

ANALISIS TEGANGAN AKIBAT PEMBEBANAN STATIS PADA DESAIN CARBODY TeC RAILBUS DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Endi Sutikno

Teknik Mesin, Universitas Brawijaya
Jl. MT. Haryono 167 Malang 65145
E-mail : sutiknoendi@yahoo.co.id

Abstract

Railbus is one type of vehicle operated for a short distance. Although that operated on the rail, construction rail bus more likely to match construction with small size busses and passengers abit because the porpuse of use that speed is faster than regular train, railbus which has several different design of the produc of the PT KIA previously requere the precence of the force to be know security testing products to be produced, railbus should be able to accept the burden of both passenger as well as from its own weight, including load time of the coupling between the carriages.

Research conducted at carbody TeC railbus in the three different loading cases, namely case 1, which stimulated loading occuring at the time railbus carbody TeC is in the push condition, case 2 represents the state loading on the carbody TeC railbus during compression on the other locomotive on the coupling process railbus done to connect with other locomotives, and case 3 which represents the state loading carbody TeC railbus when withdrawal of the oher locomotives when railbus not operated of a simulation, and the known distribution of the stress that occurs in TeC railbus carbody construction design on static loading distribution and the result of the stress that occurs in all three cases, ie the largest stress value in the first case occured in an area with a stress value frontpart 157,883Mpa, in the second case occured in an area frontpart with a stress value of 193,033Mpa, and the thirdcase, a stress of 140,615Mpa occurs in area crossbeam of the underframe. The third stress occurs in all three cases remained at the limit of material strength, so it can inferred TeC railbus carbody construction design is consider capable receiving a load that will be accepted railbus during operation.

Keywords : Stress Analysis, Railbus, Finite Elemen Method

PENDAHULUAN

Dalam perkembangan alat transportasi darat yang terus berlangsung karena mobilisasi masyarakat yang semakin dinamis, PT INKA terus meluncurkan produk-produk baru yang disesuaikan dengan kebutuhan transportasi umum yang cepat dan terjangkau. Produk yang akhir-akhir ini baru diluncurkan adalah *railbus*. *Railbus* merupakan kombinasi dari kontruksi kereta rel dan bis, dengan biaya produksi yang lebih rendah dan waktu produksi yang lebih cepat.

INKA akan meluncurkan *railbus* yang memiliki beberapa perbedaan desain dari produk sebelumnya, sehingga diperlukan adanya suatu pengujian kekuatan agar dapat diketahui keamanan produk baru yang akan dihasilkan. *Railbus* harus mampu menerima

beban baik dari penumpang maupun dari beratnya sendiri, termasuk beban saat dilakukan kopel antar kereta.

Pengujian menggunakan bantuan *software* berbasis elemen hingga yang telah terbukti dapat mendekati hasil penelitian eksperimental digunakan untuk dapat mempercepat proses perencanaan. Pengujian semacam ini telah banyak digunakan kalangan industri dengan produk kontruksi termasuk PT. INKA.

Sebelumnya telah dilakukan pengujian oleh LPPM ITB mengenai analisis kekuatan kontruksi *carbody* TC, penelitian ini menghasilkan kesimpulan bahwa desain *carbody* TC memiliki kekuatan yang baik, tetapi disarankan adanya sedikit perbaikan desain pada *bolster* karena bagian ini mendekati batas kekuatan material yang

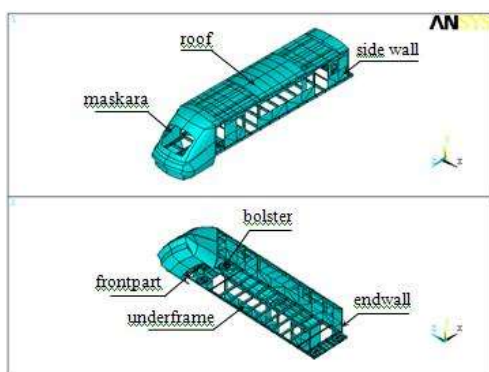
digunakan. Penelitian yang dilakukan oleh LPPM ITB mendasari penelitian ini karena *carbody* yang telah diuji hanya *carbody* TC dan belum dilakukan pengujian pada *carbody* TeC (gerbong depan) yang membawa beban paling besar dari seluruh kereta.

Analisis pada penelitian meliputi pertama sebaran dan besar tegangan yang terjadi pada kasus pembebanan 1, kedua sebaran dan besar tegangan yang terjadi pada kasus pembebanan 2 dan yang terakhir sebaran dan besar tegangan yang terjadi pada kasus pembebanan 3 pada desain *Carbody Trailer Engine Car Railbus*. Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga untuk mengetahui tegangan yang terjadi sehingga dapat diketahui apakah desain telah memenuhi syarat kekuatan material untuk menerima beban statis atau tidak.

TINJAUAN PUSTAKA
Railbus

Railbus merupakan salah satu alat transportasi jarak dekat yang menggunakan rel sebagai jalurnya. Meskipun menggunakan rel, struktur badan dari *railbus* lebih cenderung menyamai struktur bis yang ringan dengan jumlah penumpang sedikit. Satu *trainset railbus* terdiri dari tiga gerbong, yaitu *TeC (Trailer Engine Car)*, *TC (Trailer Car)* dan *MC (Motor Car)*. *Railbus* memiliki sistem propulsi *push-pull* yang memungkinkan *railbus* berjalan maju dan mundur.

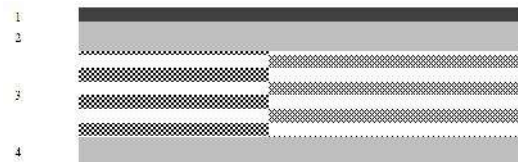
Carbody Railbus



Gambar 1 – Gambar-gambar *Carbody* TeC *Railbus*

Carbody merupakan kerangka dari badan kereta yang tersusun dari rangka *beam* dan plat. *Carbody* terdiri dari *Roof*, *Mascara*, *Side Wall*, *EndWall*, *Front Part*, *Underframe*, dan *Bolster* seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.

Material Carbody TeC Railbus



- 1 1.53 mm AL : Aluminium
- 2 1.43 mm CSM : Chopped Strand Mat 300 gr/m² 2 layer + resin polyester 157 bqtu yukalac
- 3 9.63 mm CORT : Core DIAB Divinycell II-60
- 4 1.38 mm CSM : Chopped Strand Mat 300 gr/m² 2 layer + resin polyester 157 bqtu yukalac

Sumber : Laporan Penelitian Kekuatan Konstruksi Railbus 2008 LPPM ITB

Gambar 2 – Susunan Material *Hybrid Panel*

Material yang digunakan pada *carbody railbus* adalah *sandwich panel* empat lapis yang direkatkan dengan lem khusus. Untuk *under frame*, *front part* dan rangka *roof*, *side wall* dan *end wall*, digunakan material baja SS400

Tegangan

Secara sederhana tegangan dapat didefinisikan sebagai besaran gaya yang bekerja pada satu satuan luas permukaan benda yang dikenakan oleh gaya. Secara matematis definisi tegangan dapat dituliskan sebagai berikut [1] :

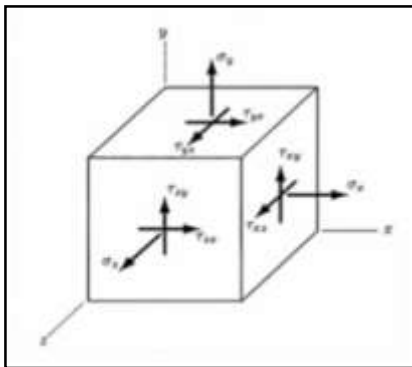
$$\sigma = \frac{P}{A} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

- keterangan P = gaya [N]
- A = luasan permukaan yang dikenakan gaya [mm²]

Tegangan dibagi menjadi dua macam, yaitu tegangan normal dan tegangan geser. Tegangan normal adalah tegangan yang bekerja secara tegak lurus pada permukaan benda (σ). Tegangan geser adalah

tegangan yang bekerja sejajar dengan permukaan benda (τ).

