

KERUSAKAN DAN PERANCANGAN ULANG ALTERNATIF GIRDER PADA LINTASAN TRIPPER SESUAI SNI 03-1729-2002

Failure and Redesign an Alternative Girder on Tripper Track in accordance with SNI 03-1729-2002

Djoko W. Karmiadji¹, Rhandi Mulia² dan Eddy Djatmiko³

¹B2TKS-BPPT, Kawasan PUSPIPTEK, Setu, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

²PT. Holcim Indonesia Tbk, Jl Raya Narogong Km.7, Cileungsi, Gunung Putri, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

³Universitas Pancasila, Srengseng Sawah, Jakarta Selatan, DKI Jakarta, Indonesia

Email: dkarmiadji@rocketmail.com

Diterima: 4 Juni 2015, Direvisi: 22 Juni 2015, Disetujui: 30 Juni 2015

Abstrak

Kegagalan fungsi *girder* pada lintasan *tripper* yang sering terjadi disebabkan oleh keretakan pada penopang silang dan tegak, terjadinya defleksi berlebih pada batang utama, dan perubahan posisi pada kedua kolom. Kerusakan struktur diakibatkan oleh ketidaksesuaian pembebanan yang diterima, sehingga memperlemah komponennya dan dapat berakibat runtuhnya struktur *girder*. Studi dilakukan dengan mengkaji desain yang sudah ada melalui pendefinisian pembebanan, selanjutnya melakukan perhitungan mekanika pada tiga model pembebanan yang berbeda dan pengecekan kelayakan desain dengan metode *LFRD* berdasarkan SNI 03-1729-2002 dengan validasi menggunakan analisis elemen hingga. Hasil menunjukkan terjadinya ketidaksesuaian pembebanan yang berakibat kerusakan *girder*, sehingga diperlukan desain alternatif melalui pemilihan profil, perhitungan kelayakan profil dan analisis ulang untuk memastikan kehandalan rancangan. Dari hasil analisis perhitungan dapat disimpulkan bahwa desain alternatif mempunyai kehandalan yang memadai yaitu defleksinya 0,35 mm dibanding desain lama 15,96 mm berdasarkan perhitungan mekanik, sedangkan hasil analisis elemen hingga, defleksi desain baru 1,08 mm dan desain lama 10,37 mm. Tegangan maksimum desain baru adalah aman terhadap material yang digunakan, yaitu SS400 dengan kekuatan sebesar 245 MPa, dimana hasil perhitungan mekanika diperoleh tegangan maksimum desain baru 52,00 MPa, sedangkan tegangan maksimum hasil analisis elemen hingga adalah 56,31 MPa dan tegangan *Von Mises* 143,39 MPa.

Kata kunci : *girder*, *tripper*, *LFRD*, elemen hingga, Standar Nasional Indonesia (SNI).

Abstract

Malfunction of girder on track tripper that often occurred is caused by cracks in the cross and upright supports, occurrence of excessive deflection on main bar, and a change in position of the both columns. Structural failure is caused by loading discrepancies received, so it is weaken its components and resulted in the collapse of the girder structure. The study was conducted by reviewing existing design through loading analysis, then performing the mechanical calculation on three different loading models and checking the feasibility of the design with LFRD method based on SNI 03-1729-2002 with validation using finite element analysis. Results showed the loading discrepancies resulting in damaged girder, so it is necessary to make design alternatives through the selection of profiles, re-calculation and feasibility analysis of the beam to ensure the reliability of the design. From the calculation analysis, it can be concluded that the alternative design has adequate reliability. Based on mechanical calculations the deflection is 0.35 mm compared to 15.96 mm of the old design, while the result of finite element analysis determine 1.08 mm deflection of the new design and 10.37 mm in old design. The maximum stress of the new design is safe for the material used, ie SS400 with a strength of 245 MPa, wherein mechanical calculation resulted in obtained maximum stress of the new design is 52.00 MPa, while the maximum stress through finite element analysis result is 56.31 MPa and Von Mises stress is 143.39 Mpa.

Keywords: *girder*, *tripper*, *LFRD*, finite element, National Indonesian Standard (SNI).

1. PENDAHULUAN

Struktur *girder* pada lintasan *tripper* merupakan struktur baja yang menopang beban dari mesin pencurah material dari sistem transportasi material *belt conveyor*. Mesin pencurah atau dikenal dengan *tripper* berfungsi untuk

mencurahkan material ke dalam *stockpile* yang bergerak bolak-balik dari satu titik ke titik pengisian berikutnya berjarak pencurahan yang diinginkan, dimana transportasi pencurahannya melewati sistem *belt conveyor* sebelum dilewatkan ke *tripper* untuk dicurahkan ke dalam *stockpile*.

Mesin *tripper* yang bergerak secara terus-menerus sepanjang lintasan rel di atas struktur *girder*, merupakan pembebanan berulang yang terjadi pada kesatuan komponen *girder*. Selain itu, efek pembebanan dari material yang berada selama di atas *belt conveyor*, dan pembebanan dari komponen *belt conveyor*, merupakan pembebanan eksternal yang ikut menambah beban *girder*.

Kerusakan lintasan *girder* yang sering terjadi, karena keretakan atau patah pada penopang vertikal dan diagonal, terjadinya defleksi yang berlebih pada batang utama sebagai landasan rel *tripper*, serta perubahan posisi pada kolom akibat tidak kuat lagi penopang di sisi kolom. Kerusakan struktur dapat diakibatkan karena pembebanan yang tidak sesuai dengan desain pembebanan yang telah ditetapkan. Dalam industri, adanya kerusakan yang timbul memperlambat produksi karena butuh waktu perbaikan yang memakan waktu dan menghentikan produksi untuk sementara. Selain itu perubahan landasan *girder* nampak jelas terjadi pada jalur yang sering dilalui *tripper*, menyebabkan jalur yang dilewati tersebut secara jelas menunjukkan terjadi tingkat pergerakan struktur (*displacement*) yang tinggi.



