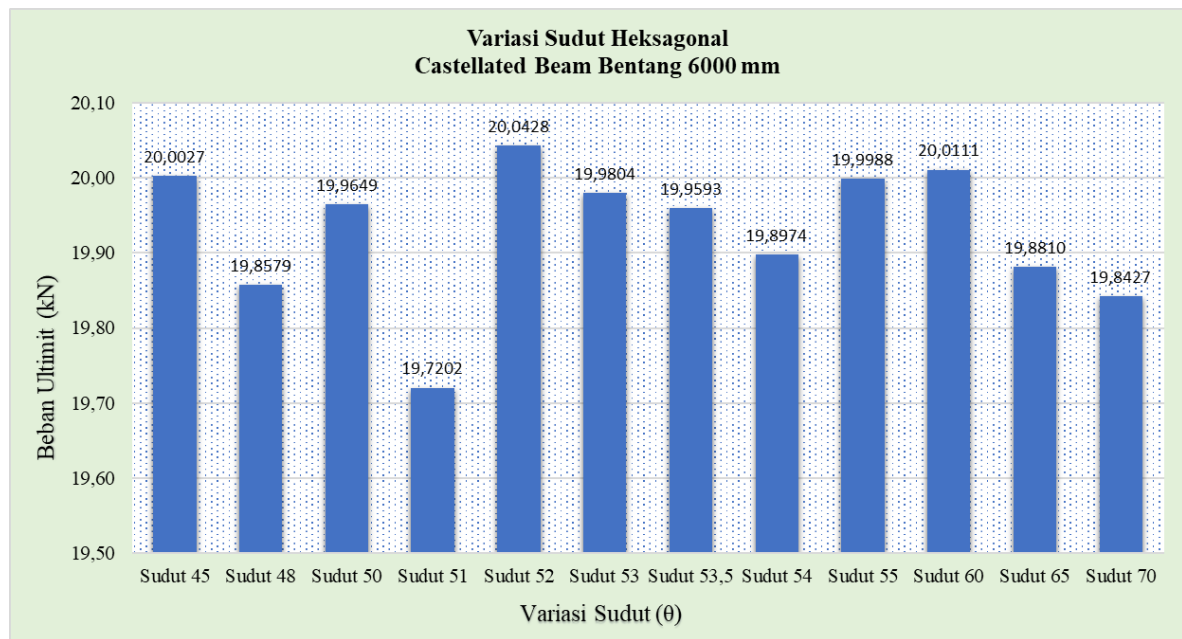


Gambar 4. Hasil Output Analisis ANSYS Model Validasi (Mehetre & Talikoti, 2021)

Perbedaan nilai deformasi antara hasil eksperimental dan simulasi relatif kecil, yaitu selisih 1,38% untuk *Shell Model* dan 2,32% untuk *Solid Model* terhadap hasil model eksperimental. Hal ini menunjukkan bahwa kedua pendekatan numerik cukup akurat dalam memprediksi perilaku struktur, dengan *Shell Model* menghasilkan nilai yang lebih mendekati hasil model eksperimental dibandingkan *Solid Model*.

Hasil Analisis Pengaruh Konfigurasi Variasi Sudut Lubang Heksagonal

Hasil analisis aplikasi ANSYS pada model *Castellated beam* dengan dengan variasi pada sudut potong bukaan lubang heksagonal dengan sudut 45°, 48°, 50°, 51°, 52°, 53°, 53.5°, 54°, 55°, 60°, 65° dan 70° dengan dimensi balok *Castellated beam* 225x75x7x5 panjang 6000 mm dengan Mutu Baja BJ41 yaitu mempunyai kuat leleh (f_y) 250 MPa dan Kuat tarik maksimum (f_u) 410 MPa dengan dengan jarak antar lubang heksagonal 75 mm. Adapun hasil dari Analisis ANSYS didapat beban ultimit sebagaimana pada Gambar 5 berikut:

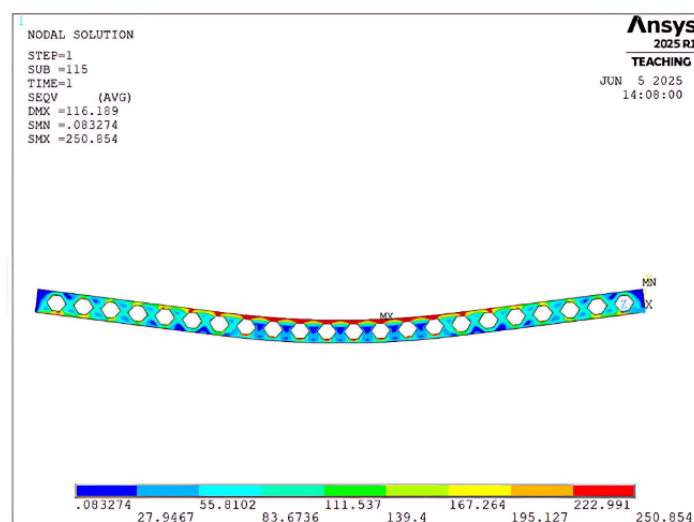


Gambar 5. Beban Ultimit Akibat Variasi Sudut Bukan Heksagonal Pada *Castellated beam* L6000 mm (Hasil Analisis, 2025)

Variasi sudut potong bukan heksagonal pada *Castellated beam* dengan panjang bentang 6000 mm memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai beban ultimit struktur. Berdasarkan hasil simulasi numerik yang ditampilkan pada Gambar 5, terlihat bahwa sudut potong 52° menghasilkan beban ultimit tertinggi sebesar 20,0428 kN. Hal ini mengindikasikan bahwa pada sudut tersebut terjadi distribusi tegangan yang lebih merata, serta geometri bukan mampu mendukung kestabilan struktural terhadap gaya lentur dan tekan. Selain itu, sudut 45° dan 60° juga menunjukkan kinerja struktural yang baik dengan nilai beban ultimit mendekati maksimum, yaitu masing-masing 20,0027 kN dan 20,0111 kN, sehingga dapat

dikategorikan sebagai konfigurasi yang masih efisien secara struktural.

