



**ANALISIS KEKUATAN RANGKA BODI BUS
LISTRIK MD12E PERSEROAN TERBATAS
MOBIL ANAK BANGSA
DENGAN METODE ELEMEN HINGGA**

Skripsi

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

Oleh

Gigih Gustomo

NIM.5202414083

**PENDIDIKAN TEKNIK OTOMOTIF
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2020**

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Gigih Gustomo

NIM : 520241403

Program studi : Pendidikan Teknik Otomotif S1

Judul : **“Analisis Kekuatan Rangka Bodi Bus Listrik MD12E
Perseroan Terbatas Mobil Anak Bangsa Dengan Metode
Elemen Hingga”**

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

Semarang,

Pembimbing



Samsudin Anis, S.T., MT., Ph.D.

NIP. 197601012003121002

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul “Analisis Kekuatan Rangka Bodi Bus Listrik MD12E Perseroan Terbatas Mobil Anak Bangsa Dengan Metode Elemen Hingga” telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 07 Januari 2020

Oleh

Nama : Gigih Gustomo
NIM : 5202414083
Program Studi : Pendidikan Teknik Otomotif

Panitia:

Ketua



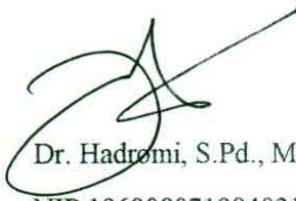
Rusiyanto, S. Pd., M. T.
NIP.197403211999031002

Sekretaris



Wahyudi, S. Pd., M. Eng.
NIP.198003192005011001

Penguji 1



Dr. Hadromi, S.Pd., M.T.
NIP.196908071994031004

Penguji 2



Drs. Suwahyo, M.Pd.

NIP.195905111984031002

Pembimbing



Samsudin Anis, S.T., MT., Ph.D.

NIP.197601012003121002

Mengetahui:

Dekan Fakultas Teknik UNNES



Dr. Nur Qudus, M.T., IPM.
NIP.196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Gigih Gustomo

NIM : 5202414083

Program Studi : Pendidikan Teknik Otomotif S1

Fakultas : Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang

Dengan ini menyatakan bahwa Skripsi dengan judul “Analisis Kekuatan Rangka Bodi Bus Listrik MD12E Perseroan Terbatas Mobil Anak Bangsa Dengan Metode Elemen Hingga” ini merupakan karya saya sendiri dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar sarjana di suatu perguruan tinggi manapun, dan sepengetahuan saya dalam skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain. kecuali, yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Semarang, 22 Januari 2020



Gigih Gustomo
52002414083

MOTTO

Kadang-kadang perjuangan adalah yang kita perlukan dalam hidup kita. Jika Allah SWT, membiarkan kita hidup tanpa hambatan itu mungkin melumpuhkan kita. Kita mungkin tidak sekuat yang semestinya kita mampu.

RINGKASAN

Gigih Gustomo. 2019. Analisis Kekuatan Rangka Bodi Bus Listrik MD12E Perseroan Terbatas Mobil Anak Bangsa Dengan Metode Elemen Hingga. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. **Samsudin Anis, S.T., MT., Ph.D.**

Tujuan penelitian ini adalah mencari tingkat angka keamanan dan menyelidiki pengaruh beban statis yang diberikan pada struktur rangka bodi bus terhadap nilai *von mises stress*, *displacement* dan *deformed* pada bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa. Karena dalam pembuatan struktur rangka bodi bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa belum dilakukan proses Analisis sehingga belum tahu kekuatan dari struktur yang digunakan untuk MD12E. Sehingga setelah dilakukan penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan, apakah struktur yang buat untuk MD12E dapat digunakan untuk produksi masal.

Metode penelitian struktur rangka bodi bus listrik ini dilakukan komputasi dengan metode elemen hingga pada *software* Autodesk Inventor Professional 2019, analisis yang dilakukan berupa *stress analysis*. Objek yang dianalisis adalah struktur rangka bodi bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa. Kemudian dilakukan pengujian struktur dengan perhitung *finite element analysis* dengan menggunakan *software* Autodesk Nastran In-CAD 2019. Pengujian struktur dilakukan sesuai dengan asumsi beban yang diterima oleh struktur rangka bodi bus, yaitu dengan asumsi beban kaca (2750 N), *Air Conditioner* (2500 N), *Ducting* dan *accessories* (5000 N), dan beban gravitasi (9800 N). Material yang digunakan pada struktur rangka bodi bus adalah Aluminium 6063 T6.