Dalam kasus tegangan tiga dimensi, sebuah elemen tegangan akan menderita tegangan-tegangan normal pada semua permukaannya. Tegangan-tegangan geser memiliki dua buah indeks bawah, dimana yang pertama menunjukkan bidang tegangan bekerja dan yang kedua mengidentifikasi arahnya dalam bidang tersebut [2].



Gambar 3 – Komponen Tegangan

Dari kesetimbangan elemen dapat dibuktikan bahwa tegangan-tegangan geser yang bekerja pada bidang-bidang tegak lurus dan diarahkan tegak lurus pada garis perpotongan bidang-bidang ini besarnya sama. Sehingga akan berlaku hubungan sebagai berikut [1]:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

Keterangan τ = tegangan geser

Tegangan-tegangan utama merupakan tiga akar riil dari persamaan pangkat tiga berikut [1]:

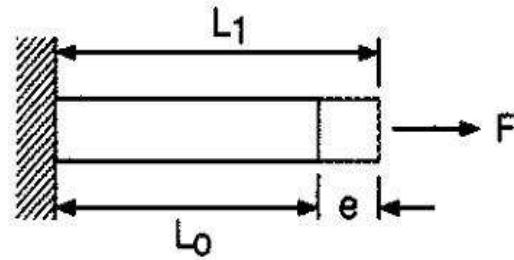
$$\sigma^3 - A\sigma^2 + B\sigma - C = 0$$

Dengan :

$$A = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$B = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2$$

$$C = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{xz}\tau_{yz} - \sigma_x\tau_{xy}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{yz}^2$$



Gambar 4 – Perubahan Bentuk Karena Beban Tarik

Untuk memperoleh satuan deformasi atau regangan (ϵ) adalah dengan membagi perpanjangan (δ) dengan panjang mula-mula (L_0) dari suatu specimen. Regangan dapat dirumuskan [1]:

$$\epsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0}$$

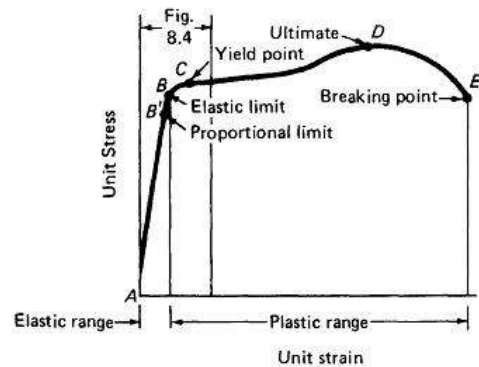
keterangan : ϵ = regangan

L_0 = panjang awal [mm]

L_1 = panjang akhir [mm]

δ = perubahan panjang [mm]

Hubungan tegangan dan regangan dapat ditunjukkan dalam gambar berikut ini [3]:



Gambar 5 – Kurva Tegangan Regangan Untuk Material Baja AISI 1020

Rasio antara tegangan dan regangan normal dapat disebut Modulus Young atau Modulus Elastisitas, merupakan tangen dari sudut yang terbentuk antara garis hubungan tegangan dan regangan dengan garis sumbu regangan dan dinotasikan :

$$E = \tan \theta = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

keterangan :

E = modulus elastisitas [kg.mm/s²]

θ = sudut antara garis hubungan regangan dengan garis sumbu regangan [°]

Sedangkan rasio antara tegangan dan regangan geser disebut Modulus Geser atau Modulus Kekakuan, dinotasikan:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

dengan :

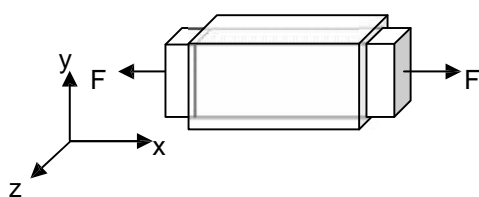
G = modulus elastisitas geser [kg.mm/s²]

τ = tegangan geser [kg.mm/s²]

γ = regangan geser = $\tan \alpha = \frac{\delta}{l}$

Konstanta kesebandingan antara regangan aksial (arah sumbu x) dengan kontraksi (arah y dan z) disebut dengan Poisson's Ratio. Persamaan konstanta yang bekerja pada tegangan di bawah batas proporsional ini adalah [1]:

$$-v = \frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}}$$



Gambar 6 – Perubahan Bentuk Karena Beban Tarik Pada Arah Lateral

Kontraksi dalam arah lateral, y dan z adalah sama yakni :

$$\epsilon_y = -v \epsilon_x = -\frac{v}{E} \sigma_x$$

$$\epsilon_z = -v \epsilon_x = -\frac{v}{E} \sigma_x$$

Regangan normal yang disebabkan oleh σ_y dan σ_x sama dengan regangan yang disebabkan oleh σ_x . Regangan normal karena adanya σ_y adalah:

$$\epsilon_x = \epsilon_z = -v \epsilon_y = -\frac{v}{E} \sigma_y$$

Sedangkan regangan normal yang disebabkan oleh σ_z

$$\epsilon_x = \epsilon_y = -v \epsilon_z = -\frac{v}{E} \sigma_z$$

Adanya tanda negatif pada persamaan di atas menunjukkan pengurangan dimensi (kontraksi) dari benda.

Hubungan tegangan dan regangan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - v(\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - v(\sigma_z + \sigma_x))$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - v(\sigma_x + \sigma_y))$$

Sehingga akan dihasilkan persamaan:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - v^2} (\epsilon_x + v \epsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - v^2} (\epsilon_y + v \epsilon_x)$$

Bila persamaan diatas diselesaikan maka akan menghasilkan:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1 - v)(1 + 2v)} ((1 - v) \epsilon_x + v(\epsilon_y + \epsilon_z))$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1 + v)(1 - 2v)} ((1 - v) \epsilon_y + v(\epsilon_z + \epsilon_x))$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1 - v)(1 - 2v)} ((1 - v) \epsilon_z + v(\epsilon_x + \epsilon_y))$$

Regangan geser (γ) adalah pergeseran elemen akibat tegangan yang terjadi yang didefinisikan sebagai [4] :

$$\gamma_{xy} = \Delta \angle BAD - \Delta \angle B'A'D'$$

Regangan geser dinyatakan sebagai :

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

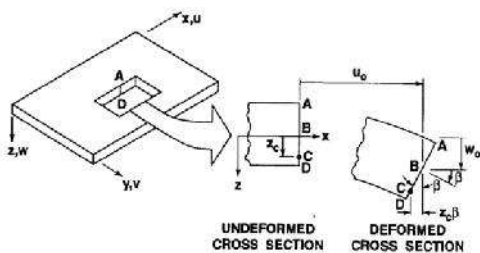
$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G}$$

Hubungan antara modulus elastisitas, modulus geser dan poisson's ratio ditulis sebagai [4]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Konsep Tegangan-Regangan Pada Material Komposit laminat

Yang dimaksud dengan komposit adalah suatu material yang tersusun oleh sesuatu yang berbeda atau zat yang berbeda. Sedangkan komposit laminat adalah material yang terdiri lapisan-lapisan dua material atau lebih yang direkatkan. Menurut hipotesa Kirchhoff, jika laminat tipis, suatu garis lurus yang tegak lurus dengan permukaan tengah laminat akan tetap tegak lurus dengan permukaan tengah laminat saat laminat berdeformasi, sehingga $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$, dan $\epsilon_z = 0$.



