TUGAS AKHIR – TM184835

ANALISA STRUKTUR STATIS PADA *CARBODY* KERETA MST DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

DHARMA FEBRIOLA
NRP. 02111540000119

Dosen Pembimbing
Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng., Ph.D
NIP. 197909262005011001

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

(halaman ini sengaja dikosongkan)

TUGAS AKHIR – TM184835

ANALISA STRUKTUR STATIS PADA CARBODY KERETA MST DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

DHARMA FEBRIOLA
NRP. 02111540000119

Dosen Pembimbing
Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng., Ph.D
NIP. 197909262005011001

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

(halaman ini sengaja dikosongkan)

FINAL PROJECT – TM184835

STATIC STRUCTURE ANALYSIS ON CAR BODY MEDIUM SPEED TRAIN USING FINITE ELEMENT METHOD

DHARMA FEBRIOLA
NRP. 02111540000119

Advisor
Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng., Ph.D
NIP. 197909262005011001

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA STRUKTUR STATIS PADA CARBODY KERETA MST DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HIINGGA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Dharma Febriola
NRP. 02111540000119

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. **Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D.** ..... **(Pembimbing)**
   NIP. 197909262005011001
2. **Ir. Julendra B. Ariatedja, MT** ..... **(Penguji 1)**
   NIP. 196807061999031004
3. **Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.** ..... **(Penguji 2)**
   NIP. 196508101991021001
4. **Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T.** ..... **(Penguji 3)**
   NIP. 198604012015041001

SURABAYA
JULI 2020

(halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISA STRUKTUR STATIS PADA *CARBODY* KERETA MST DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Dharma Febriola
NRP : 02111540000119
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing: Achmad Syaifudin,S.T,M.Eng,Ph.D.

ABSTRAK

Dalam perkembangannya kualitas transportasi yang efektif dan efisien sangat membantu masyarakat dalam menjalankan aktivitasnya . Rencana pemerintah Indonesia saat ini adalah meningkatkan sarana transportasi kereta api dari segi kualitas kereta api. Akan tetapi perlu dilakukan riset dan studi kekuatan dalam merancang kereta dari segi kapasitas dan juga kualitas salah satunya *carbody*. *Carbody* merupakan bangun ruang yang berisi penumpang atau barang, dan peralatan yang menunjang kereta api tersebut dalam beroperasi yang dibangun dengan kontruksi rangka seperti plat dan sebagai komponen penting dalam sarana transportasi berbasis rel. Untuk menjaga keamanan dan keutuhan komponen kereta api yang ada didalamnya, barang serta menjaga keamanan dan kenyamanan penumpang selama perjalanan hingga berhenti di tempat tujuan, diperlukan suatu analisis mengenai keamanan sebuah sarana transportasi dari kontruksi *Carbody*.

Saat ini sedang dilakukan pengembangan kereta api MST (*Medium Speed Train*) yang diharapkan mampu meningkatkan kualitas sarana transportasi berbasis rel. Kontruksi *Carbody* kereta MST masih dalam tahap pengembangan , penelitian ini tetap dilanjutkan sebagai acuan dalam merancang kontruksi *Carbody* kereta MST. Kereta MST memiliki kecepatan maksimum sebesar 160 km/h

dengan percepatan awal 0.5 m/s^2. Selain itu kereta MST memiliki perlambatan operasional sebesar 1.25 m/s^2 dan perlambatan maksimum sebesar 1.52 m/s^2. Untuk memastikan mode gerak dari kereta MST tersebut aman digunakan pada kontruksi *carbody* perlu dilakukannya analisis statik struktural dengan perhitungan metode elemen hingga untuk mengetahui nilai angka keamanan dari kereta. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak *ANSYS Workbench 18.0*. Model *Carbody* MST pada penelitian ini disederhanakan dengan mereduksi model menjadi setengah bagian utama. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk deformasi total dan tegangan von mises dan dibandingkan sesuai dengan standarisasi BS EN-12663-1:2010, dan standarisasi PM 175 Tahun 2015 sebagai tahap dalam proses verifikasi. Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa variasi mode gerak berpengaruh terhadap kekuatan carbody. Hal ini disebabkan oleh pembebanan longitudinal kereta yang dipengaruhi oleh variasi mode gerak tersebut. Nilai tegangan ekuivalen *von mises* maksimum adalah ketika kereta mengalami perlambatan darurat sebesar 1100 MPa yang terkonsentrasi pada underframe bagian belakang kereta dengan persentase berada diatas nilai 75% tegangan mulur bahan (230 MPa) sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015. Nilai deformasi total maksimum sebesar 30 mm terjadi pada komponen *underframe* dapat dinyatakan tidak aman karena nilai deformasi total melebihi 0.275 in atau 7 mm sesuai dengan Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation pada tahun 2018.

Kata kunci: *Carbody*, Deformasi Total, Tegangan *Ekuivalen Von Misses,Static Structural*, Metode Elemen Hingga.

STATIC STRUCTURE ANALYSIS ON CAR BODY MEDIUM SPEED TRAIN USING FINITE ELEMENT METHOD

Nama Mahasiswa : Dharma Febriola
NRP : 02111540000119
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Achmad Syaifudin,S.T,M.Eng,Ph.D.

ABSTRACT

In its development, the transportation quality is very helpful for the community in carrying out their activities. The current plan of the Indonesian government is to improve train transportation facilities in terms of train quality. However, it is necessary to conduct research and strength studies in designing the train in terms of capacity and quality, one of which is the carbody. The carbody is a geometry that contains passengers or goods, and the equipment that supports the train operation, which is built with frame construction such as plates and as an important component in rail-based transportation facilities. To maintain the safety and integrity of the train components that contained there, goods and to maintain the safety and amenities of the passengers during the trip until they reach their destination, it needs an analysis for the safety of the transportation from the Carbody construction.

Currently the MST (Medium Speed Train) train is being developed which is expected to improve the quality of rail-based transportation facilities. MST Carbody construction is in the development stage, this research is being continued as a reference in designing the MST Carbody construction. The MST train has a maximum speed of 160 km/h with an initial acceleration of 0.5 m/s^2. In addition, the MST train has an operational deceleration

of 1.25 m/s^2 and a maximum deceleration of 1.52 m/s^2. To ensure the mode of motion of the MST train is safe to use in carbody construction, it is necessary to carry out structural static analysis with finite element calculation method to determine the safety value of the train. This research uses ANSYS Workbench 18.0 software. The Carbody MST model in this study is simplified by reducing the model to its main half. The simulation results are displayed in the form of total deformation and von mises stress and compared according to the BS EN-12663-1: 2010 standard, and the 2015 PM 175 standard as a stage on the verification process. The results of this study indicate that the various type of motion affects the carbody strength. This is caused by the longitudinal loading of the train which is influenced by the various type of motion. The maximum von mises equivalent stress value is when the train experiences an emergency deceleration of 1100 MPa which is concentrated on the rear underframe of the train with a percentage above 75% of its value, material creep stress (230 MPa) in accordance with the standardization of PM 175 of 2015. The maximum total deformation value is 30 mm occurs in the underframe component which declared unsafe because the total deformation value exceeds 0.275 in or 7 mm in accordance with the Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation in 2018.

Keywords: Carbody, Total Deformation, Equivalent Von Misses Sress, Static Structural, Finite Element Method.

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya sampaikan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah, serta rizki sehingga laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya dukungan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT atas karunia, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan lancar.
2. Bapak Iksan dan Ibu Tyasning Lestari Supiyanti, Adik Jaenal Ichwan Abidin serta keluarga yang selalu memberikan semangat dan do'a yang tak henti-henti hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
3. Bapak Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan nasehat kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T., Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA., Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik dalam penyusunan tugas akhir.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Prabowo, M.Eng., selaku Dosen wali penulis, terima kasih telah menjadi dosen wali saat perwalian satu kali tiap semester.
6. Seluruh Dosen beserta staff karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS - ITS yang telah memberikan bekal berupa ilmu pengetahuan serta sarana dan prasarana selama perkuliahan.
7. Rekan BEM FTI yang telah memberikan banyak pengalaman dan pembelajaran selama kuliah.
8. Rekan – rekan Kontrasol yang telah berjuang bersama di tanah perantauan.

9. Keluarga M57 yang banyak memberikan saya pengalaman berharga selama di Departemen Teknik Mesin.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Semoga amal dan jasa yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat imbalan dari Allah SWT.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan laporan tugas akhir ini. Dan penulis meminta maaf apabila terdapat kalimat yang kurang berkenan pada laporan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan seluruh pembaca untuk kemajuan yang lebih baik. Akhir kata, penulis mengucapkan terimakasih.

Surabaya, Juli 2020

Penulis

Daftar Isi

ABSTRAK ..... **v**
ABSTRACT ..... **vii**
KATA PENGANTAR ..... **ix**
Daftar Isi ..... **xi**
Daftar Gambar ..... **xiv**
Daftar Tabel ..... **xvii**
BAB I **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Ruang Lingkup 2
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB II **4**
2.1 Penelitian Terdahulu 5
2.2 Carbody 9
2.3 Spesifikasi Teknis Kereta MST 10
2.4 Metode Elemen Hingga 11
2.5 Prosedur Metode Elemen Hingga dengan Menggunakan Software 11
2.6 Standarisasi EN-12663-1:2010 (British Standards) 12
2.7 Standarisasi PM 175 Tahun 2015 (Nasional) 15
2.8 Konsep Tegangan dan Regangan 16
2.8.1 Konsep Tegangan 16
2.8.2 Konsep Regangan 17

2.8.3 Hubungan Tegangan dan Regangan 18
2.9 Analisis yang Digunakan 19
2.9.1 Karakteristik Deformasi 19
2.9.2 Konsentrasi Tegangan 20
2.9.3 Tegangan Von Mises 20
BAB III 23
3.1 Model Material 26
3.2 Model Carbody 26
3.3 Symmetry Region 27
3.4 Elemen Kontak 28
3.5 Diskritisasi 29
3.6 Kondisi Batas dan Pembebanan 30
3.7 Tipe Analisis 47
3.7.1 Analisis Deformasi Total 47
3.7.2 Analisis Tegangan Von Mises 48
3.7.3 Mesh Convergent Test 48
BAB IV 50
4.1 Hasil Tegangan Von-Mises Maksimum 50
4.2 Hasil Analisis Deformasi Total Maksimum 56
4.3 Pembahasan 61
BAB V 63
5.1 Kesimpulan 64
5.2 Saran 65
Daftar Pustaka lxvi
BIODATA PENULIS lxviii

Lampiran.....lxix

(halaman ini sengaja dikosongkan)

Daftar Gambar

Gambar 1.1 Konstruksi *Carbody*..... 2
Gambar 2.1 Hasil simulasi tegangan pada *carbody* (Baykasoglu, 2012)..... 5
Gambar 2.2 Grafik Perbandingan Hasil Eksperimen dan Finite Elemen Analysis..... 6
Gambar 2.3 Hasil Analisa *Carbody* (Jirru, 2015)..... 8
Gambar 2.4 Dimensi *Carbody* Kereta MST..... 9
Gambar 2.5 Gambar Komponen Tegangan pada Bentuk Tiga Dimensi 17
Gambar 2.6 Diagram Tegangan-Regangan 18
Gambar 2.7 Arah tegangan pada bidang 3 dimensi..... 21
Gambar 3.1 Bagan metode penelitian 23
Gambar 3.2 Flowchart penelitian 25
Gambar 3.3 Penyederhanaan Model; (a). Model *Carbody* utuh; (b). Model *Carbody* dipotong setengah..... 27
Gambar 3.4 Model setelah dilakukan *symmetry region*. 28
Gambar 3.5 Model setelah dilakukan proses *meshing* 30
Gambar 3.6 Kondisi Model Setelah diberi Pembebanan..... 31
Gambar 3.7 Rangkaian Train Set pada Kereta MST 31
Gambar 3.8 Lokasi Pembebanan Komponen 33
Gambar 3.9 Free Body Diagram *Trailer Car* MST..... 35
Gambar 3.10 Free Body Diagram *Motor Car* pada Kereta MST 36
Gambar 3.11 Free Body Diagram Motor Car 1 pada Kecepatan 160 km/h..... 37
Gambar 3.12 Free Body Diagram Motor Car 8 pada Perlambatan 1.25 m/s^2..... 38

Gambar 3.13 Free Body Diagram Trailer Car pada Perlambatan 1.25 m/s^2 39
Gambar 3.14 Free Body Diagram Motor Car 4 pada Kecepatan 80 km/h 40
Gambar 3.15 Free Body Diagram Motor Car 8 pada Pecerpatan 0.5 m/s^2 41
Gambar 3.16 Free Body Diagram Trailer Car pada Pecerpatan 0.5 m/s^2 42
Gambar 3.17 Free Body Diagram Motor Car 4 pada Pecerpatan 0.5 m/s^2 43
Gambar 3.18 Free Body Diagram Motor Car 8 pada Perlambatan 1.52 m/s^2 44
Gambar 3.19 Free Body Diagram Trailer Car pada Perlambatan 1.52 m/s^2 45
Gambar 3.20 Free Body Diagram Motor Car 2 pada Perlambatan 1.52 m/s^2 46
Gambar 3.21 Hasil Uji Mesh Convergent Test 49
Gambar 4.1 Hasil Tegangan Maksimum Pada Kasus Mode Gerak 1 51
Gambar 4.2 Hasil Tegangan Maksimum Pada Kasus Mode Gerak 2 52
Gambar 4.3 Hasil Tegangan Maksimum Pada Kasus Mode Gerak 3 53
Gambar 4.4 Hasil Tegangan Maksimum Pada Kasus Mode Gerak 4 55
Gambar 4.5 Hasil Deformasi Total Pada Kasus Mode Gerak 1 .. 57
Gambar 4.6 Hasil Deformasi Total Pada Kasus Mode Gerak 2 .. 58
Gambar 4.7 Hasil Deformasi Total Pada Kasus Mode Gerak 3 .. 59
Gambar 4.8 Hasil Deformasi Total Pada Kasus Mode Gerak 4 .. 60

Daftar Tabel

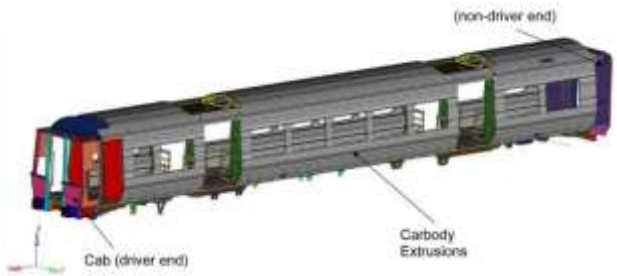
Tabel 2.1 Pembebanan Vertikal 14
Tabel 2.2 Pembebanan Kompresi 14
Tabel 2.3 Pembebanan Tarik 15
Tabel 3.1 *Material Properties Aluminium 6005A-T6* 26
Tabel 3.2 Pembebanan Komponen 33
Tabel 3.3 Data Berat *Motor Carbody dan Trailer Carbody* Kereta MST 34
Tabel 3.4 Data Beban Tarik Motor Carbody pada Perlambatan 1,25 m/s^2 38
Tabel 3.5 Data Beban Tarik Trailer Carbody pada Perlambatan 1.25 m/s^2 39
Tabel 3.6 Data Beban Tarik Motor Carbody pada Perlambatan 1.25 m/s^2 40
Tabel 3.7 Data Beban Tarik Motor Carbody pada Percepatan 0.5 m/s^2 41
Tabel 3.8 Data Beban Tarik Trailer Carbody pada Percepatan 0.5 m/s^2 42
Tabel 3.8 Data Beban Tarik Motor Carbody pada Percepatan 0.5 m/s^2 43
Tabel 3.9 Data Beban Kompresi Motor Carbody pada Perlambatan 1.52 m/s^2 44
Tabel 3.10 Data Beban Kompresi Trailer Carbody pada Perlambatan 1.52 m/s^2 45
Tabel 3.11 Data Beban Kompresi Motor Carbody pada Perlambatan 1.52 m/s^2 46
Tabel 3.12 Hasil Aktual Pembebanan Tarik dan Pembebanan Kompresi 47
Tabel 4.1 Hasil Analisis Tegangan Maksimum 55
Tabel 4.2 Hasil Analisis Deformasi Total 60

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi merupakan kegiatan yang memiliki peran penting dalam menunjang mobilitas manusia dalam menjalankan aktivitasnya sehari-hari. Transportasi merupakan kegiatan memindahkan barang dari tempat asal ke tempat tujuan. Terkhusus untuk masyarakat Indonesia yang sangat terbantu dengan adanya transportasi, hal ini disebabkan oleh kondisi geografis Indonesia yang beragam. Maka dari itu perlu adanya alat transportasi yang efektif dan efisien ditunjang dengan sarana prasarana transportasi dan sistem transportasi yang tertata dan memadai untuk memenuhi kebutuhan masyarakat Indonesia. Ketersediaan transportasi berbanding lurus dengan meningkatnya perekonomian dan pembangunan dalam masyarakat. Transportasi tidak hanya sebagai alat pemindah barang dari satu tempat ke tempat yang lain, selain itu transportasi juga membantu dalam tercapainya alokasi sumber daya mulai dari pangan, bahan bakar dan kebutuhan masyarakat lainnya. Maka dari itu kemajuan transportasi dapat menunjan perkenomian seperti membuka lapangan kerja, meningkatkan pendapatan masyarakat, dan menekan kesenjangan sosial antar daerah. Kebutuhan masyarakat Indonesia yang tiap tahun meningkat terhadap penggunaan jasa transportasi kereta api dibuktikan dengan data statistik yang dikeluarkan oleh Badan Pusat Statistik mulai dari tahun 2015-2018 dimana jumlah pengguna kereta api kian tahun semakin meningkat.