Hasil analisis yang diperoleh pada struktur rangka bodi bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa: *von mises stress*, nilai *Max von mises stress* adalah 8.45 MPa, sedangkan untuk nilai *Min* 9,726E-05, *displacement*, nilai *max displacement* 0,4444 mm, sedangkan untuk nilai *Min* 0,0 mm, dan angka *safety factor* 26,63. Dari hasil penelitian yang diperoleh dari analisis struktur rangka bodi bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa dikategorikan sangat aman karena memiliki angka keamanan (*safety factor*) yang cukup tinggi yaitu 26.63.

Kata kunci: *struktur rangka bodi bus, analisis, metode elemen hingga*

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul Analisis Kekuatan Rangka Bodi Bus Listrik Prototype 3 Perseroan Terbatas Mobil Anak Bangsa Dengan Metode Elemen Hingga. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Pendidikan pada Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif S1 Universitas Negeri Semarang. Shalawat dan salam disampaikan kepada Nabi Muhammad SAW, mudah-mudahan kiata semua mendapatka safaat Nya di yaumil akhir nanti, Amin.

Penyelesaian karya tulis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih serta penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Fathhur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T, IPM., Dekan Fakultas Teknik Universtas Negeri Semarang yang telah memberikan ijin penelitian skripsi ini.
3. Rusiyanto, S.Pd., M.T., Ketua Jurusan, Ketua Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang.
4. Samsudin Anis, S.T., MT., Ph.D., Dosen Pembimbing yang dengan sabar membimbing peneliti hingga skripsi ini selesai.

5. Dr. Hadromi, S.Pd., M.T., Dosen Penguji I yang telah memberikan banyak masukan dan saran kepada penulis
6. Drs. Suwahyo, M.Pd., Dosen Penguji II yang telah memberikan banyak masukan dan saran kepada penulis
7. Seluruh dosen jurusan Teknik Mesin, yang telah memberikan ilmu yang berguna bagi penulis.
8. Sahabat seperjuangan atas kebersamaannya dan semua motivasi yang tercurah kepada penulis.
9. Semua pihak yang memberikan saran dan motivasi kepada penulis

Penulis menyadari bahwa dalam skripsi ini masih banyak kekurangannya, oleh karena itu dengan segala kerendahan hati penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dalam perbaikan skripsi ini. Semoga Allah SWT memberikan pahala berlipat ganda atas bantuan dan kebaikannya. Amin.

Semarang, 22, Januari 2020



Gigih Gustomo

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
MOTTO	v
RINGKASAN.....	vi
PRAKATA.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	4
1.3 Pembatasan Masalah	5
1.4 Rumusan Masalah	5
1.5 Tujuan Penelitian.....	6
1.6 Manfaat Penelitian.....	6
BAB II. KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	8
2.1 Kajian Pustaka.....	8
2.2 Landasan Teori	10
2.2.1 Analisis.....	10

2.2.2 Rangka Bodi Bus.....	11
2.2.3 Alumunium.....	13
2.2.4 Beban.....	14
2.2.5 Gaya	15
2.2.6 Defleksi	18
2.2.7 Teori Elastisitas	20
2.2.8 Metode Elemen Hingga.....	23
2.2.9 Autodesk Inventor	29
2.2.10 Faktor Keamanan (<i>Safety Factor</i>)	32
BAB III. METODE PENELITIAN	35
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan	35
3.1.1 Waktu Pelaksanaan	35
3.1.2 Tempat Pelaksanaan.....	35
3.2 Desain Penelitian.....	35
3.3 Alat dan Bahan	37
3.3.1 Alat yang digunakan.....	37
3.3.2 Bahan Penelitian.....	37
3.4 Parameter Penelitian.....	43
3.5 Teknik Pengumpulan Data	43
3.5.1 Penggambaran	44
3.5.2 <i>Meshing</i>	45
3.5.3 Penentuan Titik Tumpuan dan Pembebanan.....	46
3.5.4 <i>Solfing FEA</i> (Proses Pengujian)	48