Gambar 1 Kerusakan pada struktur *girder*.

Adanya kerusakan struktur (Gambar 1) perlu dicegah agar tidak terjadi kerusakan fatal yang dapat berakibat runtuhnya lintasan *girder*. Solusi permasalahan ini perlu kajian dan evaluasi penyebab terjadinya kerusakan, serta perlu dicarikan desain alternatif pada struktur *girder* guna mengatasi kerusakan dan mendapatkan desain yang sesuai dengan pembebanannya.

Tujuan penelitian yaitu mengkaji beban struktur *girder* berdasarkan perhitungan mekanika dan pengecekan komponen *girder* sesuai metode *Load and Resistance Factor Design (LFRD)* terkait SNI 03-1729-2002, yang

hasilnya dicocokkan dengan analisis elemen hingga (*finite element*).

Analisis ini dimaksudkan untuk mengetahui penyebab kerusakan struktur *girder* dan mendapatkan desain struktur *girder* yang sesuai dengan pembebanannya, sehingga dapat didesain ulang struktur *girder* dengan tujuan mengatasi kerusakan komponen *girder* yang mengalami pembebanan kritis.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Fungsi struktur merupakan faktor utama dalam penentuan konfigurasi struktur. Berdasarkan konfigurasi struktur dan beban rencana, setiap elemen atau komponen dipilih untuk menopang dan menyalurkan beban pada seluruh struktur dengan baik (Setiawan, 2008). Baja yang digunakan pada desain struktur rangka *girder* adalah jenis SS400 (JIS 3101-1995), yang memiliki nilai tegangan luluh (S_y) sebesar 245 MPa dan tegangan maksimum (S_u) 400-510 MPa (Anonim, 2000).

Jika dua komponen penopang silang digabungkan pada satu titik yang saling berhubungan, penyambungan tersebut tidak memungkinkan untuk menyambung kedua ujung penopang secara langsung. Pada kasus tersebut, pelat buhul (*gusset plate*) dipakai untuk menerima beban dari satu komponen dan diteruskan ke komponen lainnya (Kulak, Fisher, Struik, 2001). Pelat buhul didesain dengan analisis metode sederhana yakni pengujian kekuatan material. Untuk menguji kebenarannya, Whitmore di tahun 1952 melakukan pengujian terhadap pelat buhul dari aluminium 12,6 x 1/8 x 16,6 inch, dimana penyambungan menggunakan paku keling dan baut. Model pelat buhul disimulasikan pada rangka tipe *warren*. Whitmore mengamati bahwa lokasi terjadinya tegangan luluh dan tekanan maksimum berada pada sisi diagonal yang mengalami beban tensil dan tekan (Kulak, Fisher, Struik, 2001).

Menurut kaidah keteknikan, defleksi batang (δ) utama pada *girder* tidak boleh melebihi $1/700$ panjang bentang (L) batang *girder* ($\delta < \frac{L}{700}$). Sedangkan untuk defleksi kisi rangka batang jembatan jalan dapat ditentukan sampai ketelitian 10 persen dengan rumus (Rudenko, 1964):

$$\delta = 1,2 \frac{40 M L^2}{384 E I_m} \quad (1)$$

Dengan M adalah momen desain akibat beban bergerak dalam kg.cm dan panjang bentangan dalam cm. I_m merupakan momen

inersia luasan komposit yang didapatkan dengan rumus:

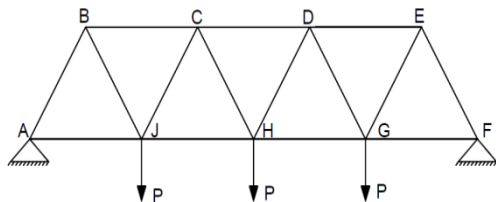
$$I_m = (A_{atas} + A_{bawah}) \frac{h^2}{4} \quad (2)$$

Pada struktur *girder* terdapat batang kembar yakni batang atas dan bawah, dengan adanya kelengkungan kembar yang dipasangkan pada jaringan rangka batang untuk memberi pratarik pada bagian batang tersebut. Untuk kelengkungan pada titik sambungan tengah diambil sama dengan defleksi amannya. Kelengkungan maksimum yang ditetapkan adalah $f_{maks} = \frac{L}{1000}$. Untuk rangka *girder* dengan panjang 8 m, ditetapkan kelengkungan struktur rangka *girder* sebesar $f_{maks} = \frac{L}{1000} = \frac{8000\text{mm}}{1000} = 8$ mm.

Sesuai dengan hukum Hooke, tegangan adalah sebanding dengan regangan, dan berlaku dalam batas elastis. Perbandingan tegangan ($\sigma = \frac{P}{A}$) dengan regangan ($\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$) dari setiap bahan yang diberikan dapat ditentukan dengan eksperimen, sehingga memberikan kepada kita suatu ukuran kekakuannya, atau elastisitas yang disebut modulus elastisitas bahan, yang dinyatakan dengan simbol E . Deformasi atau defleksi dapat ditentukan dengan rumus (Jensen & Chenoweth, 1991):

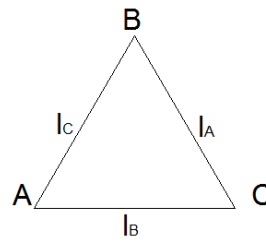
$$\Delta l = \frac{PL}{AE} \quad (3)$$

dimana Δl = defleksi batang (mm), P = beban yang diterima batang (N), A = luas penampang batang (mm^2), dan E = modulus elastisitas batang (MPa).