Gambar 1.1 Konstruksi *Carbody* (Randell, 2011)

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian kali ini memliki rumusan masalah sebagai berikut:

a. Bagaimana hasil tegangan ekstrim dan hasil deformasi total dari analisis struktur pada kontruksi *Carbody* motor kereta MST dengan pemodelan elemen hingga?
b. Bagaimana pengaruh variasi mode gerak kereta MST terhadap kekuatan *carbody* dari segi tegangan ekstrim dan deformasi pada kontruksi *Carbody* motor kereta MST dengan metode elemen hingga?

1.3 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada penelitian ini antara lain:

Variabel yang diteliti

a. Analisa deformasi total pada kontruksi *Carbody* motor kereta MST menggunakan metode elemen hingga (MEH).
b. Analisa struktur pada kontruski *Carbody* motor kereta MST pada saat baru bergerak, kecepatan kritis, saat kereta akan melintasi jalur berbelok, dan saat kereta berhenti mendadak

dengan aspek tegangan *von mises* menggunakan metode elemen hingga (MEH).

Variabel yang diabaikan

a. Sambungan las dari setiap *joint* dianggap sempurna, sehingga keseluruhan bentuk rangka merupakan satu kesatuan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain :

a. Mengetahui hasil tegangan ekstrim dan hasil deformasi total dari analisis struktur pada kontruksi *Carbody* motor MST dengan pemodelan elemen hingga.
b. Mengetahui pengaruh variasi mode gerak kereta MST terhadap kekuatan *carbody* dari segi tegangan ekstrim dan deformasi pada kontruksi *Carbody* motor kereta MST dengan metode elemen hingga.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian kali ini adalah sebagai berikut :

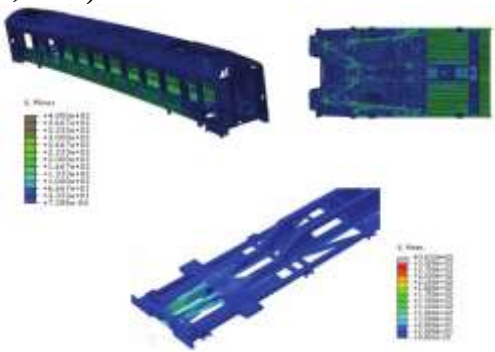
a. Memberikan kontribusi dalam pengembangan *Carbody* motor kereta MST yang bisa digunakan sebagai referensi acuan dalam melakukan analisa simulasi menggunakan perangkat lunak.
b. Memacu mahasiswa terutama Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember untuk mengembangkan penelitian yang berkelanjutan.
c. Membantu mahasiswa untuk lebih memahami penggunaan metode elemen hingga.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

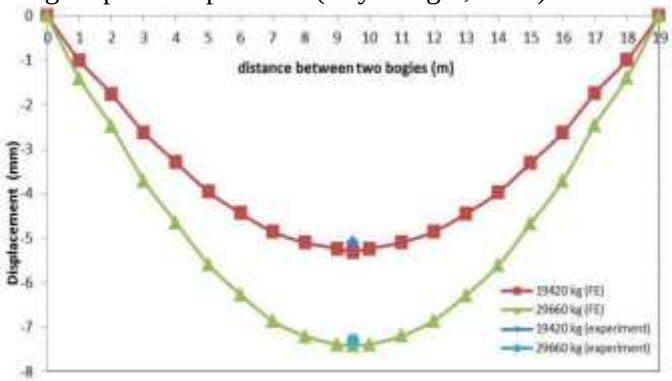
2.1 Penelitian Terdahulu

Baykasoglu et al (2012) melakukakan penelitian tentang analisis tegangan statis pada carbody kereta dengan menggunakan metode elemen hingga. Dalam penelitiannya yang berjudul *"Numerical Static and Dynamic Stress Analysis on Railway Passenger and Freight Car Models"*, Baykasoglu meneliti tentang analisa tegangan, getaran dan tabrakan dengan metode elemen hingga pada struktur *carbody* dengan tipe kereta penumpang yang terbuat dari material *steel*. *Carbody* yang dianalisa terbuat dari 5 bahan material yang berbeda yaitu *stainless steel*, St 12, Stw 24, St 37, dan St 52 yang diaplikasikan pada *side wall*, *underframe*, *roof*, dan *end wall*. Untuk material yang digunakan sebagai main support beam adalah material *steel* St 52. *Carbody* memiliki berat sekitar 25 ton, dimana berat tersebut sudah termasuk berat total kedua *bogie* tersebut. (Baykasoglu, 2012)



Gambar 2.1 Hasil simulasi tegangan pada *carbody* (Baykasoglu, 2012)

Baykasoglu melakukan uji konvergensi dengan menggunakan tingkat penyempitan mesh pada daerah kritis dihitung dan tingkat mesh yang dapat diterima dipertimbangkan. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan tingkat akurasi yang tinggi dan efisiensi yang besar dalam simulasi dengan metode numerik. Jumlah elemen dan node pada model carbody bernilai 1656900 elemen dan 1682540 node. Model tersebut terdiri dari elemen shell segiempat orde pertama. (Baykasoglu, 2012)



Gambar 2.2 Grafik Perbandingan Hasil Eksperimen dan Finite Elemen Analysis (Baykasoglu, 2012)

Bayaksoglu et al (2012) melakukan pembebanan pada *carbody* yang dilakukan berupa gaya tekan simetris dan gaya tarik. Pada penelitian ini Baykasoglu memberikan pembebanan gaya tarik sebesar 100 ton untuk *carbody* dan total 200 ton kekuatan kompresi simetris untuk carbody kereta api penumpang dengan kondisi kereta api kosong. Baykasoglu menggunakan dua variasi pembebanan vertikal, yaitu pembebanan saat kondisi tanpa penumpang dan pembebanan saat kondisi penuh dengan

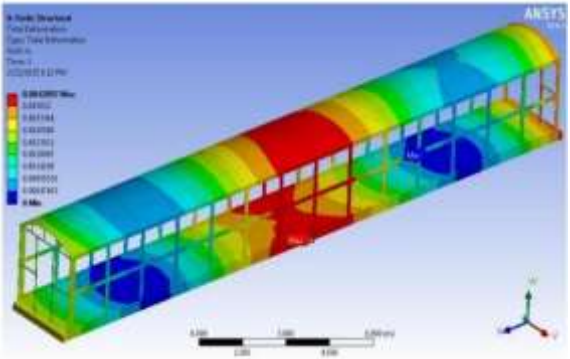
penumpang. Pada penelitian yang dilakukan oleh Baykasoglu didapatkan nilai deformasi total maksimum sebesar 5.1245 mm dan tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 1.7557 x 108 Pa pada saat kondisi pembebanan vertikal tanpa penumpang, dan didapatkan juga data deformasi total maksimum sebesar 7.683 mm dan 2.374 x 108 Pa pada saat kondisi pembebanan vertikal penuh dengan penumpang. (Baykasoglu, 2012)

Pada penelitian ini, Bayaksoglu et al (2012) melakukan validasi dengan melakukan eksperimen langsung pada *Carbody* kereta api penumpang. Gambar 2.1 menunjukan grafik perbandingan antara hasil dengan menggunakan metode elemen hingga dan hasil dengan melakukan simulasi. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa hasil pemodelan elemen hingga yang dilakukan Baykasoglu valid, karena hasil displacement maksimumnya ditunjukkan pada angka yang relati sama baik dalam kasus *carbody* tanpa penumpang maupun *carbody* dengan penumpang. (Baykasoglu, 2012)

Pada tahun 2015, Belete Jirru (2015) melakukan penelitian analisa struktur pada carbody dengan menggunakan metode elemen hingga. Pada penelitiannya menggunakan carbody dengan tipe kereta penumpang. Carbody dimodelkan menggunakan software CATIA V5-R20 yang kemudian di- import pada software *ANSYS workbench* untuk dilakukan analisa struktur statik dengan metode elemen hingga. Carbody yang dianalisis pada penelitian ini menggunakan material Steel 36. (Jirru, 2015)

Pada simulasi statik struktural yang dilakukan oleh Belete Jirru mengasumsikan kapasitas penumpang berjumlah 109 orang dengan masing masing penumpang memiliki berat 65 kg, sehingga didapatkan nilai dari beban vertikal. Tekanan dengan nilai 29820 Pa merupakan beban vertikal dan beban tekan gabungan pada rangka bawah yang diaplikasikan pada simulasi statik struktural yang dilakukan Belete Jirru. Analisa yang dilakukan oleh Belete Jirru berupa analisa total deformasi yang

terjadi dan analisa tegangan principal maksimal yang terjadi. Pada penelitian yang dilakukan oleh Belete Jirru didapatkan nilai deformasi total maksimum sebesar 0.0042897 m dan tegangan principal maksimum sebesar 1.2457 x 108 Pa. (Jirru, 2015)

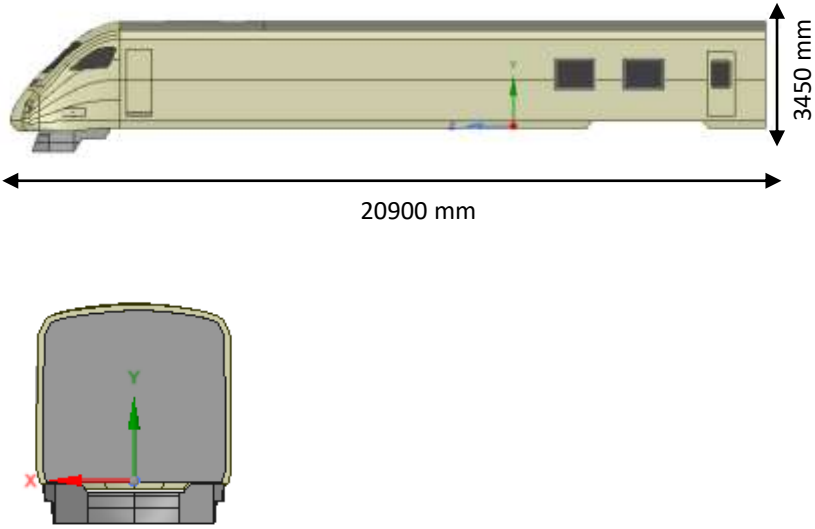


Gambar 2.3 Hasil Analisa *Carbody* (Jirru, 2015)

Pada tahun 2018 Egy Meirarizka melakukan analisa struktur statis *Carbody* pada LRT palembang menggunakan material ekstrusi aluminium 6005A-T6 yang dapat menggantikan material Al 6061-T6. Al 6061-T6 merupakan material konstruksi pesawat terbang yang terlalu kaku apabila digunakan sebagai material konstruksi carbody LRT. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa angka keamanan konstruksi carbody LRT bernilai 3,24 dengan meninjau analisis tegangan ekuivalen von-mises maksimum sebesar 109,51 MPa yang terkonsentrasi pada sudut balok penyangga dengan persentase terhadap tegangan mulur bahan sebesar 30,85% dapat dinyatakan aman karena nilai persentase berada dibawah 75% sesuai dengan standarisasi PM 175 tahun 2015. Niali deformasi total maksimum sebesar 4,5187 mm terjadi pada komponen underframe dapat dinyatakan aman karena nilai deformasi total kurang dari 0,375 in atau 9,525 mm

sesuai dengan laporan perancangan LRT yang dibuat oleh *Central Corridor Light Rail Transit* pada tahun 2008. (Meirarizka, 2018)

2.2 Carbody



Gambar 2.4 Dimensi *Carbody* Kereta MST

Semua rincian desain struktur carbody harus disetujui oleh engineer. Desain carbody harus memiliki tampilan aerodinamis yang modern, yang memerlukan perawatan minimal, dan memilki tingkat ketahanan terhadap kecelakaan yang tinggi sehingga secara desain struktur dapat menahan kerusakan yang terjadi, lebih mudah dalam proses perbaikan struktur, dan meminimalkan cedera pada penumpang. Semua sambungan yang dihubungkan secara mekanis dirancang dengan menggunakan faktor keamanan 2.0 berdasarkan beban pada sambungan. Begitu juga gaya

gesekan harus diabaikan pada sambungan yang dihubungkan secara mekanis. (Jirru, 2015)

2.3 Spesifikasi Teknis Kereta MST

Kereta MST dirancang dengan Standar Internasional (SI) untuk satuan berat dan dimensi. Bahan, komponen standar atau rancangan standar secara umum mengacu pada Standar Industri Perkeretaapian yang berlaku seperti :

a) *JIS : Japanese Industrial Standard*
b) *UIC : Union Internationale des Chemis de Fer*
c) *AAR : Association of American Railroads*
d) Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM. 175 Tahun 2015 tentang Standar Spesifikasi Teknis Kereta Kecepatan Normal.
e) *EN 12663-1 Railway Application-Structural Requirement of Railway Vehicle Bodies*
f) *ISO 2631 Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole*

Satu set kereta MST terdiri dari 4 trailer carbody dan 8 motor carbody. Kecepatan operasional maksimum 160 km/jam (kecepatan desain 180 km/jam). Percepatan operasional dari kereta MST adalah 0.5 m/s^2 dan memiliki perlambatan operasional sebesar 1.25 m/s^2 dan perlambatan maksimum sebesar 1.52 m/s^2. Kereta MST juga mampu menempuh kecepatan 80 km /jam ketika melewati lintasan berbelok dengan radius minimum dari lintasan adalah sebesar 200 m. Satu *motor carbody* mampu menampung 50 orang saat beroperasi.