3.6 Kalibrasi Instrumen	49
3.7 Teknik Analisis Data	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	51
4.1 Deskripsi Data	51
4.1.1 Dimensi Rangka Bodi Bus Yang Dianalisis	51
4.1.2 Material yang Digunakan	52
4.1.3 Pembebanan Yang Diterima Rangka Bodi Bus	53
4.2 Analisis Data	54
4.2.1 Pra Pengujian.....	55
4.3 Hasil Pengujian dan Pembahasan.....	59
4.3.1 Hasil Pengujian <i>Deformed</i>	59
4.3.2 Hasil Pengujian <i>Von Mises Stress</i>	60
4.3.3 Hasil Pengujian <i>Displacement</i>	61
4.3.4 Hasil Pengujian <i>Safety Factor</i>	63
BAB V PENUTUP.....	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Beban Statik, dan Beban Dinamik	15
Gambar 2.2 Gaya Aksi dan Gaya Reaksi.....	16
Gambar 2.3 Interaksi dua benda yang terhubung dengan karet	18
Gambar 2.4 Deformasi pada balok.....	19
Gambar 2.5 Kurva tegangan-regangan	23
Gambar 2.6 Aproksimasi solusi keseluruhan yang diperoleh dari gabungan solusi-solusi elemen.....	25
Gambar 2.7 Macam-macam <i>meshing</i>	27
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	36
Gambar 3.2 Bentuk rangka bodi bus listrik MD12E	39
Gambar 3.3 Dimensi rangka bodi bus listrik MD12E	39
Gambar 3.4 Bentuk pilar Alumunium.....	40
Gambar 3.5 Bentuk Pilar 40 mm	40
Gambar 3.6 Dimensi pilar 40 mm.....	40
Gambar 3.7 Bentuk pilar 60 mm.....	41
Gambar 3.8 Dimensi pilar 60 mm.....	41
Gambar 3.9 Bentuk pilar 80 mm.....	41
Gambar 3.10 Dimensi pilar 80 mm.....	42
Gambar 3.11 Bentuk pilar 100 mm.....	42
Gambar 3.12 Dimensi pilar 100 mm.....	42
Gambar 3.13 Bentuk pilar 120 mm.....	43
Gambar 3.14 Dimensi pilar 120 mm.....	43

Gambar 3.15 Tampilan Awal 2D <i>Sketch Inventor</i>	45
Gambar 3.16 3D Struktur Rangka Bodi Bus.....	45
Gambar 3.17 <i>Surface</i> Struktur Rangka Bodi Bus	46
Gambar 3.18 Mhelsing 3D Model Pada Inventor	46
Gambar 3.19 Letak Tumpuan	47
Gambar 3.20 Pembebanan	48
Gambar 3.21 Proses Analisis Struktur Rangka Bodi Bus	49
Gambar 4.1 Dimensi Sampel Rangka Bodi Bus	51
Gambar 4.2 Panjang Sampel Rangka Bodi Bus.....	51
Gambar 4.3 Lebar dan tinggi Sampel Rangka Bodi Bus	52
Gambar 4.4 Letak Pembebanan	53
Gambar 4.5 Pemasukan Data Material	54
Gambar 4.6 Tampilan Jendela <i>Constrains</i>	55
Gambar 4.7 Lokasi Tumpuan.....	55
Gambar 4.8 Tampilan Jendela <i>Connector</i>	56
Gambar 4.9 Letak <i>Connector</i>	57
Gambar 4.10 tampilan Jendela <i>Load</i>	57
Gambar 4.11 Lokasi Pembebanan.....	58
Gambar 4.12 <i>Meshing</i> Desain Rangka Bodi Bus Listrik	59
Gambar 4.13 Proses Analisis	59
Gambar 4.14 <i>deformed</i> pandangan <i>isometric</i>	60
Gambar 4.15 <i>Von mises Stress</i> Pandangan Isometric	60
Gambar 4.16 Letak Von Meses Stress Paling Tinggi dan Rendah	61

Gambar 4.17 <i>Displacement</i> Pandangan <i>Isometric</i>	62
Gambar 4.18 <i>Displacemnet</i> Pandangan Depan	62
Gambar 4.19 <i>Safety Factor</i> Pandangan <i>Isometric</i>	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Paduan alumunium, komposisi dan penggunaannya	14
Tabel 2.2 Harga Faktor Keamanan Beberapa Material.....	33
Tabel 3.1 Komposisi Kimia Paduan Alumunium Alloy 6063 T6.....	38
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Paduan Alumunium Alloy 6063 T6.....	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat Tugas Dosen Pembimbing	69
Lampiran 2. Surat Tugas Dosen Penguji.....	70
Lampiran 3. Tampilan 3D dan Dimensi Struktur Bodi Bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa	71
Lampiran 4. Struktur Rangka Bodi yang Dianalisis	72
Lampiran 5. Lokasi Peneitian Kantor Desain PT. Mobil Anak Bangsa	74

