



**ANALISIS KELELAHAN (*FATIGUE*) *CHASSIS FRAME* BUS LISTRIK  
PT. MOBIL ANAK BANGSA MENGGUNAKAN *SOFTWARE* AUTODESK  
INVENTOR 2019**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar  
Sarjana Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif**

**Oleh**

**RIZKI HADI AMINUDIN**

**5202414025**

**PENDIDIKAN TEKNIK OTOMOTIF**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

**2019**



**UNNES**  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG



**ANALISIS KELELAHAN (*FATIGUE*) *CHASSIS FRAME* BUS LISTRIK  
PT. MOBIL ANAK BANGSA MENGGUNAKAN *SOFTWARE* AUTODESK  
INVENTOR 2019**

**Skripsi**

**Diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar  
Sarjana Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif**

**Oleh**

**RIZKI HADI AMINUDIN**

**5202414025**

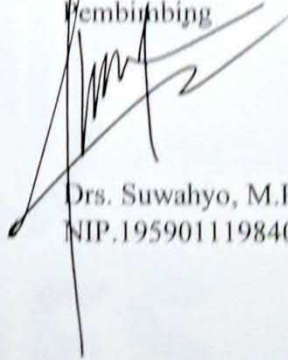
**PENDIDIKAN TEKNIK OTOMOTIF  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG  
2019**

## PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Rizki Hadi Aminudin  
NIM : 5202414025  
Program Studi : Pendidikan Teknik Otomotif  
Judul : Analisis Kelelahan (*Fatigue*) Chassis frame Bus Listrik PT. Mobil Anak Bangsa Menggunakan *Software* Autodesk Inventor 2019

Skripsi/TA ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian Skripsi/TA Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif Universitas Negeri Semarang

Semarang, 12 Juni 2018  
Pembimbing

  
Drs. Suwahyo, M.Pd.  
NIP.19590111984031002



Scanned with  
CamScanner

## PENGESAHAN

Skripsi/TA dengan judul "*Analisis Kelelahan (Fatigue) Chassis frame Bus Listrik PT. Mobil Anak Bangsa Menggunakan Software Autodesk Inventor 2019*" telah dipertahankan didepan sidang panitia ujian Skripsi/TA Fakultas Teknik UNNES pada tanggal:

Oleh

Nama : Rizki Hadi Aminudin  
NIM : 5202414025  
Program Studi: Pendidikan Teknik Otomotif

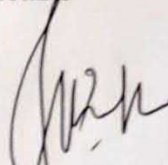
Panitia

Ketua



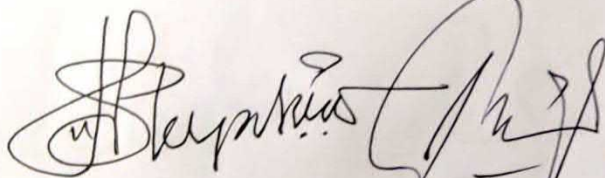
Ruslyanto, S.Pd., M.T.  
NIP. 197403211999031002

Sekretaris



Dr. Dwi Widjanarko, S.Pd., M.T.  
NIP. 196901061994031003

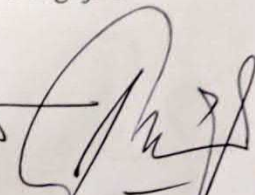
Penguji 1



Drs. Suprpto, M.Pd.

NIP.195508091982031002

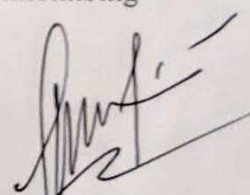
Penguji 2



Drs. Masugino, M.Pd.

NIP.195207212017091256

Pembimbing



Drs. Suwahyo, M.Pd.

NIP.195905111984031002

Mengetahui:

Dekan Fakultas Teknik



Dr. Nur Qudus, M.T., IPM.


NIP. 196911301994031001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

- 1.. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan atau dokter), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun perguruan tinggi lain.
- 2.. Karya tulis ini adalah murni gagasan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
- 3.. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
- 4.. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini.

Semarang, 13 September 2018  
Yang membuat pernyataan,



Rizki Hadi Aminudin  
NIM. 5202414025

## MOTTO DAN PERSEMBAHAN

### **Motto:**

1. “Seorang manusia yang hidup tanpa berjuang dan belajar, laksana bangkai yang berjalan di muka bumi” – KH. Moh. Khalimi Nur Shidiq.
2. Bekerja dan belajarlh dengan sungguh – sungguh, karena dengan itu siapapun bisa jadi apapun
3. *Always do your best on every job*

### **Persembahan:**

1. Bapak Washadi dan Ibu Samiah, yang sudah memberi segala kemampuan untuk anaknya. Do’a, semangat, kasih sayang dan perjuangan yang sudah diberikan untuk anakmu, semoga rahmat Allah SWT. selalu menyertai beliau.
2. Saudaran kandungku yang selalu saya banggakan Irma Hadi dan M. Saefullah.
3. Keluarga besar *Design Engineering House* PT. Mobil Anak Bangsa yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk memperoleh pengalaman desain konstruksi kendaraan.
4. Kawan seperjuangan PTO Rombel 1 2014 dan UKM RIPTEK UNNES
5. Sahabat dan teman dekat yang memberian bantuan, do’a, dukungan dan pelajaran hidup.

## RINGKASAN

**Aminudin, Rizki Hadi. 2019.** Analisis Kelelahan (*Fatigue*) *Chassis frame* Bus Listrik PT. Mobil Anak Bangsa Menggunakan *Software* Autodesk Inventor 2019. Skripsi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. Drs. Suwahyo, M.Pd.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan *chassis frame* MD12-LE dan mengetahui peningkatan ketahanan *chassis frame* MD12-LE setelah dilakukan perubahan geometri *chassis frame* MD12-LE.

Penelitian ini dilakukan secara komputasi dengan metode elemen hingga (FEM) pada *software* Autodesk Inventor 2019 dan ANSYS *Workbench* 18.1, analisis yang dilakukan meliputi *stress analysis*, *modal analysis* dan *fatigue analysis*. Objek yang dianalisis adalah *chassis frame* MD12-LE dan *chassis frame* MD12-LE yang telah mengalami perubahan geometri. Desain penelitian yang dilakukan meliputi pengumpulan data geometri rangka desain dan spesifikasi bus listrik MD12-LE, melakukan pemodelan rangka yang belum dilakukan perubahan geometri, memasukkan data material *chassis*, memasukkan data *boundary condition*, dan menjalankan perhitungan analisis.

Perubahan geometri yang dilakukan pada *chassis frame* MD12-LE terdapat pada *rear shock absorber bracket* melalui penambahan ketebalan dari 4 mm menjadi 6mm, penambahan dimensi tinggi dari 40 mm menjadi 72 mm dan penambahan flens sepanjang objek dengan dimensi lebar 20 mm. Hasil analisis yang diperoleh pada *chassis frame* MD12-LE tanpa perubahan geometri, *stress von mises* yang diperoleh adalah 765,3 MPa terdapat pada daerah *rear shock absorber bracket*, frekuensi natural maksimum 26,06 Hz dan nilai *fatigue life* minimum 646.62 siklus dengan nilai *fatigue life* maksimum adalah  $10^6$  siklus. Hasil analisis pada *chassis frame* MD12-LE yang dilakukan perubahan geometri pada *stress von mises* adalah 275,3 MPa, frekuensi natural 26,44 Hz, dan *fatigue life* minimum 754.19 siklus dengan skala merah atau kritis *fatigue life* mengalami penurunan dari *chassis frame* tanpa adanya perubahan geometri. Disimpulkan adanya peningkatan ketahanan pada *chassis frame* MD12-LE yang telah dilakukan perubahan geometri terhadap beberapa jenis analisis yang dilakukan.

Saran dalam penelitian, diharapkan mampu mengurangi nilai *stress* melalui perubahan komponen *chassis frame* yang lain, pengembangan analisis dapat dilakukan melalui penambahan *body structure chassis frame* MD12-LE, analisis pada *chassis frame* diharapkan dapat dilakukan dengan berbagai *software* CAD untuk mengetahui perbedaan hasil analisis setiap *software*, dan analisis dengan *software* sebaiknya dilakukan pengujian lab untuk mengetahui validitas hasil analisis secara komputasi.

**Kata Kunci:** *Chassis frame*, FEM, *stress*, *modal analysis*, *fatigue analysis*.



## PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang memberikan rahmat dan hidayah-Nya. Shalawat serta salam penulis ucapkan kepada Nabi Muhammad SAW dan keluarganya serta sahabatnya. Penulis sangat bersyukur karena dengan rahmat dan hidayah-Nya serta partisipasi dari berbagai pihak yang telah banyak membantu sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Kelelahan (*Fatigue*) Chassis frame Bus Listrik PT. Mobil Anak Bangsa Menggunakan *Software* Autodesk Inventor 2019”. Oleh karena itu penulis sampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Nur Qudus. M.T., IPM., Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan kesempatan untuk menyelesaikan skripsi ini.
2. Rusiyanto, S.Pd., M.T., Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan izin penelitian untuk penyusunan skripsi ini.
3. Dr. Dwi Widjanarko, S.Pd., S.T., M.T., Koordinator Program Studi Universitas Negeri Semarang.
4. Drs. Suwahyo, M.Pd., Dosen Pembimbing yang telah memberikan waktu, bimbingan, dan petunjuk dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Drs. Suprpto, M.Pd., Dosen Penguji I yang telah memberikan waktu, dan sarana dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Drs. Masugino, M.Pd., Dosen Penguji II yang telah memberikan waktu, dan sarana dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Berbagai pihak yang telah memberi bantuan untuk karya tulis ini, yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berharap semoga Skripsi ini dapat bermanfaat untuk pelaksanaan pembelajaran.

Semarang, 13 September 2018

Yang membuat pernyataan,



Rizki Hadi Aminudin

NIM. 5202414025

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR BERLOGO</b> .....	ii
<b>JUDUL DALAM</b> .....	iii
<b>PERSETUJUAN PEMBIMBING</b> .....	iv
<b>PENGESAHAN</b> .....	v
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b> .....	vi
<b>MOTTO DAN PERSEMBAHAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xv
<b>BAB IPENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Identifikasi Masalah</b> .....	5
<b>1.3 Pembatasan Masalah</b> .....	6
<b>1.4 Rumusan Masalah</b> .....	6
<b>1.5 Tujuan</b> .....	7
<b>1.6. Manfaat</b> .....	7
<b>BAB IIKAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI</b> .....	8
<b>2.1 Kajian Pustaka</b> .....	8
<b>2.2 Landasan Teori</b> .....	11
2.2.1 Konsep Tegangan dan Regangan .....	11
2.2.2 Rangka ( <i>Chassis frame</i> ) .....	15
2.2.4 Rekam Perkembangan Purwarupa Bus Listrik PT. MAB .....	26
2.2.5 Kelelahan ( <i>Fatigue</i> ) .....	28
2.2.6 Finite Element Method (FEM) .....	35
2.2.7 <i>Stress analysis</i> .....	38
2.2.8 Analisis Kelelahan ( <i>Fatigue analysis</i> ) .....	39
2.2.9 Frekuensi Natural dan <i>Modal analysis</i> .....	40
<b>BAB IIIMETODE PENELITIAN</b> .....	42
<b>3.1 Waktu dan Tempat Penelitian</b> .....	42
<b>3.2 Desain Penelitian</b> .....	42
<b>3.3 Alat dan Bahan Penelitian</b> .....	46
3.3.1 Alat .....	46
3.3.2 Bahan .....	46
<b>3.4 Parameter Penelitian</b> .....	47
<b>3.5 Teknik Pengumpulan Data</b> .....	47

3.6 Kalibrasi Instrumen .....	49
3.7 Teknik Analisis Data .....	63
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>64</b>
4.1 Hasil Penelitian .....	64
4.1.1 Hasil Perubahan Geometri <i>Chassis frame</i> MD12-LE .....	64
4.1.2 Hasil <i>Stress analysis</i> .....	64
4.1.3 Hasil <i>Modal analysis</i> .....	67
4.1.4 Hasil <i>Fatigue analysis</i> .....	68
4.2 Pembahasan.....	69
4.2.1 <i>Stress analysis</i> .....	69
4.2.2 <i>Modal analysis</i> dan Frekuensi Natural .....	72
4.2.3 <i>Fatigue analysis</i> .....	73
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>77</b>
5.1 Simpulan .....	77
5.2 Saran .....	78
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>80</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>83</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1.</b> <i>Material properties</i> logam <i>fero</i> .....	16
<b>Tabel 2.2.</b> Karakteristik mekanis dari material <i>hot-rolled</i> (tempa) dan penggunaannya.....	17
<b>Tabel 2. 3.</b> Komposisi unsur <i>carbon steel</i> STKM 16A .....	18
<b>Tabel 2. 4.</b> Spesifikasi kekuatan tarik STKM 16A.....	18
<b>Tabel 3.1.</b> Daftar asumsi pembebanan .....	45
<b>Tabel 3.2.</b> Instrumen hasil <i>stress analysis</i> .....	48
<b>Tabel 3.3.</b> Instrumen hasil <i>modal analysis</i> .....	48
<b>Tabel 3.4.</b> Instrumen hasil <i>fatigue analysis</i> .....	49
<b>Tabel 4. 1.</b> Hasil <i>stress analysis</i> .....	64
<b>Tabel 4. 2.</b> Hasil <i>modal analysis</i> .....	66
<b>Tabel 4. 3.</b> Hasil <i>fatigue analysis</i> .....	67