Susunan rangkaian satu set MST terdiri dari : $M_{C1} – M_{C2} – M_{C3} – M_{C4} – T_{C1} – T_{C2} – T_{C3} – T_{C4} – M_{C5} – M_{C6} – M_{C7} – M_{C8}$

M_C : Motor carbody

T_C : *Trailer Carbody*

2.4 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan prosedur numerik yang dapat dipakai untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang rekayasa (*engineering*), seperti analisa tegangan pada struktur, perpindahan panas, elektromagnetis, dan lairan fluida. Inti dari metode ini adalah membagi suatu benda yang akan diteliti, menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian – bagian ini disebut elemen dimana setiap elemen dihubungkan dengan node. Kemudian dibentuk persamaan matematika yang menjadi representasi benda yang dianalisa. Proses pembagian benda menjadi beberapa bagian disebut meshing. Kemudahan penggunaan berbagai hal tersebut bisa saja tergabung pada satu program komputer, yaitu dengan menyiapkan data pemilihan jenis, geometri, kondisi batas, elemen, dan sebagainya. Keunggulan dari metode elemen hingga adalah adanya arti fisik yang cukup dekat antara jaring elemen dengan struktur aktualnya. Jaring yang dimaksud bukan merupakan abstrak matematis yang sulit untuk divisualisasikan. Namun hasil yang diperoleh dengan metode ini untuk masalah tertentu adalah berupa hasil numerik, tidak ada persamaan bentuk tertutup yang dapat dipakai untuk kasus serupa yang hanya berbeda parameternya. (Cook, 1990)

2.5 Prosedur Metode Elemen Hingga dengan Menggunakan Software

Langkah-langkah dalam menyelesaikan analisa struktur menggunakan software elemen hingga adalah sebagai berikut :

1. Pembentukan geometri awal pada struktur yang akan dianalisis
2. Penentuan jenis material dan properti yang digunakan. Hal ini mencakup tentang dengan massa jenis dari

material tersebut, modulus elastis, *poisson ratio*, *tensile yield strength*, *tensile ultimate strength*.

3. Penentuan jumlah elemen yang akan diberikan pada model geometri tersebut.
4. Pembagian elemen dari hasil pemodelan geometri struktur yang akan dianalisa (*mesh generation*)
5. Pemberian kondisi batas (*Boundary Condition*) pada struktur yang dianalisa. Kondisi batas diperlukan untuk menentukan bagaimana model tertumpu pada dudukannya dalam kondisi nyata. Hal ini sangat menentukan bagaimana hasil dari analisa model geometri tersebut.
6. Pemberian kondisi pembebanan (*loading condition*). Kondisi pembebanan yang diberikan pada model struktur bergantung dengan kondisi nyatanya. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang sedekat mungkin dengan kondisi kenyataannya. Beban yang biasa didigunakan antara lain baban gaya, tekanan, momen baik statik maupaun dinamis.
7. Analisa, dimana analisa dilakukan dengan bantuan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga. Jenis analisa yang dapat dilakukan juga bervariasi dari jenis statis, dinamis, buckling maupun analisa perpindahan panas. (Syah, 2017)

2.6 Standarisasi EN-12663-1:2010 (British Standards)

Tujuan Standar EN 12663 ini adalah untuk memberikan kemudahan dalam mengoptimalkan rancangan desain Carbody dengan mempertahankan tingkat keamanan yang telah memenuhi syarat. Carbody harus mampu menahan beban maksimum sesuai dengan persyaratan operasional. Semua parameter formal pada standarisasi ini dinyatakan sebagai unit dasar SI, untuk percepatan

gravitasi yang digunakan bernilai -9,81 m/s2. (British Standard, 2010)

Untuk penerapan Standar EN 12663 ini, semua kereta diklasifikasikan dalam beberapa kategori. Klasifikasi dari berbagai kategori kereta didasarkan hanya pada persyaratan struktural desain carbody. Kereta penumpang dibagi menjadi lima kategori desain struktural, diantaranya :

- Kategori L kategori ini untuk kereta lokomotif
- Kategori P-I misalnya kereta pada umumnya.
- Kategori P-II misalnya kereta dengan unit tetap.
- Kategori P-III misalnya kereta bawah tanah, kereta ringan, dan kereta angkutan cepat.
- Kategori P-IV misalnya kereta metro ringan, kereta listrik ringan.
- Kategori P-V misalnya kereta dengan satu set rel yang membentuk rute trem.

Kereta lokomotif termasuk dalam kategori L yaitu kereta lokomotif. Sehingga pada standarisasi ini pembebanan dan batasan yang digunakan mengacu pada kategori L.

Persayaratan kekuatan statis dan stabilitas struktural pada carbody harus ditunjukkan dengan perhitungan dan pengujian, bahwa tidak ada deformasi permanen secara keseluruhan. Persyaratan ini ditunjukkan dengan membandingkan tegangan yang dihitung dengan tegangan yang diizinkan harus menghasilkan nilai kurang dari atau sama dengan 1 sesuai dengan persamaan 2.1 (British Standard, 2010).

$$U = \frac{R_d S}{R_L} \leq 1 \qquad 2.1$$

Dimana, U = Utilitas dari komponen

R_d = Nilai dari tegangan hasil perhitungan

S = Nilai dari *safety factor*

R_L = Nilai dari *ultimate stress material*

Tabel 2.1 Pembebanan Vertikal

Load in newtons

Locomotives	Passenger rolling stock					Freight wagons	
Category L	Category P-I	Category P-II	Category P-III	Category P-IV	Category P-V	Category F-I	Category F-II
$1{,}3 \times g \times m_1$	$1{,}3 \times g \times (m_1 + m_2)$					$1{,}3 \times g \times (m_1 + m_2)$ *	

* If the application produces a higher proof load (e.g. due to dynamic effects or loading conditions) then a higher value shall be applied and defined in the specification.

Analisa kegagalan utama diperlukan agar dapat diketahui pada saat pembebanan berapa dan pada daerah mana struktur akan gagal. Pembebanan vertikal yang akan digunakan dalam perancangan carbody dijelaskan pada tabel 2.1 sesuai dengan kategorinya

Tabel 2.2 Pembebanan Kompresi

Force in kilonewtons

Locomotives	Passenger rolling stock					Freight wagons	
Category L	Category P-I	Category P-II	Category P-III	Category P-IV	Category P-V	Category F-I	Category F-II
2 000	2 000	1 500	800	400	200	2 000 *	1 200 *

* Compressive force applied to the draw gear stops "c", if this draw gear stop is used (see EN 12663-2).
When the compressive force is applied on side buffers, then half of the value shall be used for each buffer axis.

Pembebanan kompresi yang digunakan dalam perancangan car body dijelaskan pada tabel 2.2 sesuai dengan kategorinya.

Tabel 2.3 Pembebanan Tarik

Force in kilonewtons

Locomotives	Passenger rolling stock					Freight wagons	
Category L	Category P-I	Category P-II	Category P-III	Category P-IV	Category P-V	Category F-I	Category F-II
1 000 [a]	1 000 [a]	1 000	600 [b]	300 [b]	150 [b]	1 500 [c] 1 000 [d]	1 500 [c] 1 000 [d]

[a] A higher force (e.g. 1 500 kN) may be necessary for certain types of coupling.

[b] These values can be adjusted but shall cover the maximum force which can be developed in normal operation or emergency recovery.

[c] Tensile force of 1 500 kN applied to the draw gear stops "a", if this draw gear stop is used (see EN 12663-2).

[d] Tensile force of 1 000 kN applied to the draw gear stops "b", if this draw gear stop is used and for other types for coupler attachment (see EN 12663-2).

Pembebanan tarik yang digunakan dalam perancangan carbody dijelaskan pada tabel 2.3 sesuai dengan kategorinya.

2.7 Standarisasi PM 175 Tahun 2015 (Nasional)

Rangka dasar harus memenuhi persyaratan dapat menahan beban, getaran, dan goncangan sebesar berat kereta, tahan terhadap korosi, dan kontruksi menyatu atau tidak menyatu dengan badan kereta. Badan kereta terdiri dari ruang penumpang, dan ruang masinis. Badan kereta harus mempunyai kekuatan serta kekakuan tinggi terhadap pembebanan tanpa terjadi perubahan bentuk (deformasi) tetap. Dalam hal pembebanan terhadap badan kereta, harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

a. Beban kompresi longitudinal yang merupakan beban statis yang dikenakan pada rangka dasar atau badan kereta, diperhitungkan bersama beban vertikal dan tanpa beban vertikal,
b. Beban kompresi longitudinal dipersyaratkan sebagai berikut :
    1. Minimal 500kN untuk kereta kecepatan normal dengan penggerak sendiri dengan beban gandar besar (*Heavy Rail Transport*).

2. Minimal 400kN untuk kereta api kecepatan normal dengan penggerak sendiri dengan beban gandar ringan (*Light Rail Transit*) yang berupa rangkaian dengan sejumlah kereta.
3. Minimal 200 kN untuk kereta api kecepatan normal dengan penggerak sendiri dengan beban gandar ringan (*Light Rail Transit*) yang berupa kereta api dengan maksimal dua unit kereta.

c. Beban vertikal badan kereta diperhitungkan berdasarkan formula sebagai berikut :

$$Pv = k\,(P1 + P2)$$

Dimana, Pv = beban vertikal
K = 1,3 (koefisien dinamis)
P1 = berat badan kereta siap operasi
P2 = jumlah penumpang x 57,7 kg

2.8 Konsep Tegangan dan Regangan

2.8.1 Konsep Tegangan

Tegangan adalah besaran gaya yang bekerja pada satu satuan luas permukaan benda yang terkena dampak oleh gaya tersebut. Tegangan diklasifikasikan menjadi dua macam, yaitu tegangan normal dan tegangan geser. (Hibbeler, 2008)

Tegangan normal didefinisikan sebagai tegangan yang bekerja secara tegak lurus pada permukaan benda (σ).

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Dimana, σ = Tegangan Normal (MPa)
P = Gaya Normal (N)
A = Luas Permukaan (mm^2)

Tegangan geser adalah tegangan yang bekerja sejajar dengan permukaan benda (τ).

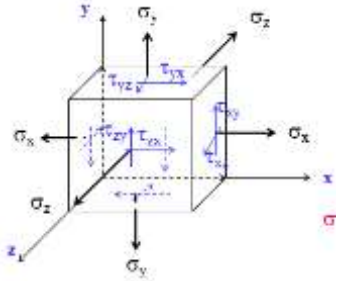
$$\tau = \frac{V}{A}$$

Dimana, τ = Tegangan Geser (Mpa)

V = Gaya Resultan Geser pada Permukaan Sejajar (N)

A = Luas Penampang (mm^2)

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 kerja dan yang kedua mengidentifikasikan arahnya dalam bidang tersebut. (Hibbeler, 2008)



Gambar 2.5 Gambar Komponen Tegangan pada Bentuk Tiga Dimensi (www.engapplets.vt.edu/Mohr/MohrCircles2-3D/Theory)

2.8.2 Konsep Regangan

Untuk memperoleh satuan deformasi atau regangan (ϵ) terdapat dua aspek yang mempengaruhi yaitu perpanjangan yang didapat dari panjang akhir dikurangi dengan panjang awal material tersebut, kemudian panjang mula- mula dari suatu material. Untuk mendapatkan besar regangan dari suatu material didapat dengan rumus sebagai berikut: (Hibbeler, 2008)

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_o}$$

Dimana, ϵ = Regangan (mm/mm)
δ = Perbedaan Panjang (mm)
L_o = Panjang Awal (mm)

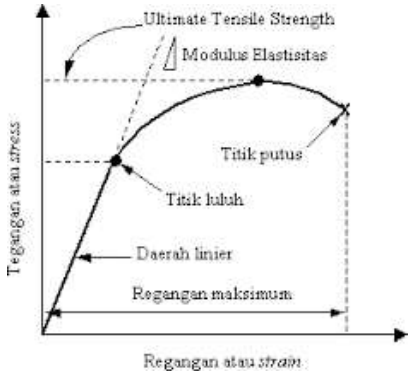
2.8.3 Hubungan Tegangan dan Regangan

Hubungan tegangan dan regangan dapat ditunjukkan dalam gambar 2.6. Rasio antara tegangan dan regangan normal dapat disebut Modulus Young atau Modulus Elastisitas. (Hibbeler, 2008)

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

Dimana, E = Modulus Elastisitas
σ = Tegangan Normal
ϵ = Regangan

Hubungan tegangan dan regangan juga bisa didapat dari diagram tegangan-regangan seperti pada gambar:



Gambar 2.6 Diagram Tegangan-Regangan (http://fisikazone.com)

Dari grafik tersebut dapat dilakukan perhitungan modulus elastisitas dengan persamaan sebagai berikut :

$$E = \tan\theta$$

Dimana, E = Modulus Elastisitas
θ = Sudut garis hubungan antara sumbu tegangan dan sumbu regangan (°)

Batas regangan plastis itu sendiri adalah batas dimana tegangan yang diberikan akan menyebabkan terjadinya deformasi plastis pada material tersebut untuk pertama kalinya. Pada umumnya, batas regangan elastis dari suatu material ditentukan dengan metode offset dimana terletak sekitar 1-2% dari regangan total (Farafry 2010).

2.9 Analisis yang Digunakan

2.9.1 Karakteristik Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda. Berdasarkan definisi tersebut deformasi dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif. Suatu material akan mengalami deformasi apabila terdapat gaya yang mengenai material tersebut. Besarnya gaya yang bekerja akan mendorong suatu material untuk berubah bentuk dan ukuran. Perubahan bentuk dari suatu material tersebut juga bergantung dari seberapa lama gaya tersebut bekerja pada material itu sendiri. Pada saat proses deformasi terjadi pada material dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Suatu benda dikatakan mengalami deformasi elastis apabila ketika benda atau material tersebut menerima gaya akan mengalami perubahan bentuk kemudian setelah gaya tidak bekerja pada benda tersebut maka benda tersebut akan kembali ke bentuk dan ukuran semula. Sedangkan deformasi plastis terjadi apabila suatu benda atau material mengalami perubahan bentuk dan ukuran ketika menerima gaya dan tidak bisa kembali ke bentuk semula meskipun sudah tidak menerima gaya lagi. Deformasi plastis terjadi karena benda tersebut sudah melewati batas elastisitas atau yield stress material. Bila suatu batang lurus diberikan beban tarik, maka

batang akan bertambah panjang. Regangan didefinisikan sebagai pertambahan panjang atau pemuaian. Pertambahan panjang persatuan panjang disebut satuan regangan. Deformasi plastis disebabkan oleh gaya yang bekerja pada suatu material, dimana gaya tersebut menyebabkan material mengalami perubahan bentuk dan ukuran hingga melewati batas elastisitasnya. Regangan plastis akan terjadi pada suatu material yang mengalami deformasi platsis. Pada saat gaya bekerja pada suatu material, nilai regangan total merupakan hasil penjumlahan dari nilai regangan elastis dan nilai regangan plastis saat gaya sudah tiak lagi bekerja pada material tersebut. Secara matematis dapat dituliskan pada persamaan 2.5.