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transportasi memiliki peran penting dalam kehidupan manusia, sehingga kebutuhan akan transportasi semakin meningkat terutama jenis transportasi darat seperti sepeda motor, mobil, bus dan truk. Salah satu angkutan umum yang banyak digunakan dan memiliki kapasitas yang cukup besar adalah bus. Total kapasitas lebih dari tujuh orang menjadikan bus sebagai kendaraan yang efektif dalam mobilitas manusia, dan juga mengurangi jumlah kendaraan pribadi yang digunakan di jalan. Bus umumnya menggunakan mesin diesel dimana proses pembakaran berada didalam mesin itu sendiri. Hasil pembakaran yang tidak sempurna di mesin dapat melepaskan gas NO_x, CO, dan HO yang dapat mencemari lingkungan (Nugroho, *et al.*, 2018: 1).

Kendaraan bermotor menggunakan bahan bakar minyak dalam jumlah yang besar, perkembangan volume lalu lintas di perkotaan Indonesia yang mencapai 15% pertahun merupakan sumber pencemaran udara yang terbesar dimana 70% pencemaran udara diperkotaan disebabkan oleh aktivitas kendaraan bermotor. Pencemaran udara tersebut disebabkan oleh emisi gas buang yang buruk (Nugraheni dan Haryadi, 2017: 22), Untuk itu mobil listrik merupakan salah satu solusi untuk mengurangi pencemaran udara yang diakibatkan oleh kendaraan bermotor.

Mobil listrik memiliki beberapa kelebihan yang potensial jika dibandingkan dengan mobil bermesin pembakaran dalam biasa, yang paling utama adalah mobil

listrik tidak menghasilkan emisi kendaraan bermotor, selain itu mobil jenis ini juga mengurangi emisi gas rumah kaca karena tidak membutuhkan bahan bakar fosil sebagai sumber energi. Menurut Muthuvel, *et al.*, (2013: 2453) kemerosotan bahan bakar fosil adalah salah satu dilema paling kritis yang akan dihadapi dunia beberapa dekade mendatang. Jumlah produksi minyak bumi mencapai 40% dari jumlah total bahan bakar fosil. Motor diesel dan motor bensin adalah pengguna produk minyak bumi terbanyak setiap hari ke hari, dari total produk minyak bumi yang dikonsumsi oleh berbagai sektor, 66% dari dikonsumsi untuk transportasi.

Mobil listrik adalah mobil yang digerakkan dengan motor listrik DC, menggunakan energy listrik yang disimpan dalam baterai atau tempat penyimpanan energi. Mobil listrik memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan mobil berbahan bakar BBM secara umum. Hal yang paling utama adalah mobil listrik tidak menghasilkan polusi udara, selain itu mobil listrik juga mengurangi efek rumah kaca karena tidak membutuhkan bahan bakar fosil sebagai penggerak utamanya (Mulyadi, *et al.*, 2019: 7). Salah satu komponen mobil yaitu bodi kendaraan dimana perkembangan bodi kendaraan dari masa ke masa mengalami perkembangan yang sangat signifikan.

Bahan yang digunakan untuk membuat rangka bodi mobil dulu sekitar tahun 1800 masehi menggunakan kayu kemudian berganti dengan besi baja yang memiliki kekuatan lebih baik, tetapi memiliki kelemahan bobot yang berat, kemudian bergeser menggunakan bahan aluminium maupun komposit yang memiliki bobot yang lebih ringan. Terobosan-terobosan ini terus dilakukan untuk

mencapai hasil yang maksimal. Dalam hal ini dibutuhkan desain dan analisis dari kerangka yang dibuat untuk mengetahui seberapa kokoh desain yang telah dibuat.

Mendesain rangka utama kendaraan tersebut dirancang sedemikian rupa agar dapat menahan berbagai pembebanan yang terjadi ketika kendaraan dioperasikan, hal ini sangatlah penting agar umur/masa pakai kendaraan dapat tahan lama. Oleh karena itu diperlukan untuk menganalisis struktur utama dengan Metode Elemen Hingga. Metode Elemen Hingga pertama kali diperkenalkan pada tahun 1950. Perkembangan Metode Elemen Hingga didukung secara langsung dengan perkembangan teknologi terutama teknologi komputer yang perkembangannya sangat cepat. Peningkatan kemampuan komputer berpengaruh besar untuk melakukan analisis persoalan teknik yang kompleks.