Dengan mempertimbangkan keunggulan tersebut, maka dalam analisis pengembangan selanjutnya pada penelitian ini, menggunakan sudut potong 52° sebagai acuan. Pemilihan sudut ini diharapkan dapat memberikan kontribusi optimal terhadap peningkatan kinerja struktur balok baja tipe *Castellated beam*, khususnya dalam konteks sistem girder baja yang dianalisis melalui pendekatan metode elemen hingga. Stress contour dari model analisis ANSYS dengan sudut 52° yang paling optimal, dapat ditampilkan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Stress Contour Hasil Analisis ANSYS Sudut 52°

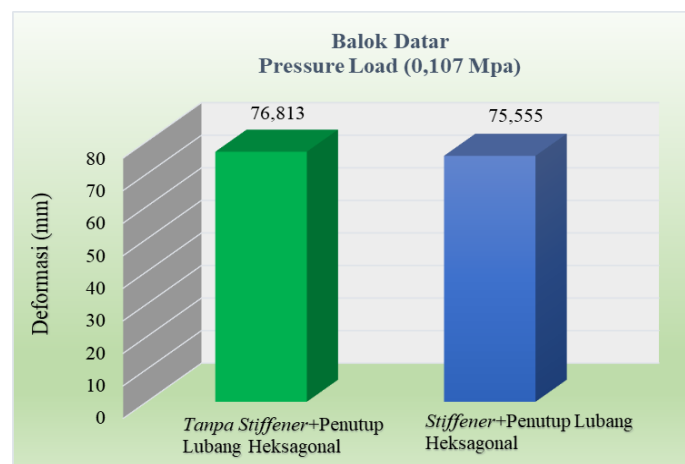
Analisis Castellated beam Datar

Berdasarkan hasil Analisis balok baja *Castellated beam* dengan model balok datar dengan pressure load sebesar 0,107 MPa, menghasilkan nilai deformasi maksimum sebesar 76,813 mm untuk model tanpa modifikasi dengan penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal,

sedangkan untuk model dengan modifikasi penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal menghasilkan nilai deformasi maksimum sebesar 75,555 mm (Lihat Tabel 2 dan Gambar 7 berikut).

Tabel 2. Pengaruh *Stiffener* dan Penutup Lubang terhadap Deformasi Balok Datar

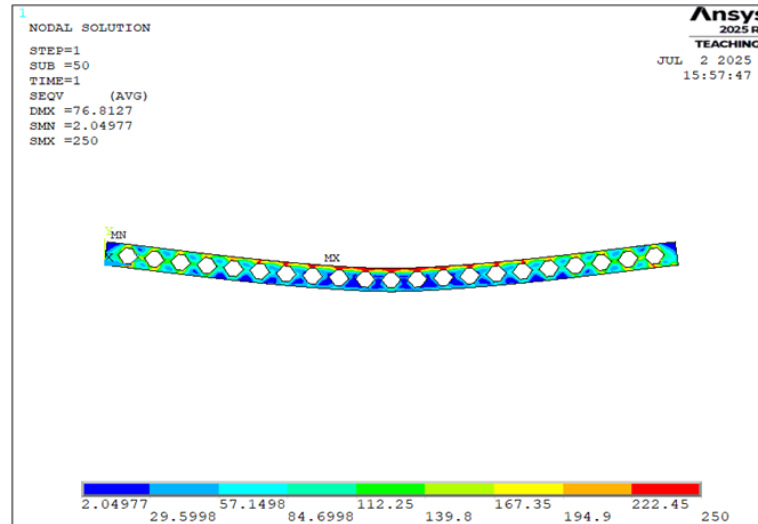
Model Analisis	Pressure Load (MPa)	Tegangan Maksimum (MPa)	Deformasi (mm)	Peningkatan Performa (%)
Tanpa <i>Stiffener</i> + Penutup Lubang Heksagonal	+0,107	250	76,813	1,64
<i>Stiffener</i> + Penutup Lubang Heksagonal	+0,107	250	75,555	



Gambar 7. Pengaruh *Stiffener* dan Penutup Lubang Heksagonal terhadap Deformasi Balok Datar pada Tekanan 0,107 MPa

Berdasarkan data pada Tabel 2 dan Gambar 7 di atas, terlihat bahwa penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal memberikan dampak positif terhadap kinerja deformasi struktur. Pada pembebanan pressure load sebesar 0,107 MPa dengan tegangan maksimum 250 MPa, model tanpa *Stiffener* dan penutup lubang mengalami deformasi

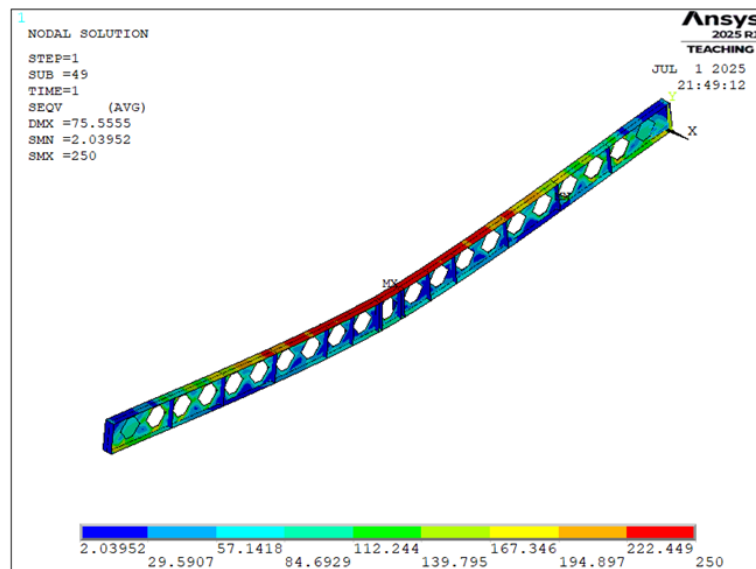
sebesar 76,813 mm, sedangkan model yang telah dimodifikasi menunjukkan deformasi lebih rendah yaitu 75,555 mm. Penurunan deformasi sebesar 1,258 mm ini menghasilkan peningkatan performa sebesar 1,64% (Lihat Gambar 8 berikut).