2.9.2 Konsentrasi Tegangan

Suatu diskontinuitas dalam benda misalnya lubang atau takik, akan mengakibatkan distribusi tegangan tidak merata disekitar diskontinuitas tersebut. Pada beberapa daerah didekat diskontinuitas, tegangan akan lebih tinggi daripada tegangan rata-rata yang jauh letaknya dari diskontinuitas. Jadi telah terjadi konsentrasi tegangan pada diskontinuitas. (Nusyirwan, 2010)

$$K = \frac{\sigma_{maksimal}}{\sigma_{nominal}}$$; dimana, K = Faktor Tegangan

Konsentrasi tegangan dinyatakan dengan faktor tegangan K_t. Pada umumnya K_t adalah sebagai perbandingan antara tegangan maksimum dengan tegangan nominal terhadap dasar penampang sesungguhnya. (Deutchman, 1975)

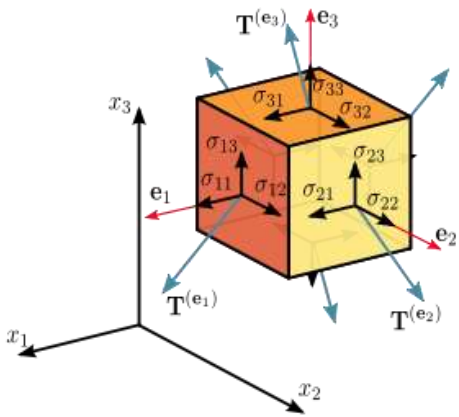
2.9.3 Tegangan Von Mises

Konsep teori kegagalan ini dapat memprediksikan ductile yielding berada di bawah suatu kombinasi pembebanan, dengan hanya menganalisis tegangan yield dari suatu material. Teori kegagalan ini memiliki tingkat akurasi lebih tinggi dari teori lainnya. Teori kegagalan ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi

ketika tegangan ekuivalen yang terjadi pada suatu material melebihi nilai tegangan yield material, serta faktor keamanan yang dinotasikan N, sehingga tidak terjadi kegagalan. (Deuschman 1975)

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_{ys}}{N}$$

Dimana, σ_{eq} = Tegangan Ekuivalen [N/m^2]
σ_{ys} = Tegangan *Yield Material* [N/m^2]



Gambar 2.7 Arah tegangan pada bidang 3 dimensi (http://www.rockmechs.com)

Berdasarkan gambar 2.7 maka σ_{eq} dapat dibentuk persamaan sebagai berikut :

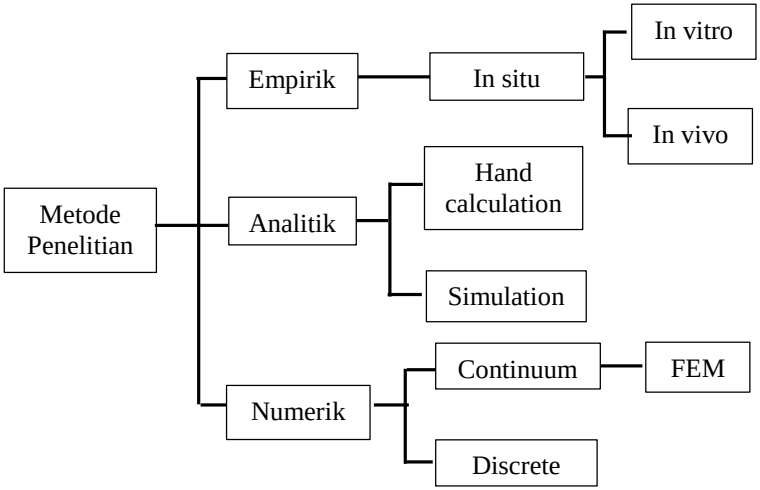
$$\tau_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2}\left[\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + \left(\sigma_x - \sigma_z\right)^2 + 6\left(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2\right)\right]^{1/2}$$

Dimana, σ_{eq} = Tegangan Ekuivalen [N/m^2]
σ_{ys} = Tegangan yield material [N/m^2]
$_x$ = tegangan pada sumbu x [N/m^2]
σ_y = tegangan pada sumbu y [N/m^2]
σ_z = tegangan pada sumbu z [N/m^2]
τ_{xy} = tegangan pada bidang x arah sumbu y [N/m^2]
τ_{yz} = tegangan pada bidang y arah sumbu z [N/m^2]
τ_{zx} = tegangan pada bidang z arah sumbu x [N/m^2]

Analisis tegangan *von-mises* ini digunakan karena objek penelitian memiliki geometri yang kompleks sehingga akan sulit untuk dianalisa dengan analisis tegangan yang lain. Tegangan *von-mises* merupakan suatu teganan ekuivalen yang dapat dijadikan sebagai hasil perhitungan yang akan dibandingkan dengan batas tegangan yield material untuk mengetahui angka keamanan dari desain objek penelitian.(Bower, 2018)

BAB III
METODE PENELITIAN

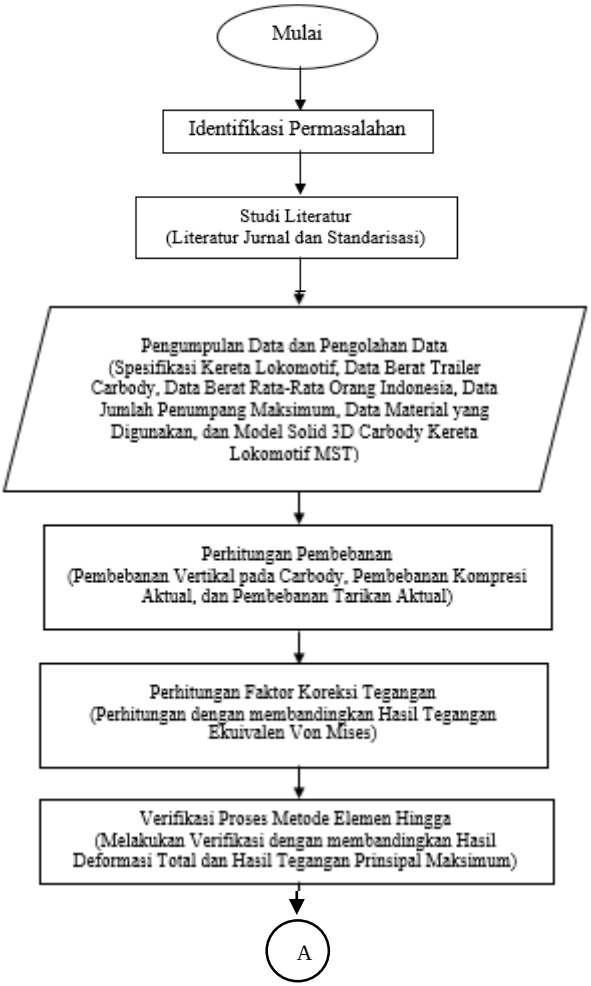
Metodologi Penelitian adalah sebuah langkah sistematis dalam menyelesaikan masalah yang diteliti, agar dapat menjawab permasalahan-permasalahan atau fenomena yang terjadi. Dalam bidang keteknikan, terdapat tiga metode yang dapat diaplikasikan dalam proses penelitian, seperti pada gambar :

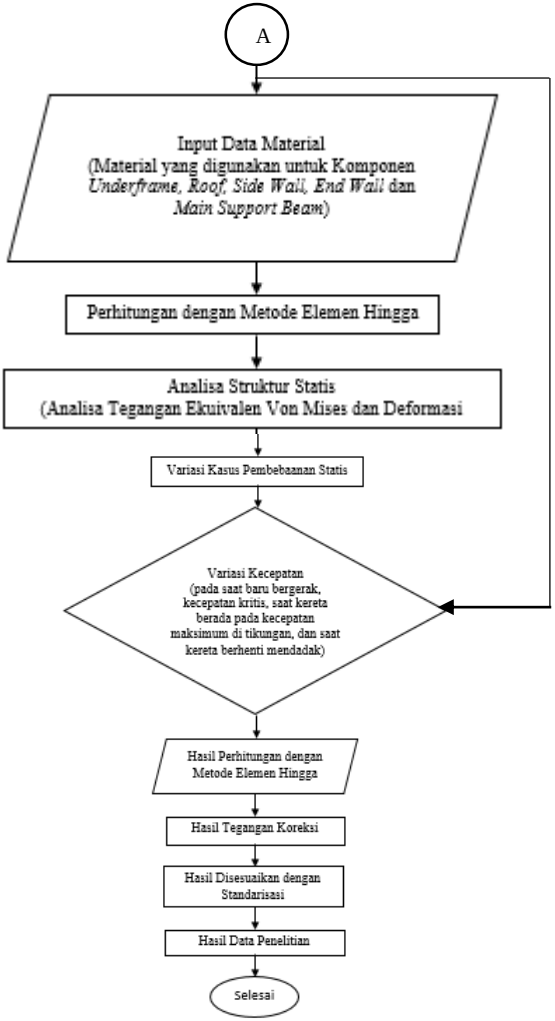


Gambar 3.1 Bagan metode penelitian

Setelah mengetahui jenis jenis dari metode penelitian, penulis memutuskan menggunakan Penelitian Numerik berupa Metode Elemen Hingga (MEH). Dikarenakan objek penelitian dapat dikatakan kompleks dan rumit sehingga untuk melakukan analisis struktur statis sangat sulit untuk dilakukan proses analisa dengan perhitungan manual, sehingga pada penelitian ini

penulis dalam proses perhitungan metode elemen hingga menggunakan software. Flowchart penelitian ditunjukkan pada gambar 3.2.





Gambar 3.2 Flowchart penelitian

3.1 Model Material

Dalam proses perhitungan dengan metode elemen hingga tahap pertama adalah mengaplikasikan material. Data referensi material yang digunakan pada penelitian ini merujuk pada data yang digunakan oleh PT. INKA. Material yang digunakan untuk komponen roof, side wall, underframe, dan end wall adalah Aluminium 6005A-T6. Data material properties ini didukung oleh Material Properties Database dari website *steeljis.com dan MakeItForm.com* yang didapatkan dari data publikasi standarisasi, dokumentasi supplier dan studi literatur.

Tabel 3.1 *Material Properties Aluminium 6005A-T6*

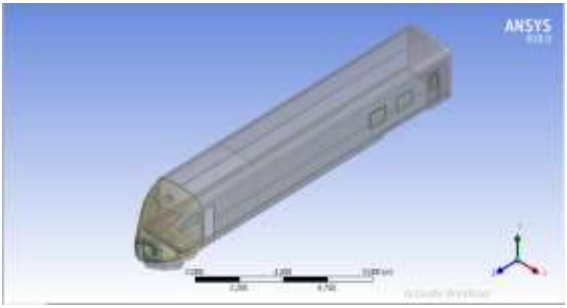
Properties	Constants	Dimensions
Density	2700	kg/m^3
Tensile Yield Strength	230	Mpa
Tensile Ultimate Strength	280	Mpa
Young's Modulus	69	Gpa
Poisson's Modulus	0.33	
Fatigue Stress	88	MPa
Shear Modulus	26	Gpa
Modulus of Resilience	370	kJ/m^3

3.2 Model Carbody

Pada penelitian ini, model carbody yang disimulasikan menggunakan model motor carbody yang elemennya telah

disederhanakan menjadi elemen shell. Penggunaan elemen shell pada penelitian ini bertujuan untuk mempercepat proses simulasi menggunakan metode elemen hingga menggunakan software *ansys workbench 18.0*.

Pada penelitian ini, model motor *carbody* yang akan disimulasikan disederhanakan dari model sesungguhnya. Komponen-komponen lainnya yang bukan termasuk komponen utama dari carbody dihilangkan dan dimodelkan dengan pembebanan dari komponen tersebut. Penghilangan komponen-komponen selain komponen *carbody* bertujuan agar jumlah element maupun node pada hasil meshing lebih sedikit, sehingga proses simulasi dapat lebih cepat mendapatkan solusi.

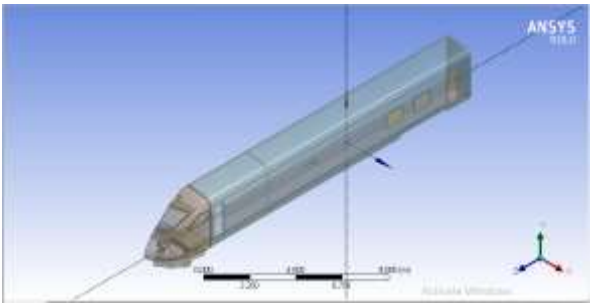


Gambar 3.3 Model *Carbody* utuh

3.3 Symmetry Region

Pendefinisaian *Symmetry Region* dalam prosedur MEH merupakan suatu kondisi batas dimana diluar bidang perpindahan (*displacement*) dan didalam bidang rotasi ditetapkan pada titik nol. Pemberian *symmetry region* dapat diberikan pada suatu model dengan kondisi batas pembebanan dan tumpuan dapat dianggap simetris. Pada penelitian ini, pembebanan pada motor *carbody* dapat dianggap simetris terhadap bidang YZ jika dilihat

pada gambar. karena pembebanan yang diberikan hanya terdapat pada sumbu Y dan Z. Begitu juga dalam kondisi batas tumpuan, ketika kita memotong menjadi setengah bagian model, tumpuan tersebut masih dapat digunakan dengan kondisi setengah bagian sehingga kondisi ini dapat diberikan kondisi batas *symmetry region*. Dengan diberikannya metode *symmetry region*, bentuk geometri model menjadi lebih berkurang dari kondisi awal, sehingga jumlah elemen pada proses disktritisasi dapat dimaksimalkan sesuai dengan kemampuan hardware dalam proses perhitungan numerik dengan menggunakan software *Ansys Workbench 18.0.*



Gambar 3.4 Model setelah dilakukan *symmetry region.*

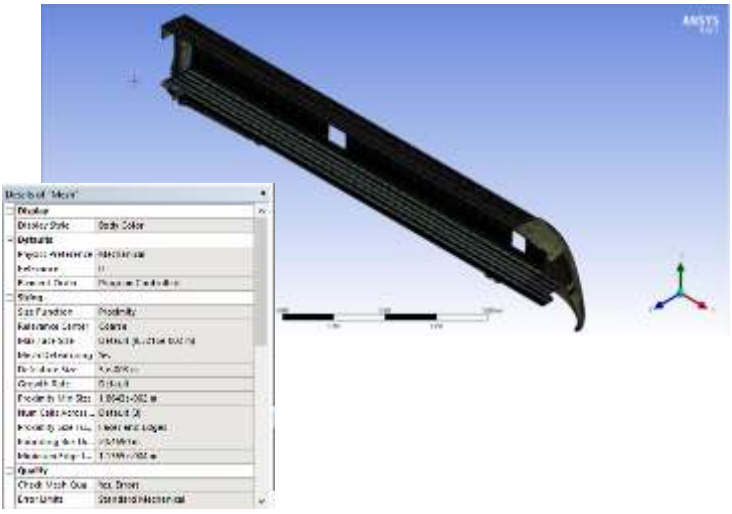
3.4 Elemen Kontak

Element kontak yang digunakan pada penelitian ini yaitu *bounded connection*. Bonded connection merupakan suatu metode penggabungan antara satu part dengan part yang lainnya secara terikat sehingga tidak ada sliding atau separasi ketika dilakukan pembebanan. Metode ini digunakan untuk menghasilkan meshing yang lebih terstruktur. Dikarenakan

elemen yang digunakan pada penelitian ini merupakan elemen shell maka secara menyeluruh *bounded connection* yang diberikan antara suatu garis ke garis yang lain.

3.5 Diskritisasi

Meshing adalah proses pembagian body menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Proses ini sangat mempengaruhi hasil dari simulasi. Oleh karena itu *meshing* harus dilakukan dengan jenis dan jumlah elemen yang sesuai dengan kebutuhan. Pada penelitian ini elemen yang diaplikasikan adalah *elemen shell* dengan ketebalan sesuai komponennya. Proses meshing yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode *Quadrilateral Dominant* sehingga hasil meshing memiliki bentuk yang terstruktur. Dengan metode *bounded connection*, jumlah bentuk *element mesh* yang tidak terstruktur berkurang, sehingga dengan bentuk mesh yang terstruktur akan menghasilkan result yang akurat.



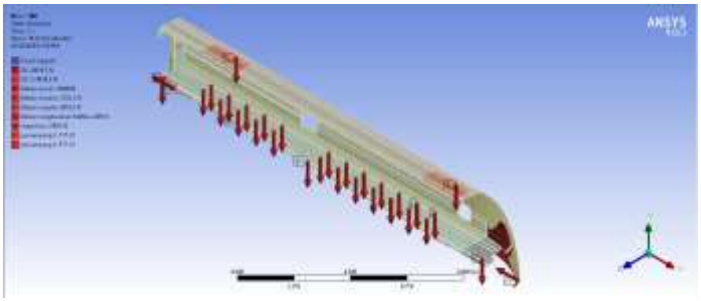
Gambar 3.5 Model setelah dilakukan proses *meshing*

Mesh convergent test merupakan suatu metode pengujian untuk mengetahui jumlah element mesh yang optimal untuk digunakan dalam proses perhitungan dengan metode elemen hingga (menggunakan software). *Mesh convergent test* sangat penting dalam metode elemen hingga, dikarenakan dengan analisa *mesh convergent test* akan didapatkan jumlah *element mesh* yang optimal sehingga hasil data yang didapatkan lebih valid dengan proses perhitungan software yang tidak begitu berat. Proses penambahan jumlah node mesh dan element mesh dengan cara mengatur nilai dari *body sizing* pada proses meshing. Semakin kecil nilai *body sizing* yang diberikan, semakin besar nilai jumlah node mesh dan element mesh yang dihasilkan.