Gambar 7 – Deformasi Geometri Pada Bidang x-z

$$u_z = u_0 - z_c \beta$$

- keterangan: u_c = perpindahan titik C
 u_0 = perpindahan titik B
 z_c = jarak antara titik C dengan permukaan tengah
 β = slope dari permukaan tengah laminat

karena pada deformasi garis ABCD tetap tegak lurus dengan permukaan tengah, maka

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

jadi perpindahan pada tiap titik z adalah

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

dan perpindahan pada sumbu y adalah

$$v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

untuk regangan yang kecil (elastisitas linier), regangan yaitu

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Sehingga regangan dapat juga dirumuskan sebagai berikut:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}$$

Atau

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

yang mana regangan permukaan tengah adalah :

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix}$$

dan kelengkungan permukaan tengah adalah:

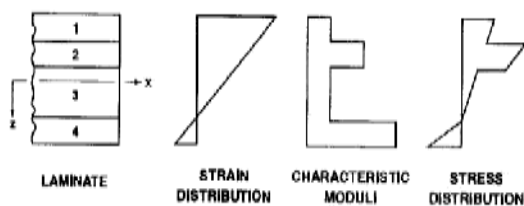
$$\begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 w_o}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_o}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_o}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}$$

Maka rumusan tegangan menjadi:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

dengan: k = nomor lapisan
[Q] = matriks elastisitas

Karena matriks elastisitas dari tiap lapisan berbeda-beda, maka tegangan yang dimiliki oleh lapisan juga berbeda-beda.



Gambar 8 – Variasi Hipotesis Tegangan dan Regangan Pada Ketebalan Laminat

Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah salah satu metode numerik yang digunakan untuk

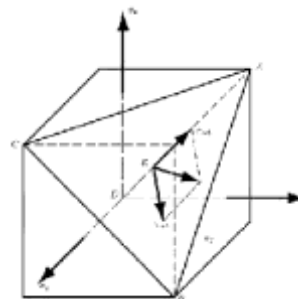
menyelesaikan permasalahan fisika dengan persamaan diferensial atau teori energi [5]. Berikut adalah langkah-langkah dari penghitungan menggunakan metode elemen hingga:

1. Diskretisasi dan pemilihan elemen
2. Memilih fungsi pendekatan
3. Menurunkan persamaan matriks kekakuan [k]
4. Menghitung matriks beban total
5. Menyusun matriks kekakuan global [K]
6. Menghitung perpindahan total
7. Mencari regangan dan tegangan serta interpretasi hasil.

Teori Kegagalan

Secara mendasar kegagalan (*failure*) dari suatu struktur dinyatakan bila struktur tidak dapat berfungsi lagi dengan baik untuk menerima pembebanan sesuai dengan yang direncanakan.

1. *The Maximum Principal Stress Theory*
Teori ini menyebutkan bahwa Kegagalan akan terjadi saat tegangan utama mencapai tegangan luluh (S_y).
2. *The Maximum Shear Stress Theory*
Kegagalan dicapai saat tegangan geser maksimum mencapai separuh dari tegangan luluh ($\frac{1}{2}S_y$).
3. *The Maximum Principal Strain Theory*
Kegagalan dicapai saat regangan utama maksimum mencapai regangan luluh (S_y/E).
4. *The Maximum Strain Energy Theory*
Kegagalan dicapai saat energi potensial (energy regangan) per unit volume mencapai $\frac{1}{2} S_y^2/E$.
5. *The Maximum Energy of Distortion Theory (Von Mises Theory)*



Gambar 9 – Tegangan Oktahedral

Teori kegagalan ini menyatakan bahwa luluh akan terjadi bila tegangan *octahedral* maksimum yang terjadi melebihi harga limit yang diketahui dari hasil tes tarik material dengan beban standar.

$$\sigma_{oct(limit)} \leq \frac{\sqrt{2}}{3} S_{yy}$$

METODE PENELITIAN

Metode yang Digunakan

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian eksperimental semu (*quasi experimental research*), metode ini bertujuan untuk memperoleh informasi yang merupakan perkiraan bagi informasi yang diperoleh dalam eksperimen nyata.

Variabel Penelitian

Varibel-variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini meliputi 3 variabel yaitu bebas, terikat dan terkontrol. Variabel bebas yang digunakan yaitu pembebanan *Carbody Railbus* yang diperoleh dari penumpang dan beban lain. Untuk variabel terikat yang diamati dalam penelitian yaitu distribusi tegangan pada *Carbody Railbus*. Sedangkan variabel terkontrol pada penelitian ini adalah geometri dan dimensi *Carbody Railbus*.

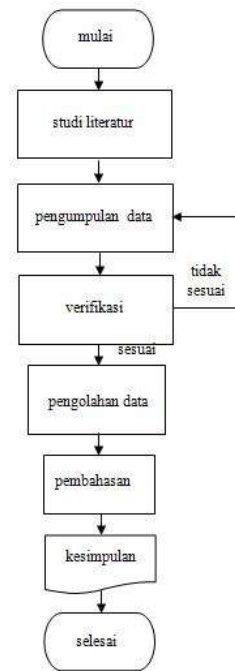
Peralatan Penelitian

Penelitian menggunakan hardware dan software. Hardware yang terdiri dari seperangkat komputer dengan spesifikasi prosessor Intel Celeron, 512 MB RAM, memory 120 GB, 128 MB VGA. Untuk software menggunakan 3 buah software aplikasi yaitu Autocad 2007 untuk pembacaan geometri model, Catia CADAM Drafting untuk pembacaan geometri model dan ANSYS 11.0 untuk penggambaran finite element model dan simulasi.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT. INKA Madiun dan Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang, dengan waktu pelaksanaan pada bulan September-Oktober 2009.

Prosedur Penelitian



Gambar 10 – Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah penjelasan dari langkah-langkah yang telah digambarkan lewat diagram alir:

1. Mulai
Sebelum penelitian dilakukan, penulis terlebih dahulu menemukan latar belakang, tujuan, dan manfaat penelitian.
2. Studi Literatur
Studi literatur dilakukan dengan membaca sumber-sumber informasi berupa buku, jurnal dan literatur lainnya yang berhubungan dengan pembahasan.
3. Pengumpulan Data
Metode yang digunakan yaitu dengan konsultasi atau mengajukan pertanyaan dan permintaan data secara langsung pada pihak yang berkaitan dengan desain produk yang akan diteliti.
4. Verifikasi
Metode yang akan digunakan terlebih dahulu diverifikasi untuk menentukan apakah metode dapat diterima dan bisa digunakan.

5. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan simulasi *software*. Berikut adalah langkah yang harus dilakukan untuk simulasi:

a. Preprocessing

Tahap ini dibagi menjadi:

a. Modeling

Geometri dari model carbody railbus dibuat dalam *modeling* ANSYS. Model dibuat sesederhana mungkin tanpa mengubah geometri struktur secara signifikan. Model carbody railbus dibuat dalam setengah model karena terdapat kesimetrian pada bentuk geometrinya.

b. Element Type

Tipe elemen yang dipilih sesuai dengan model carbody dari segi material dan geometri. Tipe elemen yang digunakan yaitu:

1. Shell63

Shell63 digunakan untuk memodelkan *underframe*. Profil yang dimiliki oleh cross beam dan side beam dibentuk menggunakan shell.

2. Shell99

Material laminat yang dimiliki oleh railbus dan digunakan untuk roof dan wall, dimodelkan menggunakan elemen yang khusus diperuntukkan untuk memodelkan material laminat. Shell99 merupakan salah satu elemen untuk memodelkan laminat yang akan digunakan dalam penelitian ini.

3. Beam4

Digunakan untuk memodelkan rangka dari wall dan roof.

c. Real Constant

Masukan real constant mencakup ketebalan untuk shell, luas area potongan, dan sebagainya.

d. Material Properties

Dalam penelitian ini dilakukan pembebanan statis dengan material linear isotropik dan linear orthotropik, maka material properties yang diperlukan yaitu :

1) Densitas

2) Modulus Elastisitas

3) Poisson's Ratio E_y untuk material linear isotropik, E_y dan E_x untuk material linear orthotropik.

b. Meshing

Meshing atau deskretisasi model diperlukan untuk membagi struktur menjadi elemen-elemen berhingga yang digunakan untuk perhitungan.

c. Penerapan Kondisi Batas

Kondisi batas yang dimaksud disini mencakup beban yang diberikan (gaya atau tekanan) dan tumpuan.

d. Solusi

Proses solving merupakan proses saat perhitungan atau dilakukan, iterasi dilakukan berulang sampai ditemukan nilai yang paling mendekati.

e. Postprocessing

Penampilan hasil pada proses viewing result untuk analisis statis berupa gambar dan tabel.

6. Pembahasan

Keluaran akan dibahas untuk mengecek apakah tegangan yang ditanggung oleh model akibat pembebanan masih bisa diterima dan masih dalam batas kekuatan material.

7. Kesimpulan

Setelah penelitian telah selesai dilakukan dan dibahas, ditarik kesimpulan akhir yang diambil dari hasil penelitian yang dilakukan, sesuai dengan tujuan awal dilakukannya penelitian.

8. Selesai

Setelah penelitian selesai sampai dengan kesimpulan, penelitian dilaporkan dalam bentuk tertulis.

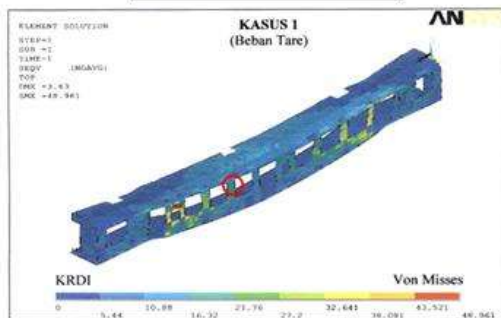
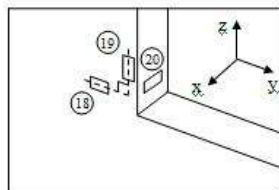
Data Verifikasi

Metode simulasi *software* pada railbus mengacu pada analisis oleh Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur BPPT atas permintaan PT. INKA sebelumnya. Salah satu *carbody* kereta yang pernah diuji adalah KRDI (Kereta Rel Diesel Indonesia). Pengujian yang dilakukan pada KRDI dilakukan dalam dua tahap, yaitu:

- a. Pengujian menggunakan simulasi software ANSYS.
- b. Pengukuran menggunakan strain gauge pada titik-titik yang dianggap memiliki tegangan tinggi dan beresiko yang didapatkan dari pengujian menggunakan software.
Berikut sebagian data yang didapat dari pengukuran suatu titik:

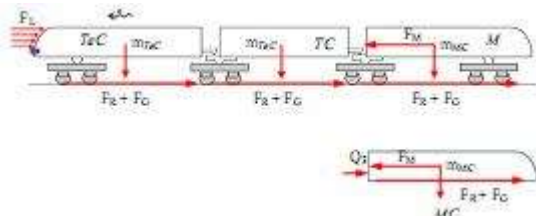
Tabel 1 - Hasil Pengukuran Regangan pada Pengujian KRDI

Nomor Strain Gauge	Regangan Terukur ($\mu\epsilon$)	Tegangan Langsung (MPa)
18	-61	-12,81
19	-62	-13,02
25	-26	-5,46



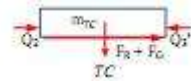
Gambar 11 – Verifikasi KRDI

1. Kasus 1



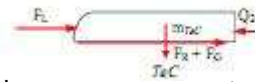
Keseimbangan gaya yang terjadi pada MC

$$m_{MC} \cdot a = F_M - F_R - Q_3$$



Keseimbangan gaya yang terjadi pada TC

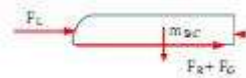
$$m_{TC} \cdot a = Q_3' - F_R - Q_2$$



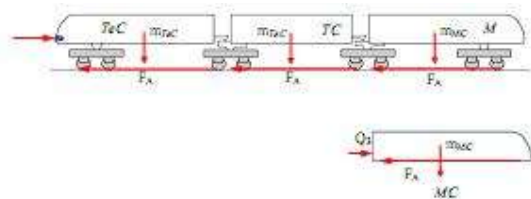
Keseimbangan gaya yang terjadi pada TC

$$m_{TeC} \cdot a = Q_2' - F_L - F_R - F_G$$

Gaya yang akan membebani *carbody* *TeC* adalah F_L , F_R , dan F_G . Gaya Q_2' berpengaruh pada percepatan yang dimiliki Railbus tetapi tidak berpengaruh pada konstruksi *carbody* itu sendiri. Sehingga pembebanan yang akan diterima oleh *carbody* adalah sebagai berikut:



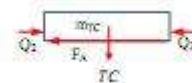
2. Kasus 2 (Pemasangan kopel)



Keseimbangan gaya yang terjadi pada MC Percepatan saat diberikan gaya kompresi adalah nol karena kereta dalam keadaan diam, seluruh gaya yang diberikan saat kompresi ditanggulangi oleh rem penuh yang berkerja, karena roda dalam keadaan tidak bisa berputar sama sekali, maka yang berkerja untuk melawan gaya kompresi bukanlah perlawananan gelundung (F_G) tapi gaya adhesi yang dihasilkan dari gesekan antara roda dengan rel.