Gambar 8. *Stress Contour* Analisis ANSYS Model Tanpa *Stiffener* dan Penutup Lubang Heksagonal Balok Datar

Berdasarkan Gambar 8 di atas menunjukkan perilaku *Castellated beam* yang dimodelkan tanpa penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal balok datar dengan nilai deformasi maksimum (DMX) sebesar 76,812 mm terjadi di

tengah bentang balok, serta nilai tegangan maksimum (SMX) mencapai 250 MPa. *Plot Stress Contour* Analisis ANSYS model sengan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal balok datar ditampilkan pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9. *Stress Contour* Analisis ANSYS Model Dengan *Stiffener* dan Penutup Lubang Heksagonal Balok Datar

Berdasarkan Gambar 9 di atas menunjukkan perilaku *Castellated beam* yang dimodelkan dengan penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal balok datar dengan nilai deformasi maksimum (DMX) sebesar 75,555 mm terjadi di

tengah bentang balok, serta nilai tegangan maksimum (SMX) mencapai 250 Mpa.

Perilaku *Castellated beam* Camber

Berdasarkan hasil Analisis balok baja *Castellated beam* dengan model balok camber dengan pressure load 0,101 MPa pada Step 1 yaitu

diberikan tekanan ke atas pada bagian bottom flange yang menghasilkan struktur balok membentuk kelengkungan awal ke atas (upward curvature) sebesar 46,195 mm untuk model tanpa modifikasi penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal, sedangkan untuk model dengan

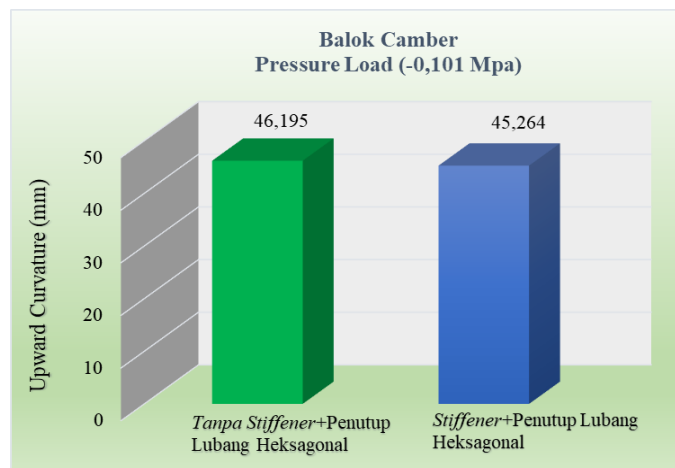
modifikasi penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal menghasilkan nilai kelengkungan awal ke atas (upward curvature) sebesar 45,264 mm. Hasil ditampilkan pada Tabel 3 berikut dan Gambar 10 berikut.

Tabel 3. Pengaruh Stiffner dan Penutup Lubang terhadap Upward Curvature Balok Camber

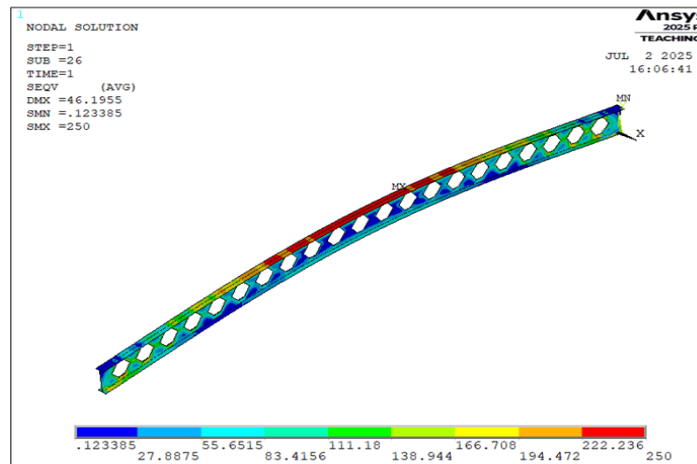
Model Analisis	Pressure Load (MPa)	Tegangan Maksimum (MPa)	Upward Curvature (mm)	Peningkatan Performa (%)
Tanpa Stiffner + Penutup Lubang Heksagonal	0,101	250	46,195	2,02
Stiffner + Penutup Lubang Heksagonal	0,101	249,998	45,264	

Berdasarkan hasil analisis pada model balok camber dengan pembebanan pressure load sebesar 0,101 MPa ke arah atas pada bagian bottom flange, diperoleh perbandingan antara konfigurasi tanpa penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal serta konfigurasi dengan penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal. Model tanpa modifikasi mengalami kelengkungan awal ke atas (upward curvature) sebesar 46,195 mm, sedangkan model dengan *Stiffener* dan penutup lubang menunjukkan nilai lengkungan ke atas yang

lebih kecil yaitu 45,264 mm. Penurunan deformasi sebesar 0,931 mm ini menghasilkan peningkatan performa sebesar 2,02%, yang menunjukkan bahwa penambahan elemen struktural berperan dalam meningkatkan kekakuan dan kestabilan balok camber. Nilai tegangan maksimum 250 MPa dan 249,998 MPa, yang mengindikasikan bahwa modifikasi tidak memengaruhi kapasitas tegangan secara signifikan, tegangan maksimum akan mencapai 99,999% dari tegangan leleh (f_y) 250 MPa.



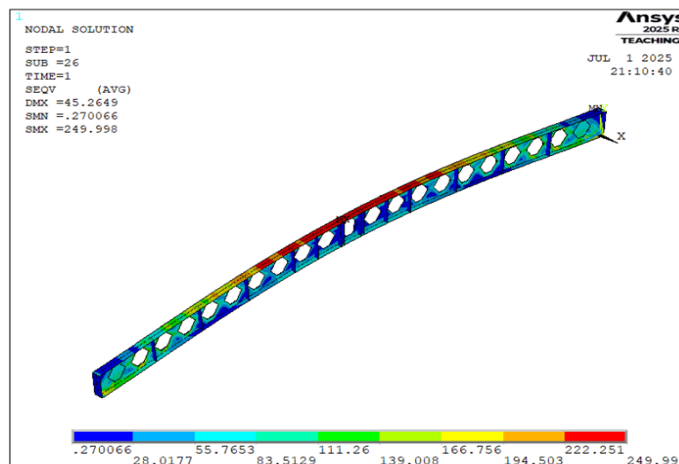
Gambar 10. Pengaruh *Stiffener* dan Penutup Lubang Heksagonal terhadap Upward Curvature Balok Camber pada Tekanan 0,101 MPa



Gambar 11. *Stress Contour* Analisis ANSYS Model Tanpa *Stiffener* dan Penutup Lubang Heksagonal Balok Camber

Berdasarkan Gambar 11 di atas menunjukkan perilaku *Castellated beam* yang dimodelkan dengan tanpa penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal balok camber dengan nilai deformasi maksimum (DMX) sebesar 46,195 mm terjadi di

tengah bentang balok, serta nilai tegangan maksimum (SMX) mencapai 250 MPa. Tegangan maksimum yang terjadi tidak melebihi tegangan leleh (f_y) 250 MPa atau dalam kondisi elastis.