3.6 Kondisi Batas dan Pembebanan

Kondisi batas (*boundary condition*) model ditunjukkan pada gambar 3.17.a oleh koordinat Kartesian, di mana X, Y, dan Z adalah arah horizontal, vertikal dan lateral. Pada bagian bawah dari komponen main support beam yang bertumpu pada bagian spring bogie diberikan *displacement* pada arah x = 0 (*fixed*), y = 0 (*fixed*) dan z = 0 (*fixed*) sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Baykasoglu et al (2012) dan penelitian Belete Jirru (2015). Karena pada penelitian Baykasoglu et al, analisa perhitungan metode elemen hingga divalidasi dengan melakuakan

eksperimen, sehingga kondisi batas tumpuan fixed dapat dijadikan sebagai acuan dalam penelitian ini

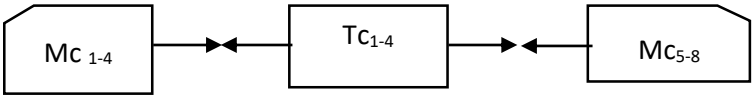


Gambar 3.6 Kondisi Model Setelah diberi Pembebanan

Begitu juga dalam penelitian Belete Jirru, kondisi batas tumpuan yang digunakan adalah tumpuan *fixed*, seperti pada gambar 3.6. Kondisi batas tersebut berlaku untuk dua *main support beam*, baik yang depan maupun yang belakang.

Beban komponen merupakan beban dari komponen yang memiliki pengaruh besar terhadap deformasi yang terjadi pada kontruksi *carbody* kereta lokomotif.

Beban Kompresi dan Beban Tarik Aktual didapatkan dari perhitungan manual dengan data penunjang dalam kondisi aktual. Kereta MST terdiri dari 3 *Carbody*, yaitu 4 *Motor Car*, 4 *Trailer Car*, dan 4 *Motor Car*. Pada setiap carbody menerima gaya pembebanan vertikal yang berbeda. Untuk mempermudah perhitungan dinamika, model free body diagram.



Gambar 3.7 Rangkaian Train Set pada Kereta MST

Pembebanan lainnya yang terdiri dari beban statik komponen AC (*Air Conditioning*), *engine* dari motor *carbody*, *Coupler*.

Pembebanan terhadap *carbody* kereta MST terdiri dari:

- Beban Kompresi longitudinal pada alat perangkai minimum sebesar 2000 kN, merupakan beban statis yang dikenakan pada peralatan perangkai, diperhitungkan bersama atau tanpa beban vertikal (*Data ini didapatkan dari Standarisasi EN-12663-1:2010)*;
  Beban Kompresi = 2000 kN.
- Beban Tarik longitudinal pada alat perangkai minimum sebesar 1000 kN, merupakan beban statis yang dikenakan pada peralatan perangkai, diperhitungkan bersama atau tanpa beban vertikal (*Data ini didapatkan dari Standarisasi EN-12663-1:2010)*;
  Beban Tarikan = 1000 kN.
- Beban vertikal diperhitungkan berdasarkan formula sebagai berikut:
  (*Formulasi perhitungan ini didapatkan dari Standarisasi EN-12663-1:2010*)

Pv = k (P1+P2)
Pv = beban vertikal
K = 1,3 (koefisien dinamis)
P1 = berat badan kereta dalam keadaan siap operasi
P2 = jumlah penumpang x 57.7 kg

(Data berat orang Asia sesuai dengan artikel "*The weight of nations: an estimation of adult human biomass"*)

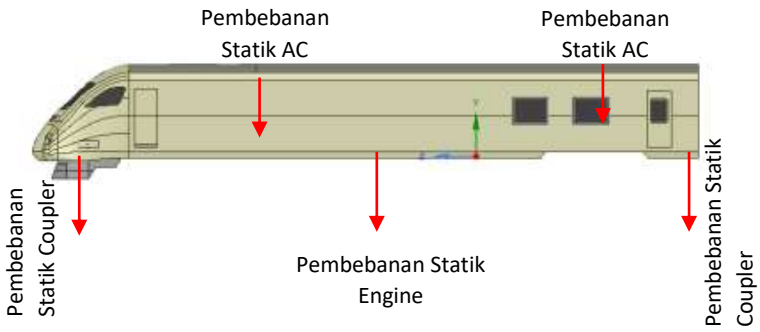
1. Pembebanan pada motor carbody pada kondisi sedang beroperasi
   Pv = 1,3 (59000 kg + 2885 kg) = 80450,5 kg

W = Pv x g , dengan asumsi g = 10 m/s^2
Beban Vertikal pada kondisi sedang beroperasi = 80450,5 x 10 m/s^2 = 804,5 kN

2. Pembebanan pada trailer carbody pada kondisi sedang beroperasi
   Pv = 1,3 (46000 kg + 3462 kg) = 64300,6 kg
   W = Pv x g , dengan asumsi g = 10 m/s^2
   Beban Vertikal pada kondisi sedang beroperasi = 64300,6 x 10 m/s^2 = 643 kN

Tabel 3.2 Pembebanan Komponen

No.	Komponen	Berat (kg)	Beban (N)
1.	AC (*Air Conditioning*)	450	4500
2.	Engine Cummins QSK-19	1928	19280
3.	Coupler	250	2500



Gambar 3.8 Lokasi Pembebanan Komponen

- Beban komponen merupakan beban dari komponen yang memiliki pengaruh besar terhadap deformasi yang terjadi pada kontruksi motor *carbody* kereta MST. Pembebanan komponen terdiri dari beban AC (*Air Conditioning*), Engine motor, dan *Coupler*, dijelaskan pada Tabel 3.2.
- Beban Kompresi dan Beban Tarik Aktual didapatkan dari perhitungan manual dengan data penunjang dalam kondisi aktual.

  Kereta MST terdiri dari 12 *Carbody*, yaitu 4 *Motor Car 1, 4 Trailer Car,* dan *Motor Car 2.* Pada setiap *carbody* menerima gaya pembebanan vertikal yang berbeda. Untuk mempermudah perhitungan dinamika, model *free body diagram*.

Tabel 3.3 Data Berat *Motor Carbody dan Trailer Carbody* Kereta MST

No.	Komponen	Berat (ton)	Simbol
1.	Motor Carbody	62,328	M_{MC}
2.	Trailer Carbody	46	M_{TC}
3.	Penumpang penuh motor carbody	2,885	M_{PMC}
4.	Penumpang penuh trailer carbody	3,462	M_{PTC}
5.	Masinis pada saat beroperasi	0,115	M_M

- Berat Total *Motor Carbody* saat beroperasi:

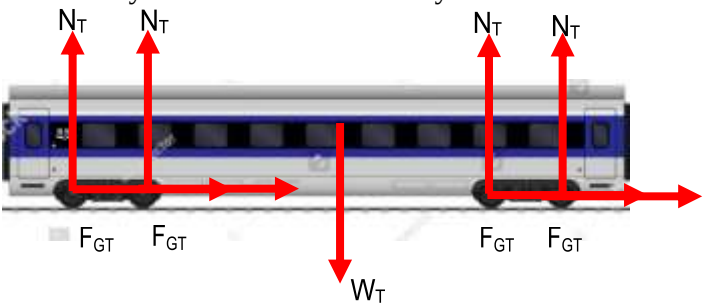
  M_1 : Berat total *Motor Carbody* saat beroperasi

  $M_1 = M_{MC} + M_{PMC} + M_M$

  $M_1 = (62,328) + 2,885 + (0,115) =$ **65,328 ton**

- Berat Total *Trailer Carbody* saat beroperasi:
  M_2 : Berat total *Trailer Carbody* saat beroperasi
  $M_2 = M_{TC} + M_{PTC}$
  $M_2 = (46) + (3{,}462) =$ **49,462 ton**

  Gaya Normal dan Gaya Gesek
  Gaya Normal Trailer Carbody



Gambar 3.9 Free Body Diagram *Trailer Car* MST

Keterangan :
N_T : Gaya Normal *Trailer Carbody*
W_T : Gaya Berat *Trailer Carbody*
F_{GT} : Gaya Gesek pada *Trailer Carbody*

$\Sigma F = 0$
$4N_T - W_T = 0$
$N_T = W_T/4$
$N_T = M_T \times g / 4$, $g = 10\ m/s^2$
$N_T = 49462\ kg \times 10\ m/s^2 / 4 = 123{,}655\ kN$

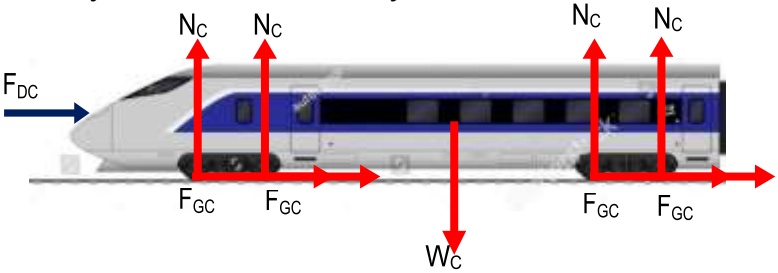
- Gaya Gesek pada *Trailer Carbody*

Berdasarkan referensi didapatkan bahwa nilai koefisien gesek rata-rata yang terjadi antara rel dan roda gerbong adalah 0,3, dengan kondisi rel kering tidak diberikan pelumas sama sekali.

$F_{GT} = \mu \times N_T$, $\mu = 0,3$

$F_{GT} = 0,3 \times 123,655$ kN = 37,09 kN

Gaya Normal *Motor Carbody*



Gambar 3.10 Free Body Diagram *Motor Car* pada Kereta MST

Keterangan :

N_C : Gaya Normal *Motor Carbody*

W_C : Gaya Berat *Motor Carbody*

F_{GC} : Gaya Gesek pada *Motor Carbody*

$\Sigma F = 0$

$4N_C - W_C = 0$

$N_C = W_C/4$

$N_C = M_L \times g / 4$, $g = 10$ m/s^2

$N_C = 65328$ kg x 10 m/s^2 / 4 = 163,321 kN

Gaya Gesek pada *Motor Carbody*

$F_{GC} = \mu \times N_C, \mu = 0,3$

$F_{GC} = 0,3 \times 163,3$ kN = 48,996 kN

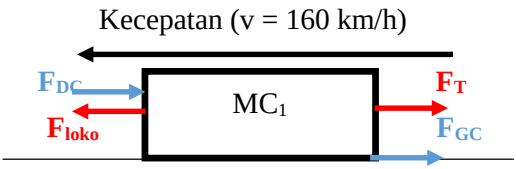
Gaya Hambatan Udara pada *Motor Carbody*
Pada kecepatan v = 160 km/h sebesar Cd = 0.348.
Dengan luasan frontal yang terkena efek aerodinamis lokomotif sebesar, A = 8,74 m^2. Sehingga gaya hambat karena aerodinamis kereta dapat dituliskan sebagai berikut,

$$F_{drag} = \frac{C_d\ \rho\ A\ V^2}{2}$$

dengan ρ_{udara} = 1.2 kg/m3 maka gaya hambat aerodinamis kereta pada kecepatan v = 160 km/h,

$$F_{drag} = \frac{(0.348)(1000)(8{,}74)(44)^2}{2} = 3.53\ kN$$

Mencari nilai beban tarikan maksimum pada motor carbody pada kondisi kecepatan sebesar 160 km/h



Gambar 3.11 Free Body Diagram Motor Car 1 pada Kecepatan 160 km/h

Dengan menggunakan data gaya tarik lokomotif atau *tractive effort* dari jurnal penelitian "Parametric Studies of North East Corridor Rail Passenger Service Between New York City and Washington, D.C." oleh John A. Stallkamp tahun 1977 dengan spesifikasi lokomotif diesel elektrik mirip dengan lokomotif *medium speed* Jakarta-Surabaya. Pada kecepatan maksimal sebesar 160 km/j didapat gaya tarik lokomotif sebesar 1.5 kN/ton.

$+\leftarrow \sum Fx = 0$

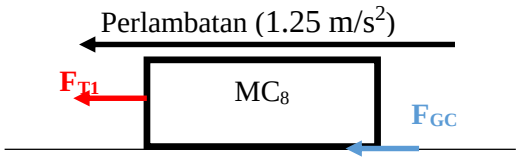
$F_{loko} - 4\ F_{gc} - Fdrag - Ft_{m1} = 0$

$F_{tm1} = F_{loko} - F_{gc} - F_d$

$= (1{,}5\ kN/ton \times ((65{,}328 \times 8) + (49{,}462 \times 4))) - (48{,}966 \times 4) - 3{,}53$

$= 881{,}193\ kN$

Mencari nilai beban tarikan maksimum pada motor carbody pada kondisi kereta MST sesaat akan melintasi jalur berbelok dengan radius minimal 200 m dan kecepatan sebesar 80 km/h dan perlambatan 1.25 m/s^2.



Gambar 3.12 Free Body Diagram Motor Car 8 pada Perlambatan 1.25 m/s^2

$\Sigma F = M_1\ a$

$-F_{T1} - 4F_{GC} = M_1\ a$

$F_{T1} = -4F_{GC} - M_1\ a$

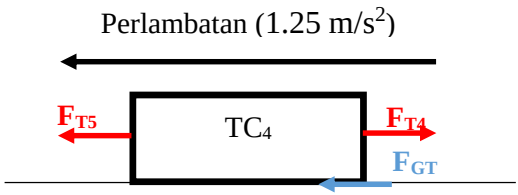
$F_{T1} = -(4 \times 48{,}996\ kN) - (65328\ kg \times 1{,}25\ m/s^2)$

$F_{T1} = -195{,}984\ kN - 81{,}66\ kN = -277{,}646\ kN$

Tabel 3.4 Data Beban Tarik Motor Carbody pada Perlambatan 1,25 m/s^2

No.	Carbody	Beban Tarik	Nilai Beban Tarik (kN)
1.	Motor Carbody 8	F_{T1}	-277,646
2.	Motor Carbody 7	F_{T2}	-555,291

3.	Motor Carbody 6	F_{T3}	-832,937
4.	Motor Carbody 5	F_{T4}	-1110,583



Gambar 3.13 Free Body Diagram Trailer Car pada Perlambatan 1.25 m/s^2

$\Sigma F = M_2\, a$

$F_{T4} - F_{T5} - 4F_{GT} = M_2\, a$

$F_{T5} = -M_2\, a - 4F_{GT} + F_{T4}$

$F_{T5} = -(49462 \text{ kg} \times 1.25 \text{ m/s}^2) - (4 \times 37{,}096 \text{ kN}) - 1110{,}583 \text{ kN}$

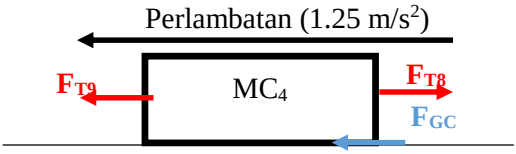
$F_{T5} = -62{,}322 \text{ kN} - 148{,}384 \text{ kN} - 1110{,}583 \text{ kN} = -1320{,}796 \text{ kN}$

Dengan cara perhitungan yang sama maka data beban tarikan dari trailer carbody adalah sebagai berikut:

Tabel 3.5 Data Beban Tarik Trailer Carbody pada Perlambatan 1.25 m/s^2

No.	Carbody	Beban Tarik	Nilai Beban Tarik (kN)
1.	Trailer Carbody 4	F_{T5}	-1320,796
2.	Trailer Carbody 3	F_{T6}	-1531,009
3.	Trailer Carbody 2	F_{T7}	-1741,223

4.	Trailer Carbody 1	F_{T8}	-1951,436



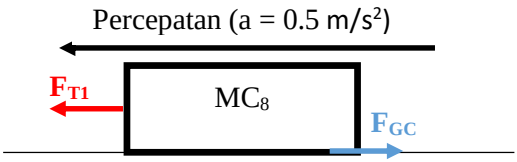
Gambar 3.14 Free Body Diagram Motor Car 4 pada Kecepatan 80 km/h

$\Sigma F = M_1 a$
$F_{T8} - F_{T9} – 4F_{GT} = M_1 a$
$F_{T9} = -M_C a - 4F_{GT} + F_{T1}$
$F_{T9} = -(65328 \text{ kg} \times 1.25 \text{ m/s}^2) – (4 \times 48,996 \text{ kN}) – 1951,436 \text{ kN} = -2229,083 \text{ kN}$

Tabel 3.6 Data Beban Tarik Motor Carbody pada Perlambatan 1.25 m/s^2

No.	Carbody	Beban Tarik	Nilai Beban Tarik (kN)
1.	Motor Carbody 4	F_{T9}	-2229,083
2.	Motor Carbody 3	F_{T10}	-2506,728
3.	Motor Carbody 2	F_{T11}	-2784,373

Mencari nilai beban tarik maksimum lokomotif carbody pada kondisi kereta baru bergerak dengan percepatan 0.5 m/s.