Gambar 2 Rangka batang statis tertentu tipe *warren*.

Lendutan rangka batang statis tertentu (Gambar 2) akan terjadi pada masing-masing titik simpul batang. Untuk menentukan penurunan titik simpul, dipergunakan beberapa metode (Gunawan, T., Margaret, S., 1988). Untuk menghitung lendutan pada struktur rangka tipe *warren*, dipergunakan metode *angle weight* dan *joint displacement*.



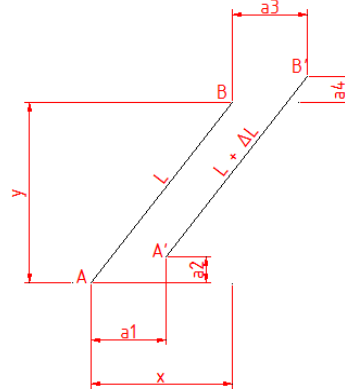
Gambar 3 Segitiga ABC.

Metode *Angle Weight* dengan metode ini dapat dihitung peralihan vertikal titik simpul pada struktur rangka secara serentak. Pada batang yang membentuk segitiga ABC (Gambar 3), peralihan pada masing-masing titik simpul adalah:

$$\Delta_A = (\epsilon_A - \epsilon_A) \cdot \text{ctg } C + (\epsilon_A - \epsilon_C) \cdot \text{ctg } B \quad (4a)$$

$$\Delta_B = (\epsilon_B - \epsilon_C) \cdot \text{ctg } A + (\epsilon_B - \epsilon_A) \cdot \text{ctg } C \quad (4b)$$

$$\Delta_C = (\epsilon_C - \epsilon_A) \cdot \text{ctg } B + (\epsilon_C - \epsilon_B) \cdot \text{ctg } A \quad (4c)$$



Gambar 4 Batang AB.

Metode *Joint Displacement* dengan metode ini dapat menghitung peralihan horizontal dan vertikal pada semua titik kumpul batang secara serentak. Besarnya peralihan pada batang AB (Gambar 4) yang panjangnya satu ditentukan dengan penurunan persamaan seperti di bawah,

$$\Delta_l = \frac{1}{l}(x(a_2 - a_1)) + (y(b_2 - b_1)) \quad (5)$$

Dalam desain, rumus lentur dipergunakan untuk memilih profil batang yang sesuai. Secara umum tegangan lentur biasanya kritis pada balok yang relatif panjang dan tegangan lenturnya dihitung dengan rumus berikut:

$$M = S \frac{I}{c} \text{ atau } S = M \frac{c}{I} \quad (6)$$

dimana M = momen lentur batang (Nmm), S = tegangan permukaan (MPa), I = momen inersia (mm^4), c = jarak dari sumbu netral ke tegangan permukaan S (mm).

Metode *LRFD* yang digunakan dalam riset ini didasarkan pada konsep probabilitas, sehingga dapat mengantisipasi segala

ketidakpastian dari material maupun beban. Oleh karena itu, metode *LRFD* ini dianggap cukup andal. Secara umum, suatu struktur dikatakan aman apabila memenuhi persyaratan sebagai berikut (Setiawan, 2008, Badan Standarisasi Nasional, 2002):

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i \cdot Q_i \quad (7)$$

Bagian kiri dari persamaan mempresentasikan tahanan atau kekuatan dari sebuah komponen atau sistem struktur. Dan bagian kanan persamaan menyatakan beban yang harus dipikul struktur tersebut. Jika tahanan nominal R_n dikalikan faktor tahanan ϕ maka akan diperoleh tahanan rencana.

Untuk struktur *girder* yang diambil dalam riset ini, jenis pembebanan yang diterimanya adalah beban dinamis (D) dan statik (L). Sehingga untuk beban terfaktor menggunakan persamaan berikut (Setiawan, 2008),

$$1,2D + 1,6L + 0,5(L_a \text{ atau } H) \quad (8)$$

Jika besar beban dinamis selama perawatan (L_a) atau beban hujan (H) diabaikan, karena struktur tidak mengalaminya saat beroperasi. Maka persamaan menjadi $1,2D + 1,6L$.

Dalam konteks analisis keandalan struktur, yang dimaksud dengan istilah kegagalan (*failure*) adalah terjadinya kerusakan pada salah satu dari sejumlah kondisi batas yang telah ditentukan sebelumnya. Pada persamaan dibawah ini merupakan fungsi kerapatan probabilitas (*Probability Density Function/PDF*) dari variabel acak beban Q serta tahanan R . Jika tahanan R lebih besar dari beban yang bekerja Q , maka suatu struktur tersebut dapat dikatakan masih aman. Peluang kegagalan dari R dan Q yang terdistribusi log normal peluang kegagalannya (Setiawan, 2008),

$$p_f = 1 - \frac{\ln(\frac{\bar{R}}{\bar{Q}})}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \quad (9)$$

Dengan \bar{R} dan \bar{Q} adalah nilai rerata, V_R dan V_Q adalah koefisien variasi dari tahanan dan beban, serta f_u adalah fungsi distribusi kumulatif hasil integrasi dari $-\infty$ hingga u .