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Konsep <i>tension test</i> secara sederhana .....	11
Gambar 2. 2. Diagram <i>stress-strain</i> untuk material ductile .....	13
Gambar 2. 3. Diagram <i>stress-strain</i> untuk material brittle.....	13
Gambar 2.4. Ilustrasi <i>bending case</i> pada kendaraan .....	19
Gambar 2.5. Ilustrasi <i>torsion bending</i> .....	20
Gambar 2.6. Ilustrasi beban kombinasi ( <i>bending and torsion</i> ) .....	21
Gambar 2.7. Ilustrasi beban lateral kendaraan .....	21
Gambar 2.8. Beban depan/belakang ( <i>fore/aft</i> ) kendaraan .....	22
Gambar 2.9. Konsep dasar rangka tipe <i>ladder</i> .....	23
Gambar 2.10. Rangka tipe <i>tubular space frame</i> .....	24
Gambar 2.11. Konstruksi rangka tipe <i>integral</i> atau <i>monocoque</i> .....	25
Gambar 2.12. Rangka tipe <i>backbone</i> .....	26
Gambar 2. 13. <i>Chassis frame</i> OH 1626.....	27
Gambar 2. 14. Bus Purwarupa 1 PT. MAB (Maxvell Buss) .....	27
Gambar 2. 15. Tampilan Bus Proto 2 PT. MAB .....	28
Gambar 2.16. <i>Chassis frame</i> Bus Purwarupa ke 3 (MD12-LE).....	28
Gambar 2.17. Kurva S-N material <i>fero material</i> .....	31
Gambar 2.18. Persamaan diagram SN untuk baja tempa .....	31
Gambar 2.19. Grafik rerata tegangan atau <i>mean stres curve</i> .....	33
Gambar 2.20. Perbandingan persamaan matematis tegangan rata – rata .....	35
Gambar 2.21. Contoh diskritisasi dengan tipe elemen <i>solid element</i> .....	36
Gambar 2.22. <i>Shell element</i> yang diterapkan pada gambar 2. 21 .....	37
Gambar 2. 23. Kolom <i>fatigue tool</i> dalam ANSYS 18.1 .....	40
Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian .....	42
Gambar 3.1. <i>Shell element</i> .....	43
Gambar 3.2. <i>Solid model</i> .....	43
Gambar 3.4. Desain <i>solid element</i> pada <i>software</i> Autodesk Inventor 2019.....	49
Gambar 3.5. Hasil <i>export</i> ekstensi desain <i>chassis frame</i> dengan <i>solid element</i> ..	50
Gambar 3.6. Desain <i>shell element</i> pada <i>software</i> autodesk inventor 2019 .....	51
Gambar 3.7. <i>Tool Nastran</i> In-CAD .....	51
Gambar 3.8. Analisis tegangan ( <i>linier sctatic analysis</i> ).....	52
Gambar 3.9. Pengaturan <i>contact</i> dengan tipe <i>bonded contact</i> .....	53
Gambar 3.10. Jendela <i>idealizations</i> .....	54
Gambar 3.11. Jendela <i>mesh settings</i> .....	55
Gambar 3.12. Menu <i>run</i> Autodesk Nastran In-CAD.....	56
Gambar 3.13. <i>Modal analysis (Normal Analysis)</i> .....	56
Gambar 3. 14. Kalibrasi <i>modal setup</i> .....	57
Gambar 3.15. Tampilan ANSYS Workbench 18.1 .....	58
Gambar 3.16. Jendela analisis <i>static structural</i> .....	58

<b>Gambar 3.17.</b> Prosedur <i>import geometry</i> .....	59
<b>Gambar 3.18.</b> Jendela <i>mechanical</i> dari kolom <i>model</i> .....	60
<b>Gambar 3.19.</b> <i>Duplicate</i> project inti .....	60
<b>Gambar 3.20.</b> langkah memisahkan objek yang menjadi fokus analisis .....	61
<b>Gambar 3.21.</b> Penyalinan data <i>boundary condition</i> pada.....	62
<b>Gambar 3.22.</b> Dialog sistem ketika persetujuan <i>upstream data</i> kepada <i>user</i> .....	62
<b>Gambar 3.23.</b> Tampilan <i>fatigue tool</i> dan <i>life</i> .....	63
<b>Gambar 4.1.</b> <i>Rear absorber bracket</i> sebelum dilakukan perubahan geometri ....	64
<b>Gambar 4.2.</b> <i>Rear absorber bracket</i> setelah dilakukan perubahan geometri .....	64
<b>Gambar 4.3.</b> Nilai <i>von-misses</i> dari hasil <i>stress analysis</i> dalam Nastran In-CAD pada <i>chassis frame</i> MD12-LE sebelum dilakukan perubahan geometri .....	65
<b>Gambar 4.4.</b> Nilai <i>von-misses</i> dari hasil <i>stress analysis</i> dalam Nastran In-CAD pada <i>chassis frame</i> MD12-LE setelah dilakukan perubahan geometri .....	66
<b>Gambar 4.5.</b> Bentuk respon <i>chassis frame</i> pada analisis <i>modal mode</i> 10.....	67
<b>Gambar 4.6.</b> Hasil <i>fatigue analysis rear shock absorber bracket</i> sebelum dilakukan perubahan geometri .....	68
<b>Gambar 4.7.</b> Hasil <i>fatigue analysis rear shock absorber bracket</i> setelah dilakukan perubahan geometri .....	69
<b>Gambar 4. 8.</b> Detail daerah <i>stress max. stress analysis</i> tahap 1 .....	69
<b>Gambar 4. 9.</b> Detail daerah <i>stress max. stress analysis</i> tahap 2 .....	70
<b>Gambar4. 10.</b> Grafik hasil <i>modal analysis</i> pada <i>chassis frame</i> sebelum dilakukan perubahan dan sesudah dilakukan perubahan .....	71
<b>Gambar 4. 11.</b> Tampilan 3 dimensi <i>rear shock absorber bracket</i> .....	73
<b>Gambar 4. 12.</b> Hasil <i>fatigue analysis rear shock absorber bracket</i> sebelum dilakukan perubahan geometri .....	74
<b>Gambar 4.13.</b> Desain <i>rear shock absorber bracket</i> yang telah dimodifikasi ....	75
<b>Gambar 4.14.</b> Hasil <i>fatigue analysis</i> pada <i>rear shock absorber bracket</i> yang telah dimodifikasi.....	75

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1.</b> Surat Tugas Pembimbing.....	84
<b>Lampiran 2.</b> Surat Tugas Dosen.....	85
<b>Lampiran 3.</b> Surat Izin Penelitian.....	86
<b>Lampiran 4.</b> Proses pendataan geometri.....	87
<b>Lampiran 5.</b> Data material STKM 16A.....	88
<b>Lampiran 6.</b> Tampilan dua dimensi <i>submodelling rear axle</i> .....	89
<b>Lampiran 7.</b> Data tabel beban <i>chassis frame MD12-LE</i> .....	90
<b>Lampiran 8.</b> Rancangan <i>fatigue analysis</i> dalam software ANSYS Workbench 18.1 .....	91
<b>Lampiran 9.</b> Rancangan <i>stress analysis</i> dan <i>modal analysis</i> dalam Autodesk Nastran In-sCAD 2019 .....	92

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Perkembangan teknologi dalam bidang transportasi telah berkembang dengan pesat, baik dalam negara berkembang maupun negara maju. Perkembangan tersebut terjadi karena tingkat mobilitas manusia yang meningkat seiring meningkatnya jumlah penduduk. Adanya perkembangan teknologi transportasi memunculkan berbagai permintaan karakteristik transportasi yang menjadi tantangan bagi tiap produsen kendaraan, diantaranya tantangan untuk menciptakan kendaraan yang lembut, cepat, aman dan memudahkan mobilitas manusia. Poin – poin tersebut selanjutnya menjadi tujuan pengembangan bagi para produsen kendaraan.

Perkembangan teknologi transportasi tidak hanya membawa dampak positif, di sisi lain perkembangan yang terjadi membawa pengaruh negatif. Salah satu dampak yang terjadi adalah polusi udara semakin meningkat. Hampir seluruh kendaraan bermotor masih menggunakan mesin pembakaran dalam dengan bahan bakar fosil akan memproduksi emisi gas buang yang menyebabkan polusi udara. Berbagai parameter polusi udara dari kendaraan bermotor seperti karbonmonoksida (CO), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), sulfur oksida (SO<sub>x</sub>) dan partikel – partikel (SPM<sub>10</sub>) yang memiliki dampak pada pemanasan global.

Bus merupakan contoh kendaraan umum yang mampu menekan jumlah kendaraan bermotor melalui pemanfaatan transportasi umum. Hampir seluruh bus memiliki kapasitas lebih dari enam orang, dari kapasitas tersebut dapat dikatakan



bus menjadi solusi minimalisasi emisi gas buang pada kendaraan pribadi. Permasalahan lain yang muncul bus yang beroperasi hingga saat ini masih menggunakan mesin diesel, masih menghasilkan emisi gas buang. Hasil pembakaran tidak sempurna yang dihasilkan mesin melepaskan gas NO<sub>x</sub>, CO, dan HO yang dapat menimbulkan polusi bagi lingkungan (Nugroho, dkk, 2018:020017-1). Inovasi lain dalam permasalahan tersebut adalah penerapan bus listrik, dari penggunaan bus listrik memiliki beberapa keunggulan, diantaranya efisiensi tinggi, tidak bising, dan tidak menghasilkan emisi secara langsung. Bus MD12-LE merupakan salah satu contoh bus listrik.

Bus MD12-LE merupakan purwarupa ketiga yang diciptakan oleh PT. MAB (Mobil Anak Bangsa), jenis bus *low entry* atau lantai rendah yang dioperasikan untuk daerah kota. Pada tahap desain dan pembuatan bus MD12-LE, *chassis frame* (kerangka bawah kendaraan) menjadi pusat atau rangka utama kendaraan, dengan berbagai beban yang ditumpukan. Beban – beban tersebut meliputi komponen – komponen dan gaya, selanjutnya komponen – komponen dan gaya yang terjadi akan saling berpengaruh pada saat kendaraan mengalami akselerasi, deselerasi, dan belok (*cornering*).

*Chassis frame* merupakan rangka kendaraan yang berfungsi sebagai penguat dari konstruksi *body* (kerangka badan) kendaraan guna menopang beban kendaraan dan benturan selama benturan, sehingga mampu melindungi penumpang. Berdasarkan uraian tersebut, faktor keamanan menjadi perhatian khusus. Berbagai pengujian dilakukan untuk memperoleh kesimpulan bahwa *chassis frame* yang telah dibuat memenuhi faktor keamanan.

Salah satu jenis pengujian untuk menilai suatu *chassis frame* memenuhi faktor keamanan adalah uji puntir atau tegangan dan uji kelelahan *chassis* yang dilakukan pada laboratorium. Uji puntir dilakukan untuk memperoleh data karakteristik kekuatan *chassis frame*, uji kelelahan dilakukan untuk memperoleh daya tahan *chassis frame* pada periode tertentu setelah dikenakan beban yang bersifat dinamis. Uji puntir dilakukan dengan *chassis* diletakkan pada instrument uji, selanjutnya *chassis* dipuntir dengan gaya tertentu, adapun uji kelelahan dilakukan dengan *chassis* dikenakan gaya secara dinamis pada periode tertentu. Data hasil uji lab dapat digunakan sebagai data valid karena benda yang diuji bersifat kongkrit (benda nyata), namun di sisi lain biaya yang dibutuhkan tidak sedikit, serta waktu yang dibutuhkan relatif lama.

Dewasa ini telah banyak digunakan metode komputasi dengan menggunakan metode elemen hingga atau FEA (*Finite Element Analysis*). FEA merupakan analisis metode elemen hingga pada suatu struktur secara komputasi. Analisis dilakukan dengan mula – mula melakukan pemodelan struktur pada *software* sesuai bentuk kongkrit, selanjutnya model tersebut disimulasikan sesuai kondisi nyata pada *software* FEA. Pengujian dengan FEA dianggap lebih cepat dan biaya yang dibutuhkan lebih murah, namun di sisi lain data yang diperoleh hanya bersifat sebagai estimasi bukan data valid, dikarenakan untuk memperoleh data valid struktur harus dilakukan pada benda nyata.

Berdasarkan pengamatan yang dilakukan oleh peneliti, pengujian yang dilakukan pada bus listrik MD12-LE hanya mencakup pengujian komputasi dengan FEA. Pengujian komputasi yang telah dilakukan berupa pengujian pembebanan statis dan *modal analysis*. Data yang diperoleh pada pengujian

tersebut meliputi nilai tegangan maksimum dari pengujian beban statis yaitu 765,3 MPa, nilai yang diizinkan adalah 325 MPa (sesuai dengan nilai *yield strength* material penyusun). Data yang diperoleh *modal analysis* yang diperoleh adalah 26,06 Hz pada frekuensi tertinggi, belum dilakukan pengujian kelelahan *chassis*.

Berdasarkan hasil pengamatan yang dilakukan peneliti, menunjukkan perlu dilakukan evaluasi atau perbaikan model *chassis frame* yang telah dibuat, dengan tujuan untuk mengurangi tingkat *stress* atau tegangan yang timbul akibat pembebanan. Penurunan tegangan yang timbul sangat diperlukan, guna menghindari kerusakan bagian *chassis frame*. Salah satu cara untuk mengurangi nilai tegangan pada struktur diantaranya merubah bentuk atau geometri yang dimiliki struktur tersebut.

Pengujian kelelahan terhadap *chassis frame* MD12-LE sangat diperlukan. Fungsi dari pengujian kelelahan *chassis frame*, memungkinkan pihak PT. MAB untuk menentukan periode dilakukannya perbaikan atau *maintenance*. Penting untuk PT. MAB menentukan periode perbaikan atau masa layak pakai pada produk yang dimiliki.

Berdasarkan uraian diatas, perlu dilakukan perbaikan desain untuk menurunkan nilai *stress* yang timbul dan dilakukan analisis kelelahan pada bus listrik MD12-LE. Pengujian yang dilakukan berbasis FEA menggunakan *tool* Autodesk Nastran In-CAD untuk pengujian *stress analysis* dan *modal analysis*, adapun pengujian *fatigue analysis* dilakukan menggunakan ANSYS. Bertolak dari uraian latar belakang diatas, peneliti mengambil judul “Analisis *Fatigue Chassis frame* Bus Listrik PT. Mobil Anak Bangsa Menggunakan *Software* Autodesk Inventor 2019”.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka identifikasi masalah adalah sebagai berikut:

1. Nilai tegangan maksimum pada *stress analysis* melebihi nilai tegangan yang diizinkan (nilai *yield strength* material).
2. Belum adanya evaluasi desain untuk menurunkan nilai tegangan maksimum yang timbul pada *stress analysis*.
3. Pengujian yang dilakukan pada tahap perancangan hanya mencakup *stress analysis* dan *modal analysis*.
4. Perancangan struktur yang dilakukan belum mempertimbangkan usia komponen penyusun struktur berdasarkan pembebanan yang ditumpu oleh struktur.
5. Belum diterapkan *fatigue analysis* pada rancangan *chassis frame* MD12-LE.
6. Belum adanya kajian ilmiah mengenai pengujian ketahanan kelelahan pada komponen penyusun *chassis frame* bus listrik MD12-LE.
7. Perlu dilakukan pengembangan lanjut, seperti perubahan geometri *chassis frame* bus listrik MD12-LE, untuk meningkatkan nilai *fatigue life* pada komponen yang mengalami tegangan maksimum.

### 1.3 Pembatasan Masalah

Berdasarkan uraian permasalahan diatas, penelitian ini dibatasi pada:

1. Proses perancangan ulang, analisis tegangan dan analisis frekuensi natural rangka bus listrik MD12-LE dilakukan dengan menggunakan Autodesk Inventor 2019.
2. Proses pengujian atau analisis yang dilakukan hanya pada tahap estimasi, dikarenakan pengujian yang dilakukan hanya pada penghitungan komputasi.
3. Pengujian ketahanan kelelahankomponen *chassis frame* MD12-LE dilakukan dengan menggunakan *tool* (alat pada aplikasi) ANSYS Workbench 18.1.
4. Pengujian kelelahan dilakukan menggunakan beban statis secara berulang
5. Pengujian ketahanan kelelahanyang dilakukan pada komponen struktur yang mengalami tegangan tertinggi berdasarkan *stress analysis*.
6. *Fatigue analysis* dilakukan oleh peneliti menggunakan pendekatan kurva S-N (*Stress-Cycle* atau kurva yang memberikan informasi tegangan atau beban yang diberikan dengan siklus yang dihasilkan).