Gambar 3.15 Free Body Diagram Motor Car 8 pada Pecerpatan 0.5 m/s^2

$\Sigma F = M_1\ a$

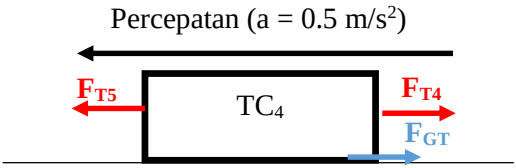
$F_{T1} - 4F_{GC} = M_1\ a$

$F_{T1} = 4F_{GC} + M_1\ a$

F_{T1} = (4 x 48,996 kN) + (65328 kg x 0.5 m/s^2) = 228,649

Tabel 3.7 Data Beban Tarik Motor Carbody pada Percepatan 0.5 m/s^2

No.	Carbody	Beban Tarik	Nilai Beban Tarik (kN)
1.	Motor Carbody 8	F_{T1}	228,649
2.	Motor Carbody 7	F_{T2}	457,298
3.	Motor Carbody 6	F_{T3}	685,948
4.	Motor Carbody 5	F_{T4}	914,597



Gambar 3.16 Free Body Diagram Trailer Car pada Pecerpatan 0.5 m/s^2

$\Sigma F = M_2\ a$

$F_{T5} - F_{T4} - F_{GT} = M_2\ a$

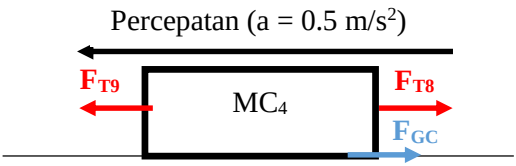
$F_{T5} = F_{T4} + F_{GT} + M_2\ a$

F_{T5} = 914,597 kN + (4 x 37,096 kN) + (49462 kg x 0.5 m/s^2) = 1087,714 kN

Dengan cara perhitungan yang sama maka data beban tarikan dari trailer carbody adalah sebagai berikut:

Tabel 3.8 Data Beban Tarik Trailer Carbody pada Percepatan 0.5 m/s^2

No.	Carbody	Beban Tarik	Nilai Beban Tarik (kN)
1.	Trailer Carbody 4	F_{T5}	1087,714
2.	Trailer Carbody 3	F_{T6}	1260,831
3.	Trailer Carbody 2	F_{T7}	1433,948
4.	Trailer Carbody 1	F_{T8}	1607,065



Gambar 3.17 Free Body Diagram Motor Car 4 pada Pecerpatan 0.5 m/s^2

$\Sigma F = M_1\ a$

$F_{T9} - F_{T8} - 4F_{GC} = M_1\ a$

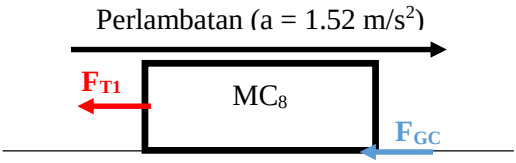
$F_{T9} = F_{T8} + 4F_{GC} + M_1\ a$

F_{T9} = 1607,065 kN + (4 x 48,996 kN) + (65328 kg x 0.5 m/s^2) = 1835,715 kN

Tabel 3.8 Data Beban Tarik Motor Carbody pada Percepatan 0.5 m/s^2

No.	Carbody	Beban Tarik	Nilai Beban Tarik (kN)
1.	Motor Carbody 4	F_{T9}	1835,715
2.	Motor Carbody 3	F_{T10}	2064,364
3.	Motor Carbody 2	F_{T11}	2293,013

Mencari nilai beban kompresi maksimum motor carbody pada kondisi kereta berhenti mendadak dengan perlambatan darurat sebesar 1.52 m/s^2.



Gambar 3.18 Free Body Diagram Motor Car 8 pada Perlambatan 1.52 m/s^2

$\Sigma F = M_1\ a$

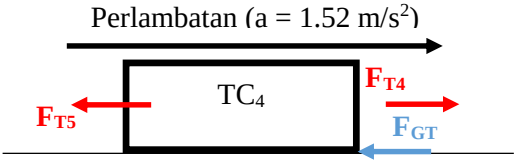
$-F_{T1} - 4F_{GC} = M_1\ a$

$F_{T1} = -4F_{GC} - M_1\ a$

$F_{T1} = -(4 \times 48{,}996\ kN) - (65328\ kg \times 1.52\ m/s^2) = -295{,}284\ kN$

Tabel 3.9 Data Beban Kompresi Motor Carbody pada Perlambatan 1.52 m/s^2

No.	Carbody	Beban Tarik	Nilai Beban Tarik (kN)
1.	Motor Carbody 8	F_{T1}	-295,284
2.	Motor Carbody 7	F_{T2}	-590,568
3.	Motor Carbody 6	F_{T3}	-885,853
4.	Motor Carbody 5	F_{T4}	-1181,137



Gambar 3.19 Free Body Diagram Trailer Car pada Perlambatan 1.52 m/s^2

$\Sigma F = M_2\, a$

$F_{T4} - F_{T5} - 4F_{GT} = M_2\, a$

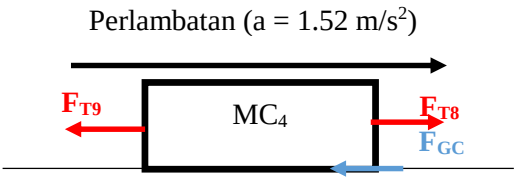
$F_{T5} = -M_2\, a - 4F_{GT} + F_{T4}$

$F_{T5} = -(49462 \text{ kg} \times 1{,}52 \text{ m/s}^2) - (4 \times 37{,}096 \text{ kN}) - 1181{,}137 \text{ kN} = -1404{,}705$

Dengan cara perhitungan yang sama maka data beban tarikan dari trailer carbody adalah sebagai berikut:

Tabel 3.10 Data Beban Kompresi Trailer Carbody pada Perlambatan 1.52 m/s^2

No.	Carbody	Beban Tarik	Nilai Beban Tarik (kN)
1.	Trailer Carbody 4	F_{T5}	-1404,705
2.	Trailer Carbody 3	F_{T6}	-1628,273
3.	Trailer Carbody 2	F_{T7}	-1851,842
4.	Trailer Carbody 1	F_{T8}	-2075,410



Gambar 3.20 Free Body Diagram Motor Car 2 pada Perlambatan 1.52 m/s^2

$\Sigma F = M_1\ a$

$F_{T8} - 4F_{GC} - F_{T9} = M_1\ a$

$F_{T9} = -4F_{GC} - M_1\ a + F_{T8}$

F_{T9} = -2075,41 kN - (65328 kg x 1.52 m/s^2) – 48,996 kN = -2370,694

Tabel 3.11 Data Beban Kompresi Motor Carbody pada Perlambatan 1.52 m/s^2

No.	Carbody	Beban Tarik	Nilai Beban Tarik (kN)
1.	Motor Carbody 4	F_{T9}	-2370,694
2.	Motor Carbody 3	F_{T10}	-2665,979
3.	Motor Carbody 2	F_{T11}	-2961,263

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan didapatkan nilai pembebanan kompresi maksimum sebesar 2961,263 kN yang didapat dari hasil perhitungan dengan kondisi perlambatan sebesar 1.52 m/s2, dan didapatkan nilai pembebanan tarik maksimum sebesar 2293,013 kN yang didapatkan dari hasil perhitungan dengan kondisi percepatan sebesar 0.5 m/s2.

Tabel 3.12 Hasil Aktual Pembebanan Tarik dan Pembebanan Kompresi

No	Pembebanan Maksimum	Nilai (kN)	Analisa
1.	Pembebanan Tarikan	881,193	Kecepatan 160 km/h
2.	Pembebanan Kompresi	-2784,373	Perlambatan 1.25 m/s^2
3.	Pembebanan Tarikan	2293,013	Percepatan 0.5 m/s^2
4.	Pembebanan Kompresi	-2961,263	Perlambatan 1.52 m/s^2

Jika dibandingkan dengan nilai pembebanan tarik dan pembebanan kompresi pada Standarisasi EN 12663-1:2010 yang memiliki pembebanan tarik sebesar 1000 kN dan pembebanan kompresi 2000 kN tidak sesuai dengan kategori P-1. Namun perlu mendapatkan hasil dengan melakukan perhitungan metode elemen hingga dengan pembebanan kompresi dan tarikan berdasarkan standarisasi dan berdasarkan perhitungan secara manual.

3.7 Tipe Analisis

3.7.1 Analisis Deformasi Total

Pada penelitian ini, analisis deformasi total dilakukan untuk melihat hasil defleksi yang terjadi. Hasil defleksi pada analisis ini akan dibandingkan dengan Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by

undercutting metro tunnel excavation yang dilakukan oleh Wangping et al, 2018. Pada laporan tersebut dijelaskan bahwa, defleksi vertikal yang terjadi pada underframe tidak melebihi 0,275 in atau 7 mm.

3.7.2 Analisis Tegangan Von Mises

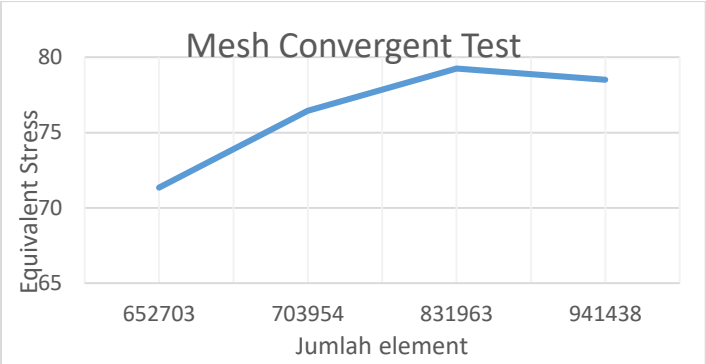
Pada penelitian ini, analisis tegangan von-mises digunakan untuk mengetahui keamanan dari material yang digunakan pada komponen carbody. Hasil dari simulasi ini pada akhirnya akan dibandingkan dengan standarisasi EN-12663-1:2010 dan PM 175 tahun 2015 untuk mengetahui tegangan maksimum yang terjadi dapat memasuki toleransi atau tidak.

3.7.3 Mesh Convergent Test

Convergent test dilakukan untuk mengatur deviasi hasil perhitungan. Untuk mendapatkan hasil yang convergent dilakukan pengecilan ukuran elemen sampai mendapat hasil error di bawah lima persen. Tes convergent dilakukan dengan mengambil suatu titik acuan untuk dibandingkan perubahan tegangan yang terjadi terhadap perubahan ukuran elemen.

Tabel 3.13 Hasil Mesh Convergent Test

No	Equivalent Stress (MPa)	Node	Element	Error (%)
1	71,36	610682	652703	-
2	76,45	662847	703954	9,62
3	79,26	788009	831963	6,48
4	78,51	896164	941438	2,73



Gambar 3.21 Grafik Hasil Uji Mesh Convergent Test

Hasil dari convergent test dijadikan sebagai acuan minimal jumlah nodes dan elements untuk melakukan perhitungan metode elemen hingga. Pada gambar, hasil yang dijadikan sebagai acuan jumlah nodes 196164 dan element sebesar 141438 elements karena memiliki error di bawah lima persen yaitu 2,7%.

BAB IV
PEMBAHASAN

Dalam bab 4 ini akan dijelaskan mengenai hasil dari simulasi desain kontruksi motor carbody kereta MST yang terdiri dari komponen utama underframe, end wall, side wall, dan roof yang menggunakan material Al 6005A-T6. Adapun hal yang dianalisa pada simulasi kali ini adalah tegangan ekstrim dan deformasi total pada konstruksi motor carbody dengan variasi mode gerak.

4.1 Hasil Tegangan Von-Mises Maksimum

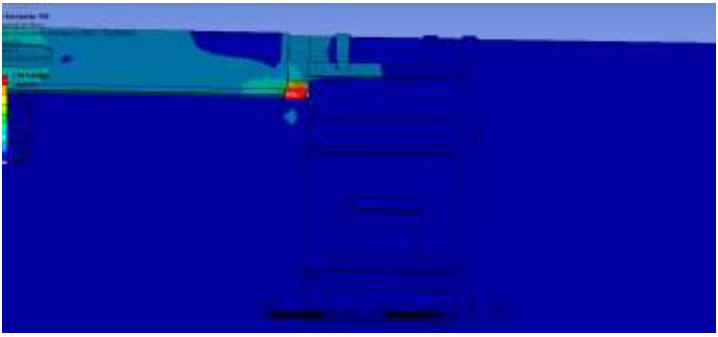
Untuk menguji apakah deformasi yang dihasilkan pada proses perhitungan dengan metode elemen hingga dapat digunakan untuk menganalisis struktur statis kontruksi motor carbody kereta MST, maka dilakukan perhitungan dengan metode elemen hingga untuk mendapatkan nilai tegangan von mises maksimum terlebih dahulu. Perhitungan ini bertujuan untuk memastikan tegangan yang terjadi pada kontruksi carbody kereta MST sudah sesuai dengan standarisasi PM 175 Tahun 2015.

Sesuai dengan standariasi PM 175 tahun 2015 tentang perancangan kontruksi carbody dapat diterima ketika tegangan yang terjadi pada beban maksimum pada titik kritis kontruksi badan kereta tidak melebihi 75% tegangan mulur bahan. Material Al 6005A-T6 memiliki nilai tegangan mulur sebesar 230 MPa.

4.1.1. Kasus Mode Gerak 1

Pada mode gerak kereta MST dengan kecepatan stabil 160 km/h tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6061-T6 terjadi pada komponen

underframe bagian belakang seperti pada gambar 4.1 dimana terdapat kontur berwarna merah dengan nilai 219 MPa. Titik tegangan maksimum berada di *underframe* pada support belakang disebabkan oleh beban tarik yang diterima oleh coupler belakang pada motor carbody yaitu sebesar 881,193 kN. Beban tarik sebesar 881,193 kN dipengaruhi oleh gaya gesek kereta dengan rel, *drag force* yang dialami oleh motor carbody ketika kereta sedang beroperasi, selain itu juga beban tiap carbody yang berada dalam satu trainset.