$$m_{MC} \cdot a = Q_3 - F_A$$

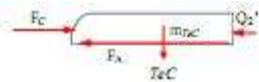
$$a = 0 \Rightarrow Q_3 = F_A$$



Keseimbangan gaya yang terjadi pada TC

$$m_{TC} \cdot a = Q_2 - F_R - F_C - Q_3'$$

$$a = 0 \Rightarrow Q_2 - F_A + Q_3'$$



Keseimbangan gaya yang terjadi pada TC

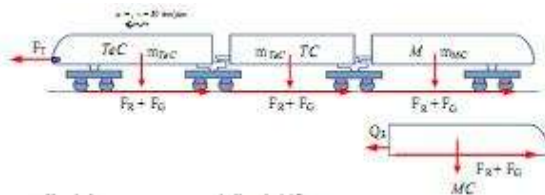
$$m_{TeC} \cdot a = -F_A - Q_2'$$

$$a = 0 \Rightarrow Q_2' = F_C - F_A$$

Gaya yang akan membebani *carbody* *TeC* adalah F_C . Sehingga pembebanan yang akan diterima oleh *carbody* adalah sebagai berikut:



3. Kasus 3



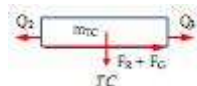
Keseimbangan gaya yang terjadi pada MC

$$m_{MC} \cdot a = F_C + F_R - Q_3$$

Besarnya Q_3 saat lokomotif penarik mencapai kecepatan maksimum 50 km/jam yaitu:

$$m_{MC} \cdot 0 = F_C + F_R - Q_3$$

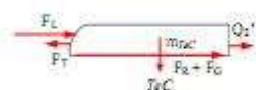
$$Q_3 = F_{C\ MC} + F_{R\ MC}$$



Keseimbangan gaya yang terjadi pada TC

$$m_{TC} \cdot a = Q_2 - F_C - F_R - Q_3'$$

$$Q_2 = F_{C\ TC} + F_{R\ TC} + Q_3'$$



Keseimbangan gaya yang terjadi pada TC:

$$m_{TeC} \cdot a = F_T - Q_3' - F_L - F_{R\ TeC} - F_{C\ TeC}$$

Gaya yang akan membebani *carbody* *TeC* adalah sebagai berikut, Besar dari masing-masing gaya yang membebani *carbody* *TeC* *Railbus* yaitu:

1. Perlawanan angin (F_L)

Perlawanan angin didapatkan dari [6]:

$$F_L = \frac{\rho}{2} \cdot c_L \cdot A_{norm} \cdot v^2$$

keterangan:

- F_L = perlawanan angin [N]
- ρ = densitas udara [kg/m³]
- c_L = koefisien drag
- A_{norm} = area frontal normal [m²]
- v = kecepatan kereta [m/s]

Koefisien drag adalah konstanta yang mempengaruhi besarnya perlawanan angin. Besar dari koefisien drag yaitu 0,5 – 0,7 bergantung pada bentuk kereta, yaitu konvensional, setengah licin dan licin sempurna (bentuk arus) [7].

Dengan densitas udara pada kondisi normal adalah 1,183 kg/m³, koefisien drag 0,6 untuk bentuk setengah licin, luas area normal frontal sebesar 9417600 m², kecepatan kereta maksimum 100 km/jam atau 27,78 m/s. Perlawanan angin yang dibebankan pada *mascara* *Railbus* yaitu:

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{\rho}{2} \cdot c_L \cdot A_{norm} \cdot v^2 \\ &= \frac{1,183}{2} \cdot 0,6 \cdot 9,4176 \cdot 27,78^2 \\ &= 1308,21N \end{aligned}$$

Sedangkan pada kecepatan 50 km/jam perlawanan angin menjadi

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{\rho}{2} \cdot c_L \cdot A_{norm} \cdot v^2 \\ &= \frac{1,183}{2} \cdot 0,6 \cdot 9,4176 \cdot 13,89^2 \\ &= 644,84 N \end{aligned}$$

2. Perlawanan gelundung (F_R)

Perlawanan gelundung didapatkan dari rumus [7]:

$$F_R = c_1 \cdot c_2 \cdot W$$

keterangan:

F_R = perlawanan gelundung [N]

c_1 = 1, untuk baan yang terpelihara dengan baik

c_2 = 0,25 – 0,35

W = berat kereta [kg]

Jadi perlawanan gelundung pada gerbong MC yaitu:

$$\begin{aligned} F_R &= c_1 \cdot c_2 \cdot W \\ &= 1 \cdot 0,35 \cdot 250688 \\ &= 87740,8 \text{ kg} \end{aligned}$$

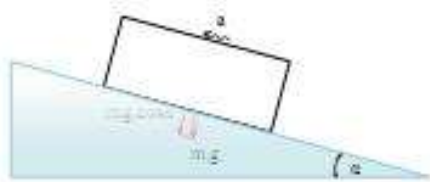
Jadi perlawanan gelundung pada gerbong TC yaitu:

$$\begin{aligned} F_R &= c_1 \cdot c_2 \cdot W \\ &= 1 \cdot 0,35 \cdot 131443 \\ &= 46005,05 \text{ kg} \end{aligned}$$

Jadi perlawanan gelundung pada gerbong TeC yaitu:

$$\begin{aligned} F_R &= c_1 \cdot c_2 \cdot W \\ &= 1 \cdot 0,35 \cdot 243648 \\ &= 85276,8 \text{ kg} \end{aligned}$$

3. Perlawanan tanjakan (F_G)



Penggolongan jalan kereta api berdasarkan besarnya tanjakan yaitu [7]:

1. Baban datar ; untuk tanjakan sampai 10‰
2. Baban pegunungan ; untuk tanjakan lebih dari 10‰

Rumusan perlawanan tanjakan yaitu [7]:

$$\begin{aligned} F_g &= m \cdot g \cdot \sin \alpha \\ &= m \cdot g \cdot i \end{aligned}$$

keterangan :

F_g = perlawanan tanjakan [N]

m = massa gerbong TeC [kg]

g = gravitasi (9.8 m/s²)

α = sudut tanjakan

i = besar tanjakan [‰]

Perlawanan tanjakan yang diterima oleh gerbong MC Railbus yaitu:

$$\begin{aligned} F_g &= m \cdot g \cdot \frac{10}{1000} \\ &= 25062 \cdot 9,8 \cdot \frac{10}{1000} \\ &= 2456,1 \text{ N} \end{aligned}$$

Perlawanan tanjakan yang diterima oleh gerbong TC Railbus yaitu:

$$\begin{aligned} F_g &= m \cdot g \cdot \frac{10}{1000} \\ &= 17480 \cdot 9,8 \cdot \frac{10}{1000} \\ &= 1713,04 \text{ N} \end{aligned}$$

Perlawanan tanjakan yang diterima oleh gerbong TeC Railbus yaitu:

$$\begin{aligned} F_g &= m \cdot g \cdot \frac{10}{1000} \\ &= 24844 \cdot 9,8 \cdot \frac{10}{1000} \\ &= 2434,7 \text{ N} \end{aligned}$$

4. Berat sendiri dan perlengkapan *carbody* TeC

Getaran yang terjadi saat Railbus beroperasi akan menyebabkan terjadinya percepatan yang akan memperbesar beban yang harus diterima oleh *carbody*

$$F_{vg} = m \cdot g \cdot c_{getaran}$$

keterangan:

m = Massa aksesoris dan perlengkapan yang dibebankan pada underframe TeC [Kg]

$C_{getaran}$ = Konstanta percepatan karena gerakan vertikal

g = Percepatan gravitasi [m/s^2]

Beban yang diberikan pada struktur dikalikan dengan konstanta percepatan vertikal yang diakibatkan oleh getaran yang dihasilkan saat kereta berjalan yaitu 0,3 g [8] jadi konstanta pengali percepatan adalah 1,3.