### 1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka identifikasi masalah adalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai hasil *stress analysis*, *modal analysis* dan *fatigue life* struktur rangka bus listrik MD12-LE sebelum dilakukan perubahan geometri?
2. Berapa nilai hasil *stress analysis*, *modal analysis* dan *fatigue life* struktur rangka bus listrik MD12-LE setelah dilakukan perubahan geometri?
3. Adakah perbedaan nilai hasil *stress analysis* dan *fatigue life* struktur rangka bus listrik MD12-LE sebelum dan setelah dilakukan perubahan geometri?

## 1.5 Tujuan

Sesuai dengan rumusan permasalahan yang telah diuraikan maka, dapat tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui nilai hasil *stress analysis* dan *fatigue life* struktur rangka bus listrik MD12-LE sebelum dilakukan perubahan geometri.
2. Mengetahui nilai hasil *stress analysis* dan *fatigue life* struktur rangka bus listrik MD12-LE setelah dilakukan perubahan geometri.
3. Mengetahui adakah perbedaan nilai hasil *stress analysis* dan *fatigue life* struktur rangka bus listrik MD12-LE sebelum dan setelah dilakukan perubahan geometri.

## 1.6. Manfaat

Manfaat yang diperoleh pada penelitian ini, adalah sebagai berikut:

1. Bagi peneliti, dapat menerapkan pengetahuan tentang sifat bahan, mekanika struktur dan kemampuan penggunaan *software CAD (Computer Aided Design)* dan *CAE (Computer Aided Engineering)* yang didapatkan selama kuliah, pada analisis ketahanan kelelahanstruktur dengan FEA, sehingga dapat digunakan untuk implementasi secara nyata.
2. Bagi PT. MAB, dapat digunakan untuk memprediksi waktu penggunaan rangka bus listrik MD12-LE.
3. Menciptakan produk desain rangka baru untuk bus listrik MD12-LE nilai *fatigue life* dan hasil *stress analysis* yang lebih baik.

## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1 Kajian Pustaka

Jurnal “*Stress analysis of a Cross over Electric Car Chassis*” oleh Kristyadi, dkk (2017), dalam penelitian ini dilakukan perhitungan *stress analysis* dengan FEM pada *software* Solidworks, objek yang dianalisis adalah dua objek *chassis frame* dengan balok pelat padat dan *chassis frame* dengan balok pelat dilubangi dengan tujuan untuk mengurangi berat *chassis frame* dan akhirnya menambah usia baterai pada mobil listrik. Hasil dari penelitian yang dilakukan dalam empat kasus yaitu kondisi statis, pendakian mobil, mobil melewati jalan menurun dan kondisi saat pengereman. Hasil penelitian menunjukkan tegangan maksimum dari *stress analysis* pada *chassis* dengan pelat berlubang adalah 25% lebih tinggi dari plat padat, lendutan maksimum pada *chassis frame* plat berlubang adalah 20% lebih tinggi dari plat padat dan faktor keamanan minimum *chassis frame* plat berlubang adalah 20% lebih rendah dari *chassis frame* plat padat. Faktor keamanan sebagai parameter kritis dari kedua kasus di atas 1, dan dapat dikatakan bahwa semua kasus direkomendasikan untuk *chassis frame* mobil listrik. *Chassis frame* berlubang dapat mengurangi sekitar 22,5% dari berat chassis, maka dapat disimpulkan bahwa *Chassis frame* berlubang cocok untuk aplikasi mobil listrik.

Penelitian yang dilakukan oleh Agus, dkk (2017) dengan judul “Analisis Tegangan Statik Pada Rancangan Mobil Listrik Ganesha Sakti (GASKI) Menggunakan *Software* Solidwork 2014”. Dalam penelitian tersebut dilakukan

perbandingan hasil uji beban statik pada rangka standar dan rangka yang telah diberikan penguat berupa komponen tambahan pada bagian yang menerima beban. Adapun hasil pengujian pada *software* Catia 2014 menunjukkan penurunan tegangan maksimum dengan tanpa beban pengendara sebesar 12,5% dan dengan beban pengendara sebesar 12,87%, dan *safety factor* pada *frame* telah dimodifikasi meningkat dengan tanpa beban pengendara sebesar 13,21% dan dengan beban pengendara sebesar 12,66%.

Jurnal “Analisis Simulasi Struktur *Chassis* Mobil Mesin USU Berbahan Besi Struktur Terhadap Beban Statik Dengan Menggunakan Perangkat Lunak ANSYS 14.5” oleh Fadila dan Syam (2013), dalam penelitian tersebut dilakukan perbandingan hasil uji statik. Adapun terdapat dua model rangka dengan material sama yaitu ASTM A500, dengan dimensi *hollow section* yang berbeda. Rangka USU I penyusun rangka utama menggunakan *square tube* dengan dimensi 30 x 30 mm tebal 2 mm, komponen *rollbar* menggunakan *circular tube* dengan diameter 25 mm dan tebal 2 mm, dikenakan beban 700 N mendapatkan nilai tegangan maksimum 22,563 MPa. Rangka USU II penyusun rangka utama menggunakan *square tube* dengan dimensi 20 x 20 mm tebal 2 mm, komponen *rollbar* menggunakan *circular tube* dengan diameter 16 mm dan tebal 2 mm, dikenakan beban 700 N mendapatkan nilai tegangan maksimum 53,217 MPa. Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan rangka dengan penampang lebih besar dapat mengurangi nilai tegangan maksimum atau *von misses*.

Jurnal “*Fatigue analysis* pada Pegas Daun Jenis SST 74 dalam Aplikasi Industri Alat Berat dengan Pemodelan Metode Elemen Hingga” dilakukan oleh Anggraini dan Chairil (2018), dalam penelitian tersebut analisis *fatigue* dilakukan



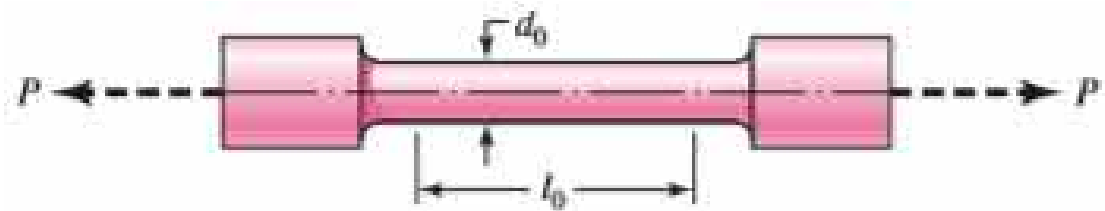
dengan menggunakan *tool* FEA pada *software* ANSYS, hasil penelitian menunjukkan terdapat kenaikan angka *fatigue life* pada pegas daun setelah dilakukan penampahan dimensi penampang pegas daun. Adapun *fatigue life* dari angka  $91 \times 10^3$  siklus menjadi  $5 \times 10^5$  siklus.

Jurnal “Perhitungan SCF Untuk Analisa *Fatigue* pada Sambungan Struktur Anjungan Lepas Pantai” oleh Tawekal (2005), dalam penelitian tersebut dilakukan perhitungan *Stress Concentration Factor* (SCF) atau perbandingan antara tegangan maksimum pada sambungan dengan tegangan nominal, adapun perhitungan yang dilakukan adalah penghitungan manual dan penghitungan dalam *software* Pro-Eng yang diterapkan pada sambungan polos struktur dan sambungan dengan penguat tubular. Nilai SCF yang diperoleh pada sambungan polos yaitu 5,032 (pembebanan axial, melalui perhitungan manual), 3,01 (pembebanan momen *In-Plane*, melalui perhitungan manual), 5,098 (pembebanan momen *Out-Plane*, melalui perhitungan manual), 4,47 (pembebanan axial, melalui perhitungan *software* Pro-Eng), 2,98 (pembebanan momen *In-Plane*, melalui perhitungan *software* Pro-Eng), dan 4,488 (pembebanan momen *Out-Plane*, melalui perhitungan *software* Pro-Eng), sedangkan nilai SCF yang diperoleh pada sambungan dengan sambungan tubular diperoleh 2,98 (pembebanan axial, melalui perhitungan *software* Pro-Eng), 2,15 (pembebanan momen *In-Plane*, melalui perhitungan *software* Pro-Eng), 2,99 (pembebanan momen *Out-Plane*, melalui perhitungan *software* Pro-Eng). Berdasarkan hasil yang diperoleh, penggunaan sambungan tubular dapat mengurangi nilai SCF, maka secara tidak langsung menurunnya nilai SCF dapat meningkatkan *fatigue-life*.

## 2.2 Landasan Teori

### 2.2.1 Konsep Tegangan dan Regangan

Tegangan dan regangan merupakan parameter hasil yang diperoleh ketika dilakukan *tensile test* (uji tarik) atau *compression test* (uji tekan) terhadap material dengan tujuan untuk memperoleh informasi karakteristik dan kekuatan material. Pengujian tarik dan tekan dilakukan dengan meletakkan material pada *mounting* (dudukan) mesin tes dan ditarik secara perlahan sementara beban  $P$  dan defleksi diamati (Budynas dan Nisbett, 2008: 34), konsep ini ditunjukkan pada gambar 2.1. Beberapa alat tes telah dilengkapi dengan rekam data beban yang diujikan dan defleksi yang terjadi dari material, selanjutnya data tersebut diolah untuk diperoleh karakteristik tegangan dan regangan material.



**Gambar 2.1.** Konsep *tension test* secara sederhana  
(Sumber: Budynas dan Nisbett, 2008:28).

*Stress* atau tegangan merupakan beban tegak lurus terhadap permukaan spesimen (Callister dan Rethwisch, 2009: 154). Persamaan matematis tegangan atau *stress* ditunjukkan pada persamaan I

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots \dots \dots \text{(I)} \quad (\text{Callister dan Rethwisch, 2009: 154}).$$

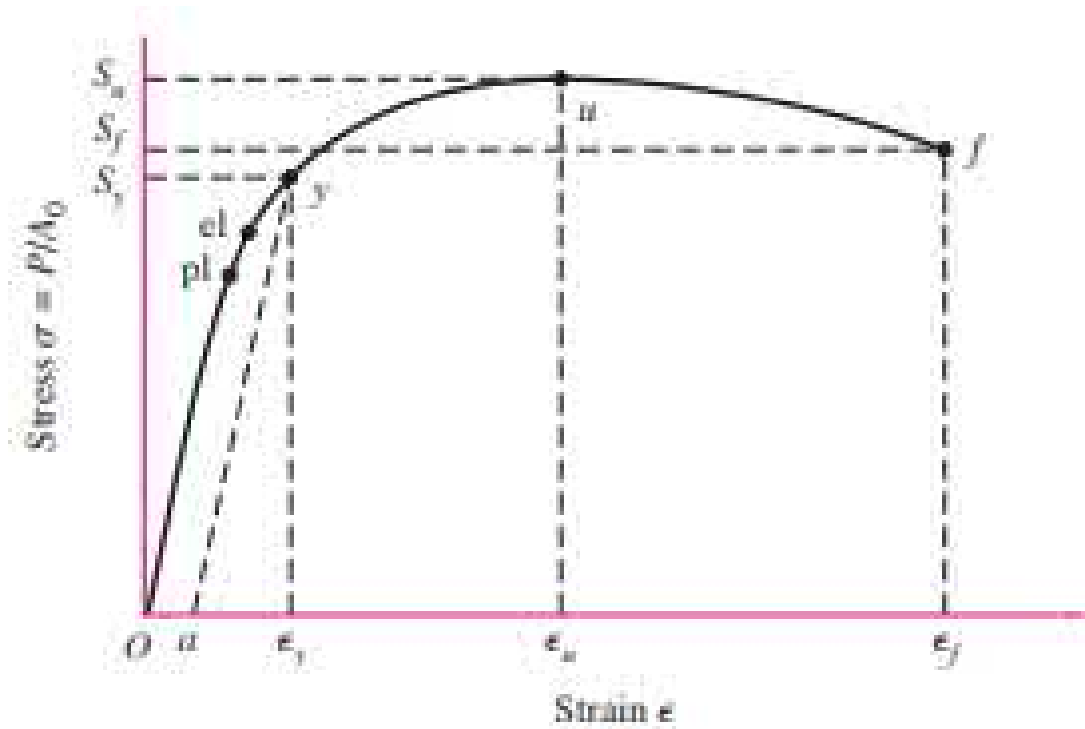
$\sigma$  merupakan simbol matematis tegangan dengan satuan  $\text{N/mm}^2$ ,  $F$  atau  $P$  (dalam gambar 2.1) merupakan gaya atau beban yang bekerja, satuan yang digunakan adalah  $\text{N}$  (*Newton*) dan  $A_0$  merupakan satuan luas, dengan satuan yang digunakan adalah  $\text{m}^2$ .

*Strain* atau regangan merupakan perpanjangan dimensi spesimen setelah atau selama mendapat pembebanan. Persamaan matematis regangan ditunjukkan pada persamaan II:

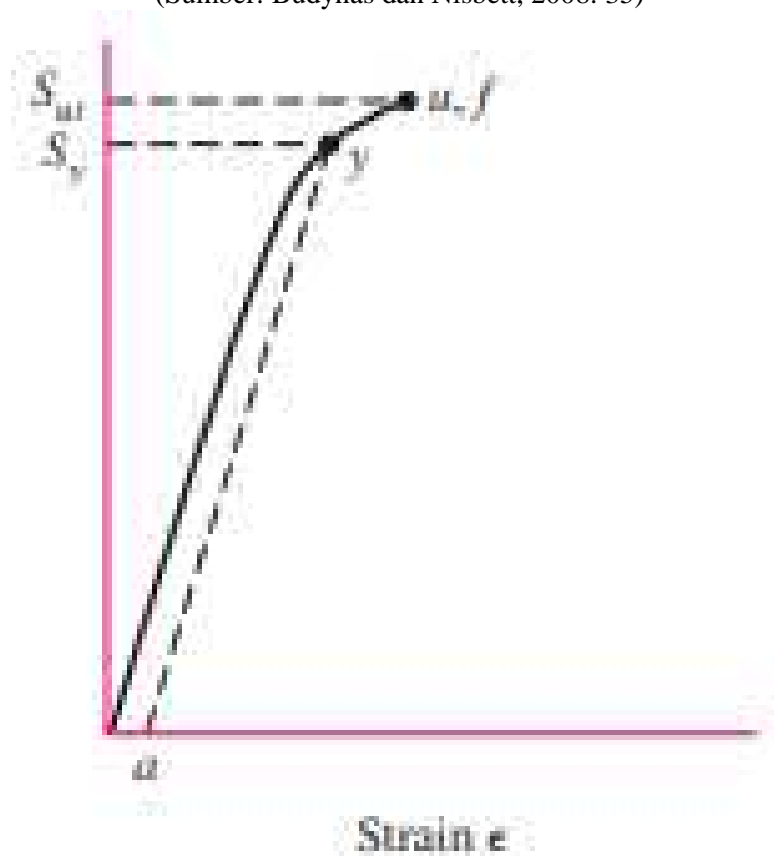
$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} \dots\dots\dots\text{(II)} \text{ (Budynas dan Nisbett, 2008: 35).}$$

Berdasarkan persamaan II,  $\epsilon$  merupakan simbol matematis regangan,  $l$  adalah dimensi spesimen sebelum dikenakan beban,  $l_0$  merupakan dimensi awal spesimen sebelum dikenakan beban, dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa dimensi memiliki satuan, sehingga satuan yang digunakan saling meniadakan, sebagaimana menurut Callister dan Rethwisch (2009: 154), regangan secara matematis tidak memiliki satuan.