Gambar 12. *Stress Contour* Model dengan *Stiffener* dan Penutup Lubang Heksagonal Balok Camber

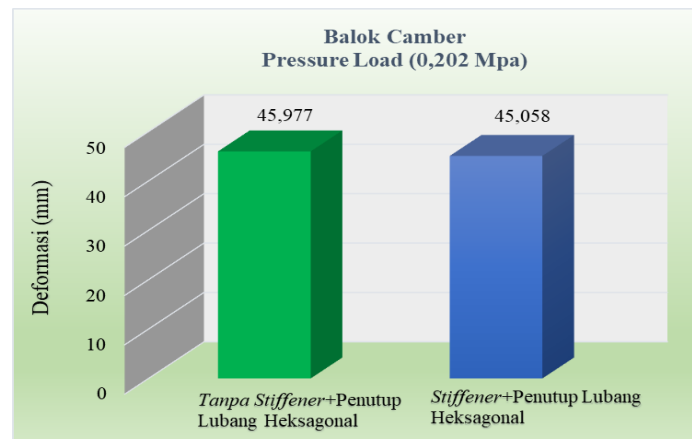
Berdasarkan Gambar 12 di atas menunjukkan perilaku *Castellated beam* yang dimodelkan dengan penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal balok camber dengan nilai deformasi maksimum (DMX) sebesar 45,264 mm terjadi di tengah bentang balok, serta nilai tegangan maksimum (SMX) mencapai 249,998 MPa. Tegangan maksimum yang terjadi tidak melebihi tegangan leleh (f_y) 250 MPa atau dalam kondisi elastis.

Berdasarkan hasil Analisis balok baja *Castellated beam* dengan model balok camber yang

diberikan pembebanan pada area top flange dengan pressure load 0,202 MPa pada Step 2 yang menghasilkan struktur balok dengan deformasi sebesar 45,977 mm untuk model tanpa modifikasi dengan penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal, sedangkan untuk model dengan modifikasi penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal menghasilkan nilai deformasi sebesar 45,058 mm. Perincian hasil dapat dilihat pada Tabel 4 berikut dan Gambar 13 berikut.

Tabel 4. Pengaruh *Stiffener* dan Penutup Lubang terhadap Deformasi Balok Camber

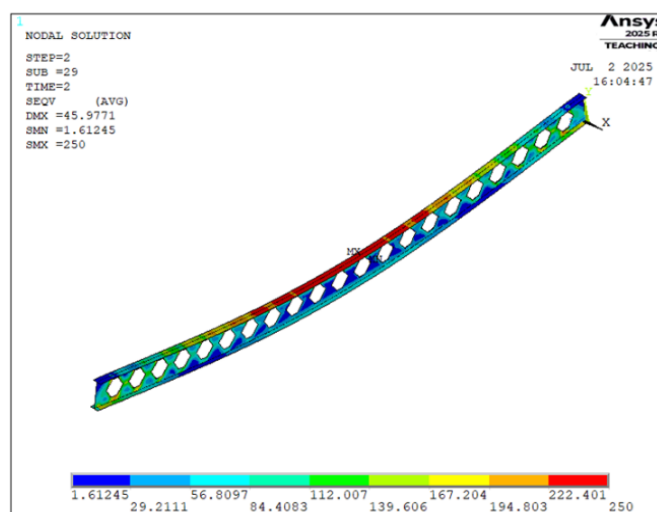
Model Analisis	Pressure Load (MPa)	Tegangan Maksimum (MPa)	Deformasi (mm)	Peningkatan Performa (%)
Tanpa Stiffner + Penutup Lubang Heksagonal	0,202	250,000	45,977	2,04
Stiffner + Penutup Lubang Heksagonal	0,202	249,997	45,058	



Gambar 13. Pengaruh *Stiffener* dan Penutup Lubang Heksagonal terhadap Deformasi Balok Camber pada Tekanan 0,202 MPa

Berdasarkan data Tabel 4 dan Gambar 13 model *Castellated beam* dengan model balok camber yang diberikan pembebanan pada area top flange dengan pressure load 0,202 MPa, terlihat bahwa penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal memberikan kontribusi terhadap pengurangan deformasi. Model tanpa penambahan *Stiffener* menunjukkan deformasi sebesar 45,977 mm, sedangkan model dengan penambahan *Stiffener* mengalami deformasi sebesar 45,058 mm, yang mengalami penurunan deformasi sebesar

0,919 mm atau peningkatan performa sebesar 2,04%. yang menunjukkan bahwa penambahan elemen struktural berperan dalam meningkatkan kekakuan dan kestabilan balok camber. Nilai tegangan maksimum 250 MPa dan 249,997 MPa, yang mengindikasikan bahwa modifikasi tidak memengaruhi kapasitas tegangan secara signifikan, tegangan maksimum akan mencapai 99,999% dari tegangan leleh (f_y) 250 MPa.

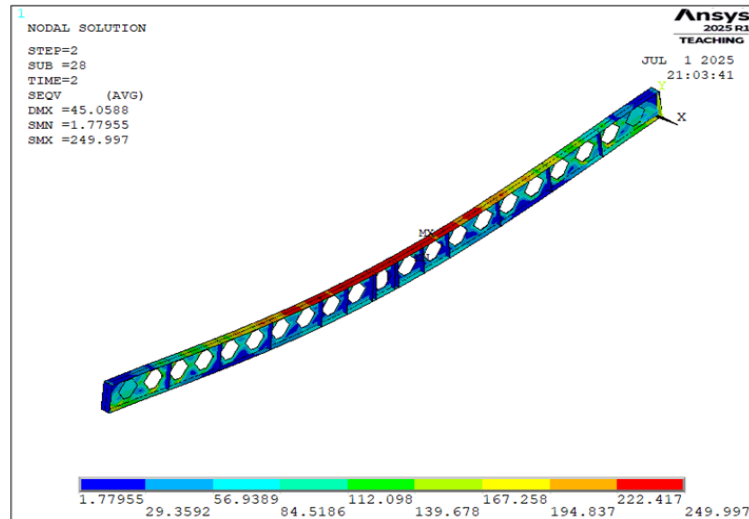


Gambar 14. Stress Contour Analisis ANSYS Model Tanpa *Stiffener* dan Penutup Lubang Heksagonal Balok Camber

Berdasarkan Gambar 14 di atas menunjukkan perilaku *Castellated beam* yang dimodelkan dengan penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal balok camber dengan nilai deformasi maksimum (DMX) sebesar 45,977 mm terjadi di tengah bentang balok, serta nilai tegangan maksimum (SMX) mencapai 250 MPa. Tegangan

maksimum yang terjadi tidak melebihi tegangan leleh (f_y) 250 MPa atau dalam kondisi elastis.