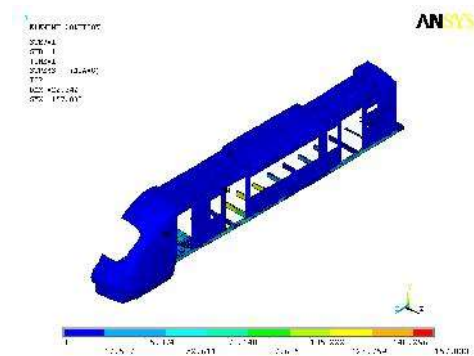
Tabel 2 – Beban dan Tempat Pembebanan

Tempat Pembebanan	Beban dan perlengkapan	Massa [kg]	Berat [N]	Berat karena getaran (m.g.C _{getaran}) [N]
Underframe	• Engine	3200	31360	40768
	• Alternator	1500	14700	19110
	• Fuel Tank	300	2940	3822
	• Battery Box	150	1470	1911
	• CAC	240	2352	3057,6
	• SIV	75	735	955,5
	• Brake Resistor	101	989,8	1286,74
	• Output Filter	198	1940,4	2522,52
	• Braking Unit	200	1960	2548
	• Aksesoris Carbody	6627,5	64949,5	84434,35
	• Penumpang	4560	44688	58094,4
• Coupler	1000	9800	12740	
	total	9101,5	89194,7	115953,11
Roof	1. Radiator	600	5880	7644
	2. AC	220	2156	2802,8
	total	9921,5	97230,7	126399,9

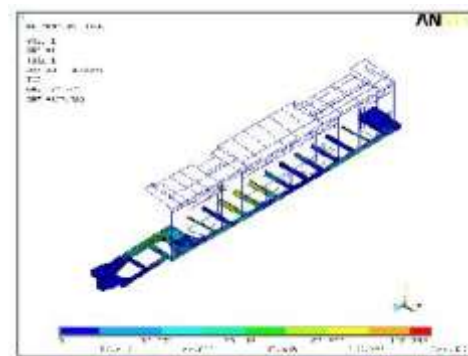
Hasil Simulasi

Keluaran yang diambil dari simulasi adalah sebaran dan besar tegangan yang dihasilkan, dari sebaran dan besar tegangan tersebut, struktur dianalisis kekuatannya dari segi material, apakah masih dalam batas aman kriteria *yield* atau tidak. Struktur *railbus* yang terdiri dari beberapa macam material sekaligus akan dianalisa menggunakan kriteria kegagalan yang sesuai dengan jenis materialnya yang ulet, yaitu menggunakan Teori Kegagalan Von Mises. Ketiga kasus yang disimulasikan mendapatkan hasil yang berbeda, berikut adalah keluaran dari ketiga simulasi tersebut.

1. Kasus I

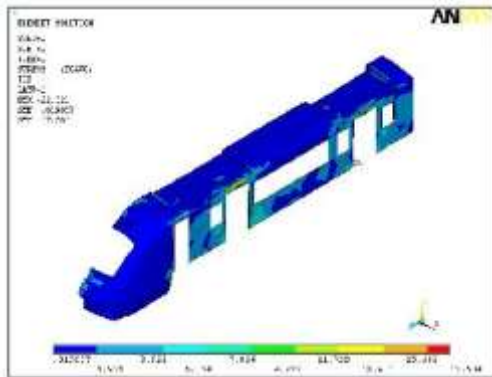


Gambar 12 – Sebaran Tegangan Von Mises Pada Kasus 1

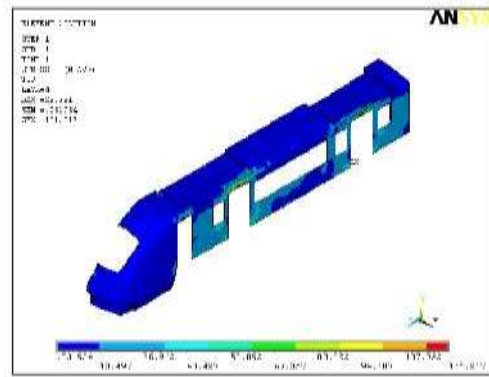


Gambar 13 – Sebaran Tegangan Von Mises Pada Kerangka Carbody Kasus 1

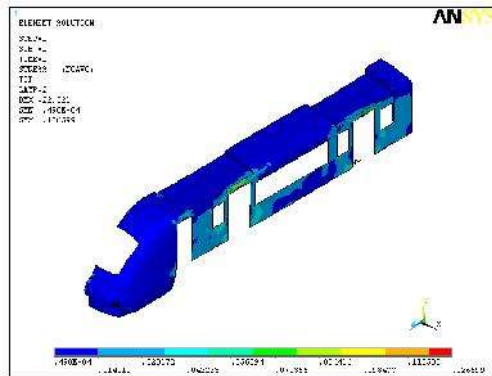
Gambar 12 menunjukkan seluruh tegangan Von Mises yang terjadi pada *carbody TeC railbus* saat dikenakan pembebanan kasus pertama. Dari gambar rangka yang diperlihatkan pada gambar 13 lebih jelas terlihat sebaran yang terdapat pada rangka *carbody TeC railbus*. Pada kasus pertama, bagian yang mendapatkan tegangan paling kritis adalah bagian tengah *frontpart*. Tegangan ini disebabkan oleh tekanan angin pada kecepatan maksimal 100 km/jam yang dibebankan merata pada *frontal area* dari maskara, selain itu, terutama disebabkan oleh beban yang didapatkan dari perlawanan jalan yang diaplikasikan pada *bolster*. Selain pada *frontpart*, dari gambar 13 dapat diketahui pula terdapat tegangan yang besar akibat beban *engine* yang terdapat pada *crossbeam*.