Metode Elemen Hingga dalam penelitian ini digunakan untuk menentukan defleksi dan tegangan yang dapat ditahan oleh rangka bodi bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa dan kekuatan dari bahan yang digunakan untuk membuat struktur rangka bodi bus, sehingga akan didapatkan struktur rangka yang kuat dan dapat menahan beban yang diterima rangka bodi bus. Material yang digunakan untuk membuat struktur rangka bodi bus adalah alumunium 6063 T6.

Bahan alumunium ini memiliki kekuatan yang hampir sama dengan besi, namun memiliki berat yang lebih ringan dibanding dengan besi. Pada *prototype* ke 1 dan *prototype* ke 2 bahan yang digunakan untuk membuat struktur rangka bodi bus menggunakan besi, dimana besi memiliki bobot yang lebih berat dibanding dengan alumunium. Sehingga pada *prototype* ke 1 dan *prototype* ke 2 tidak lulus uji layak jalan dari pemerintah Republik Indonesia karena memiliki berat melebihi

dari *standart* yang ada. Sehingga pada MD12E ini diputuskan untuk menggunakan bahan aluminium untuk mengurangi kelebihan berat yang terjadi pada *prototype* ke 1 dan *prototype* ke 2.

Penelitian ini menitik beratkan pada kekuatan dari struktur rangka bodi bus bagian depan sampai bagian pintu penumpang yang terbuat dari aluminium 6063 T6. Perhitungan dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Metode Elemen Hingga untuk memperoleh nilai *defleksi* dan tegangan pada bagian pintu depan sampai dengan pintu bagian belakang bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa, sehingga dapat diketahui kekuatan rangka bodi bus dalam menahan komponen bodi bus.

Berdasarkan uraian diatas, maka akan dilakukan penelitian tentang analisis kekuatan tekan terhadap struktur rangka bodi bus listrik PT. Mobil Anak Bangsa. Analisis kekuatan rangka bodi bus diambil sampel yaitu pada bagian rangka bodi bagian depan sampai bagian pintu penumpang bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa menggunakan Metode Elemen Hingga.

1.2 Identifikasi Masalah

Dari latar belakang masalah dapat diidentifikasi permasalahan yang terjadi adalah pembuatan struktur rangka bodi bus PT. Mobil Anak Bangsa pada *prototype* ke 1 dan *prototype* ke 2 menggunakan bahan besi dan menimbulkan berat yang melebihi dari regulasi pemerintah republik Indonesia. Sehingga pembuatan struktur rangka bodi bus PT. Mobil Anak Bangsa pada MD12E diputuskan menggunakan bahan yang lebih ringan yaitu aluminium. Sehingga perlu dilakukan proses analisis terlebih dahulu, untuk mengetahui kekuatan dari struktur rangka bodi bus

yang dibuat. Dari masalah ini peneliti akan menganalisis struktur rangka bodi bus yang diambil sampel pada bagian rangka bodi bagian depan sampai bagian pintu penumpang bus, untuk memperoleh nilai *defleksi*, tegangan dan kekuatan dari rangka bodi bus yang dibuat.

1.3 Pembatasan Masalah

Untuk menentukan arah penelitian yang baik, ditentukan batasan masalah sebari berikut:

1. Bagian yang dianalisis yaitu hanya bagian rangka bodi bus bagian depan sampai bagian pintu penumpang tidak termasuk rangka bodi secara utuh dan *chassis*.
2. Beban yang digunakan untuk perhitungan adalah beban puncak yang bekerja pada masing-masing struktur rangka bodi bus bagian depan sampai bagian pintu penumpang.
3. Bahan yang digunakan dalam pembuatan rangka bodi bus listrik adalah aluminium 6063 T6.
4. Perhitungan dan analisis dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Metode Elemen Hingga melalui *Software* Autodesk Inventor Professional 2019.

1.4 Rumusan Masalah

Dari uraian di atas maka perumusan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Berapakah angka tingkat keamanan struktur rangka bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa?

2. Bagaimanakah karakteristik struktur rangka bodi bus terhadap nilai *von mises stress*, *displacement* dan *deformed* pada bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa?