Gambar 15 berikut memperlihatkan *Stress Contour* ANSYS Model dengan *stiffener* dan penutup lubang heksagonal balok camber.



Gambar 15. *Stress Contour* Analisis ANSYS Model Dengan *Stiffener* dan Penutup Lubang Heksagonal Balok Camber

Berdasarkan Gambar 15 di atas menunjukkan perilaku *Castellated beam* yang dimodelkan dengan penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal balok camber dengan nilai deformasi maksimum (DMX) sebesar 45,058 mm terjadi di tengah bentang balok, serta nilai tegangan maksimum (SMX) mencapai 249,997 MPa. Tegangan maksimum yang terjadi tidak melebihi tegangan leleh (f_y) 250 MPa atau dalam kondisi elastis.

Perilaku *Castellated beam* Datar Dengan Mutu Baja Hybrid

Peningkatan mutu material pada bagian top flange elemen ini merupakan bagian paling

kritis terhadap tegangan tarik akibat beban lentur. Selain itu, top flange memiliki peran dalam mereduksi konsentrasi tegangan dan mencegah terjadinya local buckling di area bukaan *Castellated beam*, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas lokal.

Analisis pada balok baja *Hybrid Castellated beam* dengan model struktur datar dengan konfigurasi *hybrid* (Mutu baja BJ 41, BJ50 dan BJ55) pada flange dan web yang disimulasikan menggunakan software ANSYS dengan pendekatan *Shell* element (Lihat Tabel 8 berikut).

Tabel 8. Konfigurasi *Hybrid Castellated beam* Model Struktur Camber

Model	Mutu Baja	Pressure Load (kN/m)	Keterangan
Normal Camber	Top Flange: BJ41	Step 1 (-17,675)	Melengkung Ke Atas
	Web: BJ41	Step 2 (+35,350)	Beban Maksimum
Hybrid Camber	Top Flange: BJ50	Step 1 (-17,675)	Melengkung Ke Atas
	Web: BJ41	Step 2 (+35,350)	Beban Maksimum
Hybrid Datar (YT4A)	Top Flange: BJ50	18,725	Penguatan sisi atas terhadap lentur murni
	Web: BJ41		
	Bottom Flange: BJ41		

Berdasarkan hasil Analisis balok baja *hybrid Castelled beam* dengan model balok camber menghasilkan nilai deformasi, tegangan maksimum

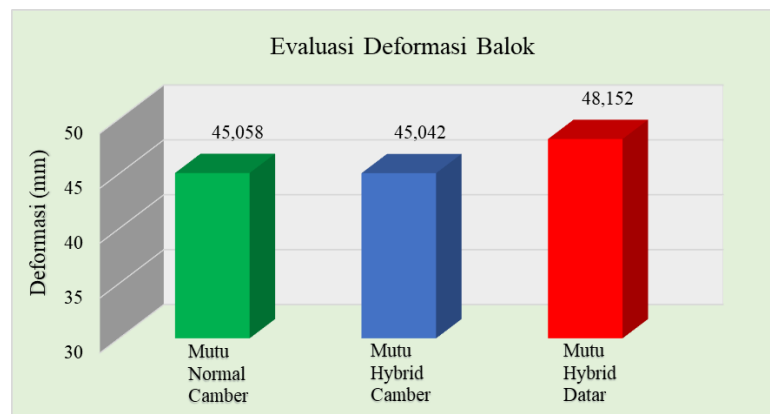
sebagaimana hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 9 dan Gambar 16 berikut.

Tabel 9. Evaluasi Deformasi dan Tegangan Pada Variasi *Hybrid Castelled beam* Model Struktur Camber

Model	Pressure Load (kN/m)	Deformasi (mm)	Tegangan Maksimum (MPa)
Normal Camber	35,350	45,058	249,997
<i>Hybrid</i> Camber	35,350	45,042	261,144
<i>Hybrid</i> Datar (YT4A)	18,725	48,152	276,331

Berdasarkan Tabel 9 hasil analisis ANSYS, model Normal Camber menunjukkan performa struktural yang lebih efisien dibandingkan model *Hybrid* Datar (YT4A), ditinjau dari aspek deformasi dan beban maksimum. Model Normal Camber mengalami deformasi sebesar 45,058 mm dengan beban maksimum 35,350 kN/m dan mengalami tegangan maksimum sebesar 249,997 MPa dengan rasio terhadap tegangan leleh (f_y) sebesar 99,998%, sedangkan model *Hybrid* Datar mengalami deformasi lebih besar yaitu 48,152 mm dengan

beban maksimum lebih kecil 47% dan tegangan maksimum 276,331 MPa dengan rasio terhadap tegangan leleh (f_y) 95%. Model *hybrid* camber mengalami deformasi sebesar 45,042 mm dengan beban maksimum 35,350 kN/m dan mengalami tegangan maksimum 261,144 MPa dengan rasio terhadap tegangan leleh (f_y) 90%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan model camber sangat efektif dalam mengurangi deformasi dan distribusi tegangan.



Gambar 16. Perbandingan Deformasi *Castelled beam* Berdasarkan Mutu Material

Berdasarkan Gambar 16 di atas, hasil analisis ANSYS menunjukkan bahwa nilai deformasi tertinggi terjadi pada balok *hybrid* datar sebesar 48,152 mm, sedangkan deformasi terendah terdapat

pada balok *hybrid* camber sebesar 45,042 mm, serta balok normal camber mengalami deformasi sebesar 45,058 mm.