Diagram *stress-strain* merupakan digram yang menggambarkan deformasi material ketika spesimen mendapat beban, diagram ini ditunjukkan pada gambar 2. 2 dan 2. 3. Diagram tersebut merupakan hubungan antara data *stress* dan *strain* material, selanjutnya dari diagram tersebut akan diketahui titik ketika material mengalami deformasi elastis, dan titik ketika material menunjukkan deformasi plastis. Berdasarkan proses yang digambarkan pada diagram *stress-strain* material terbagi menjadi dua jenis yaitu material *brittle* (getas) dan material *ductile* (ulet).



**Gambar 2. 2.** Diagram *stress-strain* untuk material *ductile*  
(Sumber: Budynas dan Nisbett, 2008: 35)



**Gambar 2. 3.** Diagram *stress-strain* untuk material *brittle*  
(Sumber: Budynas dan Nisbett, 2008: 35)

Gambar 2. 2 menunjukkan karakteristik material *ductile* ketika menerima pembebanan, dari diagram tersebut terdapat titik **pl** merupakan batas proporsi (*proportional limit*), titik tersebut menunjukkan garis linier yang menunjukkan hubungan *stress* dan *strain* mulai menyimpang. Secara matematis garis linier yang ditunjukkan diagram *stress-strain* sama dengan hukum Hooke yang dinotasikan pada persamaan III.

$$\sigma = E\epsilon \dots\dots\dots\text{(III)} \text{ (Budynas dan Nisbett, 2008: 35).}$$

Berdasarkan persamaan III,  $E$  merupakan modulus *young*, nilai yang dimiliki notasi tersebut bersifat konstan.  $E$  adalah ukuran dari kekakuan material, unit atau satuan yang dimiliki oleh  $E$  sama dengan *stress*.

Titik **el** yang ditunjukkan pada gambar 2. 2 merupakan titik batas elastis (*elastic limit*) (Budynas dan Nisbett, 2008: 35). Fenomena ini terjadi ketika spesimen memperoleh beban melebihi titik tersebut, material menjadi plastis atau material tidak akan kembali pada kondisi mula sebelum dikenakan beban, secara rinci garis diantara **pl** dan **el** tidak menunjukkan garis linier sempurna, walaupun daerah tersebut masih dalam kondisi material dengan sifat elastis.

*Yield point* merupakan titik batas, berdasarkan gambar 2. 2 titik *yield* merupakan titik yang menjadi awal bertambahnya regangan (*strain*) dengan perbandingan yang tidak liner terhadap tegangan yang diberikan (Budynas dan Nisbett, 2008: 35). Titik *yield* ditunjukkan pada poin  $y$  atau  $S_y$ , sehingga dapat dikatakan pada titik *yield* material tidak akan kembali ke geometri awal material tersebut (plastis). Penerapan nilai *yield* material pada struktur menjadi prioritas, karena melalui nilai *yield* material yang telah diketahui, perancang mampu

memperhitungkan beban maksimum yang mampu ditumpu oleh struktur tersebut pada kondisi normal atau pada kondisi elastis material.

*Yield* pada setiap material memiliki tingkat yang berbeda. Contoh pada gambar 2. 2 dan 2. 3, diagram *stress-strain* untuk material *brittle* memiliki tingkat *yield* yang lebih rendah. Garis putus yang menghubungkan antara  $a$  dan  $y$  menggambarkan tidak setiap material memiliki tingkat *yield* sesuai dengan kriteria grafik *stress-strain*, adapun garis tersebut digunakan untuk mempermudah pembacaan titik *yield*.

*Ultimate strength* ( $S_u$ ) merupakan tegangan maksimum yang dicapai pada diagram *stress-strain* (Budynas dan Nisbett, 2008: 35). Ketika material telah melewati titik  $u$ , selanjutnya akan terjadi grafik penurunan hingga mencapai titik  $f$  atau patah (*fracture*) sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2. 2. Beberapa material lain, patahan (*fracture*) terjadi ketika proses pencatatan diagram *stress-strain* masih berjalan, serta titik  $u$  dan  $f$  bersifat identik, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2. 3.

### 2.2.2 Rangka (*Chassis frame*)

*Chassis* merupakan salah satu bagian penting yang berfungsi untuk menampung seluruh komponen pendukung dan beban kendaraan. Beban yang ditumpu meliputi masa setiap komponen dan gaya yang berinteraksi dengan kendaraan selama proses akselerasi, deselerasi, memutar (*cornerring*) dan melewati berbagai permukaan jalan dengan keadaan tidak menentu. *Chassis* diharuskan memiliki sifat yang kuat dan kokoh untuk menahan beban dan reaksi yang terjadi saat proses berkendara.

## A. Material Rangka

*Ferous metals* atau logam fero merupakan salah satu material yang banyak digunakan pada bidang teknis konstruksi. Penggunaan logam fero secara luas dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu : 1) memiliki jumlah yang melimpah di bumi, 2) biaya pengolahan material fero relatif ekonomis 3) sifat serbaguna dikarenakan logam fero memiliki berbagai variasi sifat mekanis (Callister dan Rethwisch, 2009:393). Salah satu sifat negatif dari logam fero, material tersebut rentan terhadap korosi.

**Tabel 2. 1.** Material properties logam fero(Sumber: Smith (Ed), 2002: 137)

Material	Density (Mgm <sup>-3</sup> )	Cost/Tonne (£)	Yield Strength (MPa)	Modulus (GPa)
Aluminium and steel alloys	2.7 – 2.9	1000 – 1500	40 - 600	69 – 79
Mild steel and steel alloys	7.5 – 8.3	200 - 1800	220 – 1300	190 – 209
Copper and alloys	8.5 – 8.9	750 - 1500	60 – 960	120 – 150

Baja (*steel alloys / iron alloys carbon*) merupakan contoh jenis logam fero dan banyak dimanfaatkan sebagai material bidang konstruksi kendaraan, dengan nilai kekuatan lentur yang dimiliki 220 – 1300 MPa sebagaimana ditampilkan tabel 2.1 . Komposisi baja terdiri berbagai campuran, dengan berbagai varian perlakuan panas. *Mechanical properties* atau sifat mekanis material dipengaruhi oleh kandungan karbon yang dimiliki, pada material baja, pada umumnya memiliki kandungan karbon kurang dari 1.0 wt%. Terdapat tiga jenis baja berdasarkan kandungan karbon yang dimiliki yaitu baja *low carbon*, *medium* dan *high carbon* (Callister dan Rethwisch, 2009:394).

Baja *low carbon* atau baja dengan kandungan karbon terkecil, pada umumnya kandungan karbon yang dimiliki sekitar 0.25 wt% dan tidak

terpengaruh perlakuan panas (Callister dan Rethwisch, 2009:394). Callister dan Rethwisch (2009:394) menyatakan “jenis penggunaan baja karbon endah meliputi komponen *body* kendaraan, struktur (dengan bentuk *I-beams*, bercabang, dan besi bersudut), dan lembaran yang yang digunakan dalam perpipaan, bangunan, jembatan dan kaleng”. Baja karbon rendah memiliki beberapa jenis grup yaitu, baja karbon rendah *high-strength* dan *low alloy steel*. Dua jenis baja tersebut memiliki perbedaan pada sifat mekanis, contoh masing – masing jenis tersebut ditunjukkan tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Karakteristik mekanis dari material *hot-rolled* (tempa) dan penggunaannya (Sumber: Callister dan Rethwisch, 2009:395).

<b>AISI/SAE or ASTM Number</b>	<b>Tensile Strength (MPa (ksi))</b>	<b>Yield Strength (MPa (ksi))</b>	<b>Ductility (%EL in 50 mm (2in.))</b>	<b>Typical Application</b>
<b><i>Plain Low-Carbon Steels</i></b>				
1010	325 (47)	180 (26)	28	<i>Automobile panels, nails, and wire</i>
1020	380 (55)	210 (30)	25	<i>Pipe; structural and sheet steel</i>
A36	400 (58)	220 (32)	23	<i>Structural (bridges and buildings)</i>
A516 Grade 70	485 (70)	260 (38)	21	<i>Low- temperature pressure vessels</i>
<b><i>High-Strength, Low-Alloy Steels</i></b>				
A440	435 (63)	290 (42)	21	<i>Structure that are bolted or riveted</i>
A663 Grade E	520 (75)	380 (55)	23	<i>Structure used at low ambient temperatures</i>
A656 Grade 1	655 (95)	552 (80)	15	<i>Truck frames and railway cars</i>

Baja yang digunakan sebagai material penyusun *chassis frame* MD12-LE adalah STKM 16A. STKM 16A merupakan jenis baja tempa (*hot-rolled steels*),



dengan jenis penampang tipe SHS (*Square Hollow Section*). STKM 16A merupakan salah satu contoh *low-carbon steel*, berdasarkan sifat mekanis dan komposisi dimiliki, ditunjukkan pada tabel 2.3 dan 2.4.

**Tabel 2. 3.** Komposisi unsur *carbon steel* STKM 16A (Sumber: www.ctstubes.com)

Grade		Designation	Units%					
			C	Si	Mn	P	S	Nb or V
Grade 16	A	STKM 16A	0.35~0.45	0.40 max.	0.40~1.00	0.040 max.	0.040 max.	-
	C	STKM 16C						

**Tabel 2. 4.** Spesifikasi kekuatan tarik STKM 16A (*Japanese Standards Association, 2007:1684*)

Grade		Symbol of Grade	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Yield Point or proof strength (N/mm <sup>2</sup> )
16	A	STKM 16A	510 min.	325 min.
	C	STKM 16C	620 min.	460 min.

Jenis baja lainnya adalah, baja *medium-carbon (medium-carbon steels)* dan baja *high-carbon (high-carbon steels)*. Baja jenis *medium-carbon steel* memiliki konsentrasi karbon diantara 0.25 hingga 0.60 wt%, sedangkan jenis *high-carbon steels* memiliki konsentrasi karbon 0.60 wt% hingga 1.4 wt% (Callister dan Rethwisch, 2009:395). Dua baja tersebut diaplikasikan pada bidang yang berbeda, *high-carbon* digunakan untuk komponen yang memerlukan kekerasan tinggi, seperti alat pemotong (*hacksaw blades, knives, etc*). Jenis *medium-carbon steels* memiliki kekerasan yang lebih tinggi dari baja *low-carbon* namun tingkat keuletan yang dimiliki lebih rendah, baja *medium-carbon* digunakan pada bidang komponen kendaraan seperti roda gigi, poros engkol dan lain – lain.

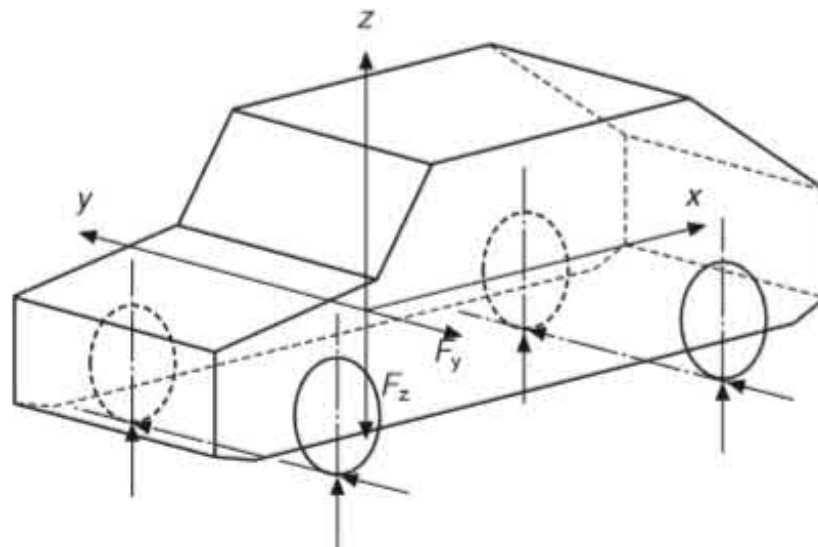
#### B. Jenis Beban

Tugas dari struktur *chassis* adalah untuk menopang beban dan gaya dari komponen kendaraan, dalam keadaan normal. Ketika kendaraan melaju, beban yang ditopang *chassis* dapat mengalami deformasi yang disebabkan oleh interaksi

roda kendaraan kendaraan dengan permukaan jalan, fenomena tersebut dapat dikatakan sebagai *load case* (kasus pembebanan) yang dimiliki oleh kendaraan ketika kendaraan menemui permukaan jalan tidak menentu. Dasar *load case* terdapat lima macam yang meliputi (Sumber: Smith (Ed), 2002: 125):

#### 1) *Bending case*

*Bending case* adalah beban dalam bidang vertikal, bidang  $x$ - $z$  yang disebabkan distribusi berat komponen sepanjang *chassis* kendaraan yang menyebabkan bending (tekukan) pada sumbu  $y$  (Smith (Ed), 2002: 125), ilustrasi *bending case* ditunjukkan pada gambar 2. 4.