Alternatif lain yang lebih mudah untuk menentukan peluang kegagalan adalah dengan menggunakan indeks kehandalan β . Hubungan antara p_f dan β dihitung dengan menggunakan persamaan

$$p_f = 460. \exp(-4,3\beta) \quad (10)$$

Menurut Rosyid (2007) keandalan sebuah komponen atau sistem adalah peluang komponen atau sistem tersebut untuk memenuhi

tugas yang telah ditetapkan tanpa mengalami kegagalan selama kurun waktu tertentu apabila dioperasikan dengan benar dalam kurun waktu tertentu. Metode *Monte Carlo* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai keandalan suatu struktur. Perhitungan keandalan berdasarkan *ultimate strength* juga bisa dilakukan dengan menggunakan metode tersebut. Nilai keandalan didapatkan dengan cara sebagai berikut (Ardhiansyah, 2010):

$$K = 1 - p_f \quad (11)$$

dimana pada rumus ini, K = kehandalan dan p_f = peluang kegagalan.

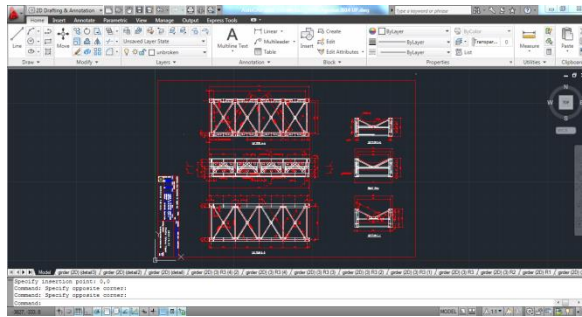
3. METODE PENELITIAN

Penelitian diawali dengan mengumpulkan data guna mengetahui dimensi desain *girder* lama, *properties* dari material baja yang digunakan, dan jarak peletakan beban yang bekerja pada struktur tersebut. Kemudian dari data tersebut dikaji kembali untuk mendefinisikan peletakan beban dan mencari beban yang bekerja pada masing-masing komponen.

Berdasarkan data awal dan pengamatan yang didapatkan dari observasi lapangan, kemudian dicarilah beban yang bekerja pada struktur *girder*. Beban yang terjadi berupa beban dinamis dan statis. Tentunya, beban dinamis yang bergerak sepanjang *girder* tidak dapat dihitung secara pasti jika beban bergerak sepanjang lintasan *girder*. Maka, semua beban dinamis diletakan pada titik-titik pembebanan yang mewakili pergerakannya. Ditetapkan tiga model pembebanan untuk mengetahui besarnya pembebanan dari masing-masing komponen.

Mencari besarnya gaya-gaya yang bekerja pada tiap-tiap komponen *girder* yaitu balok, kolom, serta penopang dengan perhitungan mekanika untuk analisa struktur. Studi eksak untuk mencari gaya-gaya, regangan, momen, tegangan, dan defleksi pada struktur. Hasil yang didapatkan dijadikan sebagai acuan untuk memastikan penyebab kerusakan yang terjadi pada penopang silang dan lendutan yang terjadi pada balok.

Pengecekan struktur dengan metode *LRFD* dilakukan setelah diketahui beban yang didapat dari perhitungan mekanika, dilanjutkan dengan pengecekan komponen batang, kolom, dan penopang. Beban pada masing-masing komponen berbeda, sehingga beban terfaktor yang digunakan untuk mengecek kelayakan profil dari komponen tersebut juga akan berbeda.



Gambar 4 Pemodelan 2 D AutoCad.

Studi struktur dengan elemen hingga (*finite element*) melalui beberapa tahapan yaitu:

1. Pemodelan *girder* dengan *AutoCAD* berupa desain 2D, untuk mempermudah mengetahui dimensi dan menentukan koordinat seperti ditunjukkan Gambar 4.
2. Mengkonversi pemodelan *Girder* yang dibuat dengan *AutoCAD* ke *UGS NX.7.5* untuk selanjutnya dilakukan pemodelan 3D dari struktur geometri *girder* secara keseluruhan.
3. Tahap selanjutnya, pengaturan geometri untuk mendefinisikan beban, yaitu melakukan pengaturan pada komponen balok yang mengalami beban kritis.
4. *Meshing*, dilakukan pengaturan *meshing* untuk menentukan ketelitian hasil yang didapat.
5. Validasi parameter *properties* material dari profil baja yang digunakan pada pemodelan struktur *girder*, diperlukan untuk mengetahui perilaku material terhadap beban yang bekerja.
6. Menjalankan *NASTRAN-NX.7.5* untuk model pembebanan dengan pengujian beberapa model pembebanan pada jarak tertentu. Jenis pemodelan dan perhitungan yang dilakukan adalah jenis *structural*.

Data hasil step-step diatas merupakan data hasil perhitungan analisa struktur, pengecekan komponen dengan *LRFD*, dan analisa elemen hingga yang selanjutnya digunakan untuk evaluasi desain awal.

Perancangan *Girder* alternatif diawali dengan pemilihan profil berdasarkan kriteria yang diharapkan yaitu kehandalan dari penopang, tingkat defleksi struktur rangka yang aman terhadap pembebanan yang diterima. Dari hasil kompilasi data awal ditentukan 4 alternatif penampang profil baja yang akan dipilih sebagai hasil pertimbangan dan evaluasi data-data yang sesuai. Kriteria pembobotan evaluasi mengarah

pada satu desain terbaik sesuai dengan kriteria yang diinginkan.