Tabel 10. Perbandingan Tegangan Maksimum dan Rasio terhadap f_y pada Elemen *Castelled beam* Model Struktur Camber

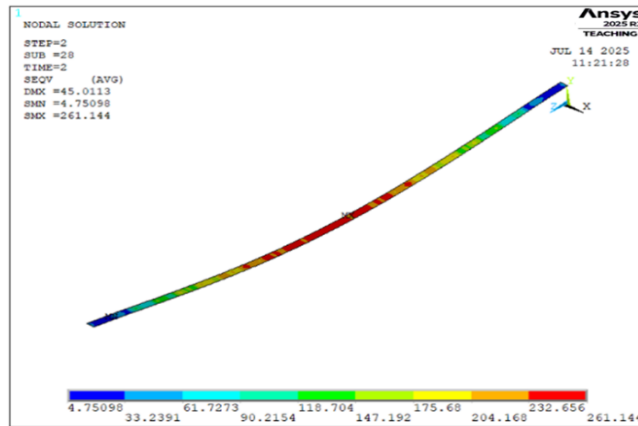
Model	Tegangan Maksimum Masing-Masing Elemen (MPa)			Top Flange	Web	Bottom Flange
	Top Flange	Web	Bottom Flange	Rasio (%)	Rasio (%)	Rasio (%)
Normal Camber	249,997	249,980	221,101	99,999	99,992	88,440
<i>Hybrid</i> Camber	261,144	249,979	221,098	90,050	99,992	88,439
<i>Hybrid</i> Datar	276,331	249,993	225,270	95,287	99,997	90,108

Berdasarkan Tabel 10 di atas didapatkan nilai

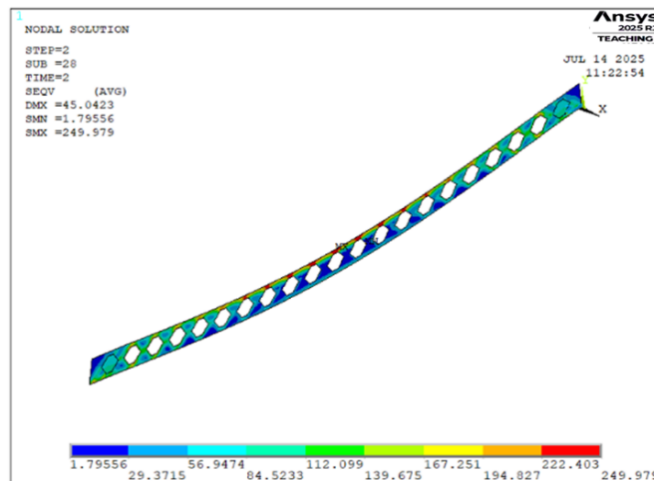
tegangan maksimum pada model normal camber

mengalami tegangan maksimum pada elemen struktur top flange sebesar 249,997 MPa dengan rasio 99,999%, web sebesar 249,980 MPa dengan rasio 99,992%, bottom flange sebesar 221,101 MPa dengan rasio 88,440%. pada model *hybrid* camber mengalami tegangan maksimum pada elemen struktur top flange sebesar 261,144 MPa dengan rasio 90,050%, web sebesar 249,979 MPa dengan

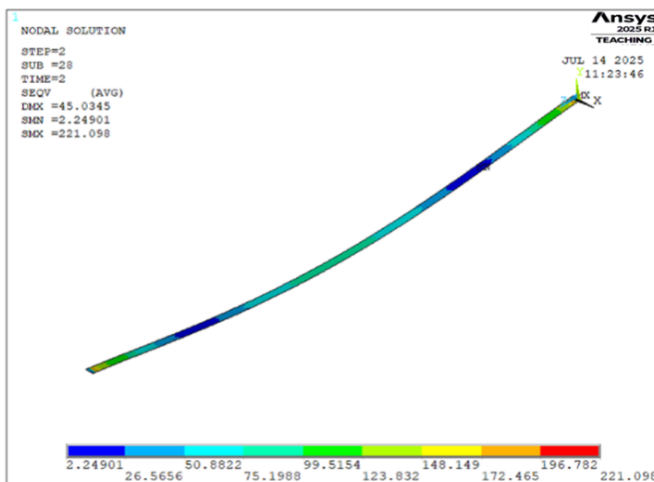
rasio 99,992%, bottom flange sebesar 221,098 MPa dengan rasio 88,439%. pada model *hybrid* datar mengalami tegangan maksimum pada elemen struktur top flange sebesar 276,331 MPa dengan rasio 95,287%, web sebesar 249,993 MPa dengan rasio 99,997%, bottom flange sebesar 225,270 MPa dengan rasio 90,108%



Gambar 17. *Stress Contour Analisis ANSYS Model Komponen Top Flange Balok Camber*



Gambar 18. *Stress Contour Analisis ANSYS Model Komponen Web Balok Camber*



Gambar 19. *Stress Contour Analisis ANSYS Model Komponen Bottom Flange Balok Camber*

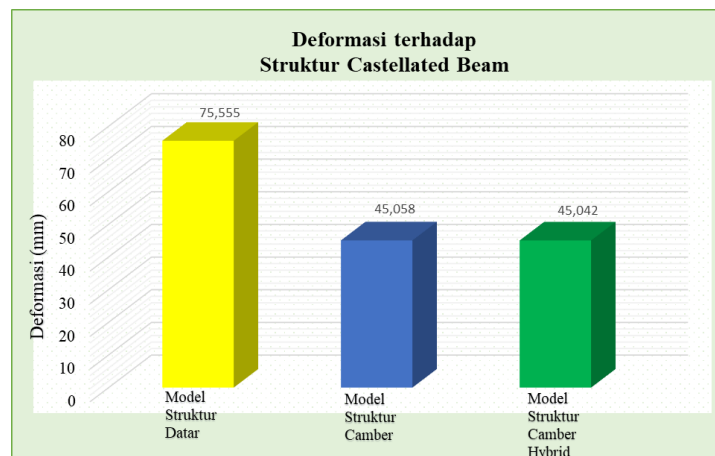
Berdasarkan Gambar 17-19 di atas menunjukkan perilaku *hybrid Castellated beam* Model *Hybrid* Camber yang dilakukan peningkatan mutu pada elemen Top Flange menjadi BJ50 dengan nilai deformasi maksimum (DMX) sebesar 48,042 mm terjadi di tengah bentang balok, serta nilai tegangan maksimum (SMX) mencapai 261,144 MPa. Tegangan maksimum yang terjadi tidak melebihi tegangan leleh (f_y) 290 MPa atau dalam kondisi elastis. Pada elemen top flange dengan rasio tegangan sebesar 90,050%, elemen web 99,992%, dan elemen bottom flange sebesar 88,439%.