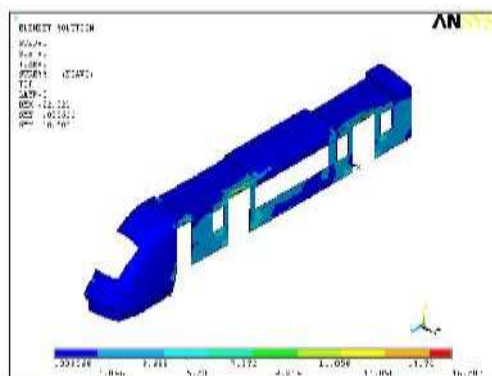
Gambar 14 – Tegangan Von Mises Pada Layer 1 (CSM) Kasus 1



Gambar 17 – Tegangan Von Mises Pada Layer 4 (Aluminium) Kasus 1



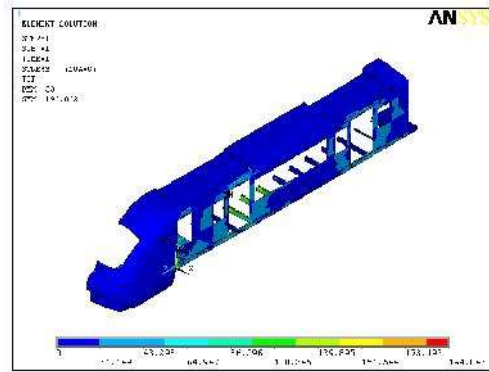
Gambar 15 – Tegangan Von Mises Pada Layer 2 (divinycell) Kasus 1



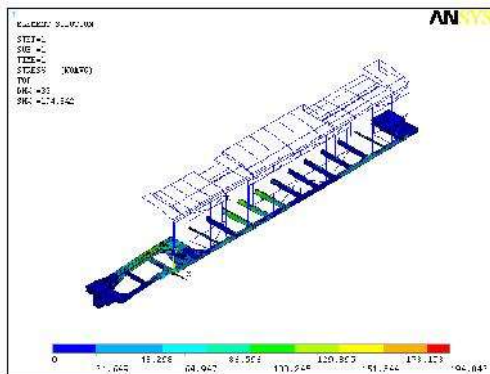
Gambar 16 – Tegangan Von Mises Pada Layer 3 (CSM) Kasus 1

Gambar 14 sampai 17 menunjukkan tegangan Von Mises yang terjadi pada tiap layer sandwich. Tegangan terbesar menunjukkan kecenderungan pada daerah yang sama pada tiap layer, yaitu pada daerah *sidewall* yang diakibatkan oleh beban dari radiator yang dipasang di atap *carbody TeC Railbus* serta beban yang didapatkan dari *battery box*.

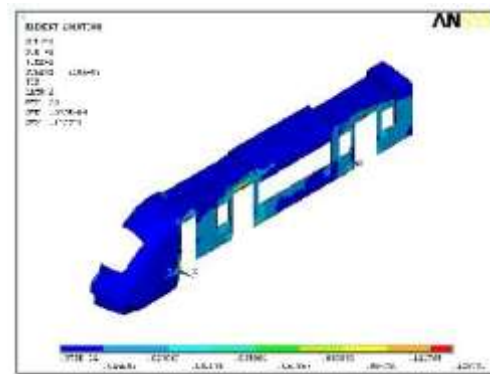
2. Kasus 2



Gambar 18 – SebaranTegangan Von Mises Pada Kasus 2

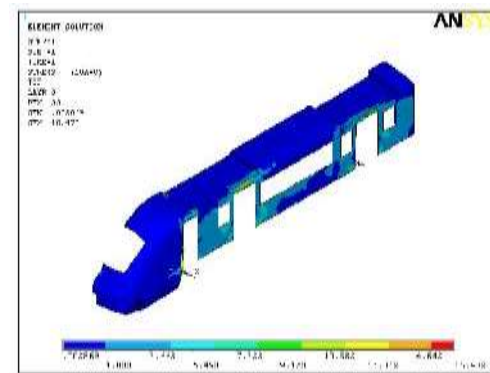


Gambar 19 – SebaranTegangan Von Mises Pada Kerangka Carbody Kasus 2

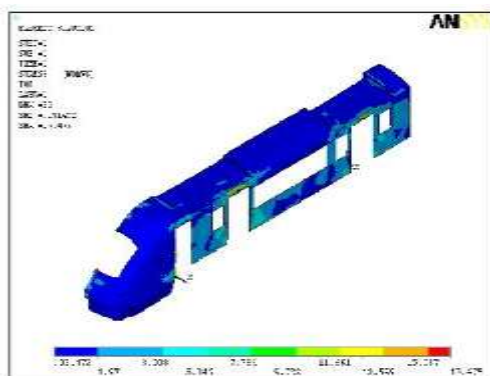


Gambar 21 – Tegangan Von Mises Pada Layer 2 (divinylcell) Kasus 2

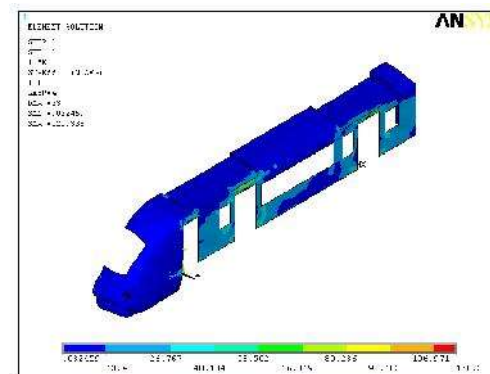
Pada kasus kedua, terlihat dari gambar 18 bagian yang mengalami tegangan terbesar tetap ada pada bagian *frontpart*. Meskipun pada proses ini *carbody* tidak terdapat tekanan angin karena *railbus* dalam keadaan diam, tetapi tekanan yang diberikan saat pemasangan kopler dari lokomotif penarik cukup besar sehingga *frontpart* tetap mengalami tegangan yang besar, bahkan lebih besar dari kasus pertama. Selain pada *frontpart*, dari gambar 18 dapat diketahui pula terdapat tegangan yang besar akibat beban *engine* yang terdapat pada *crossbeam*.



Gambar 22 – Tegangan Von Mises Pada Layer 3 (CSM) Kasus 2



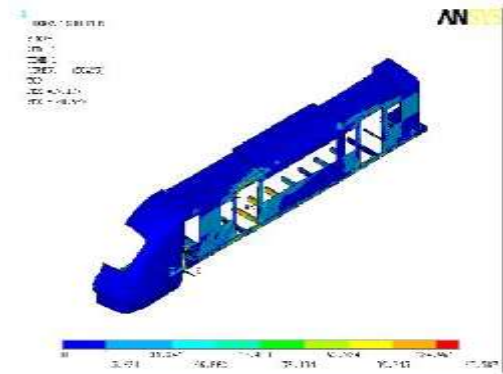
Gambar 20 – Tegangan Von Mises Pada Layer 1 (CSM) Kasus 2



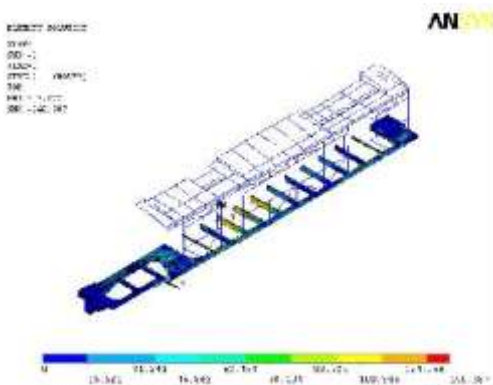
Gambar 23 – Tegangan Von Mises Pada Layer 4 (Aluminium) Kasus 2

Tegangan Von Mises pada tiap *layer* yang diperlihatkan pada gambar 20 sampai 23 masih menunjukkan kecenderungan nilai tegangan terbesar pada daerah *sidewall*.