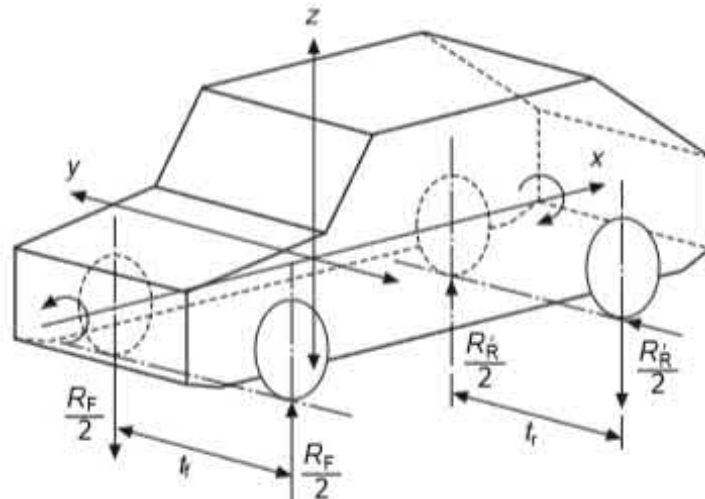


**Gambar 2.4.** Ilustrasi *bending case* pada kendaraan (Sumber: Smith (Ed), 2002: 125).

#### 2) *Torsion case*

*Torsion case* atau beban puntir, *torsion case* terjadi ketika *body* kendaraan memperoleh beban dari momen yang diaplikasikan pada garis tengah *axle*, momen ini terdapat pada *axle* depan dan belakang. Beban *torsion* menghasilkan

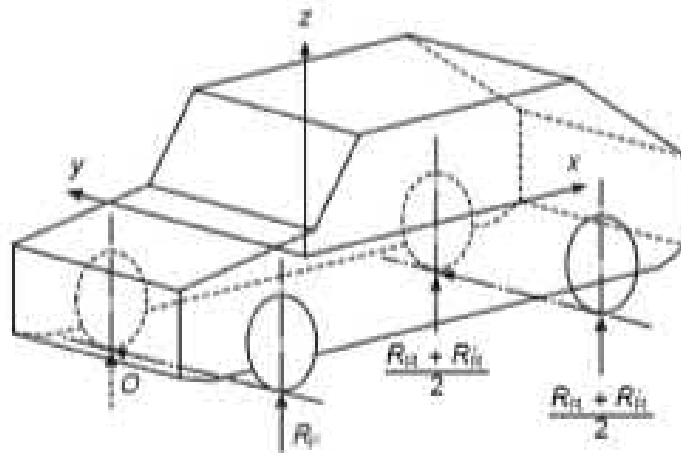
gerakan puntiran kendaraan sepanjang sumbu  $x$  kendaraan (Sumber: Smith (Ed), 2002: 125). Ilustrasi pembebanan *torsion* ditunjukkan pada gambar 2. 5.



**Gambar 2.5.** Ilustrasi torsion bending  
(Sumber: Smith (Ed), 2002: 126).

### 3) *Combined bending and torsion*

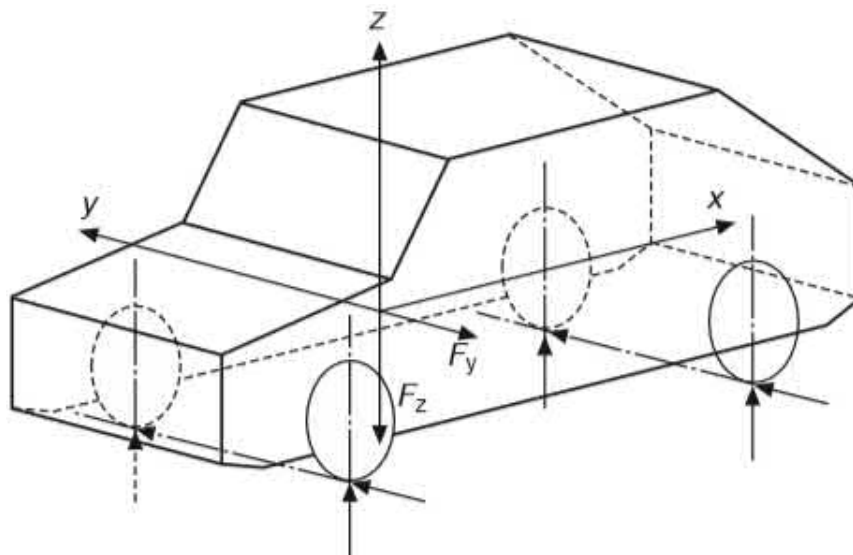
*Combined bending and torsion* (kombinasi *bending* dan *torsion*), merupakan gabungan beban yang diaplikasikan secara bersamaan. Beban puntir (*torsion*) tidak dapat muncul tanpa adanya beban tekuk (*bending*) sebagaimana gaya gravitasi. Oleh karena itu, dua beban tersebut harus dipertimbangkan ketika menghadirkan kondisi nyata dalam melakukan simulasi. Ilustrasi beban kombinasi ditunjukkan pada gambar 2. 6.



**Gambar 2.6.** Ilustrasi beban kombinasi (*bending and torsion*)  
(Sumber: Smith (Ed), 2002: 126).

#### 4) *Lateral loading*

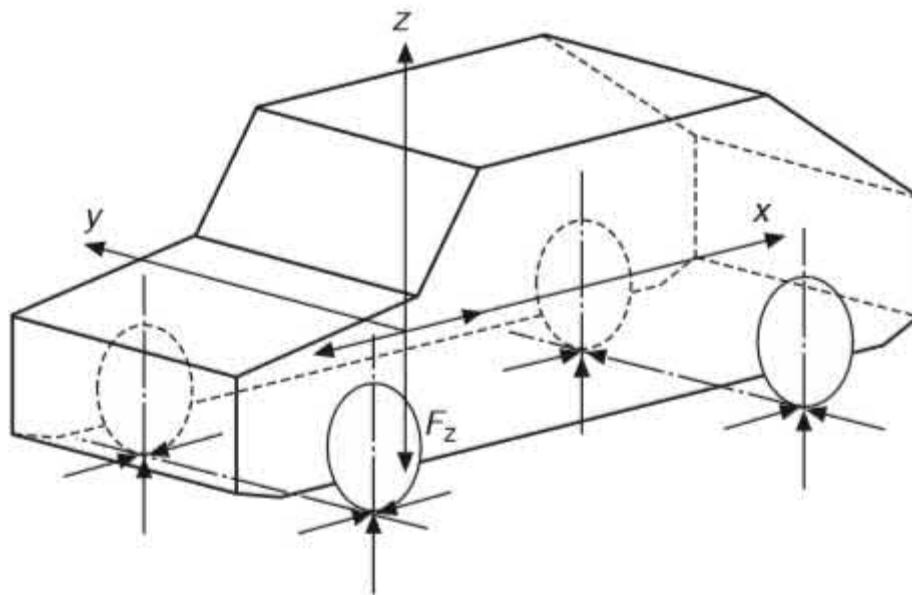
Beban lateral (*lateral loading*) terjadi ketika kendaraan melewati simpangan atau ketika kendaraan melewati sisi jalan, beban ini bekerja sepanjang sumbu  $y$  (Sumber: Smith (Ed), 2002: 127). Ilustrasi beban lateral ditunjukkan pada gambar 2.7 .



**Gambar 2.7.** Ilustrasi Beban lateral kendaraan  
(Sumber: Smith (Ed), 2002: 127)

### 5) *Fore and aft loading*

*Fore and aft loading* atau beban depan dan belakang merupakan beban yang bekerja pada kendaraan ketika melakukan akselerasi dan pengereman. Gaya yang dihasilkan pada beban ini adalah gaya yang bersifat longitudinal. Kasus pembebanan longitudinal dan *fore and aft loading* memerlukan perhatian khusus ketika merancang dudukan peredan kejut (*suspension*) pada *chassis*, namun perhitungan beban ini kurang berpengaruh pada perhitungan *chassis* secara utuh (Sumber: Smith (Ed), 2002: 127). Ilustrasi beban depan dan belakang ditunjukkan pada gambar 2. 8.



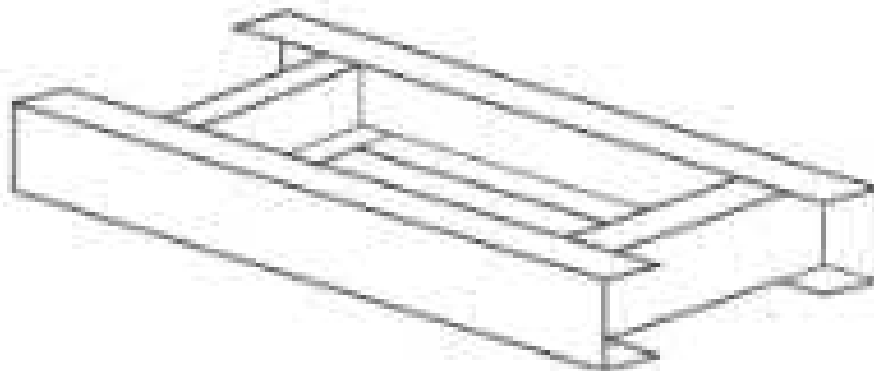
**Gambar 2.8.** Beban depan/belakang (*fore/aft*) kendaraan  
(Sumber: Smith (Ed), 2002: 127)

### C. Jenis Konstruksi *Chassis*

Terdapat beberapa jenis *chassis* dengan karakteristik yang berbeda ketika memperoleh berbagai jenis beban, berikut beberapa jenis konstruksi *chassis*:

a) *Ladder Frame* (Rangka *Ladder*)

*Ladder frame* adalah jenis konstruksi *chassis* dengan dua batang pipa panjang yang menyokong kendaraan, menyediakan dukungan yang kuat dari berat beban dan umumnya berdasarkan desain angkut (Fadila dan Syam, 2013: 71). Gambar 2. 9 menampilkan konsep dasar rangka tipe *ladder*, tipe ini banyak digunakan untuk kendaraan komersial dikarenakan *ladder frame* mudah untuk ditambahkan susunan *body* seperti *boxvans* dan *container*. Beberapa contoh jenis kendaraan dengan rangka *ladder frame* diantaranya *pick-up*, Truk, dan SUV,.



**Gambar 2.9.** Konsep dasar rangka tipe *ladder*  
(Sumber: Smith (Ed), 2002: 137).

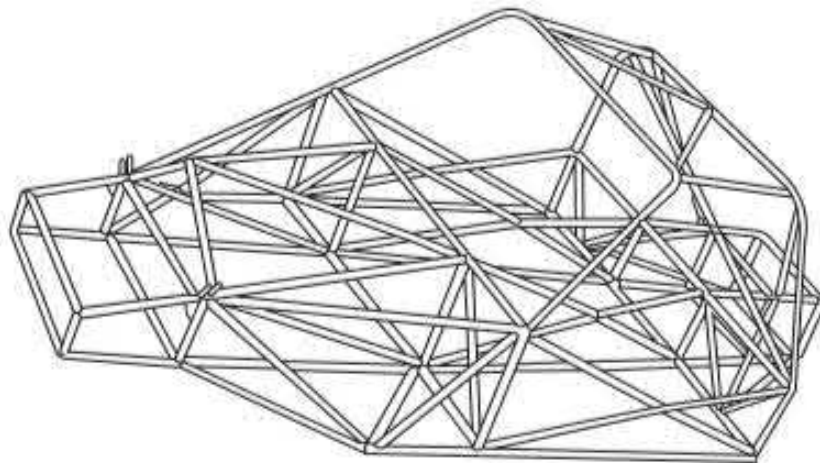
Rangka *ladder* memiliki desain dua batang memanjang (*rail*) dengan beberapa bagian melintang (*cross members*) bagian lain ditutup oleh batang melintang (*cross members*) (Smith (ed.), 2002: 137). Beberapa keuntungan dan kekurangan penggunaan konstruksi *chassis ladder* menurut Dwinanto dan Burhanuddin (2015: 121), meliputi:

Keuntungan rangka ini: (1) Mudah untuk didesain, dibangun, dan dimodifikasi. (2) Lebih cocok untuk kendaraan berat yang suka *off-road* dan lebih tahan lama. (3) Mudah untuk di reparasi bila terjadi tumbukan. Kekurangan dari rangka ini adalah: (1) Lebih berat dibandingkan *chassis* model lainnya. (2) *Performance*-nya lebih

rendah dibandingkan chassis model lain. (3) Efisiensi lebih rendah. (4) Torsi rendah saat melewati tikungan. (5) Mudah terguling.

b). *Tubular Space Frame*

*Tubular Space Frame* merupakan rangka yang memakai berbagai macam pipa circular (terkadang dipakai bentuk *square tube* agar mudah disambung, meskipun begitu bentuk *circular* memiliki kekuatan begitu besar) (Fadila dan Syam 2013: 71). *tubular space frame* adalah chassis terbaik yang kekuatannya sangat bagus di perlindungan kekakuan torsional, ketahanan beban berat, dan beban *impact* (Shantika, dkk, 2017:10). Gambar 2. 10 menunjukkan konstruksi rangka tipe *tubular space frame*. Kekuatan *impact* dan ketahanan berat yang baik dipengaruhi oleh konstruksi tipe tubular yang sangat padat, mempunyai banyak struktur penopang. Rangka tipe *tubular space frame* banyak ditemukan pada kendaraan yang sering ditemui pada perlombaan mobil.



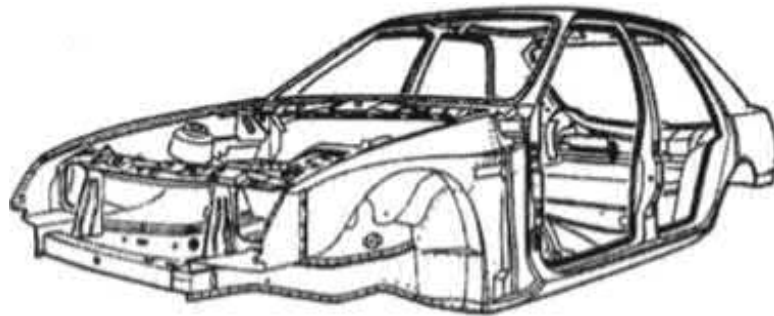
**Gambar 2.10.** Rangka tipe *tubularspace frame*  
(Sumber: Smith (Ed), 2002:141)

c). *Monocoque*

*Monocoque* merupakan satu kesatuan struktur *chassis* dari bentuk kendaraannya sehingga *chassis* ini memiliki bentuk yang beragam yang

menyesuaikan dengan *body* mobil (Fadila dan Syam, 2013: 71). Konstruksi tipe diilustrasikan pada gambar 2. 11. Beberapa keuntungan dan kekurangan *chassis monocoque* menurut Dwinanto dan Muhammad (2015:122), meliputi:

Keuntungan dari rangka ini adalah: (1) Bobot paling ringan.(2) Handling lebih lembut. (3) Ground clearance lebih rendah. Kekurangan dari rangka ini adalah: (1) Sangat sulit diperbaiki. (2) Sulit untuk dilakukan perombakan.

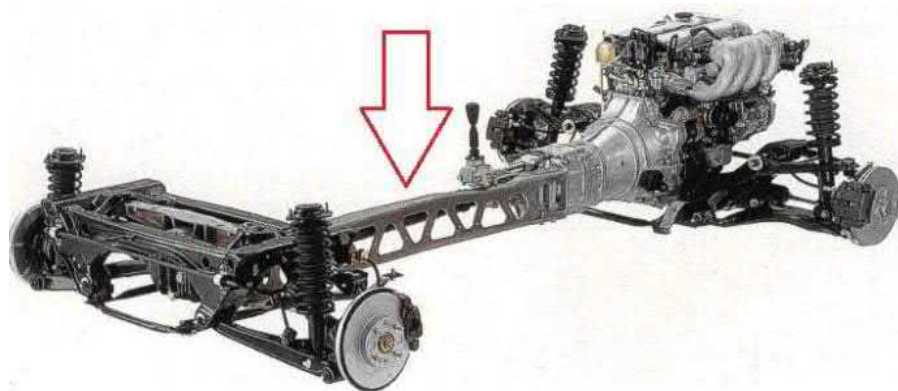


**Gambar 2.11.** Konstruksi rangka tipe *integral* atau *monocoque*  
(Sumber: Smith (Ed), 2002:142)

d). *Backbone*

*Backbone* merupakan rangka kendaraan dengan satu rangka inti yang melintang dari bagian depan kendaraan yang terhubung. Rangka ini (*backbone*) dirancang untuk mobil dua dan empat penumpang, karena *backbone* pusat (tengah) dapat digunakan sebagai sandaran lengan atau panel tambahan diantara tempat duduk (Adams, 1993: 91). Gambar 2. 12 menunjukkan bentuk rangka *backbone*, sifat rangka *backbone* memiliki ketahanan terhadap beban yang bersifat torsional.