Evaluasi Kinerja *Castellated beam* Model Datar dan Camber

Evaluasi terhadap efektivitas atas kinerja struktur *Castellated beam* dilakukan dengan membandingkan *Castellated beam* model struktur datar, struktur camber dan struktur camber *hybrid*, ketiga model variasi menggunakan penambahan pengaku *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal untuk meningkatkan kapasitas struktur terhadap tegangan lokal, deformasi, dan potensi tekuk. Hasil analisis ANSYS digunakan untuk menentukan konfigurasi paling efektif dalam meningkatkan stabilitas dan kekuatan struktur *Castellated beam*.

Tabel 11. Perbandingan Kinerja Struktur Datar, Camber, dan Camber *Hybrid* Terhadap Beban Ultimit dan Deformasi

Model Struktur	Beban Ultimit (kN/m)	Tegangan Maksimum (MPa)	Deformasi (mm)	Peningkatan Performa (%)
Struktur Datar	18,725	250,000	75,555	0,000
Struktur Camber	35,350	249,997	45,058	40,360
Struktur Camber <i>Hybrid</i>	35,350	261,144	45,042	40,380



Gambar 20. Grafik Perbandingan Deformasi pada Model Struktur *Castellated beam*: Datar, Camber, dan Camber *Hybrid*

Berdasarkan Tabel 11 dan Gambar 20 di atas beban ultimit pada model struktur camber dan struktur camber *hybrid* sebesar 35,35 kN/m, lebih besar 52,97% dari model struktur datar yaitu sebesar 18,725 kN/m. Penurunan nilai deformasi yang sangat signifikan dari model struktur datar 75,555 mm menjadi 45,058 mm pada model struktur camber dan 45,042 mm pada model struktur camber *hybrid*. Tegangan maksimum yang terjadi pada model struktur datar sebesar 250 MPa atau sebesar 100% dari nilai tegangan leleh (f_y) 250 MPa dan sebesar 249,997 MPa atau sebesar 99,998% dari nilai tegangan leleh BJ41 (f_y) 250 MPa pada model struktur camber serta nilai tegangan maksimum sebesar 261,144 MPa atau sebesar 90,046% dari

nilai tegangan leleh BJ50 (f_y) 290 MPa pada model struktur camber *hybrid*. Peningkatan performa struktur model struktur camber sebesar 40,36% dan sebesar 40,38% pada model struktur camber *hybrid*. Struktur camber *hybrid* memiliki kinerja terbaik dengan penurunan deformasi, peningkatan kekuatan.

Diafragma Pada *Castellated beam Hybrid* Datar

Analisis Diafragma double *hybrid Castellated beam* un-camber dengan panjang bentang 12.000 mm dan lebar 3.000 mm serta jarak bersih antar girder 2.650 mm yang disimulasikan menggunakan software ANSYS dengan pendekatan *Shell* element. Berdasarkan hasil analisis dengan

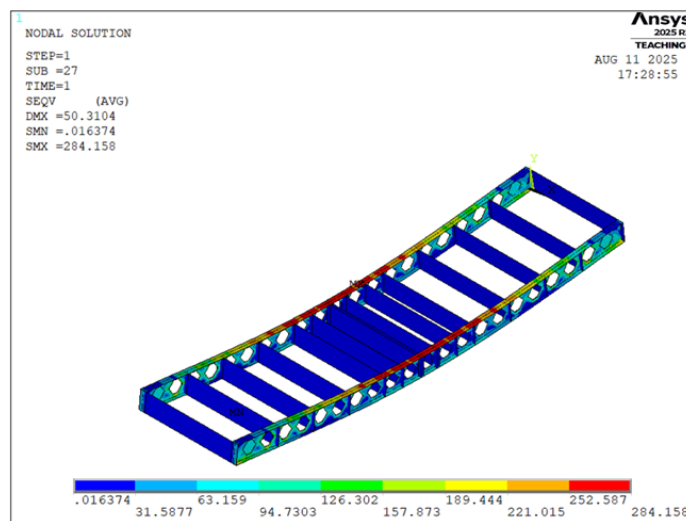
pressure load sebesar 0,108 MPa, menghasilkan nilai deformasi sebesar 50,31 mm (lihat Tabel 12).

Tabel 12. Hasil Analisis Diafragma double *hybrid Castellated beam* un-camber

Model Analisis	Pressure Load (MPa)	Rasio Tegangan Maksimum (%)	Deformasi (mm)
<i>Castellated beam</i> Datar	0,107	100,000	75,555
<i>Diafragma Double Hybrid Castellated beam Un-Camber</i>	0,108	97,980	50,310

Berdasarkan hasil analisis, *Castellated beam* datar dengan pressure load 0,107 MPa dengan rasio tegangan maksimum sebesar 100% (BJ41) dengan deformasi sebesar 75,555 mm, sedangkan konfigurasi *Diafragma double hybrid Castellated beam* un-camber dengan pressure load 0,108 MPa

dengan rasio tegangan maksimum 97,98% (BJ50) dengan deformasi 50,31 mm. Berdasarkan hasil tersebut menunjukkan bahwa *Diafragma double hybrid Castellated beam* un-camber dapat meningkatkan kekakuan serta dapat menurunkan deformasi secara signifikan (lihat Gambar 21).



Gambar 21. Stress Contour analisis ANSYS Model *Diafragma double hybrid Castellated beam* un-camber

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis metode elemen hingga dengan ANSYS R2025 untuk struktur JPO, dari hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

- 1) Berdasarkan hasil analisis dan validasi terhadap data pengujian eksperimental, dapat disimpulkan bahwa *Shell Model* lebih akurat dalam merepresentasikan respon struktur *Castellated Beam* dibandingkan *Solid Model*. Selain itu, *Shell Model* terbukti lebih efisien secara komputasi dan lebih mudah dalam proses pemodelan, sehingga lebih sesuai digunakan dalam analisis struktur *Castellated Beam*
- 2) Berdasarkan hasil analisis metode elemen hingga dengan Software ANSYS R2025 dimodelkan 3D *Shell Element SHELL181*, Pembentukan profil *Castellated beam* dari profil Hot Rolled Section WF 150x75x7x5 menjadi CB 225x75x7x5.