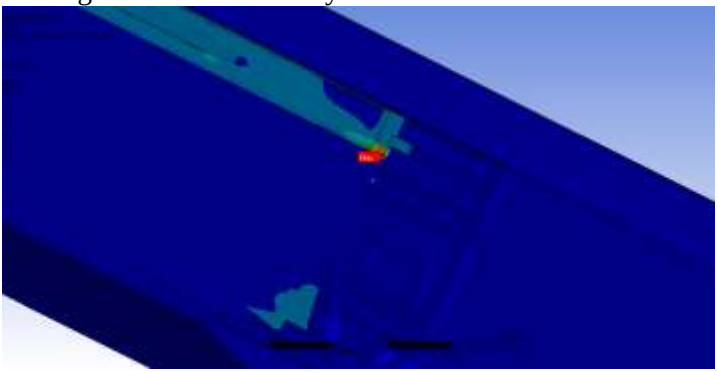
Gambar 4.1 Hasil Tegangan Maksimum Pada Kasus Mode Gerak 1

Presentase tegangan : $\frac{219}{230}$. 100% = 95 % dari tegangan mulur Maka pada kasus mode gerak 1 didapatkan nilai 95 % dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6, sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya melebihi 75% tegangan mulur Al 6005A-T6.

4.1.2. Kasus Mode Gerak 2

Pada mode gerak kereta MST ketika kereta akan melintasi jalur

yang berbelok dengan perlambatan 1,25 m/s^2 tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 terjadi pada underframe yang berdekatan dengan fixed support belakang jendela dengan nilai 1039 MPa. Titik tegangan maksimum berada di *underframe* disebabkan oleh beban kompresi yang diterima oleh coupler belakang pada motor carbody yaitu sebesar 2784,37 kN. Beban tarik sebesar 2784,37 dipengaruhi oleh besarnya perlambatan, semakin besar perlambatan yang dilakukan oleh suatu kereta maka beban kompresi yang diterima oleh motor carbody akan lebih besar dan dapat mengalami kerusakan apabila beban yang diterima mengakibatkan tegangan maksimum yang dihasilkan melebihi 75% tegangan mulur material, sehingga mengakibatkan kereta tersebut tidak aman sesuai dengan standariasi PM 175 tahun 2015 tentang perancangan kontruksi carbody



Gambar 4.2 Hasil Tegangan Maksimum Pada Kasus Mode Gerak 2

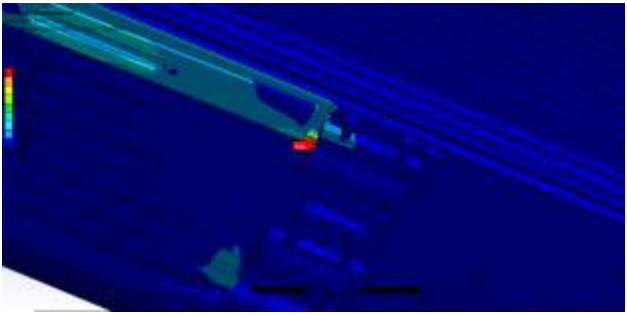
Presentase tegangan : $\frac{1039}{230}$. 100% = 451 % dari tegangan mulur

Maka pada kasus mode gerak 2 didapatkan nilai 451 % dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6, sehingga dapat dikatakan

aman karena nilai persentasenya tidak melebihi 75% tegangan mulur Al 6005A-T6.

4.1.3. Kasus Mode Gerak 3

Pada mode gerak kereta MST ketika baru bergerak dengan percepatan 0,5 m/s^2 tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 terjadi pada underframe yang berdekatan dengan fixed support belakang jendela dengan nilai 734 MPa. Titik tegangan maksimum berada di *underframe* disebabkan oleh beban tarik yang diterima oleh coupler belakang pada motor carbody yaitu sebesar 2293 kN. Beban tarik sebesar 2293 kN dipengaruhi oleh gaya gesek kereta dengan rel, *drag force* yang dialami oleh motor carbody ketika kereta sedang beroperasi, selain itu juga beban tiap carbody yang berada dalam satu trainset. Hasil tegangan maksimum yang dihasilkan oleh percepatan 0,5 m/s^2 mirip dengan hasil pada kasus mode gerak 1, titik tegangan maksimum dari kasus 1, dan 3 juga mirip dikarenakan beban yang diterima adalah beban tarikan. Ketika kereta baru bergerak diperlukan beban tarik yang lebih besar apabila dibandingkan dengan beban tarik ketika kereta sudah berjalan.

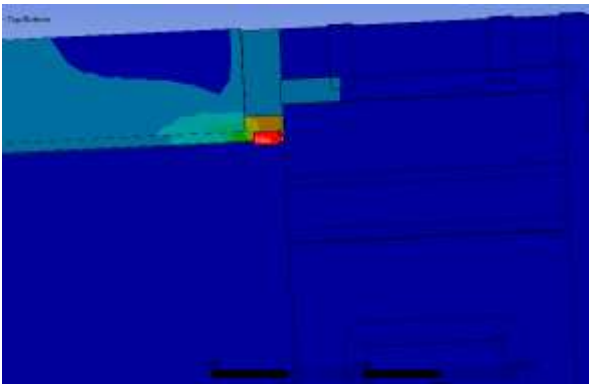


Gambar 4.3 Hasil Tegangan Maksimum Pada Kasus Mode Gerak 3

Presentase tegangan : $\frac{734}{230}$. 100% = 319 % dari tegangan mulur
Maka pada kasus mode gerak 3 didapatkan nilai 319% dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6sehingga dapat dikatakan aman karena nilai persentasenya melebihi 75% tegangan mulur Al 6061-T6.

4.1.4. Kasus Mode Gerak 4

Pada mode gerak kereta MST ketika berhenti mendadak atau darurat dengan pelambatan 1,52 m/s^2 tegangan von-mises maksimum yang terjadi pada material Al 6005A-T6 terjadi pada underframe yang berdekatan dengan fixed support belakang jendela dengan nilai 1100 MPa. Titik tegangan maksimum berada di *underframe* disebabkan oleh beban kompresi yang diterima oleh coupler belakang pada motor carbody yaitu sebesar 2961,26 kN. Beban tarik sebesar 2961,26 kN dipengaruhi oleh besarnya perlambatan, semakin besar perlambatan yang dilakukan oleh suatu kereta maka beban kompresi yang diterima oleh motor carbody akan lebih besar dan dapat mengalami kerusakan apabila beban yang diterima mengakibatkan tegangan maksimum yang dihasilkan melebihi 75% tegangan mulur material, sehingga mengakibatkan kereta tersebut tidak aman sesuai dengan standariasi PM 175 tahun 2015 tentang perancangan kontruksi carbody. Maka dari itu perlambatan sebesar 1,52 m/s^2 tidak dijadikan sebagai perlambatan operasional karena termasuk dalam kategori tidak aman.



Gambar 4.4 Hasil Tegangan Maksimum Pada Kasus Mode Gerak 4

Presentase tegangan : $\frac{1100}{230}$. 100% = 478 % dari tegangan mulur

Maka pada kasus mode gerak 4 didapatkan nilai 478 % dari tegangan mulur bahan Al 6005A-T6, sehingga dapat dikatakan tidak aman karena nilai persentasenya melebihi 75% tegangan mulur Al 6005A-T6.

Berdasarkan hasil perhitungan tegangan maksimum denan metode elemen hingga dapat diolah seperti pada tabel 4.1 dimana pada kasus mode gerak 1, 2, 3 aman sesuai dengan standariasi PM 175 tahun 2015 terkecuali pada kasus mode gerak 4 dimana kereta mengalami perlambatan darurat.

Tabel 4.1 Hasil Analisis Tegangan Maksimum

Kasus	Tegangan Yield (MPa)	Tegangan Maksimum Von Mises (MPa)	% dari tegangan yield	Faktor Keamanan	Analisa Tegangan Von Mises
1	230	219	95%	1,05	Tidak Aman
2	230	1039	451%	0,22	Tidak Aman

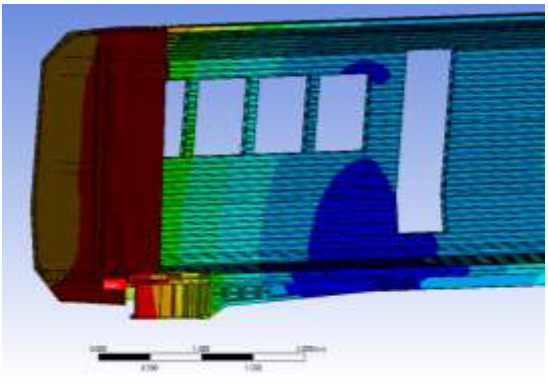
3	230	734	319%	0,31	Tidak Aman
4	230	1100	478%	0,21	Tidak Aman

4.2 Hasil Analisis Deformasi Total Maksimum

Material Al 6005A-T6 ini digunakan pada komponen utama motor *carbody* kereta MST, yaitu *underframe*, *end wall*, *side wall*, dan *roof*. Dengan mengikuti penelitian yang dilakukan oleh Wangping et al, 2018 tentang Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation yang menerangkan bahwa batasan defleksi maksimum yang terjadi pada kontruksi *carbody* kereta MST adalah sebesar 0,275 in atau 7 mm, kontruksi *carbody* kereta MST dapat dikatakan aman, jika nilai deformasi total yang terjadi lebih kecil dari nilai batasan maksimum defleksi yang diperbolehkan sesuai laporan tersebut.

4.2.1 Kasus Mode Gerak 1

Pembebanan ketika kereta bergerak dengan kecepatan 160 km/h yang didistribusikan pada kasus pembebanan I adalah pembebanan vertikal dengan penumpang, dan pembebanan komponen. Setelah dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode elemen hingga deformasi total maksimum sebesar 4,6 mm terjadi pada komponen underframe bagian belakang.



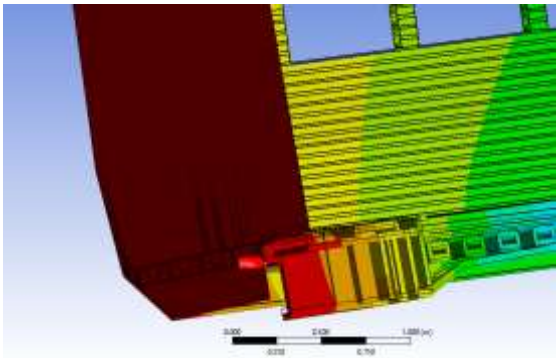
Gambar 4.5 Hasil Deformasi Total Pada Kasus Mode Gerak 1

Nilai faktor keamanan defleksi : $\frac{7}{4,6}$ = 1,52

Jika hasil pada kasus pembebanan I dibandingkan dengan referensi Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation, menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 1,52.

4.2.2 Kasus Mode Gerak 2

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan 2 adalah pembebanan vertikal dengan penumpang, dan pembebanan komponen. Deformasi total maksimum sebesar 28,4 mm terjadi pada komponen underframe bagian belakang.



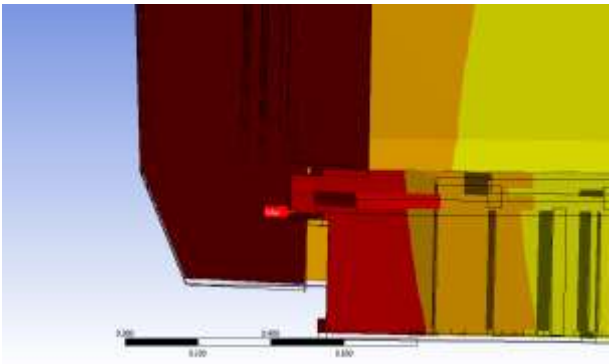
Gambar 4.6 Hasil Deformasi Total Pada Kasus Mode Gerak 2

Nilai faktor keamanan defleksi : $\frac{7}{28,4}$ = 0,24

Jika hasil pada kasus pembebanan 2 dibandingkan dengan referensi Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation, menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 0,24.

4.2.3 Kasus Mode Gerak 3

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan 3 adalah pembebanan vertikal dengan penumpang, dan pembebanan komponen. Deformasi total maksimum sebesar 18,1 mm terjadi pada komponen underframe bagian belakang.



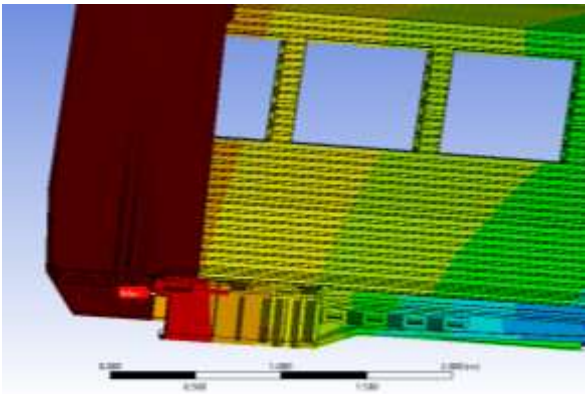
Gambar 4.7 Hasil Deformasi Total Pada Kasus Mode Gerak 3

Nilai faktor keamanan defleksi : $\frac{7}{18,1}$ = 0,38

Jika hasil pada kasus pembebanan 3 dibandingkan dengan referensi Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation, menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 0,38.

4.2.4 Kasus Mode Gerak 4

Pembebanan yang didistribusikan pada kasus pembebanan 4 adalah pembebanan vertikal dengan penumpang, dan pembebanan komponen. Deformasi total maksimum sebesar 30 mm terjadi pada komponen underframe bagian belakang.



Gambar 4.8 Hasil Deformasi Total Pada Kasus Mode Gerak 4

Nilai faktor keamanan defleksi : $\frac{7}{30}$ = 0,23

Jika hasil pada kasus pembebanan 4 dibandingkan dengan referensi Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation, menghasilkan angka keamanan untuk defleksi yang terjadi sebesar 0,23.

Tabel 4.2 Hasil Analisis Deformasi Total

Kasus	Deformasi Total (mm)	Faktor Keamanan Deformasi	Keterangan
1	4,6	1,52	Aman
2	28,4	0,24	Tidak Aman
3	18,1	0,38	Tidak Aman
4	30	0,23	Tidak Aman

4.3 Pembahasan

4.3.1 Pembahasan Analisis Tegangan Von Mises Maksimum

Setelah melakukan proses perhitungan dengan metode elemen hingga, didapatkan data tegangan von mises maksimum seperti pada tabel. Dari data pada tabel dapat diketahui bahwa pada kondisi kasus 1, 2, 3, dan 4 dikatakan tidak aman untuk material yang digunakan, karena persentase tegangan von mises maksimum terhadap tegangan mulur material yang dihasilkan di atas 75% tegangan mulur material sesuai dengan Standarisasi Nasional PM 175 Tahun 2015.

Dari hasil simulasi diketahui bahwa titik kritis dari kasus mode gerak 1, 2, 3, 4 berada pada underframe belakang, yang lebih tepatnya berada di dekat fixed support belakang. Pada proses simulasi tegangan terkonsentrasi pada underframe bagian belakang dikarenakan beban longitudinal yang dibebankan kepada carbody besar, namun nilai tegangan yang terjadi masih dikatakan tidak aman pada kasus 1, 2, 3, dan 4. Hal ini dikarenakan pembebanan longitudinal yang melebihi standart EN-12663-1 dimana pada kereta kategori P-1 pembebanan tarikan maksimum sebesar 1500 kN dan pembebanan kompresi maksimum sebesar 2000 kN. Apabila dilihat dari Standarisasi Nasional PM 175 tahun 2015 juga tidak aman untuk kasus 1, 2, 3, dan 4 dikarenakan tegangan maksimum yang dihasilkan melebihi 75% dari tegangan mulur material Aluminium 6005A-T6 setelah dilakukan proses perhitungan dengan metode elemen hingga. Meskipun terdapat pembebanan komponen seperti engine, AC, coupler, dan penumpang tegangan kritis tetap pada daerah yang mengalami beban longitudinal karena beban tersebut sangat besar dikarenakan pada trainset kereta MST tipe DMU ini terdiri dari 12 gerbong dengan 8 motor carbody yang memiliki massa total ketika beroperasi sebesar 65,33 ton dan 4

trailer carbody yang memiliki massa total ketika beroperasi sebesar 49,46 ton.