Pengecekan komponen terpilih dengan *LRFD* memberikan informasi jenis dan ukuran profil yang digunakan. Profil tersebut diuji kembali kelayakannya dengan melakukan kalkulasi kembali menggunakan metode *LRFD* sesuai beban terfaktor pada masing-masing profil penyusun komponen struktur *girder*.

Hasil pemilihan dan perhitungan kemudian didokumentasikan yang terdiri data mengenai gaya masing-masing komponen, kelayakan defleksi rangka, kelayakan desain penopang silang, kelayakan desain penopang tegak, kelayakan desain kolom, dan kelayakan desain batang.

Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan metode elemen hingga untuk memastikan kebenaran hasil kalkulasi dan sebagai pembanding bahwa desain yang dibuat aman sesuai perencanaan yang diharapkan. Tahapan analisis elemen hingga sama dengan prosedur diatas. Data yang dikomparasikan berupa data defleksi dan tegangan maksimum struktur dari desain terpilih.

Pada desain baru dilakukan pengujian kehandalan sebagai fungsi kendali dan memastikan kembali bahwa desain tersebut aman dan handal. Data yang dihasilkan dari pengujian diperoleh dengan cara pengujian desain terpilih terhadap variasi pembebanan pada salah satu model. Hasil pengujian diperoleh melalui analisis elemen hingga dengan bantuan *software NASTRAN*. Data tersebut kemudian dihitung untuk mencari peluang kegagalan P_f dan indeks kehandalan β .

Data-data yang diperoleh kemudian didokumentasikan sebagai hasil riset ini yaitu desain *girder* alternatif dengan data pendukung termasuk spesifikasi, *technical drawing*, dan prosedur fabrikasi serta pemasangannya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

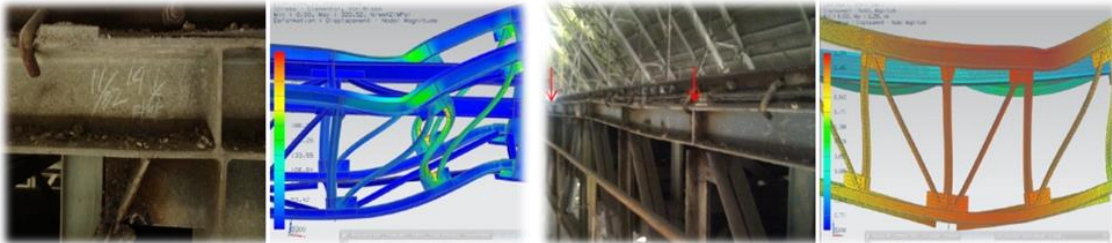
Pada tahap awal analisis telah dilakukan evaluasi kalkulasi pembebanan dan reaksi akibat beban yang terdeteksi pada desain lama, dimana hasil analisis yang outputnya data pembebanan dan defleksi balok menunjukkan 3 hal penting dari desain lama, yaitu:

1. Beban yang diterima profil berlebih sehingga mengakibatkan retak dan patah pada komponen penopang.
2. Desain balok atas dan bawah tidak sesuai terhadap beban yang diterima, sehingga

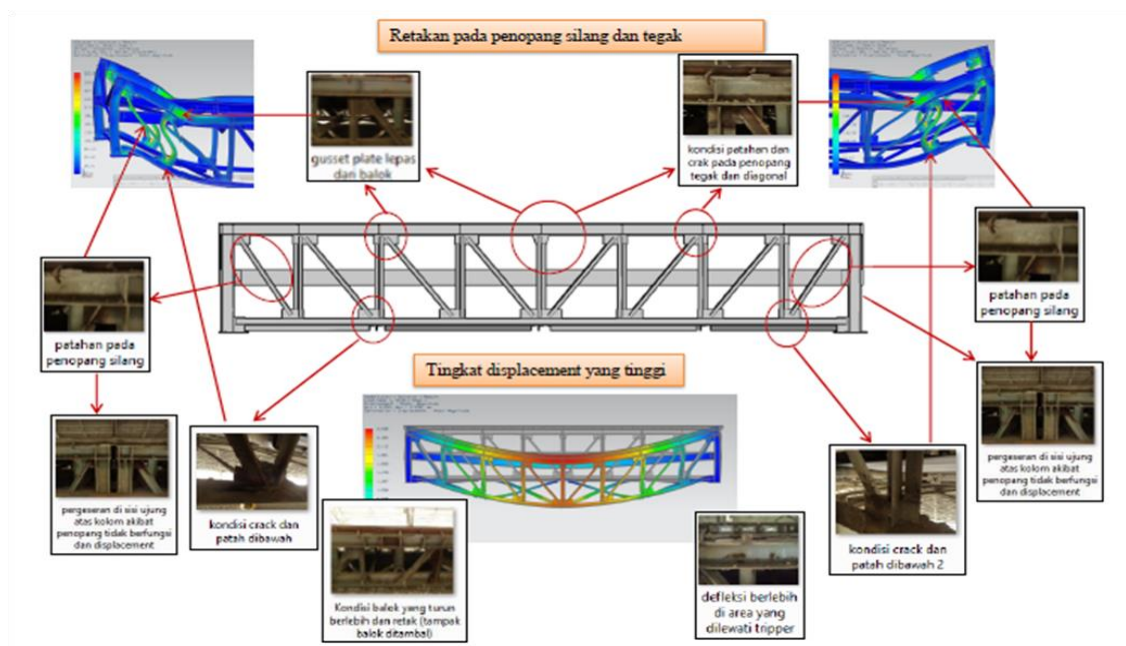
tingkat defleksi berlebih terhadap batas yang diijinkan.