3. Kasus 3

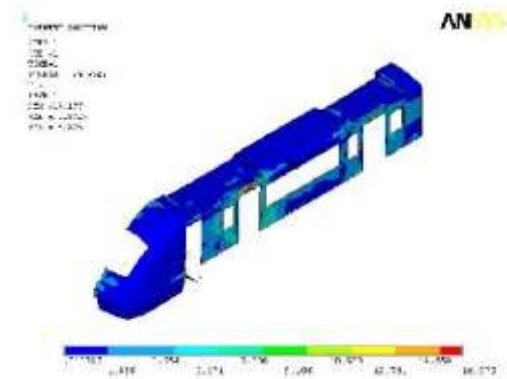


Gambar 24 – Sebaran Tegangan Von Mises Pada Kasus 3

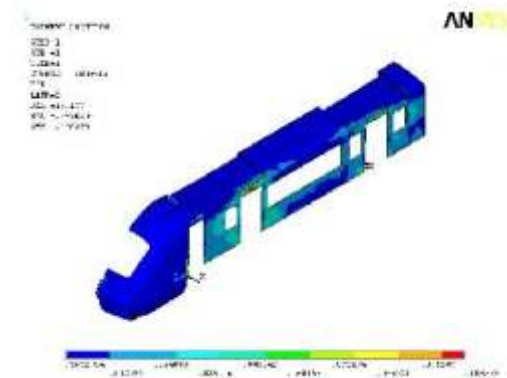


Gambar 25 – Sebaran Tegangan Von Mises Pada Kerangka Carbody Kasus 3

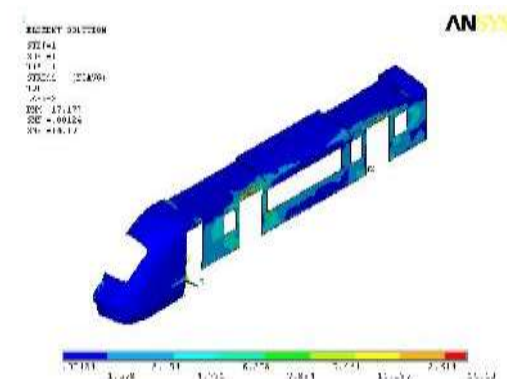
Pada kasus ketiga, beban paling besar diberikan oleh kereta yang berada di belakang *carbody* *TeC* berupa beban perlawanan gelundung dan tanjakan memberikan hasil tegangan Von Mises yang dialami *carbody* *TeC* *railbus* seperti gambar 24. Meskipun beban yang diberikan relatif besar, tegangan yang dialami oleh material tidak lebih dari tegangan yang dialami pada kasus pertama dan kedua karena desain struktur yang cukup baik untuk menerima beban tarik. Tegangan terbesar diakibatkan oleh beban *engine* yang diterima oleh *crossbeam* pada *underframe*.



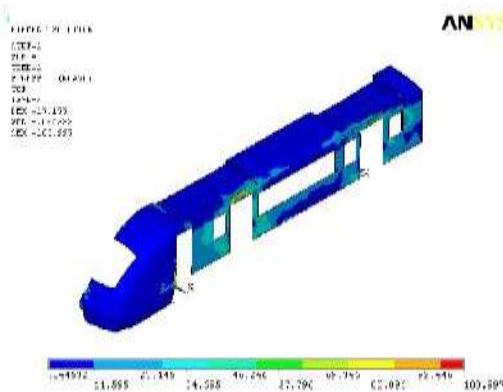
Gambar 26 – Tegangan Von Mises Pada Layer 1 (CSM) Kasus 3



Gambar 27 – Tegangan Von Mises Pada Layer 2 (divinycell) Kasus 3



Gambar 28 – Tegangan Von Mises Pada Layer 3 (CSM) Kasus 3



Gambar 29 – Tegangan Von Mises Pada Layer 4 (Aluminium) Kasus 3

Gambar 26 sampai 29 menunjukkan tegangan Von Mises yang terjadi pada sandwich panel carbody TeC railbus akibat pembebanan pada kasus 3. Tegangan utama yang terbesar ada pada daerah sidewall pintu belakang, sama seperti pada 2 kasus sebelumnya.

Ketiga kasus yang dibebankan pada carbody TeC railbus memberikan nilai tegangan yang berbeda, yang diperlihatkan pada tabel 2.

Tabel 3 - Tegangan yang Terjadi pada Ketiga Kasus Pembebanan pada Carbody TeC Railbus

Kasus	Daerah	Material	Tegangan Yield	Tegangan	Faktor Keamanan
1	frontpart	SS400	245	157,833	1,552
	sidewall	CSM	93	17,584	5,289
	sidewall	divinycell	1,8	0,126	14,286
	sidewall	CSM	93	16,582	5,608
	sidewall	aluminium	290	121,217	2,392
2	frontpart	SS400	245	194,842	1,257
	sidewall	CSM	93	17,475	5,322
	sidewall	divinycell	1,8	0,126	14,286
	sidewall	CSM	93	16,472	5,646
	sidewall	aluminium	290	120,338	2,410
3	crossbeam	SS400	245	140,587	1,74
	sidewall	CSM	93	16,375	5,679
	sidewall	divinycell	1,8	0,108	16,667
	sidewall	CSM	93	14,190	6,554
	sidewall	aluminium	290	103,997	2,786

Nilai Faktor Keamanan yang digunakan pada analisis adalah 1,25 - 1,5 untuk struktur yang telah diketahui dengan baik material dan pembebanannya. Faktor Keamanan untuk tiap material pada masing-masing kasus dianggap sangat memenuhi dengan nilai keamanan terkecil terdapat pada kasus 2 yaitu 1,257. Hal ini dikarenakan besarnya tegangan yang dihasilkan oleh beban pada proses kopel sehingga nilai faktor keamanan hampir mencapai nilai kritis.

KESIMPULAN

Dari simulasi yang dilakukan diketahui sebaran dan besar tegangan yang terjadi pada desain konstruksi carbody TeC Railbus pada pembebanan statis. Ketiga tegangan yang terjadi pada ketiga kasus masih berada pada batas kekuatan material, sehingga dapat disimpulkan desain konstruksi carbody TeC Railbus dianggap mampu menerima pembebanan yang akan diterima Railbus saat beroperasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Timoshenko, S., 1980. *Strength of Material*. Edisi Kedua. New York: D. Van Nostrad Company Inc.
- [2] Marghitu, Dan B., Cristian I. Diaconescu, and Bogdan O. Ciocirlan. 2001. *Mechanics of Materials*. Academic Press: SanDiego.
- [3] Bassin, Milton G., Stanley M. Brodsky, Harold Wolkoff, 1979. *Statics and Strength of Materials, Third Edition*. McGraw-Hill: New York.
- [4] Budynas, R.G. 1977. "Advanced Strength and Applied Stress Analysis", McGraw-Hill, New York.
- [5] Segerlind, Larry J. 1984. *Applied Finite Element Analysis*. Edisi Kedua. Canada: John Wiley and Sons Inc.
- [6] Lindgreen, E., Sorenson, S.C., 2005. *Driving Resistance from Railroad Trains*. Denmark: Department of Energy Engineering Technical University of Denmark

[7] Subyanto.1977. *Dinamika Kendaraan Rel.* Bagian Pertama. Bandung: CV. Komala.

[8] Subyanto.1981. *Dinamika Kendaraan Rel.* Bagian Kedua. Bandung: CV. Komala.