4.3.2 Pembahasan Analisis Deformasi Total

Setelah melakukan proses perhitungan dengan metode elemen hingga, didapatkan data deformasi total seperti pada tabel 4.2. dapat diketahui bahwa pada proses perhitungan kasus 1, 2, 3, 4 memiliki titik deformasi yang sama yaitu pada underframe bagian belakang sepeti pada gambar 4,5. Meskipun memiliki variasi mode gerak yang berbeda-beda namun memiliki titik deformasi yang mirip dikarenakan beban terkonsentrasi pada underframe bagian belakang, dimana pada bagian tersebut terdapat beban longitudinal dan juga beban coupler.

Pada kasus mode gerak 1 dimana kereta berada pada kecepatan stabil sebesar 160 km/h menghasilkan angka total deformasi sebesar 4,6 mm dan faktor keamanan deformasi sebesar 1,52 sehingga masih dkatakan aman mengacu pada standarisasi *Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation* pada tahun 2018 yang menerangkan bahwa batasan defleksi maksimum yang terjadi pada kontruksi *carbody* kereta adalah sebesar 0.275 in atau 7 mm. sedangkan pada kasus mode gerak 2, 3, dan 4 menghasilkan angka deformasi diatas 7 mm sehingga dapat dikatakan tidak aman. Dengan angka faktor keamanan defleksi sebesar 2, kontruksi *carbody* kereta MST sudah dapat dikatakan aman dengan menggunakan material Al 6005A-T6. Hal ini dikarenakan pembebanan longitudinal yang melebihi standart EN-12663-1 dimana pada kereta kategori P-1 pembebanan tarikan maksimum sebesar 1500 kN dan pembebanan kompresi maksimum sebesar 2000 kN, sehingga dapat dilihat juga pada semua kasus mode gerak menghasilkan titik maksimum deformasi di bagian belakang dimana pembebanan longitudinal diberikan.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari proses perhitungan dengan metode elemen hingga pada model kontruksi motor *carbody* kereta MST dengan meninjau aspek analisis tegangan ekuivalen *von mises* dan analisis deformasi total yang memvariasikan 4 kasus mode gerak

1. Nilai tegangan ekuivalen von mises maksimum pada semua kasus mode gerak menghasilkan hasil tegangan maksimum yang tidak aman setelah dilakukan proses simulasi dengan metode elemen hingga. Hal ini disebabkan oleh persentase tegangan von mises maksimum terhadap tegangan mulur material yang dihasilkan di atas 75% tegangan mulur material sesuai dengan Standarisasi Nasional PM 175 Tahun 2015.
2. Pada semua kasus mode gerak menghasilkan titik tegangan maksimum yang mirip yaitu berada di bagian underframe support belakang dengan nilai terbesar 1100 MPa, pada saat kereta mengalami perlambatan darurat.
3. Nilai deformasi total maksimum pada kasus mode gerak 2, 3, dan 4 menghasilkan hasil deformasi yang tidak aman dikarenakan angka deformasi yang dihasilkan melebihi 7 mm mengacu pada standarisasi *Deformation characteristics and safety assessment of a high-speed railway induced by undercutting metro tunnel excavation* pada tahun 2018, kecuali pada kasus mode gerak 1 dimana kereta berada pada kecepatan stabil 160 km/h yang masih aman karena angka deformasi yang dihasilkan sebesar 4,6 mm.
4. Pada semua kasus mode gerak menghasilkan titik deformasi maksimum yang mirip yaitu berada di bagian

belakang kereta dengan nilai terbesar 30 mm, pada saat kereta mengalami perlambatan darurat.

5. Berdasarkan hasil analisa dengan menggunakan metode elemen hingga dapat dikatakan bahwa variasi mode gerak kereta MST berpengaruh terhadap kekuatan *carbody* dari segi tegangan maksimum dan deformasi pada kontruksi *Carbody* motor kereta MST. Hal ini dikarenakan oleh variasi mode gerak yang berpengaruh terhadap pembebanan longitudinal dari carbody motor kereta MST.

5.2 Saran

Demi kelancaran proses perhitungan dengan metode elemen hingga pada model kontruksi *carbody* kereta MST disarankan untuk menyiapkan perangkat hardware dengan kapasitas RAM diatas 16GB, dikarenakan model kontruksi *carbody* kereta MST ini akan menghasilkan banyak *node* dan *element* mesh sehingga dibutuhkan kapasitas RAM hardware diatas 16GB untuk menyelesaikan perhitungan dengan metode elemen hingga. Serta untuk meninjau lebih lanjut penelitian tentang analisa statik struktural, perlu dilakukannya proses perhitungan dengan metode elemen hingga menggunakan elemen *solid* agar dapat diketahui perbedaan hasil antara elemen *shell* dengan elemen *solid*. Namun perlu dipersiapkan kapasitas RAM lebih dari 16GB untuk proses perhitungan metode elemen hingga dengan elemen solid. Dari hasil perhitungan penelitian, diperlukan tindak lanjut berupa validasi dengan hasil eksperimen apabila gerbong lokomotif ini terealisasi karena validasi tidak dapat mendekati nilai yang sama apabila dilakukan dengan membandingkan dengan model gerbong kereta jenis lain. Selain itu, manfaat dari membandingkan dengan hasil eksperimen adalah untuk mempelajari pola dalam melakukan simulasi perhitungan elemen hingga untuk project gerbong kereta selanjutnya.

Daftar Pustaka

Baykasoglu, C. 2012. ***Numerical Static and Dynamic Stress Analysis on Railway Passenger And Freight Car Models***. Jurnal Internasional. Karabuk, Turkiye.

Bhatti, M. A. 2005. ***Fundamentals Finite Element Analysis and Applications***. John Willey & Sons, Inc.

Bower, A. F. 2008. ***Applied Mechanics of Solids***. Brown University, Providence, Rhode Island, USA : CRC Press

British Standard. 2010. ***Railway applications – Structural requirements of railway vehicle bodies* (*BS EN 12663- 1:2010*)**. Chiswick High Road, London : BSI Group.

Cook, R. D. 1995. ***Finite Element Modelling for Stress Analysis***. United States of America : Pearson Education, Inc.

Deutchman, A. 1975. ***Machine Design Theory and Practice***. Mac Millan Publishing Co., New York.

Hibbeler, R.C. 2008. ***Mechanics of Materials***. Canada : Pearson Prentice Hall

Jirru, B. 2015. ***Modeling and Structural Analysis of railway Vehicle body with Finite Element method***, PhD Thesis. Addis Ababa University, Etiopia.

Menteri Perhubungan Republik Indonesia. 2015. ***PERATURAN MENTERI PERHUBUNGAN REPUBLIK INDONESIA NOMOR : PM 175 TAHUN 2015 Tentang "Standar Spesifikasi Teknis Kereta Kecepatan Normal Dengan Penggerak Sendiri"***. Jakarta.

Nusyirwan. 2010. ***Analisis Untuk Menentukan Faktor Konsentrasi Tegangan Dengan Eksperimental Dengan Eksperimental dan Metode Elemen Hingga***. Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin. Universitas Andalas, Padang.

Randell, N. 2011. ***Fast Tracking Rail Vehicle Design. Bombardier***. United Kingdom.

Spiryagin, M. 2014. ***Design and Simulation of Rail Vehicles***. London : CRC Press

Syah, K. 2017. ***Analisis Deformasi pada Stent Asymmetric dengan Variasi Tipe Connector***. Tugas Akhir. Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

BIODATA PENULIS

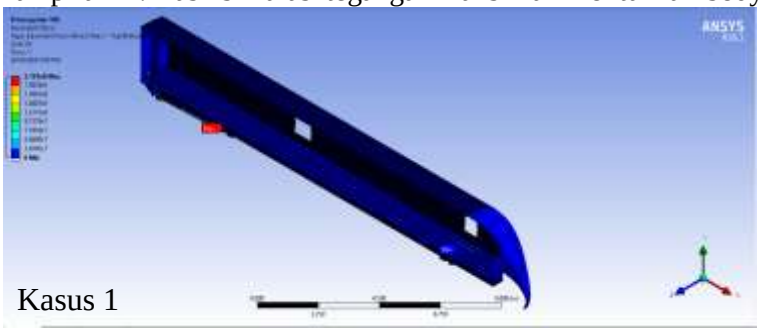
Dharma Febriola merupakan nama lengkap dari penulis tugas akhir ini. Penulis yang lahir di Lumajang pada 21 Februari 1997 ini merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Iksan dan Ibu Tyasning Lestari Supiyanti. Penulis memulai pendidikan formal di TK Kemala Bhayangkari kemudian melanjutkan ke SDN Ditotrunan 1 Lumajang. Setelah lulus SD pada tahun 2009 penulis melanjutkan ke SMPN 1 Lumajang dan kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 2 Lumajang pada tahun 2012. Setelah menyelesaikan studi tingkat menengah atas, penulis menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur SBMPTN pada tahun 2015 dengan NRP 02111540000119. Penulis mengambil bidang studi Desain khususnya pada laboratirum Mekanika Benda Padat.

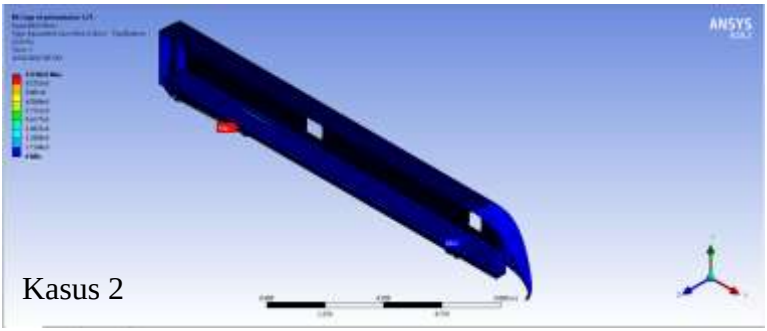
Selama menempuh perkuliahan, penulis juga aktif ikut serta dalam berbagai kegiatan dan organisasi. Tahun 2016-2017 penulis menjabat sebagai Staf Departemen Sosial Masyarakat BEM FTI, kemudian pada tahun 2017-2018 penulis menjabat sebagai Kepala Departemen Sosial Masyarakat BEM FTI. Penulis memiliki pengalaman kerja praktik bagian divisi maintenance PT. Pertamina (Persero) RU IV Balongan dimana penulis merancang matriks maintenance dan analisa FMEA pada Jetty Propylane.

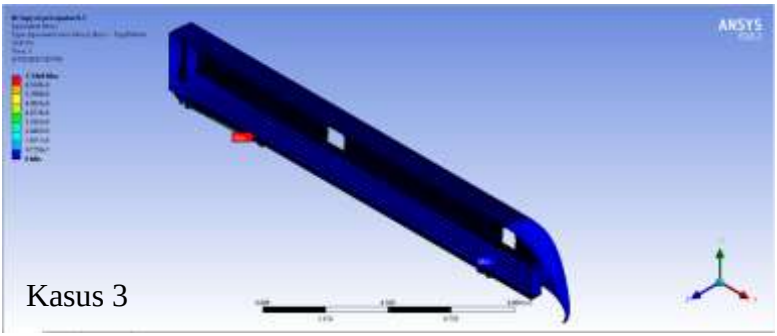
(halaman ini sengaja dikosongkan)

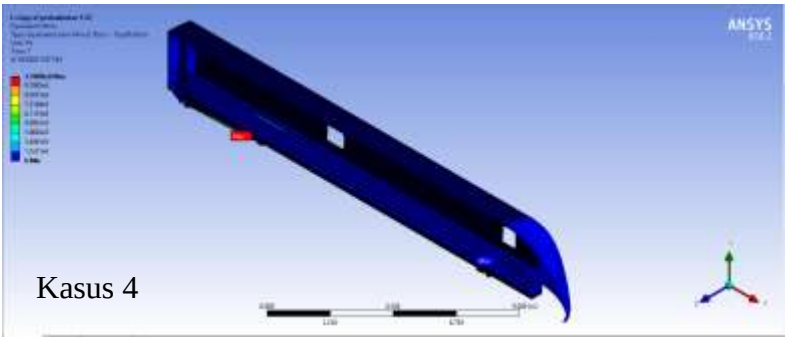
Lampiran

Lampiran 1 : Hasil simulasi tegangan maksimum kontur full body

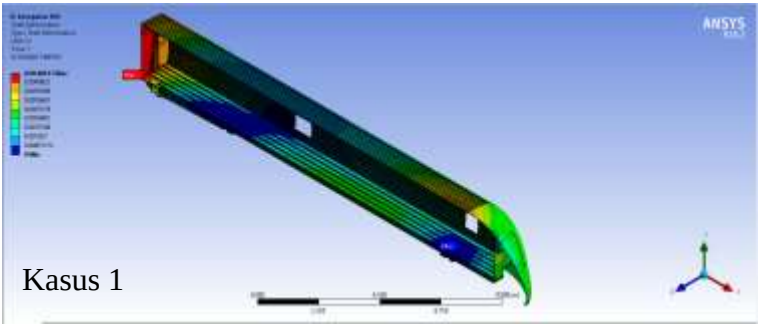


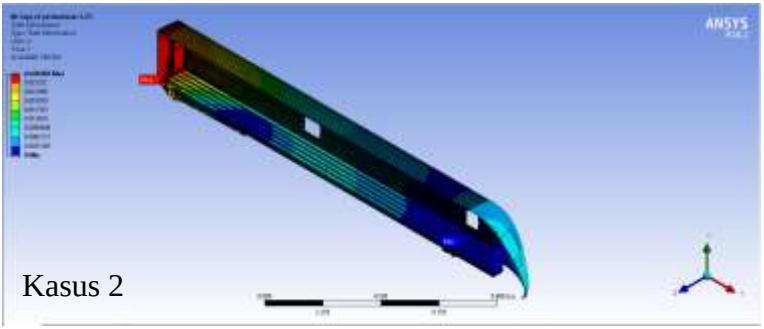


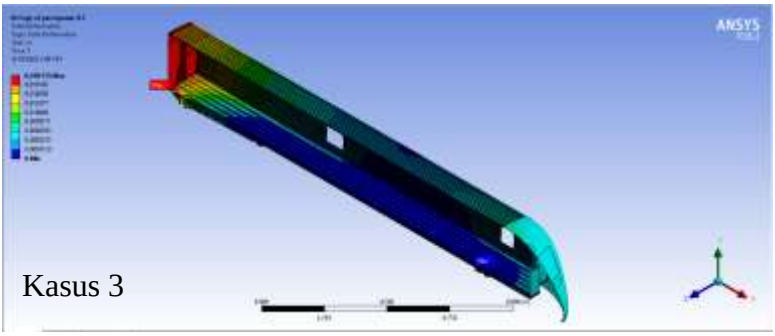


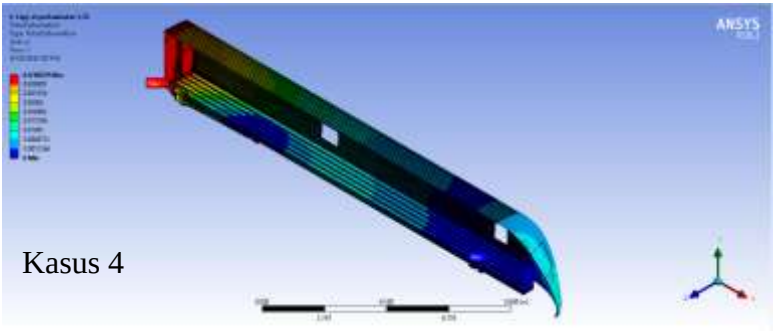


Lampiran 2 : Hasil Simulasi Total Deformasi Kontur Full body






ANSYS
Kasus 3


ANSYS
Kasus 4