3. Jika penopang tegak dan silang lepas, akan berakibat pada beban batang atas yang akan

mengalami beban berlebih akibat dari batang yang tidak mengalami sokongan. Sehingga berakibat pada tingkat lendutan yang semakin tinggi pula.



Gambar 5 Modeling kerusakan penopang silang dan pergeseran batang pada struktur girder.

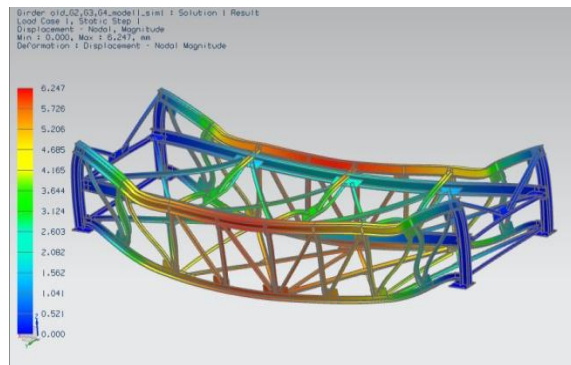


Gambar 6 Rangkuman evaluasi dari kerusakan girder.

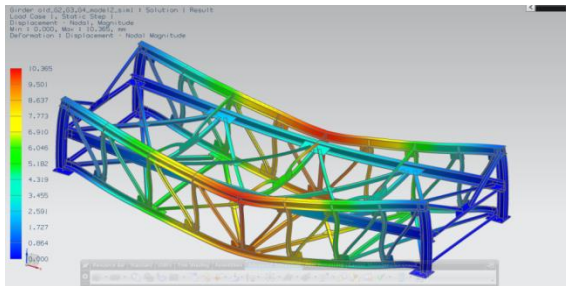
Penopang yang retak ataupun patah merupakan permasalahan yang dapat berakibat pada komponen batang atas dan bawah, sehingga perlu dipastikan kembali jenis profil penopang yang sesuai. Selain itu, perlu dilakukan pemilihan kembali untuk jenis batang atas dan bawah yang sesuai. Sehingga didapatkan satu kesatuan struktur girder yang aman dan memiliki kehandalan yang baik pada model pembebanan yang diinginkan. Gambar 5 dan 6 adalah hasil modeling kerusakan pada desain lama struktur girder.

Analisis pembebanan dinamik dan statik struktur girder direpresentasikan menjadi tiga model pembebanan terkait dengan defleksi struktur rangka girder. Model pembebanan 1, dimana struktur girder menerima beban dari kedua roda tripper pada jarak kedua sisi sama,

beban dinamik ketika material dicurahkan ditengah struktur, dan beban statik dari rel. Gambar 7 adalah ilustrasi kegagalan rangka struktur akibat pembebanan model 1.



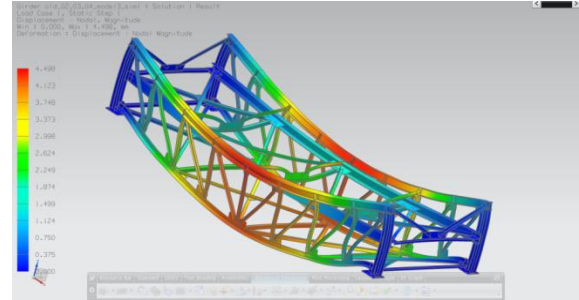
Gambar 7 Modeling kerusakan struktur pada model pembebanan 1.



Gambar 8 Modeling kerusakan pada model pembebanan 2.

Gambar 8 merupakan simulasi kerusakan pada kondisi model pembebanan 2, dimana struktur *girder* menerima beban dari satu roda *tripper* yang posisinya tepat di tengah batang utama struktur, dimana beban dinamik material bergerak dari ujung kiri ke kanan untuk dicurahkan diujung struktur, dan beban statik akibat adanya rel.

Simulasi kerusakan yang terjadi pada kondisi model pembebanan 3, dimana struktur *girder* menerima beban dari satu roda *tripper* dan posisi pindah ke sisi kanan, beban dinamik material yang bergerak merata dari ujung kiri ke kanan berlanjut pencurahan pada *girder* berikutnya, dan beban statik dari rel (gambar 9).



Gambar 9 Modeling kerusakan pada model pembebanan 3.

Tabel 1 Defleksi struktur *girder* pada tiga model pembebanan.

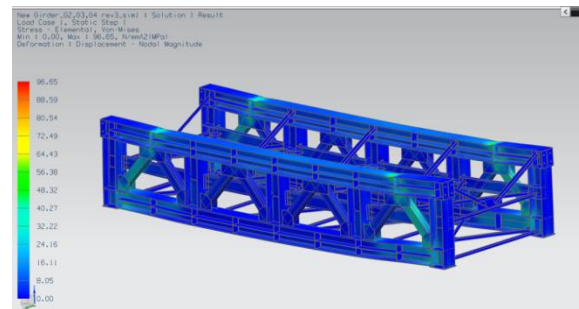
Metode	Defleksi vertikal (mm)			Syarat defleksi (mm)		Keterangan
	Model 1	Model 2	Model 3	Struktur span/1000	Batang utama span/700	
Perhitungan <i>angle weight</i>	7,671	13,266	15,959	8	11,43	Tidak aman
Elemen hingga	6,247	10,365	9,256	8	11,43	Tidak aman

Besarnya tegangan yang diterima struktur batang *girder* sebanding dengan tingkat defleksinya, hal ini berakibat penurunan (*displacement*) rangka semakin tinggi juga. Pada Tabel 1 terlihat bahwa besarnya defleksi maksimum pada struktur rangka berdasarkan perhitungan metode *angle weight* sebesar 15,959 mm, sedangkan dengan metode elemen hingga didapatkan sebesar 10,365 mm. Hasil menunjukkan bahwa tingkat defleksi berada diatas syarat defleksi struktur rangka yang diijinkan yaitu sebesar 8 mm. sedangkan syarat defleksi pada batang yang diijinkan sebesar 11,43 mm. Perhitungan membuktikan bahwa batang tidak cukup aman menahan tingkat *displacement* akibat beban yang diterima.

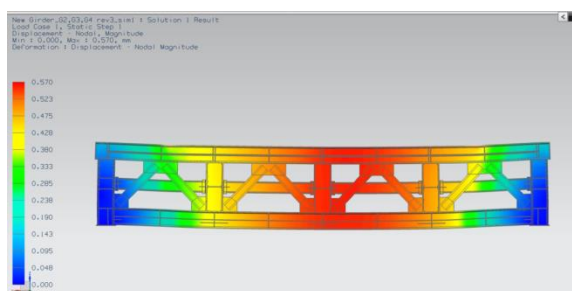
Berdasarkan hasil perhitungan dan evaluasi pada desain lama, maka perlu dilakukan kajian kembali terhadap pemilihan profil yang sesuai. Kajian tersebut antara lain melakukan pemilihan profil dengan cara menghitung tingkat tegangan dan defleksi. Selanjutnya melakukan perhitungan kelayakan profil desain lama yang dilakukan berdasarkan metode *LRFD*. Metode *LRFD* mensyaratkan pembebanan terfaktor yang didasarkan pada metode probabilitas struktur handal, sehingga

dapat dipastikan kehandalan desain struktur yang dihitung. Hasil yang dibandingkan kemudian sebagai dasar dalam pemilihan profil yang tepat.

Untuk mendapatkan jenis profil desain alternatif yang sesuai dengan pembebanan yang diterima pada komponen konstruksi *girder*, maka dilakukan pemilihan profil yang tepat untuk komponen penopang silang, penopang tegak, kolom, dan batang utama atas dan bawah. Pemilihannya berdasarkan beberapa alternatif desain dengan profil terpilih dan selanjutnya ditentukan desain baru didasarkan pada tegangan dan defleksi optimum dari salah satu desain alternatif (Gambar 10 dan 11).



Gambar 10 Tegangan pada struktur *girder* baru.



Gambar 11 Defleksi struktur girder pada model pembebanan 1.

Hasil dari analisis mekanika menunjukkan bahwa dihasilkan defleksinya jauh dibawah

batas yang disyaratkan yaitu 0,35 mm. Sedangkan hasil yang didapatkan dengan metode elemen hingga (*finite element*), defleksi yang terjadi pada desai baru sebesar 1,08 mm, sedangkan pada desain lama pada posisi yang sama sebesar 10,37 mm. Nilai-nilai desain baru menunjukkan penurunan defleksi hingga dibawah batas yang aman, yaitu berada dibawah batas defleksi yang ditetapkan 8 mm untuk struktur rangka dan 11,43 mm untuk syarat batang atas atau bawah seperti ditunjukkan tabel 2.

Tabel 2 Defleksi struktur girder alternatif terhadap tiga model pembebanan.

Metode	Defleksi vertikal (mm)			Syarat defleksi (mm)		Keterangan
	Model 1	Model 2	Model 3	Struktur span/1000	Batang utama span/700	
Perhitungan <i>angle weight</i>	0,181	0,350	0,310	8	11,43	Aman
Elemen hingga	0,570	1,054	1,077	8	11,43	Aman

Tabel 3 Perbandingan hasil analisis elemen hingga pada desain lama dan baru.

Model pembebanan	Defleksi Maks. (mm)	Teg. Potong Maks (MPa)	Teg. Utama Maks. (MPa)	Teg. Von Misses (MPa)	Keterangan	Batang beban kritis
Desain Lama						
Model 1	6,25	237,95	412,77	454,46	Tidak aman	Penopang silang
Model 2	10,37	184,49	314,28	352,71	Tidak aman	Penopang silang
Model 3	9,26	209,34	393,52	400,54	Tidak aman	Penopang silang
Desain Baru						
Model 1	0,57	51,72	57,08	96,65	Aman	Kolom bawah
Model 2	1,05	66,12	33,26	124,04	Aman	Kolom bawah
Model 3	1,08	76,66	68,50	143,39	Aman	Kolom bawah

Tegangan maksimum dan tegangan *von misses* yang didapatkan pada desain baru berkurang dan berada jauh dari batas kekuatan luluh materialnya. Hasil evaluasi menunjukkan tingkat *strees* terbesar pada penopang silang sudah tidak ada lagi, karena pembebanan bergeser pada kedua komponen kolom. Tingkat tegangan terbesar yang dihasilkan pada desain baru berada jauh dari tegangan luluh material, dimana hasil evaluasi dari analisa elemen hingga mengindikasikan nilai tegangan maksimum adalah 56,31 MPa, sedangkan tegangan *von misses*nya adalah 143,39 MPa. Dibandingkan terhadap perhitungan mekanika, tegangan maksimum yang didapatkan adalah 52,00 MPa. Sehingga jika nilai analisis ini dibandingkan dengan kekuatan material yang digunakan yaitu

SS400 sebesar 245 MPa, maka hasil yang didapatkan masih pada batas yang aman.

Pada desain lama, tegangan maksimum terjadi pada penopang silang dan melebihi batas plastis material. Sedangkan pada desain baru, tegangan maksimum masih aman di bawah batas plastis. Selain itu, pada desain baru, besar tegangan maksimum bergeser pada komponen kaki-kaki kolom. Sehingga secara keseluruhan, desain penopang, batang atas dan bawah, dan kolom berada pada batas aman dibawah 100 MPa. Pada Tabel 3 adalah hasil analisa elemen hingga pada desain lama dan baru dari 3 model pembebanan yang sama.

Pengecekan kehandalan dimaksudkan untuk mengetahui peluang kerusakan/

kegagalannya. Dari hasil perhitungan secara *LRFD*, sebenarnya sudah menjamin bahwa desain alternatif dihitung pada daerah kurva fungsi kerapatan probabilitas (*PDF*) yang aman. Walaupun sudah dipastikan tidak berada pada daerah kegagalan (*failure*), tentunya hasil perhitungan dapat dibuktikan kembali sebagai fungsi kendali terhadap kualitas desain rancangan yang telah dibuat. Keluaran dari pengecekan kehandalannya tentulah untuk mengetahui peluang kegagalan yang mungkin terjadi. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa peluang kegagalan desain baru sebesar $1:10^9$. Hasil tersebut menunjukkan hasil yang memuaskan dan menunjukkan indeks kehandalan 1, tepatnya 0,999999992636 didapatkan dari nilai indeks kehandalan desain β sebesar 5,7809.

Rancangan desain baru sudah sesuai dengan desain rancangan terhadap beban yang ditetapkan, hal ini dibuktikan dengan perhitungan mekanika, pengecekan kelayakan komponen dengan metode *LRFD* berdasarkan SNI 03-1729-2002, dan analisa elemen hingga (*finite element*). Dipastikan rancangan desain yang diputuskan adalah aman dan handal.

5. KESIMPULAN

Kerusakan yang sering terjadi pada struktur *girder* yaitu: retak dan patah pada penopang silang, kerusakan ini sering terjadi sehingga mengganggu operasi; tingkat pergeseran struktur *girder* ke bawah yang berlebih sehingga berakibat tingkat defleksi batang utama yang semakin tinggi.

Hasil perbandingan desain baru terhadap desain lama, menunjukkan pada desain lama, tegangan maksimum terjadi pada penopang silang dan melebihi batas plastis material. Sedangkan pada desain baru, tegangan maksimum masih aman di bawah batas plastis. Secara keseluruhan, desain penopang, batang atas dan bawah, dan kolom berada pada batas aman dibawah 100 MPa jauh dibawah tegangan luluh materialnya. Hasil analisis elemen hingga, tegangan maksimumnya 56,31 MPa, tegangan *von misses* 143,39 MPa. Berdasarkan hasil perhitungan mekanika, tegangan maksimumnya 52,00 MPa, sehingga jika kekuatan material SS400 yang digunakan 245 MPa, maka masih dalam batas yang aman.

Hasil perhitungan mekanika menunjukan bahwa nilai defleksi 0,35 mm jauh dibawah batas yang disyaratkan, sedangkan desain lama 15,96 mm. Sedangkan hasil analisis dengan metode elemen hingga, defleksi desain baru sebesar

1,08 mm dan desain lama 10,37 mm. Hasil yang didapat dari desain baru menunjukkan terjadinya penurunan defleksi dan berada pada batas defleksi yang ditetapkan yaitu 8 mm (SNI 03-1729-2002).

Untuk pengujian kehandalan struktur baru, didapatkan peluang kegagalannya sebesar $1:10^9$. Hasil tersebut menunjukkan hasil yang memuaskan dan menunjukkan indeks kehandalan 1, tepatnya 0,999999992636 didapatkan dari nilai indeks kehandalan desain β sebesar 5,7809.

Hasil studi yang dilakukan secara eksak baik secara perhitungan ataupun analisis elemen hingga (*finite element*) yang telah dilakukan, dan dibuktikan dengan kelayakan profil yang dihitung dengan metode *LRFD* berdasarkan SNI 03-1729-2002, membuktikan bahwa perancangan desain baru dapat menjawab permasalahan kerusakan *girder* lama. Dipastikan rancangan desain yang diputuskan adalah aman dan handal.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2000). *Products Handbook Structural Steel*. Continental Steel Pte Ltd. Singapore. January 2000.
- Ardhiansyah, F. (2010). Analisa Kehandalan Scantling Support Structure System Gas Processing Module FPSO Belanak Terhadap Beban Ekstrem. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan Institut Teknologi Surabaya. Surabaya.
- Badan Standar Nasional. (2002). SNI 03-1729-2002 : Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung. Jakarta.
- Gunawan, T., Margaret, S. (1988). Teori Soal dan Penyelesaian mekanika teknik jilid 2 Edisi 8. Delta teknik group. Jakarta.
- Japanese Industrial Standards. (1995). G 3101-1995: *Rolled steel for general structure*. Jepang.
- Jensen & Chenoweth. (1991). Kekuatan Bahan Terapan Edisi Keempat. Jakarta. Penerbit Erlangga.
- Kulak, G. L., Fisher, J. W., Struik, J. H. A. (2001). *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints Second Edition*. American Institute of Steel Construction, Inc. United States of America.
- Rosyid, D.M. (2007). Pengantar Rekayasa Keandalan. Surabaya. Airlangga University Press.

Rudenko, N. (1964). Mesin Pengangkat. Jakarta. Erlangga.

Setiawan, A. (2008). Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD (Berdasarkan SNI 03-1729-2002). Jakarta. Penerbit Erlangga.