Variasi sudut potong pada bukaan heksagonal *Castellated beam* berpengaruh signifikan terhadap perilaku kekuatan lentur struktur. Sudut potong 52° menghasilkan kapasitas beban maksimum tertinggi.

- 3) Pembentukan profil *Castellated beam* dari profil Hot Rolled Section WF 350x175x11x7 menjadi CB 525x175x11x7 dengan sudut lubang heksagonal 520 dan panjang bentang 12 m dengan konfigurasi camber mampu meningkatkan beban ultimit 88,78% dan menurunkan deformasi 40,36% dibanding balok datar, dengan tegangan maksimum 249,997 MPa dibawah tegangan leleh material (f_y) 250 MPa. Penambahan *Stiffener* dan penutup lubang heksagonal pada balok camber dapat menurunkan deformasi 2,03%.
- 4) Struktur *Castellated beam* dengan konfigurasi camber *hybrid* terbukti memberikan peningkatan performa struktur sebesar 40,38% dibandingkan dengan struktur balok datar. Struktur *Castellated beam* model camber *hybrid* (BJ41+BJ50) dapat

menurunkan nilai deformasi dari 75,555 mm menjadi 45,042 mm dengan penurunan tegangan maksimum sebesar 10,01%. Penambahan diafragma pada double *hybrid Castellated beam* un-camber panjang bentang (L) 12 m dan jarak antar girder (S) 2,65 m dapat menurunkan deformasi sebesar 33,41%. Tegangan maksimum yang terjadi mencapai 90%-95% dari besarnya tegangan leleh masing-masing komponen *hybrid girder*.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Thabhawee, H., Mohammed, A. (2019). *Experimental study for strengthening octagonal castellated steel beams using circular and octagonal ring stiffeners*. International Conference on Civil and Environmental Engineering Technologies, 1-12
- Aminullah A., Taufik S., dan Barkiah I. (2014), Pengaruh Penambahan Pengaku Vertikal Terhadap Kuat Lentur Balok Baja Profil I, Jurnal Teknologi Berkelanjutan (Sustainable Technology Journal), Vol. No. 2, pp. 71-81
- ANSYS Mechanical Academic (2025). Lisence No. cc28aadbb66f. ISTN. Jakarta
- ANSYS Inc. (2021). *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*. ANSYS, Inc
- Arifi, E., & Setyowulan, D. (2020). *Teknologi bahan konstruksi*. Yogyakarta: CV Budi Utama
- Barkiah, N., & Darmawan, S. (2021). *Analisis perilaku lentur castellated beam pada struktur baja ringan*. Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan, **23**(2), 115–124
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 03-1729-2002: Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis* (4th ed.). John Wiley & Sons
- Kumaragurubaran, N., Subramanian, D. R., Jagadeesan, D. K. (2021). *Experimental analysis and Study on Shear Performances of Castellated Beam Chassis under Three Cases of Stiffener*. Journal of Engg. Research Vol. 11 No(2B) pp.292-323
- Kaveh, A., & Fakoor, V. (2020). *Structural optimization of Castellated Beams using metaheuristic algorithms*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, **65**(2), 353–375
- Mathur, S., Senthilpandian, M., Karthikeyan, K. (2020). *Static and Dynamic Analysis of Steel Beams with Web Openings*. Journal of Physics, 1-9
- Mehetre, A. J., Talikoti, D. R. S. (2019). *Flexural Failure Prediction Of Castellated Beams Using Experimental Investigation*. International Conference on Advances in Construction Materials and Structures (ACMS-2018)
- Mehetre, A. J., Talikoti, D. R. S. (2019). *Analytical and Experimental Investigation of Castellated Beam by American Standard*. Journal of Engineering Reseach and Application, PP 05-10
- Mehetre, A. J., Talikoti, D. R. S. (2021). *Prediction of ultimate load carrying capacity of castellated beams by experimental and analytical investigation*. Intenational Journal Structural Engineering, **11**(2), 107-126
- Morkhade, S. G. (2019). *Behavior of Castellated Steel Beams: State of the Art Review*. Electronic Journal of Structure Engineering, **19** (1), 39-48
- Nimmi, K. P., Krishnachandran, V. N. (2016). *Experimental and Analytical Investigations of Cellular Steel Beams*. **3** (8), 1886-1892
- Naidu, G. G., Kasukurthi, S., Manohar, K. S., Adaikkalakumar, P., & Chandramouly, Y. J. (2020). *A Study on Castellated Beams with and Without Stiffeners*. International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM), **7**(6), 96-101
- Partono, W., Sukamta, Hardiyati, S., & Budi, L. (2018). Optimasi distribusi lubang pada balok baja kastela. *TEKNIK*, **39**(1), 1–8.
- Pratama, R. (2023). *Analisis struktur gedung menggunakan metode elemen hingga*. Jurnal Teknik Sipil Indonesia, **12**(2), 101–110
- Pawar, V., & Kumbhar, S. (2022). *Effect of stiffener on Castellated Beam performance under various loadings*. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, **10**(2), 1134–1142.
- Pritykin, A. I. (2022). *Prediction of the Castellated Beams deflections*. Research Paper, 1160-1174
- Samudro, B. (2024). *Finite Element Analysis dalam Aplikasi Rekayasa Struktur*. Penerbit Andi
- Saneebamol, M. A., Syed, Soni. (2016). *Experimental Investigation on Castellated steel beam having spacer plates (Litzka Beam)*. **2** (1), 244-247
- Taufik S., R.X Xiao., 2006, *Simplified Finite Element Modelling of Beam- Column Bolted Connections with Shell Elements*, Proceedings of the Eighth International Conference on Computational Structures Technology, Paper

118

- Wokanubun, P. (2023). *Analisis Numerik Struktur Baja Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Penerbit Graha Ilmu
- Yustisia, V. W. (2020). *Analisis Tegangan – Regangan Perilaku Balok Baja Castella pada Sambungan dengan Plat Couple untuk Geometri Hexagonal, Octagonal, dan Berlian Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Tesis Magister, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya