

PENGARUH PENGAKU (*STIFFENER*) DAN PENUTUP LUBANG *CASTELLATED BEAM* TERHADAP TEKUK (*BUCKLING*) PADA KONSTRUKSI RAMP DOOR DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

(The Effect of Stiffeners and Castellated Beam Hole Covers on Buckling in Ramp Door Construction with Finite Element Method)

Abdul Hari Nugroho¹, Pio Ranap Tua Naibaho¹

¹Program Studi S2 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tama Jagakarsa

E-mail: nuks_spd@yahoo.co.id

Diterima 11 Maret 2025, Disetujui 20 Juni 2025

ABSTRAK

Baja castellated adalah balok baja yang mempunyai elemen pelat badan berongga berbentuk segienam (hexagonal). Salah satu kasus yang sering terjadi pada struktur baja castellated ialah buckling. Dalam penelitian ini mengambil studi kasus konstruksi ramp door yang terbuat dari baja castellated. Konstruksi ramp door mengalami kerusakan buckling setelah dilakukan uji beban. Analisa dilakukan terhadap empat model ramp door dengan pembebanan menyerupai kondisi aktual jembatan sesuai SNI 1725-2016. Modeling pertama menggunakan balok induk castellated 900x200x11x17 tanpa penambahan stiffener. Modeling kedua dengan penambahan stiffener disetiap jarak antar lubang castellated. Modeling ketiga menutup semua lubang tanpa penambahan stiffener. Modeling keempat menutup semua lubang dengan penambahan stiffener disetiap jarak antar lubang castellated. Analisa dilakukan dengan metode elemen hingga. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh stiffener dan penutup lubang castellated terhadap nilai deformation, equivalent stress dan eigenvalue buckling. Dari hasil analisa pengaruh stiffener (model kedua) untuk nilai lendutan berkurang 0,62%, nilai tegangan meningkat 4,04%, nilai eigenvalue buckling meningkat 144,94%. Pengaruh penutup castellated (model ketiga) untuk nilai lendutan berkurang 8,69%, nilai tegangan berkurang 19,71%, nilai eigenvalue buckling meningkat 12,75%. Pengaruh stiffener dan penutup castellated (model keempat) untuk nilai lendutan berkurang 11,18%, nilai tegangan berkurang 20,15%, nilai eigenvalue buckling meningkat 153,98%.

Kata Kunci : castellated, pengaku (stiffener), penutup lubang, tekuk (buckling), ramp door

ABSTRACT

Castellated steel is a steel beam that has a hexagonal hollow web element. One of the cases that often occurs in castellated steel structures is buckling. This study takes a case study of ramp door construction made of castellated steel. The ramp door construction experienced buckling damage after a load test. Analysis was carried out on four ramp door models with loading resembling the actual conditions of the bridge according to SNI 1725-2016. The first modeling uses a 900x200x11x17 castellated main beam without the addition of stiffeners. The second modeling with the addition of stiffeners at each distance between castellated holes. The third modeling closes all holes without the addition of stiffeners. The fourth modeling closes all holes with the addition of stiffeners at each distance between castellated holes. The analysis was carried out using the finite element method. This study aims to determine the effect of stiffeners and castellated hole covers on deformation values, equivalent stress and buckling eigenvalues. From the analysis of the effect of stiffener (second model) for the deflection value decreased by 0.62%, the stress value increased by 4.04%, the buckling eigenvalue increased by 144.94%. The effect of castellated cover (third model) for the deflection value decreased by 8.69%, the stress value decreased by 19.71%, the buckling eigenvalue increased by 12.75%. The effect of stiffener and castellated cover (fourth model) for the deflection value decreased by 11.18%, the stress value decreased by 20.15%, the buckling eigenvalue increased by 153.98%.

Keywords : castellated, stiffener, hole cover, buckling, ramp door

PENDAHULUAN

Penggunaan material yang terbuat dari baja sebagai konstruksi bangunan saat ini sangat diminati. Ini dikarenakan baja mempunyai kelebihan dibandingkan dengan material lainnya seperti rasio kekuatan per volume yang tinggi. Namun penggunaan material baja identik dengan biaya konstruksi yang lebih mahal jika dibandingkan dengan menggunakan material beton. Menyadari kelebihan dan kekurangan baja ini, maka pada perkembangannya para pakar teknik terus berinovasi dan melakukan pengujian agar penggunaan material baja dapat dimaksimalkan.

Castellated beam dibuat dengan memotong bagian badan/web dari profil baja I atau *wide flange* dengan pola zig-zag (gergaji) di sepanjang bentang badan profil tersebut. Kemudian masing – masing bagian di salah satu ujungnya disambung dengan las sehingga menghasilkan penampang baru dengan profil yang lebih tinggi (Banu Adhibaswara, Relly Andayani, 2010).



Gambar 1. *Castellated Beam*.

Pemanfaatan *castellated beam* memiliki beberapa kelebihan antara lain penghematan material, karena berkurangnya berat dari profil, serta dengan profil penampang yang tinggi menghasilkan momen inersia yang besar sehingga lebih kuat dan kaku. (Saidul Ulum, 2014). Disamping kelebihan yang dimiliki *castellated beam*, terdapat juga kelemahan dari profil yang berpenampang tinggi ini, antara lain lemahnya daya tahan terhadap gaya geser yang besar dikarenakan berkurangnya bagian web akibat lubang. Adapun penelitian terhadap balok *castellated* yang berkaitan dengan tema penelitian diantaranya. Fiqri Anra Wijaya, 2020, membahas mengenai pengaruh variasi bentuk *stiffener* terhadap *lateral torsional buckling* pada baja *castellated*. William Wranata, Paulus Karta Wijaya, 2021, studi *numerikal* tekuk web pada balok baja kastela akibat kombinasi momen lentur dan gaya geser. Royki dan Leo S. Tediato, 2018, analisis pengaruh lubang pada balok kastela terhadap *defleksi* dan *lateral torsional buckling* dengan metode elemen hingga.

Di Indonesia khususnya, studi mengenai perencanaan *castellated beam* yang digunakan sebagai struktur utama *ramp door* masih minim penggunaannya. Oleh karena itu dalam penelitian ini mengambil studi kasus konstruksi *ramp door* yang terbuat dari baja *castellated*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh

penambahan *stiffener* dan penutup lubang *castellated* pada struktur *ramp door existing* terhadap nilai *deformation*, *equivalent stress* dan *eigenvalue buckling* tetapi tidak berfokus mendapatkan struktur *ramp door* yang aman, efektif dan efisien sesuai peraturan yang berlaku.

Ramp door ialah konstruksi pintu rampa atau struktur jembatan yang mempunyai fungsi utama yaitu untuk jalan keluar masuknya kendaraan dari kapal menuju dermaga atau sebaliknya (Rayroha Matonang, Imam Pujo Mulyatno, Hartono Yudo, 2019). Dalam penelitian ini mengambil studi kasus terhadap *Ramp door* yang terletak di dermaga PT. Satya Amerta Havenport di kabupaten Morowali Utara, Provinsi Sulawesi Tengah. *Ramp door* ini berfungsi untuk memindahkan material bijih nikel (*ore*) dari kapal tongkang ke dermaga.



Gambar 2. Struktur *Ramp door*.

Struktur *ramp door* harus didisain untuk menghindari *elastic deformation* yang berlebihan yang dapat menyebabkan perubahan penampang geometri akibat dari beban yang diperoleh (Angger Setyo Aji, Didik Hardianto, 2022). Setelah dilakukan uji beban dengan muatan *dump truck* maksimal 50 ton konstruksi *ramp door* ini mengalami kerusakan tekuk (*buckling*) baik tekuk lokal maupun tekuk lateral pada balok induk. Untuk itu selanjutnya akan dilakukan analisis kekuatan struktur *ramp door* tersebut.



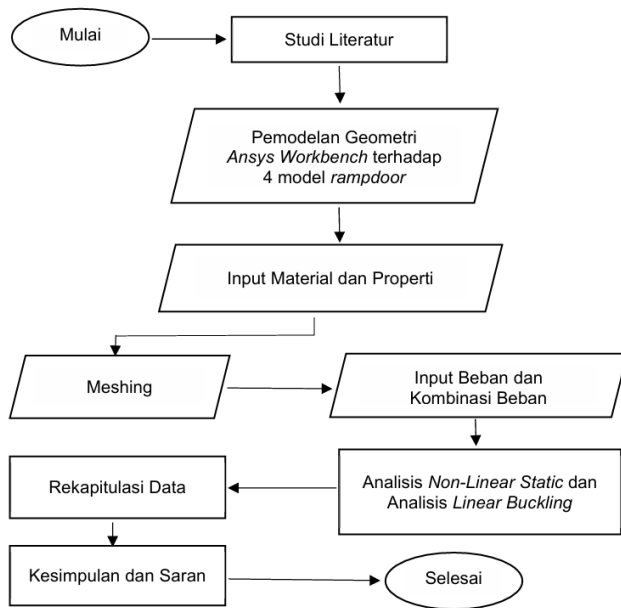
Gambar 3. Struktur *Ramp door* mengalami kerusakan (*buckling*) pada balok induk.

Dalam penelitian ini analisa hanya berfokus pada nilai lendutan (*deformation*), tegangan setara (*equivalent stress*) dan nilai beban kritis yang menyebabkan struktur mengalami tekuk (*eigenvalue buckling*). Analisa dilakukan dengan metode elemen hingga dan menggunakan program *Ansys Workbench*.

METODOLOGI

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kualitatif yang berfokus pada pemahaman mendalam terhadap kasus melalui data deskriptif, observasi dan analisis dokumen.

Pengumpulan data terdiri dari data primer dan sekunder, untuk data primer dilakukan dengan observasi langsung di lapangan, sedangkan data sekunder dengan cara mengambil referensi dari buku, artikel, jurnal, dan *shop drawing*, serta peraturan yang terkait dengan tema penelitian ini. Kemudian proses analisis dengan metode elemen hingga menggunakan *software Ansys Workbench* bisa dilakukan, adapun alur penelitian ditampilkan pada Gambar berikut ini :



Gambar 4. Diagram alur penelitian

1) Pengumpulan Data

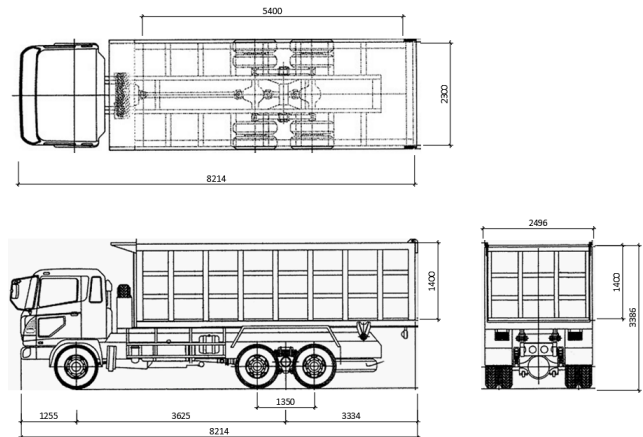
Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data diantaranya data kendaraan dan data konstruksi *ramp door* :

a) Data kendaraan

Kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini ialah *dump truck* bermuatan bijih besi (*ore*), seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 1. Ukuran *dump truck*.

Model	HOWO Truck
Dimensi bak truk (LxWxH)	5400x2300x1400 mm
Dimensi total truk (LxWxL)	8214x2496x3386 mm
Jarak sumbu roda	3625+1350 mm
Berat sendiri truk	12290 kg
Berat muatan	30000 kg



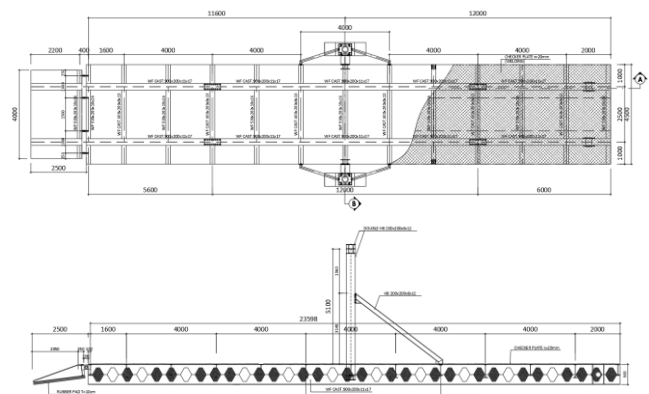
Gambar 5. Dimensi *dump truck*.

b) Data struktur *ramp door*

Struktur *ramp door* yang dipakai dalam penelitian ini merupakan *ramp door* yang terbuat dari baja *castellated*, adapun data dan spesifikasinya disajikan pada tabel berikut ini :

Tabel 2. Ukuran *ramp door*.

Bentang <i>ramp door</i> (L)	23,6 meter
Lebar <i>ramp door</i> (b)	4,5 meter
Balok Induk (memanjang)	<i>Castellated</i> 900x200x11x17
Jarak balok induk	2,5 meter
Balok anak (melintang)	<i>Castellated</i> 600x200x8x13 I-WF 500x200x10x16
Jarak balok anak	2 meter
Mutu baja profil	SS 400, ($f_u = 400$ MPa, $f_y = 250$ MPa)



Gambar 6. Denah struktur *ramp door*.

2) Pembebanan *Ramp Door*

Nilai beban berdasarkan peraturan SNI 1725 : 2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan, dan SNI 2833 : 2016 tentang

Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa, didapatkan nilai beban sebagai berikut :

Tabel 3. Nilai beban pada struktur *ramp door*.

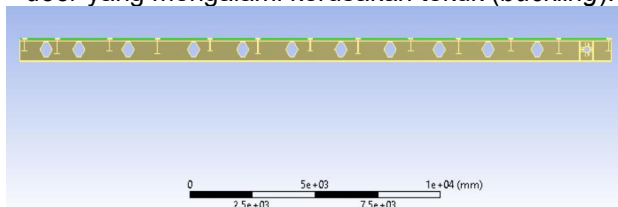
Beban	Nilai	Satuan
Beban mati tambahan (<i>MA</i>)	47,68	Pa
Beban merata (<i>BTR</i>)	9000	Pa
Beban terpusat garis (<i>BGT</i>)	68600	N/m
Beban pejalan kaki (<i>TP</i>)	5000	Pa
Gaya rem (<i>TB</i>)	2262	N
Beban angin struktur tekan (<i>EWS tekan</i>)	2160	N/m
Beban angin struktur hisap (<i>EWS hisap</i>)	1080	N/m
Beban angin kendaraan (<i>EWL</i>)	1502	N/m
Beban temperature (<i>EUN</i>)	27,5	°C
Beban gempa arah x (<i>EQ arah x</i>)	11482	N
Beban gempa arah y (<i>EQ arah y</i>)	11482	N

Tabel 4. Kombinasi beban pada struktur *ramp door*.

Keadaan Batas	<i>MA</i>	<i>BTR</i>	<i>BGT</i>	<i>TP</i>	<i>TB</i>	<i>EWS</i>	<i>EW_L</i>	<i>EUn</i>	<i>EQ</i>
Kuat I	1,4	1,8	-	-	-	1,2	-	-	-
Kuat II	1,4	1,4	-	-	-	1,2	-	-	-
Kuat III	1,4	-	1,4	-	-	1,2	-	-	-
Kuat IV	1,4	-	-	-	-	1,2	-	-	-
Kuat V	1,4	-	0,4	1,0	1,2	-	-	-	-
Ekstrem I	1,4	0,3	-	-	-	-	1,0	-	-
Ekstrem II	1,4	0,5	-	-	-	-	-	-	-
Daya layan I	1,0	1,0	0,3	1,0	1,2	-	-	-	-
Daya layan II	1,0	1,3	-	-	1,2	-	-	-	-
Daya layan III	1,0	0,8	-	-	1,2	-	-	-	-
Daya layan IV	1,0	-	0,7	-	1,2	-	-	-	-

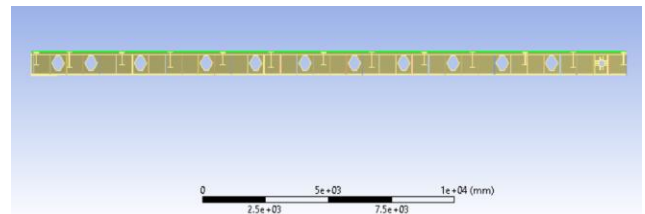
3) Pemodelan *Ramp Door*

- a) Model pertama menggunakan balok induk *castellated* 900x200x11x17 tanpa penambahan *stiffener*, model ini sesuai dengan model *ramp door* yang mengalami kerusakan tekuk (*buckling*).



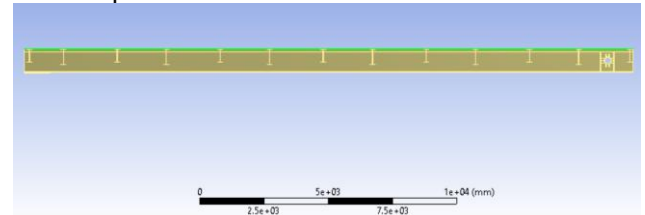
Gambar 7. Struktur rangka *ramp door* model 1.

- b) Model kedua menggunakan balok induk *castellated* 900x200x11x17 dengan penambahan *stiffener* disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated*.



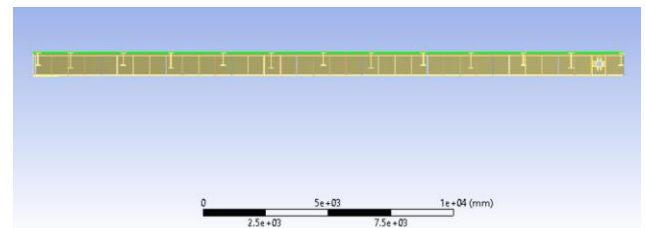
Gambar 8. Struktur rangka *ramp door* model 2.

- c) Model ketiga menggunakan balok induk *castellated* 900x200x11x17 dengan menutup semua lubang bukaan dan tanpa *stiffener*.



Gambar 9. Struktur rangka *ramp door* model 3.

- d) Model keempat menggunakan balok induk *castellated* 900x200x11x17 dengan menutup semua lubang bukaan dan penambahan *stiffener* disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated*.



Gambar 10. Struktur rangka *ramp door* model 4.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah semua proses pemodelan dan pembebanan serta analisa kekuatan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software Ansys Workbench selesai*, kemudian didapatkan data berupa nilai *Total Deformation*, *Equivalent Stress*, dan *Eigenvalue Buckling*.

1) *Total Deformation/ Displacement*

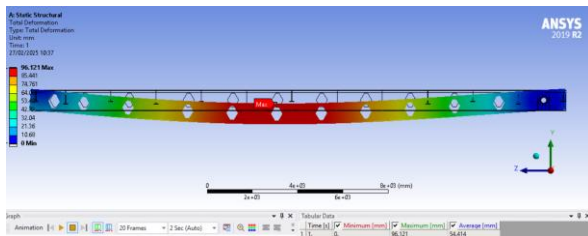
Deformasi ialah perubahan bentuk, dimensi dan posisi dari suatu objek/benda karena diterapkan sebuah gaya atau suhu (Angger Setyo Aji, Didik Hardianto, 2022). Berdasarkan RSNI T-03 : 2005 pasal 4.7 tentang persyaratan dan pembatasan lendutan balok, mengatur bahwa lendutan pada balok ialah dihitung akibat beban layan yaitu beban hidup ditambah beban kejut. Sehingga pengecekan nilai deformasi diambil hanya untuk kombinasi keadaan batas layan maksimum.

Tabel 5. *Total deformation* maksimum keadaan batas layan.

Batas Layan	Deformasi (mm)	Deformasi (%)	Selisih (%)	Keterangan
Model.1	96,12	100,00	0,00	Sebagai acuan
Model.2	95,19	99,38	-0,62	turun

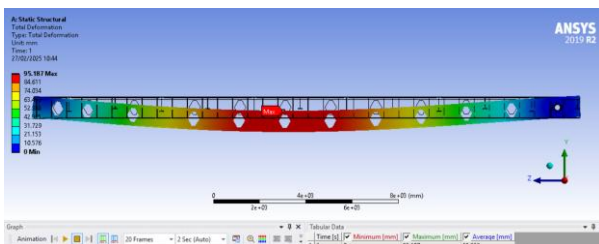
Batas Layan	Deformasi (mm)	Deformasi (%)	Selisih (%)	Keterangan
Model.3	85,64	91,31	-8,69	turun
Model.4	84,94	88,82	-11,18	turun

Untuk memperjelas mengenai perilaku deformasi dari setiap model *ramp door* yang dianalisa berikut ini disajikan gambar animasi dari keempat model *ramp door* tersebut :



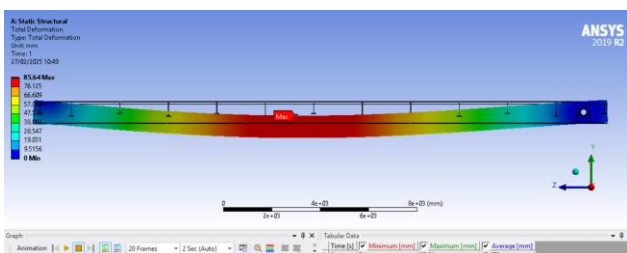
Gambar 11. Total deformasi *ramp door* model 1.

Gambar 11. di atas menunjukkan besarnya deformasi maksimum untuk *ramp door* model 1 akibat dari kombinasi beban layan terjadi pada tengah bentang yaitu sebesar 96,12 mm.



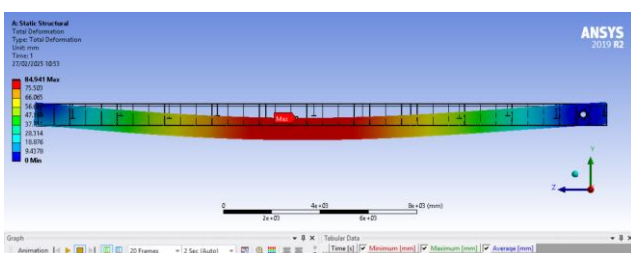
Gambar 12. Total deformasi *ramp door* model 2.

Gambar 12. di atas menunjukkan besarnya deformasi maksimum untuk *ramp door* model 2 akibat dari kombinasi beban layan terjadi pada tengah bentang yaitu sebesar 95,19 mm.



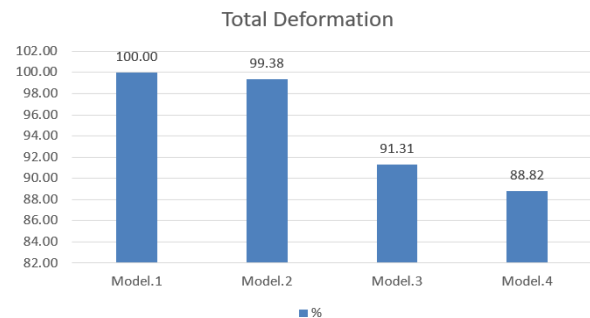
Gambar 13. Total deformasi *ramp door* model 3.

Gambar 13. di atas menunjukkan besarnya deformasi maksimum untuk *ramp door* model 3 akibat dari kombinasi beban layan terjadi pada tengah bentang yaitu sebesar 85,64 mm.



Gambar 14. Total deformasi *ramp door* model 4.

Gambar 14. di atas menunjukkan besarnya deformasi maksimum untuk *ramp door* model 4 akibat dari kombinasi beban layan terjadi pada tengah bentang yaitu sebesar 84,94 mm.



Gambar 15. Grafik nilai *total deformation* semua model *ramp door*.

Berdasarkan hasil analisa diatas dapat diambil kesimpulan bahwa untuk *ramp door* model 1 dijadikan sebagai acuan untuk perhitungan deformasi maka diambil nilai lendutan 100%. Sementara untuk *ramp door* model 2 yang dalam analisis dilakukan penambahan *stiffener* disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* didapatkan nilai lendutan dari 100,00% menjadi 99,38% berkurang 0,62%. *Ramp door* model 3 yang dalam analisis dilakukan penutupan semua lubang bukaan *castellated* dan tanpa *stiffener* didapatkan nilai lendutan dari 100,00% menjadi 91,31% berkurang 8,69%. *Ramp door* model 4 yang dalam analisis dilakukan penutupan semua lubang bukaan dan penambahan *stiffener* disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* didapatkan nilai lendutan dari 100,00% menjadi 88,82% berkurang 11,18%. Sehingga model *ramp door* yang paling efektif untuk mengurangi deformasi adalah *ramp door* model 4 yaitu dapat mengurangi lendutan sebesar 11,18%.

Validasi nilai *total deformation*

Bilamana ketentuan batas kekuatan (*limit state of strength*) sudah terpenuhi, maka struktur masih harus dievaluasi terhadap ketentuan kondisi batas layan (*limit state of serviceability*), karena untuk memastikan bahwa pada kondisi beban rencana struktur tidak menyebabkan permasalahan bagi pemakaian dan berfungsi sesuai rencana. Besarnya lendutan balok ditentukan oleh tujuan pemakaian dan detail struktur tersebut. Berdasarkan peraturan RSNI T-03 : 2005 pasal 4.7.2 bahwa untuk balok di atas dua tumpuan menerus, lendutan maksimumnya $\frac{1}{800} \times \text{bentang}$. sehingga batasan lendutan maksimum adalah $\frac{1}{800} \times 23600 = 29,50$ mm.

Tabel 6. Validasi total deformasi dan deformasi ijin.

Batas Layan	Deformasi maksimum (mm)	Deformasi Ijin (mm)	Keterangan
Model.1	96,12	29,50	tidak memenuhi
Model.2	95,19	29,50	tidak memenuhi
Model.3	85,64	29,50	tidak memenuhi
Model.4	84,94	29,50	tidak memenuhi

Pada tabel 6. di atas menunjukkan bahwa untuk keempat model *ramp door* tidak memenuhi persyaratan mengenai deformasi maksimum untuk jembatan, sehingga apabila *ramp door* tersebut dianggap sebagai struktur jembatan maka struktur tersebut harus diubah agar supaya memenuhi persyaratan deformasi maksimum sesuai peraturan Standard Nasional Indonesia mengenai perencanaan struktur baja untuk jembatan RSNI T-03 : 2005.

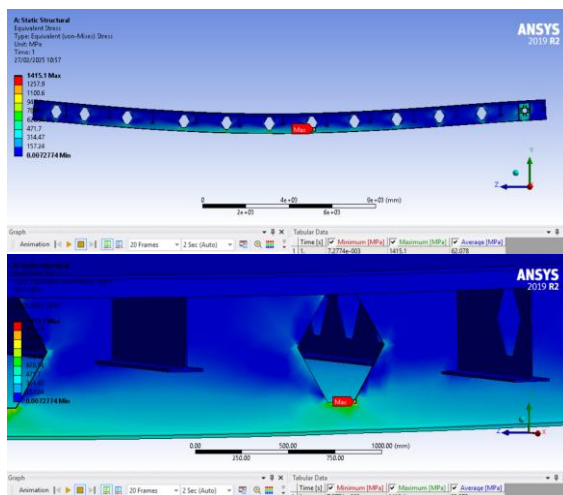
2) *Equivalent Stress (Von Mises)*

Tegangan ekivalen secara umum digunakan untuk material padat (*solid*). Dalam kasus ini material dikatakan gagal apabila ketika mencapai nilai maksimal *stress von mises* sesuai spesifikasi material (Angger Setyo Aji, Didik Hardianto, 2022). Untuk pengecekan tegangan maksimum menggunakan kombinasi keadaan batas ultimate maksimum.

Tabel 7. *Equivalent Stress* maksimum keadaan batas ultimate maksimum.

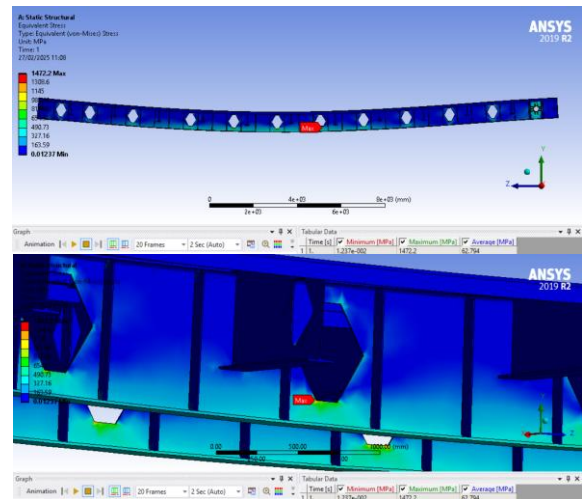
Batas Ultimate	<i>Equivalent Stress</i> (MPa)	<i>Equivalent Stress</i> (%)	Selisih (%)	Keterangan
Model.1	1415,10	100,00	0,00	Sebagai acuan
Model.2	1472,20	104,04	4,04	naik
Model.3	1136,20	80,29	-19,71	turun
Model.4	1130,00	79,85	-20,15	turun

Untuk memperjelas mengenai perilaku tegangan dari setiap model *ramp door* yang dianalisa berikut ini disajikan gambar animasi dari keempat model *ramp door* tersebut :



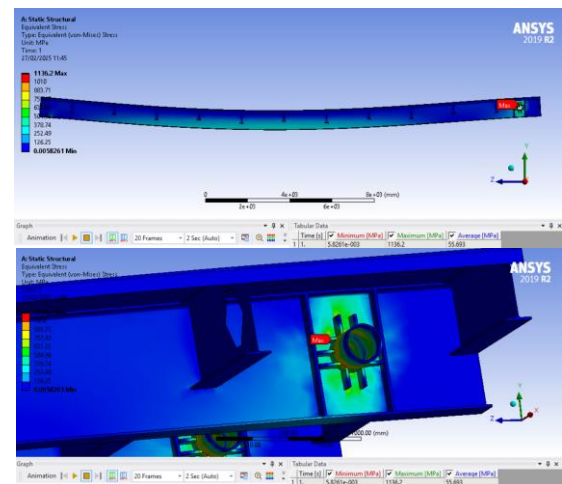
Gambar 16. *Equivalent stress ramp door* model 1.

Gambar 16. di atas menunjukkan distribusi tegangan maksimum terjadi pada sudut lubang bukaan *castellated* pada tengah bentang yaitu sebesar 1415,10 MPa.



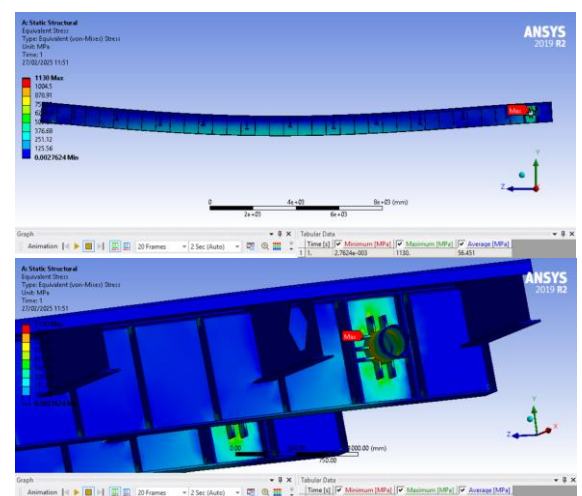
Gambar 17. *Equivalent stress ramp door* model 2.

Gambar 17. di atas menunjukkan distribusi tegangan maksimum terjadi pada sudut lubang bukaan *castellated* pada tengah bentang yaitu sebesar 1472,20 MPa.



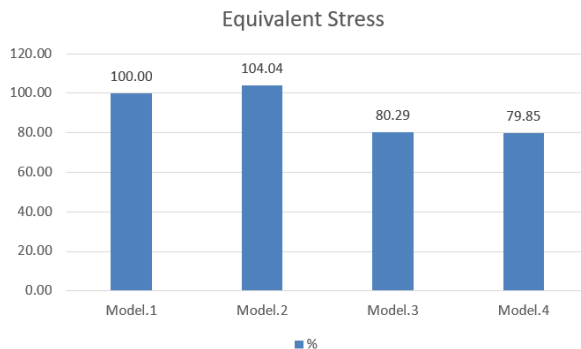
Gambar 18. *Equivalent stress ramp door* model 3.

Gambar 18. di atas menunjukkan distribusi tegangan maksimum terjadi pada daerah tumpuan sendi tepatnya pada perkuatan *stiffener* pipa yaitu sebesar 1136,20 MPa.



Gambar 19. *Equivalent stress ramp door* model 4.

Gambar 19. di atas menunjukkan distribusi tegangan maksimum terjadi pada daerah tumpuan sendi tepatnya pada perkuatan *stiffener* pipa yaitu sebesar 1130,00 MPa.



Gambar 20. Grafik nilai *Equivalent Stress* semua model *ramp door*.

Berdasarkan hasil analisa diatas dapat diambil kesimpulan bahwa untuk *ramp door* model 1 dijadikan sebagai acuan untuk perhitungan tegangan maka diambil nilai tegangan 100%. Sementara untuk *ramp door* model 2 yang dalam analisis dilakukan penambahan *stiffener* disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* didapatkan nilai tegangan dari 100,00% menjadi 104,04% meningkat 4,04%. *Ramp door* model 3 yang dalam analisis dilakukan penutupan semua lubang bukaan *castellated* dan tanpa *stiffener* didapatkan nilai tegangan dari 100,00% menjadi 80,29% berkurang 19,71%. *Ramp door* model 4 yang dalam analisis dilakukan penutupan semua lubang bukaan dan penambahan *stiffener* disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* didapatkan nilai tegangan dari 100,00% menjadi 79,85% berkurang 20,15%. Sehingga model *ramp door* yang paling efektif untuk mengurangi tegangan adalah *ramp door* model 4 yaitu dapat mengurangi tegangan sebesar 20,15%.

Validasi *Equivalent Stress* (*Von Mises*)

Pada pemodelan di *Ansys Workbench*, kriteria kegagalan yang digunakan adalah *von mises* yaitu kegagalan struktur akan terjadi jika tegangan *von mises* mencapai nilai tegangan leleh material. Dalam analisa ini menggunakan material baja SS 400 yang mempunyai tegangan leleh $f_y = 250$ MPa. Sehingga nilai *Equivalent stress* harus lebih kecil dari 250 MPa.

Tabel 8. *Equivalent Stress* maksimum.

Batas Ultimate	Maximum Stress (Mpa)	Allowable Stress (Mpa)	Keterangan
Model.1	1415,10	250	tidak memenuhi
Model.2	1472,20	250	tidak memenuhi
Model.3	1136,20	250	tidak memenuhi
Model.4	1130,00	250	tidak memenuhi

Pada tabel 8. menunjukkan bahwa untuk keempat model *ramp door* tersebut tidak memenuhi persyaratan mengenai tegangan ijin material, sehingga perlu dilakukan perubahan struktur *ramp door* yang tidak terbatas penambahan *stiffener* dan penutupan lubang

castellated melainkan dengan merubah dimensi profil baja *castellated* yang lebih besar pada balok induk supaya memenuhi tegangan ijin material baja.

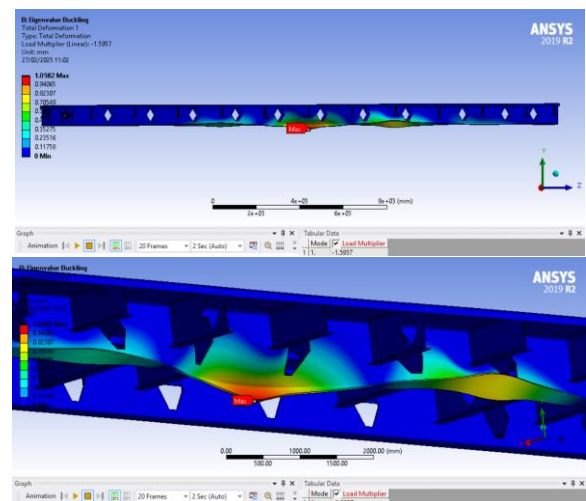
3) *Eigenvalue Buckling*

Eigenvalue ialah nilai besaran kelipatan beban/gaya yang menyebabkan tekuk (*buckling*) pada struktur, sedangkan *mode shape* atau *eigenvectors* ialah bentuk/arrah dari perilaku tekuk yang diakibatkan oleh nilai eigen. Tekuk terjadi apabila kekakuan tegangan direduksi oleh beban tekan dari kekakuan elastis sehingga resultan struktur tereduksi sampai nol. Untuk pengecekan *Eigenvalue Buckling* digunakan kombinasi keadaan batas *ultimate* minimum.

Tabel 9. *Eigenvalue Buckling* minimum keadaan batas *ultimate* minimum.

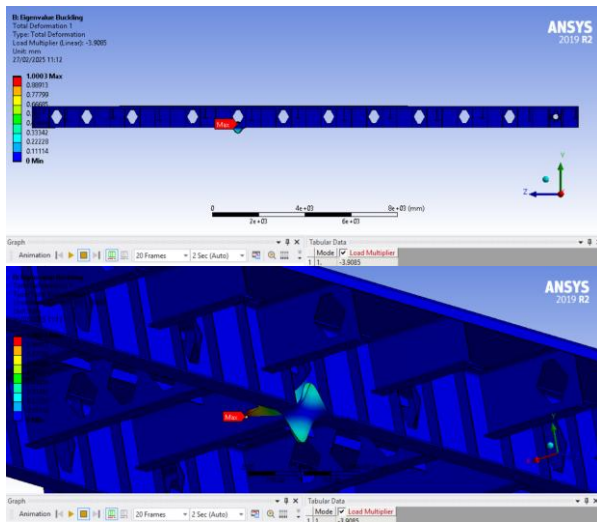
Batas Ultimate	Eigen value Buckling	Eigen value Buckling (%)	Selisih (%)	Keterangan
Model.1	1,596	100,00	0,00	Sebagai acuan
Model.2	3,909	244,94	144,94	naik
Model.3	1,799	112,75	12,75	naik
Model.4	4,053	253,98	153,98	naik

Untuk memperjelas mengenai perilaku *Eigenvalue Buckling* dari setiap model *ramp door* yang dianalisa berikut ini disajikan gambar animasi dari keempat model *ramp door* tersebut :



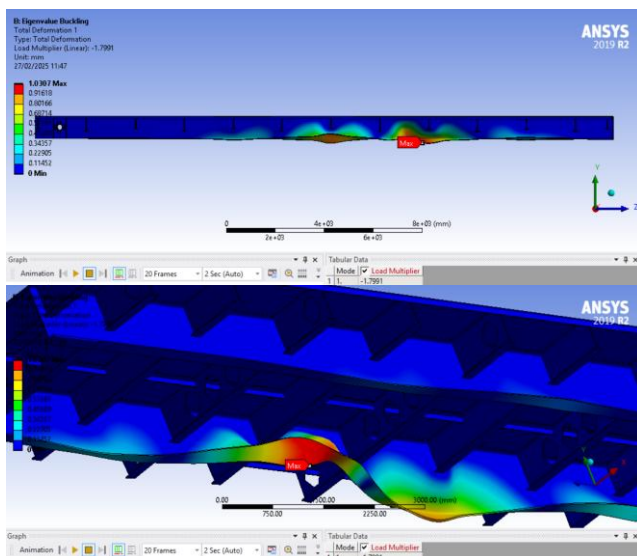
Gambar 21. *Eigenvalue buckling* *ramp door* model 1.

Gambar 21. di atas menunjukkan bahwa struktur balok utama pada *mode shape* pertama mengalami *flens buckling*, *web buckling* dan *lateral torsional buckling*, pada tengah bentang, adapun nilai eigen *buckling* sebesar 1,596.



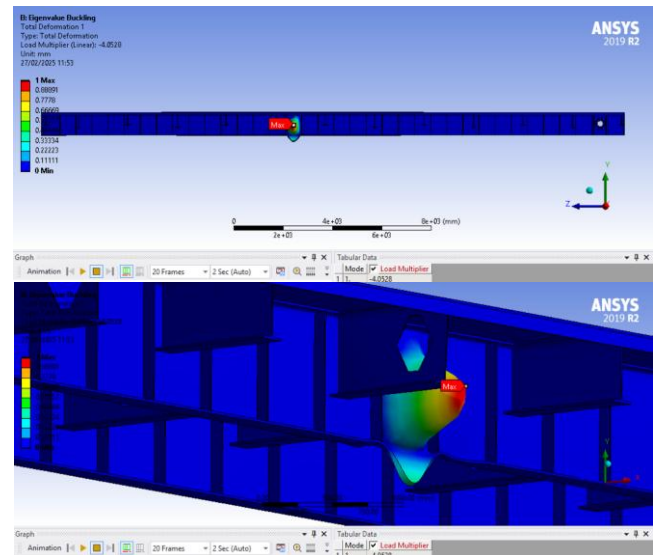
Gambar 22. Eigenvalue buckling ramp door model 2.

Gambar 22. di atas menunjukkan bahwa struktur balok utama pada *mode shape* pertama mengalami *flens buckling* dan *web buckling* dibawah lubang bukaan *castellated*, adapun nilai eigen *buckling* sebesar 3,909.



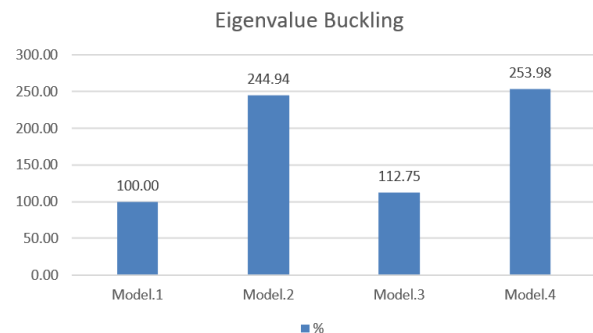
Gambar 23. Eigenvalue buckling ramp door model 3.

Gambar 23. di atas menunjukkan bahwa struktur balok utama pada *mode shape* pertama mengalami *flens buckling*, *web buckling* dan *lateral torsional buckling*, pada tengah bentang, adapun nilai eigen *buckling* sebesar 1,799.



Gambar 24. Eigenvalue buckling ramp door model 4.

Gambar 24. di atas menunjukkan bahwa struktur balok utama pada *mode shape* pertama mengalami *flens buckling* dan *web buckling* pada tengah bentang, adapun nilai eigen *buckling* sebesar 4,053.



Gambar 25. Grafik nilai Eigenvalue Buckling semua model ramp door.

Berdasarkan hasil analisa diatas bahwa untuk *ramp door* model 1 dijadikan sebagai acuan untuk perhitungan *eigenvalue buckling* maka diambil nilai eigen *buckling* 100%. Sementara untuk *ramp door* model 2 yang dalam analisis dilakukan penambahan *stiffener* disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* didapatkan nilai eigen *buckling* dari 100,00% menjadi 244,94% meningkat 144,94%. *Ramp door* model 3 yang dalam analisis dilakukan penutupan semua lubang bukaan *castellated* dan tanpa *stiffener* didapatkan nilai eigen *buckling* dari 100,00% menjadi 112,75% meningkat 12,75%. *Ramp door* model 4 yang dalam analisis dilakukan penutupan semua lubang bukaan dan penambahan *stiffener* disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* didapatkan nilai eigen *buckling* dari 100,00% menjadi 253,98% meningkat 153,98%. Sehingga model *ramp door* yang paling efektif untuk mengurangi *buckling* adalah *ramp door* model 4 yaitu dapat menambah nilai eigen *buckling* sebesar 153,98%.

Validasi *Eigenvalue Buckling*

Analisis linear buckling bertujuan untuk melihat mode shape dan eigenvalue pada setiap kasus. semakin besar nilai *eigenvalue buckling* maka semakin aman terhadap kegagalan tekuk/ *buckling*.

Berikut hasil yang didapatkan dari analisa metode elemen hingga :

- a) Balok *castellated* tanpa pengaku/ *stiffener* pada model 1 mengalami tiga macam *buckling* yaitu *flens buckling*, *web buckling* dan *lateral torsional buckling*. Hal ini terjadi dikarenakan lubang pada web balok *castellated* menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada sisi-sisi bukaan sehingga menyebabkan badan penampang balok tidak bisa menahan tegangan tekan akibat beban terpusat maupun beban merata sehingga terjadi *buckling*.
- b) Balok *castellated* dengan pengaku/ *stiffener* pada model 2 mengalami dua macam *buckling* yaitu *flens buckling* dan *web buckling*. Setelah pengaku/ *stiffener* diletakkan pada web balok disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* maka *lateral torsional buckling* tidak terjadi. Hal ini terjadi dikarenakan adanya tahanan lateral pada badan penampang balok akibat pengaku vertikal, sehingga simpangan lateral pada web/ badan penampang balok dapat terminimalkan.
- c) Balok *castellated* tanpa pengaku/ *stiffener* tetapi dilakukan penutupan semua lubang bukaan *castellated* sesuai model 3 mengalami tiga macam *buckling* yaitu *flens buckling*, *web buckling* dan *lateral torsional buckling*. Hal tersebut terjadi karena dukungan lateral tidak memadai pada sayap tekannya (*top flange*) dan kekakuan torsi badan/ web yang kurang secara keseluruhan.
- d) Balok *castellated* dengan pengaku/ *stiffener* dan dilakukan penutupan semua lubang bukaan *castellated* sesuai model 4 mengalami dua macam *buckling* yaitu *flens buckling* dan *web buckling*. Setelah pengaku/ *stiffener* diletakkan pada web balok disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* dan dilakukan penutupan semua lubang bukaan *castellated* maka *lateral torsional buckling* tidak terjadi. Hal ini disebabkan adanya tahanan lateral pada web/ badan penampang balok yang diberikan oleh pengaku vertikal. Dengan adanya pengaku vertikal tersebut berfungsi sebagai kolom pendek tunggal yang menjadi penghubung untuk menyalurkan beban ke *flange* bawah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa pengaruh penambahan plat pengaku (*stiffener*) disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* seperti pemodelan *ramp door* model kedua lebih efektif dalam hal mengurangi kegagalan tekuk/ *buckling*, yaitu dapat meningkatkan nilai *eigen buckling* sebesar 144,94%.

Pengaruh penutupan semua lubang bukaan *castellated* dan tanpa penambahan *stiffener* seperti

pemodelan *ramp door* model ketiga lebih efektif dalam hal mengurangi kegagalan material dalam hal tegangan leleh, yaitu dapat mengurangi nilai tegangan setara (*equivalent stress*) sebesar 19,71%.

Pengaruh penutupan semua lubang bukaan *castellated* dan penambahan *stiffener* disetiap jarak antar bukaan lubang *castellated* seperti pemodelan *ramp door* model keempat efektif dalam hal kenyamanan konstruksi (lendutan/ *deformation*) yaitu dapat mengurangi nilai lendutan sebesar 11,18%. Efektif dalam hal mengurangi kegagalan material (*Equivalent stress*) yaitu dapat mengurangi nilai tegangan setara (*equivalent stress*) sebesar 20,15%. Efektif dalam hal mengurangi kegagalan tekuk (*eigenvalue buckling*) yaitu dapat meningkatkan *eigenvalue buckling* sebesar 153,98%.

Dari hasil perbandingan masing-masing model struktur *ramp door* diatas didapatkan desain yang paling efektif untuk mengurangi kegagalan tekuk lokal (*flens*, *web*) dan tekuk lateral adalah *ramp door* model keempat yaitu dapat meningkatkan nilai *eigen buckling* sebesar 153,98%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Program Studi S2 Teknik Sipil Universitas Tama Jagakarsa yang sudah memberikan dukungan dalam penyusunan penelitian ini.

REFERENSI

- Angger Setyo Aji, Didik Hardianto. (2022). *Analisa Kekuatan Konstruksi Ramp door pada Deck Cargo Barge dengan Metode Elemen Hingga (Finite Element Method)*, Jurnal Jalasena Vol.4 No.1.
- Banu Adhibaswara, Relly Andayani. (2010). *Bridge Structure Design of Composite Steel Beam with Profile Castellated*, Undergraduate Program Faculty of Civil and Planning Engineering, Gunadarma University, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). Panitia Teknik Standardisasi Bidang Jalan dan Jembatan. *Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa (SNI 2833:2016)*, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). Panitia Teknik Standardisasi Bidang Jalan dan Jembatan. *Pembebanan untuk jembatan (SNI 1725:2016)*, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2005). Panitia Teknik Standardisasi Bidang Jalan dan Jembatan. *Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan (RSNI T-03-2005)*, Jakarta.
- Fiqri Anra Wijaya. (2020). *Pengaruh Variasi Bentuk Stiffener Terhadap Lateral Torsional Buckling pada Baja Castellated Beam*, Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Rayroha Matonang, Imam Pujo Mulyatno, Hartono Yudo. (2019). *Analisa Kekuatan Konstruksi Ramp door pada Kapal Landing Ship Tank (LST) 117M dengan Metode Elemen Hingga*, Jurnal Teknik Perkapalan Vol.VII No.1.
- Royki dan Leo S. Tediato. (2018). *Analisis Pengaruh Lubang pada Balok Kastela terhadap Defleksi dan*

Lateral Torsional Buckling dengan Metode Elemen Hingga, Jurnal Mitra Teknik Sipil Vol.I No.1.

Saidul Ulum. (2014). *Analisa Perbandingan Model Keruntuhan Profil Hexagonal dan Circular Castellated Beam dengan Program FEA*, Tugas Akhir Program Studi S1 Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

William Wranata, Paulus Karta Wijaya. (2021). *Studi Numerikal Tekuk Web pada Balok Baja Kastela Akibat Kombinasi Momen Lentur dan Gaya Geser*, Jurnal Aplikasi Teknik Sipil Vol.19 No.3.