**Gambar 2.12.**Rangka tipe *backbone*.  
(Sumber: Pistonheads, 2012)

#### **2.2.4 Rekam Perkembangan Purwarupa Bus Listrik PT. MAB**

PT. MAB telah membuat 3 purwarupa bus listrik. Berikut perkembangan bus listrik purwarupa yang telah dikembangkan oleh PT. Mobil Anak Bangsa:

1. Bus purwarupa 1 memiliki nama bus listrik Maxvell, merupakan bus listrik generasi pertama yang dibuat oleh PT. MAB. Bus purwarupa 1 merupakan bus jenis *High Deck* (HD), jenis *chassis frame* yang digunakan adalah OH 1626 Mercedes Benz yang ditunjukkan oleh gambar 2. 13, dimensi panjang awal *chassis frame* tersebut yaitu  $\pm 8$  meter, *chassis* tersebut diperpanjang melalui penambahan struktur *space frame* (kerangka penumpang) untuk memaksimalkan kapasitas beban yang mampu ditumpu kendaraan, dari proses perpanjangan tersebut, dimensi panjang akhir *chassis frame* menjadi  $\pm 12$  meter. Tampilan bus listrik purwarupa 1 PT. MAB ditunjukkan oleh gambar 2. 14.



**Gambar 2. 13.** *Chassis frame OH 1626*  
(Sumber: Tribunnews, 2016).



**Gambar 2. 14.** Bus Purwarupa 1 PT. MAB (Maxvell Buss)  
(Sumber: HALTEBUS, 2018).

2. Bus puwarupa 2 atau bus MD12E, merupakan bus yang dibuat oleh PT. Mobil Anak Bangsa menggunakan *chassis frame* tipe *monocoque*, kerangka *chassis frame* tersebut tidak memiliki rangka memanjang dari bagian depan hingga belakang *chassis*. Bus purwarupa 2 merupakan jenis bus *low entry / low deck* (bus dengan lantai rendah), tipe ini digunakan untuk mobilitas dalam kota (*citybuss*) atau dapat digunakan sebagai kendaraan penghubung antar terminal dalam bandara dengan tipe *low deck* (lantai rendah, salah satu

contohnya bus yang terdapat pada bandara untuk keperluan transportasi antar terminal). Tampilan bus purwarupa ke 2 ditunjukkan pada gambar 2.15.



**Gambar 2.15.** Tampilan Bus Proto 2 PT. MAB  
(Sumber: CNN Indonesia, 2018).

3. Bus listrik purwarupa ke 3 atau bus MD12-LE merupakan bus purwarupa terbaru milik PT. MAB, bus tersebut masih dalam proses produksi. Bus MD12-LE merupakan bus tipe *low entry / low deck* (lantai rendah). Tipe *chassis* yang dimiliki bus MD12-LE adalah *chassis monocoque*, seperti tipe *chassis* yang digunakan oleh bus purwarupa ke 2 PT. Mobil Anak Bangsa. Desain *chassis frame* bus MD12-LE ditunjukkan oleh gambar 2.16.



**Gambar 2.16.** *Chassis frame* Bus Purwarupa ke 3 (MD12-LE)  
(Sumber: Dokumentasi pribadi).

## 2.2.5 Kelelahan (*Fatigue*)

### A. Definisi Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan struktur (*fatigue failure*) terjadi karena aplikasi tegangan fluktuatif yang lebih rendah dari tegangan yang mampu menyebabkan kegagalan selama satu aplikasi tegangan (Chetan, dkk, 2012:103). Kelelahan (*fatigue*) merupakan bentuk kegagalan yang terjadi pada struktur yang mengalami tegangan dinamis (Callister dan Rethwisch, 2006: 255). Berdasarkan definisi tersebut dapat diartikan bahwa kelelahan pada struktur terjadi karena adanya pembebanan berulang (siklis) dengan nilai tegangan dibawah batas *yield* dan *ultimate strength* material.

Proses terjadinya kelelahan material terdiri atas *crack initiation* yang bermula pada daerah dengan konsentrasi tegangan yang tinggi, *crack growth* dan *final fracture* (Hutabarat dan Sitorus, 2017:258). *Crack growth* atau langkah awal terjadinya retakan disebabkan pembebanan berulang, selanjutnya retakan yang muncul akan terus mengalami perambatan hingga terjadinya *final fracture* (patah). Fenomena perambatan tersebut terjadi pada area yang mengalami konsentrasi retakan.

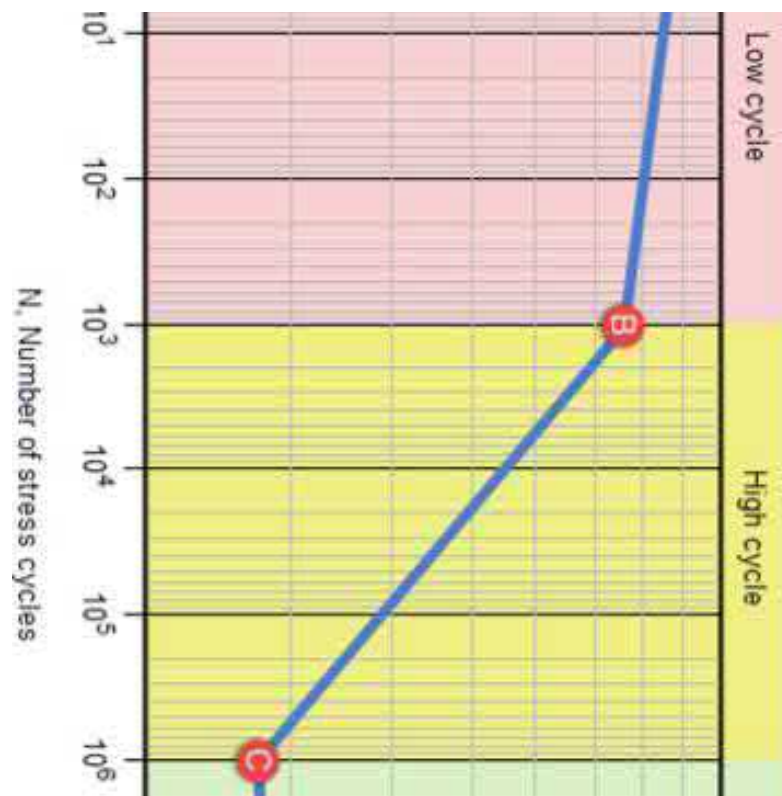
Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi proses terjadinya kelelahan. Menurut Callister dan Rethwisch, (2006:262), faktor yang mempengaruhi umur kelelahan struktur, meliputi:

- (a) Tegangan rerata (*mean stress*), kenaikan tingkatan *mean stress* menimbulkan penurunan ketahanan kelelahan (*fatigue life*),
- (b) Efek permukaan (*surface effects*), untuk beberapa kondisi pembebanan pada umumnya, tegangan maksimum dalam komponen atau struktur ditunjukkan pada permukaan yang dimiliki.
- (c) Faktor desain (*design factors*), desain dari suatu komponen dapat mempunyai pengaruh yang signifikan pada karakteristik kelelahan yang dimiliki. Setiap takik atau diskontinuitas pada geometri benda dapat menjadi penyebab tegangan dan sumber inisiasi retakan kelelahan.

## B. Diagram S-N

Diagram S-N merupakan komponen dasar yang pendekatan kelelahan dengan menggunakan pendekatan *stress-life* (pendekatan yang menghubungkan tegangan pada struktur yang disebabkan pembebanan dengan daya tahan struktur atau umur struktur dalam satuan siklus). Diagram S-N atau dikenal dengan diagram Wohler, dalam diagram tersebut terdapat dua sumbu yaitu sumbu horizontal (*x axis*) dan sumbu vertikal (*y axis*). Sumbu *x* digunakan sebagai data tegangan yang dihasilkan dari pembebanan, notasi yang digunakan pada *y axis* menggunakan “*S*”. *X axis* digunakan sebagai data siklus atau umur yang diperoleh dari pembebanan yang dikenakan pada struktur.

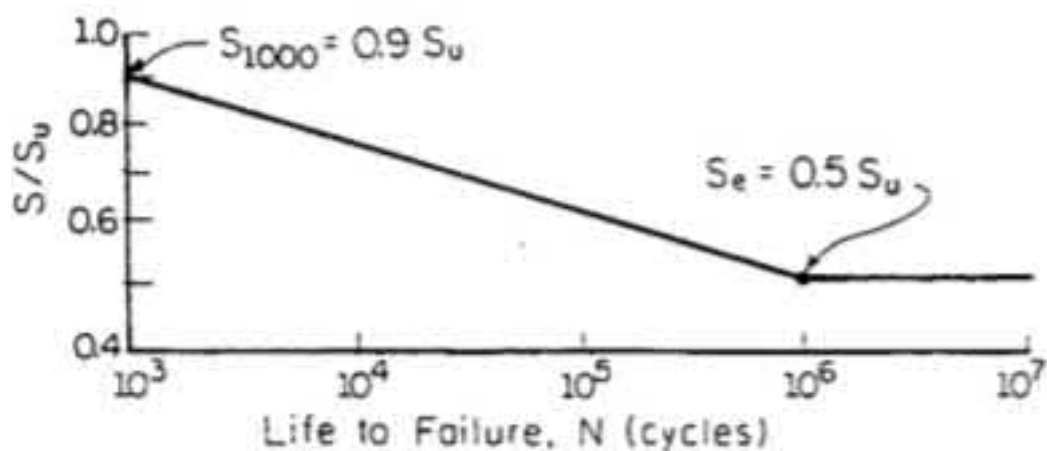
Terdapat tiga area yang ditampilkan pada diagram S-N, tiga area tersebut ditampilkan pada gambar 2. 17 yang ditampilkan oleh John Holtz (2016:5) dalam buku “*Durability 101: Don’t get tired of fatigue*”.



**Gambar 2.17.** Kurva S-N material *fero* material  
(Sumber: Holtz, 2016:5).

Titik – titik pada kurva sesuai pada nilai – nilai pada gambar 2. 17, merupakan  
(Holtz, 2016:5):

1. *Ultimate tensile strength,  $S_{ut}$* . Kegagalan terjadi pada 1 siklus.
2. Akhir dari area “*low cycle*”, pada umumnya pada 1000 siklus
3. Akhir dari area “*high cycle*”, pada umumnya diantara siklus 10<sup>7</sup> dan 10<sup>8</sup>.



**Gambar 2.18.** Persamaan diagram SN untuk baja tempa  
(Sumber: Bannantine,dkk, 1989:4).

Contoh diagram S-N sederhana ditunjukkan pada gambar 2. 18 berdasarkan gambar 2. 18 diperoleh beberapa persamaan matematis, berikut persamaan matematis yang dapat digunakan untuk memperoleh garis pada diagram S-N untuk material baja menurut Bannantine, dkk (1989:4-5):

$$S = 10^C N^b \text{ (untuk memperoleh nilai tegangan pada siklus } 10^3 < N < 10^6 \text{)}$$

Eksponen  $C$  dan  $b$ , dari kurva SN ditentukan melalui persamaan IV dan V

$$b = -\frac{1}{3} \log_{10} \frac{S_{1000}}{S_e} \dots\dots\dots \text{(IV)}$$

$$C = -\frac{1}{3} \log_{10} \frac{(S_{1000})^2}{S_e} \dots\dots\dots \text{(V)}$$

$S_e$  merupakan nilai ketahanan tegangan pada transisi menuju umur tak terhingga (Holtz, 2016:15). Persamaan untuk memperoleh nilai siklus dari perubahan tegangan, diperoleh melalui persamaan VI.

$$N = 10^{-C/b} S^{1/b} (10^3 < N < 10^6) \dots\dots\dots (VI)$$

Menurut Bannantine, dkk (1989:5) untuk mengestimasi nilai  $S_{1000}$  dan  $S_e$  diperoleh melalui persamaan VII

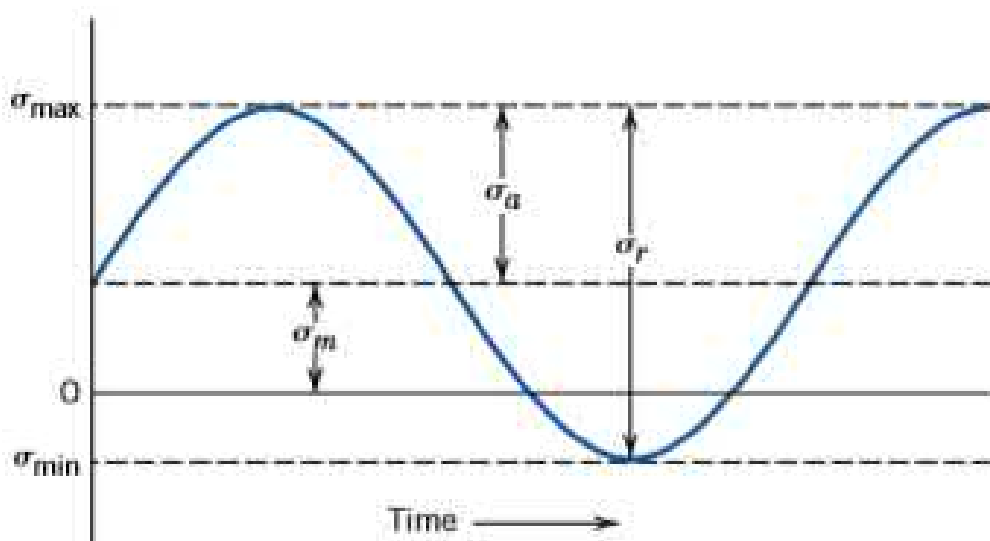
$$S_{1000} = 0,9S_u \quad \text{dan} \quad S_e = 0,5S_u \dots\dots\dots (VII)$$

Persamaan VIII lain yang dapat digunakan untuk menemukan nilai (Bannantine, dkk, 1989:5)

$$S = 1,62 S_u N^{-0,085} \dots\dots\dots (VIII)$$

### C. Rerata Tegangan

Akuan (2007:12), parameter pembebanan yang berpengaruh terhadap kelelahan logam adalah tegangan rata - rata,  $\sigma_m$  dan tegangan amplitudo,  $\sigma_a$  serta frekuensi pembebanan. Adapun parameter – parameter tersebut direpresentasikan pada gambar 2.19 sebagai kurva rerata tegangan atau *mean stress curve*.



**Gambar 2.19.** Grafik rerata tegangan atau *mean stres curve*.  
(Sumber: Callister dan Rethwisch, 2006:256).



Berdasarkan gambar 2.19, didapatkan beberapa persamaan (Akuan, 2007:12):

1. Tegangan maksimum (*maximum stress*),  $\sigma_{\max} = S_{\max}$
2. Tegangan minimum (*minimum stress*),  $\sigma_{\min} = S_{\min}$
3. Tegangan amplitudo (*alternating stress component*),  $S_a = \sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$  atau  $S_a = (S_{\max} - S_{\min}) / 2$
4. Tegangan rata-rata (*midrange stress*),  $S_m = \sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$  atau  $S_m = (S_{\max} + S_{\min}) / 2$
5. Rasio tegangan (*stress ratio*),  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  atau  $R = S_{\min} / S_{\max}$ .

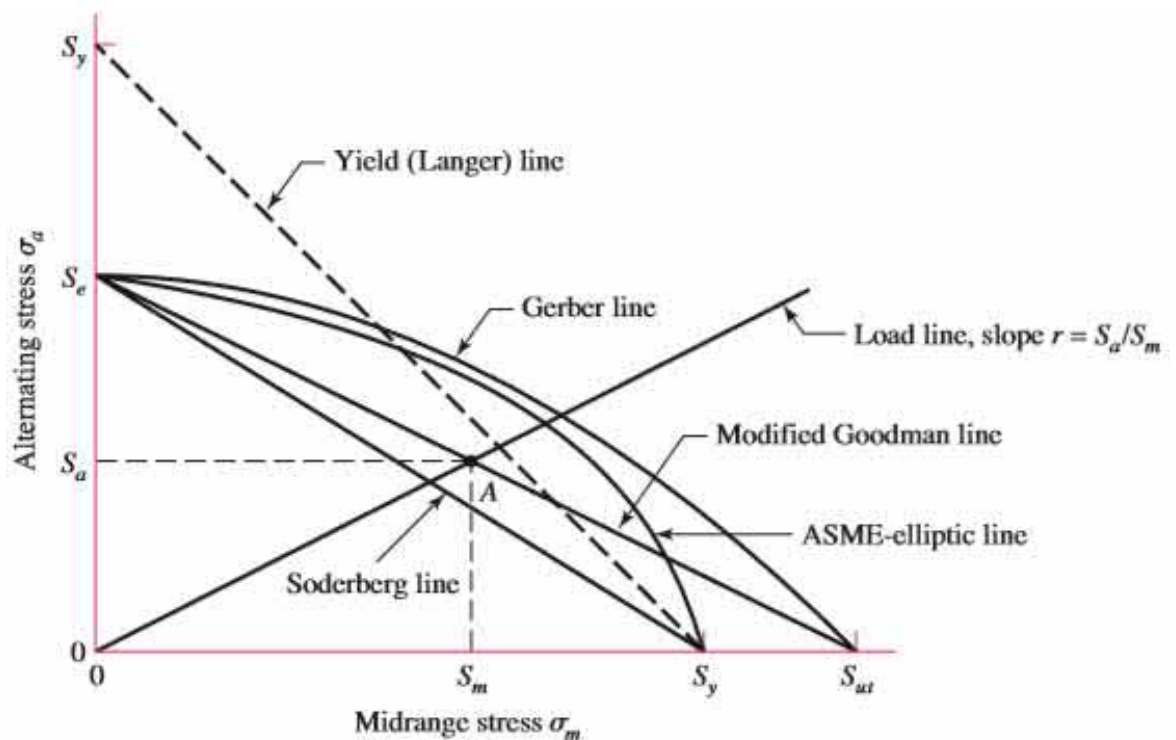
Menurut Akuan (2007:12) menyatakan “bila tegangan rata-rata sama dengan 0 atau rasio tegangan sama dengan -1, maka besarnya tegangan amplitudo yang diijinkan adalah nilai batas lelahnya ( $S_e$ )”. Berdasarkan pendapat tersebut dapat disimpulkan, apabila tegangan rata – rata semakin besar maka tegangan amplitudonya harus diturunkan. Terdapat beberapa persamaan matematis yang menghubungkan nilai batas lelah, nilai *ultimate strength*, dan nilai *yield strength*, sebagaimana kurva batas tegangan pada logam yang tampak pada gambar 2. 20, terdapat pada buku “*Shigley’s Mechanical Engineering Design: Eighth Edition*” oleh Budynas dan Nisbet (2008:297).

Berdasarkan gambar 2. 20 diperoleh beberapa persamaan matematis yang menghubungkan nilai  $S_e$ ,  $S_y$ ,  $S_{ut}$ ,  $S_a$ , dan  $S_m$  yang dikemukakan oleh beberapa ahli, berikut persamaan matematis yang diperoleh (Bannantine, 1989:6-7):

- Soderberg (USA, 1930):  $\sigma_a/S_e + \sigma_m/S_y = 1$   
 Goodman (England, 1899):  $\sigma_a/S_e + \sigma_m/S_u = 1$   
 Gerber (Germany, 1874):  $S_a/S_e + (S_m/S_{ut})^2 = 1$   
 Morrow (USA, 1960s):  $S_a/S_e + S_m/\sigma_f = 1$

Bannantine (1989:8) membuat persamaan matematis (persamaan IX) yang menghubungkan nilai  $S_a$ ,  $S_m$ ,  $S_u$  dan  $S_n$ , berdasarkan persamaan Soderberg, Goodman, Morrow dan Gerber.

$$\sigma_a/S_n + \sigma_m/S_u = 1 \text{ (} S_n \text{ memiliki nilai konstan).....(IX)}$$



**Gambar 2.20.** Perbandingan persamaan matematis tegangan rata – rata  
(Sumber: Budynas dan Nisbett, 2008:297).

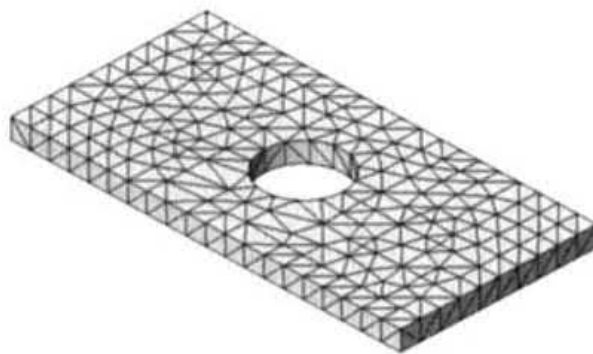
### 2.2.6 Finite Element Method (FEM)

*Finite element method* (FEM) atau metode elemen hingga adalah metode numerik untuk memperoleh solusi perkiraan persamaan diferensial biasa dan parsial (Bhatti, 2005:1). MEH (Metode Elemen Hingga) adalah metode numerik yang digunakan untuk memecahkan permasalahan dalam bidang rekayasa atau pun bidang fisik lainnya (Choiron, dkk, 2014:1). Hendra (2012:365) mengungkapkan “pada metode elemen hingga pemodelan dilakukan dengan membagi model yang akan dianalisis menjadi beberapa elemen dan menggunakan elemen tersebut sebagai dasar perhitungan dan analisis”. Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan metode elemen hingga atau FEM adalah metode numerik yang untuk memperoleh persamaan matematis dalam bentuk diferensial

biasa dan parsial untuk menyelesaikan permasalahan bidang rekayasa melalui pembagian model menjadi beberapa elemen sebagai dasar penghitungan dalam proses analisis.

Diskritisasi menjadi salah satu langkah utama dalam menggunakan FEM. Menurut Choiron, dkk (2014:1) pengertian diskritisasi adalah pembagian bodi kontinum menjadi elemen – elemen yang terdiri dari beberapa *node*. Kurowski (2004:19-20), mengungkapkan klasifikasi diskritisasi berdasarkan bidang perpindahan tiga dimensi dibedakan menjadi:

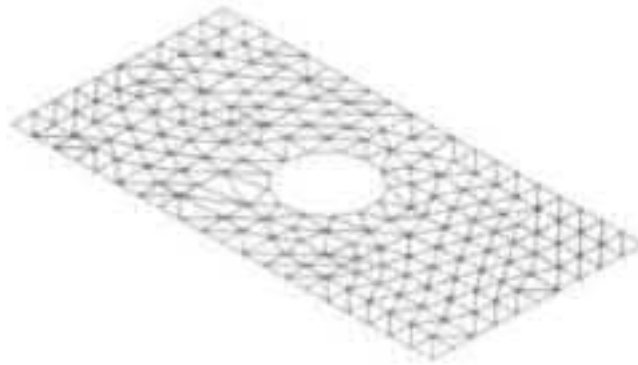
1. *Solid element*, elemen padat yang sepenuhnya mewakili bidang tiga dimensi (Kurowski, 2004:19). Elemen ini digunakan pada penelitian ini, sebagai representasi dari bentuk nyata, dengan dimensi sesuai pada rangka atau *chassis frame* MD12-LE. Gambar 2. 21 merupakan contoh elemen tipe *solid element*.



**Gambar 2.21.** Contoh diskritisasi dengan tipe elemen *solid element*  
(Sumber: Kurowski, 2004:19).

2. *Shell element*, tipe *shell element* memiliki satu dimensi (Kurowski, 2004:19). *shell element* digunakan untuk mereduksi dimensi atau meringankan kinerja komputer saat dilakukan analisis. Secara visual *shell element* memiliki tampilan sebuah lembaran atau permukaan dari benda (*surface*), adapun permukaan

tersebut mewakili ketebalan benda. Ketebalan pada *shell elemen* memiliki nilai konstan. Contoh *shell element* terdapat pada gambar 2. 22.



**Gambar 2.22.** *Shell element* yang diterapkan pada gambar 2. 21  
(Sumber: Kurowski, 2004:19)

3. *Membrane element*, elemen membran secara visual mirip dengan elemen shell, tetapi tekanan normal pada penampang shell biasanya dianggap konstan. (Kurowski, 2004:20)
4. *Beam element*, Elemen *beam* memiliki dua dimensi. Kami membuat asumsi bahwa penampang kecil dibandingkan dengan panjang (Kurowski, 2004:20)

FEA (*Finite Element Analysis*) adalah metode elemen hingga yang terintegrasi dengan dengan CAD (Budynas dan Nisbett, 2008: 934). Adapun menurut Kurowski (2004:1) FEA adalah sebuah alat dari analisis desain. Berdasarkan dua pendapat tersebut, dapat disimpulkan bahwa istilah FEA digunakan sebagai alat analisis yang terintegrasi dengan *software* CAD, salah satu contoh *software* tersebut adalah Autodesk Inventor 2019.

Terdapat beberapa prosedur umum dalam perhitungan yang dilakukan oleh FEA. Menurut Rahman, dkk (2008:79) terdapat tiga prosedur yang secara umum digunakan FEA dalam proses analisa, meliputi:

1. Langkah *preprocessing* (mendefinisikan model), langkah ini meliputi mendefinisikan domain geometrik masalah, tipe elemen yang akan digunakan, sifat material elemen, sifat geometrik elemen (panjang, area, dan sejenisnya), konektivitas elemen (mesh model), kendala fisik (kondisi batas) dan pembebanan (Hutton dalam Rahman,dkk, 2008:79).
2. Langkah selanjutnya adalah *solution*, pada langkah ini persamaan aljabar yang mengatur dalam bentuk matriks dan menghitung nilai yang tidak diketahui dari variabel bidang primer dirakit (Cook dalam Rahman, dkk, 2008:79).
3. Langkah terakhir adalah *postprocessing*, analisis dan evaluasi hasilnya dilakukan pada langkah ini (Hutton dalam Rahman, dkk, 2008:79).

### **2.2.7 Stress analysis**

FEA memiliki berbagai macam bidang untuk melakukan perhitungan matematis pada bidang teknik, diantaranya mampu melakukan perhitungan matematis karakteristik suatu spesimen atau struktur terhadap pembebanan yang diberikan melalui *stress analysis* yang terintegrasi dengan *software* CAD. Tujuan *stress analysis* pada penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik struktur bus MD12-LE terhadap pembebanan, adapun hasil yang dicari adalah nilai *von-misses* dan nilai deformasi.

*Software* yang digunakan untuk melakukan *stress analysis* adalah Autodesk Inventor 2019. Beberapa prosedur umum sebagaimana dilakukan pada FEA diterapkan dalam *software* Autodesk Inventor 2019, adapun secara spesifik prosedur tersebut meliputi:

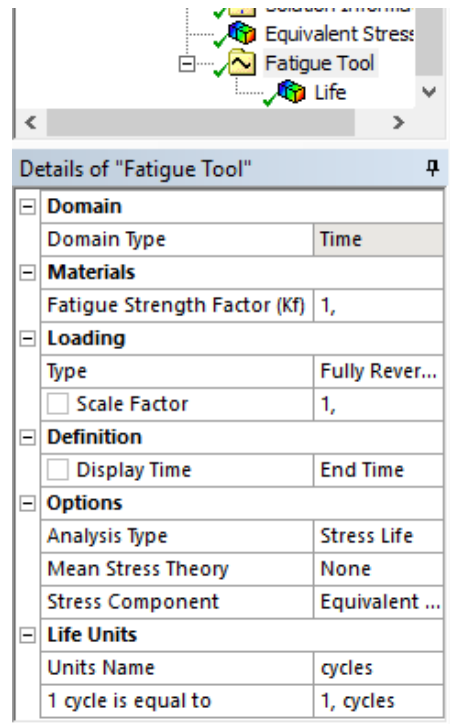
3. *Preprocessing*, meliputi mendefinisikan domain geometrik rangka, tipe elemen yang akan digunakan, sifat material elemen, sifat geometrik elemen (panjang,

area, dan sejenisnya), konektivitas elemen (mesh model), kendala fisik (kondisi batas) dan pembebanan.

2. *Solution*, mengatur dalam bentuk matriks dan menghitung nilai yang tidak diketahui dari variabel bidang primer dirakit dalam penghitungan tegangan pada analisis statis.
3. *Postprocessing*, atau hasil dan evaluasi desain yang dicari, adapun nilai ini berupa nilai *von misses* dan total deformasi.

### **2.2.8 Analisis Kelelahan (*Fatigue analysis*)**

*Fatigue analysis* dilakukan untuk mengetahui usia atau waktu ketahanan suatu komponen terhadap beban yang dikenakan. Analisis kelelahan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan FEA yang dimiliki oleh *software* ANSYS Workbench 18.1. Terdapat beberapa konfigurasi untuk melakukan analisis kelelahan pada *fatigue tool* yang digunakan pada penelitian ini, sebagaimana ditunjukkan gambar 2.22, salah satu konfigurasi yang dilakukan adalah menentukan jenis *analysis type* atau jenis analisis yang digunakan, pada penelitian ini menggunakan jenis *stress life*, pemilihan jenis *stress life* dilakukan karena estimasi *fatigue life* mencapai  $10^5$  siklus.



**Gambar 2. 23.** Kolom *fatigue tool* dalam ANSYS 18.1  
(Sumber: Dokumentasi pribadi).

### 2.2.9 Frekuensi Natural dan *Modal analysis*

Huzain dan R. Heru (2013: 108), *natural frequency* (frekuensi natural) adalah karakteristik benda padat yang memiliki massa/inersia dan kekakuan. frekuensi alami struktur merupakan frekuensi dari struktur yang secara alami cenderung untuk bergetar jika struktur ini terkena gangguan, Maulidiyadan Rusli (2017: 2). Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan frekuensi alami adalah bentuk respon saat suatu benda atau struktur mendapat gaya dari luar, respon tersebut terjadi karena karakteristik benda yang memiliki massa/inersia dan kekakuan. Penggunaan nilai frekuensi natural tidak hanya digunakan untuk mengetahui karakteristik dinamis struktur, namun dapat digunakan untuk mengetahui kegagalan suatu struktur terhadap eksitasi getaran yang timbul, Huzain dan R. Heru (2013: 108) menyatakan bahwa “bila benda digetarkan

dengan gaya harmonis yang memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi pribadi benda tersebut, maka amplitudo getaran yang terjadi pada benda akan semakin besar (tidak teredam), sehingga akan mengakibatkan kegagalan struktur”.

*Modal analysis* merupakan pembelajaran sifat dinamis dari struktur dibawah eksitasi getaran, Bhise, dkk (2017: 158). *Modal analysis* menggunakan metode elemen hingga (FEM) dapat digunakan untuk menentukan frekuensi natural dan *shape mode* (bentuk repon terhadap getaran)(Rajappan dan Vivekanandhan, 2013: 64). Berdasarkan uraian tersebut, disimpulkan bahwa *modal analysis* merupakan analisa terhadap suatu struktur yang dipengaruhi eksitasi getaran, adapun penggunaan *modal analysis* dapat dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga yang terdapat pada *software* CAE Autodesk Inventor 2019.

Salah satu contoh penggunaan *modal analysis* pada analisa sifat dinamis struktur dilakukan oleh Ps. Madu, dan Venugopal (2014) dengan penelitian yang berjudul “*Static Analysis, Design Modification and Modal analysis of Structure Chassis frame*”, *modal analysis* yang dilakukan pada penelitian tersebut menggunakan *software* CAE ANSYS Workbench. Data yang diperoleh pada *modal analysis* tersebut mencapai 14 bentuk jenis respon getaran, dengan respon getaran pada model ke 7 menunjukkan frekuensi natural maksimum pada kondisi dinamis dengan nilai frekuensi 58,683 Hz.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Simpulan

Berdasarkan data hasil penelitian dan pembahasan dari *stress analysis*, *modal analysis* dan *fatigue analysis* pada *chassis frame* MD12-LE dapat disimpulkan bahwa:

1. Berdasarkan hasil pengujian *stress analysis*, perubahan geometri komponen *chassis frame* MD12-LE yang mengalami tegangan maksimum 765,3 MPa melebihi tegangan *yield strenght* material pembentuknya. Nilai hasil *modal analysis* maksimum yang diperoleh adalah 26,06 Hz dan nilai *fatigue life* yang dihasilkan adalah 646,62 siklus untuk nilai maksimum dan 1E+6 siklus untuk nilai minimum.
2. Hasil yang diperoleh dari pengujian *stress analysis* pada *chassis* MD12-LE setelah dilakukan perubahan adalah 275,3 MPa, mempunyai hasil *stress vonmises* yang lebih sedikit dari hasil analisis *stress* pada desain *chassis frame* MD12-LE tanpa adanya perubahan geometri. Adapun hasil *modal analysis* maksimum adalah 26,44 Hz, lebih besar dari frekuensi natural yang diperoleh pada *chassis frame* sebelumnya, meningkatnya nilai frekuensi natural, menandakan tingkat kokoh suatu struktur meningkat. Adapun hasil *fatigue analysis* pada *rear shock absorber bracket* yang diperoleh pada *fatigue life* maksimum menunjukkan hasil estimasi 1E+6 siklus dan *fatigue life minimum* 754,19 siklus, dengan hasil nilai *fatigue life* minimum mengalami penambahan dari *rear shock absorber bracket* sebelumnya.

3. Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh pada analisis *chassis frame* yang tidak dilakukan perubahan geometri dan *chassis frame* yang dilakukan perubahan analisis, terdapat perbedaan dari hasil analisis yang dilakukan pada dua objek tersebut. Perbedaan yang tampak meliputi, hasil *stress* yang timbul akibat dari pembebanan mengalami penurunan pada *chassi frame* MD12-LE yang dilakukan perubahan geometri. Nilai *modal analysis* pada meningkat pada *chassi frame* MD12-LE yang mengalami perubahan geometri. Nilai *fatigue life* meningkat, berdasarkan nilai *fatigue life* yang tampak, adapun skala skala warna yang tampak pada *chassis frame* MD12-LE yang dilakukan perubahan geometri memiliki warna merah atau daerah *fatigue life* minimum lebih sedikit dari daerah kritis *fatigue life* yang dimiliki oleh *chassis frame* MD12-LE tanpa dilakukan perubahan geometri.

## 5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah diuraikan, saran yang dapat diberikan antara lain:

1. Perubahan geometri rangka yang disajikan pada penelitian ini masih sangat terbatas, namun melalui penelitian ini diharapkan mampu memunculkan gagasan untuk penelitian lebih lanjut, seperti analisis yang dilakukan seperti melakukan perubahan komponen *chassis frame* lain, untuk menurunkan nilai tegangan maksimum berdasarkan data terakhir yang dikembangkan dalam penelitian ini.
2. *Stress analysis* yang dilakukan oleh peneliti hanya menyertakan *chassis frame*, untuk penelitian selanjutnya akan lebih baik jika *body structure* (struktur

rangka badan kendaraan) sehingga karakteristik rangka kendaraan yang diperoleh semakin kompleks

3. Penggunaan *software* atau aplikasi analisis untuk bidang teknik (CAE/*Computer Aided Engineering*) berbasis elemen hingga telah mengalami perkembangan, dengan jenis yang beragam, adapun perlu dilakukan analisis struktur dilakukan dengan menggunakan *software* CAE yang beragam untuk memberikan informasi prosedur penggunaan tiap *software* CAE.
4. Pengujian pembebanan *stress analysis* yang dilakukan dengan menggunakan *software* CAE perlu dilakukan pengujian lab untuk mengetahui validitas hasil analisis *software*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adams, Herb. 1993, *Chassis Engineering*. The Berkley Publishing Group: New York.
- Agus, N., K. Rihendra, dan I. N. P. Nugraha. 2017. Analisis Tegangan Statik Pada Rancangan Frame Mobil Listrik Ganesha Sakti (GASKI) Menggunakan Software Solidworks 2014. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin (JJPTM)* 8 (2).
- Akuan, Abrianto. 2007. *Kelelahan Logam*. Bandung: Universitas Jenderal Achmad Yani.
- Anggraini, L. dan Y. Chairil. *Fatigue analysis* pada Pegas Daun Jenis SST 74 dalam Aplikasi Industri Alat Industri Alat Berat dengan Pemodelan Metode Elemen Hingga. *ROTASI* 20 (2): 118 – 123.
- Bannantine, J., J. J. Corner, J. L. Handrock. 1989. *Fundamental of Metal Fatigue analysis*. New Jersey: Prentice Hall.
- Bhatti M. 2005. *Fundamental Finite Element Analysis and Applications: with Mathematica and Matlab Computations*. United States: John Wiley & Sons, Inc.
- Bhise, S., V. Dabhade. S. Pagi. A. Veldandi. dan V. Chodankar. 2017. *Modal analysis of Truck Chassis frame*. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 8 (3): 158 – 166.
- Budynas, R. dan J. K. Nisbett. 2008. *Mechanical Engineering - Shigley's Mechanical Engineering Design Eighth Edition*. United States: The McGraw-Hill Companies.
- Callister, W. dan D. G. Rethwish. 2009. *Materials Science and Engineering: An Intoduction, 8<sup>th</sup> Edition*. United States: John Wiley & Sons, Inc.
- Chetan, Jadav dan P. Khushbu. *A Review of the Fatigue analysis of an Automobile Frames*. *International Journal of Advanced Computer Research* 2 (4): 103 – 107.
- Choiron, M. A., A. Purnowidodo. dan K. Anam. 2014. *Modul Ajar Metode Element Hingga*. Malang: Universitas Brawijaya.
- CNN. 2018. Bus Listrik Moeldoko Akan Diujikan Di Bandara Soetta. <https://www.cnnindonesia.com/teknologi/20180303143156-384280180/bus-listrik-moeldoko-akan-diuji-cobakan-di-bandara-soetta>. (Diunduh pada tanggal 12 Desember 2018).
- Dendy, M. A. dan H. A. Bakar. 2015. Analisis Kekuatan Struktur Landing Skid Akibat Impact Saat Landing Dengan Variasi Beban Pada Helikopter Synergy N9. *INDEPT* 5 (2): 35 – 45.
- Dwinanto, A. Y. dan F. B. Muhammad. 2015. Analisa Perbandingan Karakteristik Bodi dan Chassis pada Prototipe Kendaraan Listrik. *Jurnal Rekayasa Mesin* 6 (2): 119 – 126.
- Fadila, A. dan B. Syam. 2013. Analisis Simulasi Struktur *Chassis* Mobil Mesin USU Berbahan Besi Struktur Terhadap Beban Statik Dengan Menggunakan Perangkat Lunak ANSYS 14.5. *Jurnal E-Dinamis* 6 (2): 70 – 79.

- Garud, R. Y., S. C. Tamboli. dan A. Pandey. 2018. Structural Analysis of Automotive Chassis, Design Modification and Optimization. *International Journal of Applied Engineering Research* 13 (11): 9887 – 9892.
- Haltebus. 2018. Intip Bus Listrik Mobil Anak Bangsa Yuk. <http://www.haltebus.com/detail769.html>. (Diunduh pada tanggal 11 September 2018).
- Hasanuddin, I., Husaini. M. S. Anwar. S. Yudha. B. Z. dan H. Akhyar. 2017. Stress and strain analysis from dynamic loads of mechanical hand using finite element method. *IOP Conf. Series: Materials Sciences and Engineering* 352.
- Hendra, Erinofiardi. 2012. Analisa Defleksi Struktur Tower Transmisi Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Rekayasa Mesin* 3 (2): 362 – 371.
- Holtz, John. 2016. *Durability 101: Don't get tired of Fatigue*. <http://au.autodesk.com/au-online/classes-on-demand/class-catalog/classes/year-2016/nastran-incad/sim20902>. (Diunduh pada tanggal 31 Agustus 2018).
- Hutabarat, U. J. dan M. B. H. Sitorus. 2017. Perancangan Mesin Uji Lelah Baja Poros Dengan Pembebanan Puntir Dinamis. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)* 6 (4): 258 – 262.
- Huzain, M. F. dan R. H. Triharjanto. 2013. Pengukuran Karakteristik Dinamika Struktur Satelit LAPAN-ORARI/A2 (Structural Dynamics Characteritics Measurement of LAPAN-ORARI/A2 Satellit). *Jurnal Teknologi Dirgantara* 10 (2): 107-116.
- Jalil, A. dan M. Awwaluddin. 2013. Analisis Kelelahan Pada Struktur Landasan Rangka Pada Perencanaan Pesawat Sinar-X Digital Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Perangkat Nuklir* 7 (1): 41 – 50.
- Japanese Standards Association. 2007. *Ferrous Metals & Metallurgy*. Tokyo: Japanese Standards Association.
- Kadir, A. M., D. Priadi. E. S. Siradj. dan H. Setiyono. 2013. Investigasi Eksperimental Perilaku Profil Baja Ringan Berpenampang Persegi Akibat Interaksi Beban Tekan Memusat dan Momen Lentur. *Majalah Metalurgi* 28: 33 – 48.
- Kristyadi, T., A. Putra. T. Santika. L. Hartawan. dan Trinaldo. 2017. *Stress analysis of a Cross over Electric Car Chassis*. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* 14 (5): 13 – 28.
- Kurowski, P. M. 2004. *Finite Element Analysis for Design Engineers*. United State of America: SAE International.
- M, Shivakumar dan Nirmala L. 2012. Fatigue Life Estimation of Chassis frame FESM Bracket for Commercial Vehicle. *International Journal of Science and Research (IJSR)* 3: 441 – 447.

- Maulidiya, S. dan Rusli. 2017. Penentuan Frekuensi Natural Dan Arah Pergerakan Gelombang (Studi Kasus: Jembatan Soekarno Hatta Kota Malang). *Jurnal MIPA UNSRAT* 6 (1): 1 – 7.
- Mohammadipour, A. dan K. Willam. 2018. A numerical lattice method to characterize a contact fatigue crack growth and its Paris coefficients using configurational forces and stress-life curves. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*
- Nugroho, U., S. Anis. R. Kusumawardani. A. M. Khoiron. S. S. Maulana. M. Irvani. dan Z. P. Mashdiq. 2018. Frame analysis of UNNES electric bus chassis construction using finite element method. *Engineering International Conference (EIC2017)*.
- Patill, H. B., S. D. Kachave. dan E. R. Deore. 2013. *Stress analysis of Automotive Chassis with Various Thicknesses. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 6: 44 – 49.
- Pistonheads. 2012. *Donor Chassis. Suggestions?.* <https://www.pistonheads.com/gassing/topic.asp?h=0&f=30&t=1103729>. (Diakses pada tanggal 10 Oktober 2018).
- Ps, M. dan V. T. 2014. Static Analysis, Design Modification and *Modal analysis of Structural Chassis frame. International Journal of Engineering Research and Applications* 5: 6-10.
- Rahman, Roslan A., M. N. Tamin dan O. Kurni. 2008. *Stress analysis of Heavy Duty Truck Chassis As A Preliminary Data For Its Fatigue Life Prediction Using FEM. Jurnal Mekanikal* (26): 76 – 85.
- Rajappan, R dan M. Vivekanandhan. 2013. Static and *Modal analysis of Chassis by Using FEA. The International Journal of Engineering* 2 (2): 63 – 73.
- Riley, W. B dan A. R. George. 2002. Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis. *SAE International*.
- Shantika, T, E. T. Firmansjah dan I. Naufan. 2017. Perancangan Chassis Type Tubular Space Frame Untuk Kendaraan Listrik. *POROS* 15 (1): 9 – 17.
- Smith, J. H (Ed.). 2002. *An Introduction to Modern Vehicle Design*. USA: Elsavier
- Sugiyono. 2015. *METODE PENELITIAN PENDIDIKAN – Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: ALFABETA
- Tawekal, R. L. 2005. Perhitungan SCF untuk Analisa Fatigue pada Sambungan Struktur Anjungan Lepas Pantai. *Media Komunikasi Tekni Sipil* 3 (2): 63 – 74.
- Tribunnews. 2016. Bedah Jeroan Bus OH 1626 Yang Diserahkan Mercedes-Benz Indonesia Ke Blue Bird Group. <http://www.tribunnews.com/otomotif/2016/03/02/bedah-jeroan-bus-oh-1626-yang-diserahkan-mercedes-benz-indonesia-ke-blue-bired-group>. (Diunduh pada tanggal 11 September 2018).