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui tingkat angka keamanan struktur rangka bodi bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa dalam menahan beban dari komponen-komponen yang ada pada struktur rangka bodi bus.
2. Menyelidiki pengaruh beban statis yang diberikan pada struktur rangka bodi bus terhadap nilai *von mises stress*, *displacement* dan *deformed* pada bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat teoritis
 - a. Untuk menambah ilmu pengetahuan dan melatih kemampuan penulis dalam melakukan penelitian secara ilmiah dan menuliskan hasil penelitian dalam bentuk skripsi.
 - b. Penelitian ini secara khusus bermanfaat bagi penulis yaitu dalam rangka menganalisis dan menjawab keingintahuan penulis terhadap perumusan masalah yang muncul pada rangka bodi bus listrik PT. Mobil Anak Bangsa. Serta mengembangkan ilmu pengetahuan terutama berkenaan dengan analisis dengan Metode Elemen Hingga menggunakan *software Autodesk Inventor Profesional 2019*.

2. Manfaat praktis

- a. Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk bahan acuan dalam pembuatan rangka bodi bus listrik *prototype* 3 PT. Mobil Anak Bangsa dalam produksi masal.
- b. Penelitian ini diharap dapat digunakan sebagai referensi dalam penelitian selanjutnya dan menambah daftar pustaka yang berkaitan dengan tugas akhir tentang analisis dengan Metode Elemen Hingga.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Bus merupakan salah satu kendaraan bermotor yang dapat membawa banyak penumpang. Oleh sebab itu, bus harus didesain agar dapat memberikan rasa aman bagi penumpang dan pengemudinya. Tugas akhir ini membahas tegangan dan *displacement* pada struktur rangka bus. Penulis melakukan analisa dengan menggunakan metode elemen hingga dan dengan *software* bantu *ANSYS / LS - Dyna*. Hasil analisa berupa konsentrasi tegangan dan *displacement* pada bagian sisi samping struktur rangka bus. Besarnya *displacement* pada bagian tersebut tidak melebihi ruang batas selamat (*residual space*). Oleh karena itu, struktur rangka bus ini aman jika terkena beban pendulum atau kecelakaan terguling (Subarkah, dan Prahasto, 2014: 160).

Perancangan sebuah struktur bodi bus, harus dipertimbangkan beban operasional maksimum yang dapat ditopang sebuah bus. Namun dalam praktiknya, kendaraan umum seperti bus tingkat seringkali digunakan untuk kegiatan-kegiatan kota yang mana pembebanan yang dialami bodi bus jauh lebih besar dari kapasitas operasional maksimumnya. Fenomena tersebut dinamakan beban penuh dalam penelitian ini. Dalam penelitian ini dibahas mengenai optimasi rangka bus dengan permodelan CAD secara 3 dimensi, yang disimulasikan dengan pembebanan statis sehingga diperoleh hasil tegangan, defleksi maksimum beserta lokasinya dan faktor pengaman. Dengan memvariabelkan bentuk profil, batang penyusun rangka dan ketebalan batang,

maka diperoleh bentuk rangka yang optimal untuk pembebanan penuh, yang mana rangka memiliki faktor pengaman tertinggi, yaitu rangka dengan *clamp channel* beam ukuran 50x100x5 dan *clamp tube* berdiameter 1,5 inci dengan tebal 3,5mm (Eddy, *et al.*, 2016: 423).

Proses desain untuk struktur mekanik yang kompleks harus dipertimbangkan dari fase pengembangan konsep hingga desain yang lengkap. Dalam industri otomotif, khususnya struktur bodi bus, pengembangan konsep dapat didukung dengan rancangan khusus dan piranti analisa. Saat struktur chassis baru telah dikembangkan, struktur bodi harus direncanakan agar sesuai dengan chassis baru tersebut. Penulis mencoba untuk mengembangkan bodi yang sesuai dengan chassis 0 500 RI 16321 60 (DIN 34) dan akan dikaji kelakuan mekaniknya dengan metode elemen hingga. Tujuan akhir dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan karakteristik puntir dari struktur dengan bantuan perangkat lunak metode elemen hingga (NASTRAN) dan pengujian model skala sebagai verifikasi hasil analisa. Dalam tesis ini telah dilakukan simulasi dengan bantuan perangkat lunak guna mengetahui respon struktur terhadap pembebanan statis. Kekakuan puntir konsep baru ini diperkirakan relatif sama dengan kekakuan puntir konsep konvensional dengan massa struktur yang lebih ringan. Fenomena puntiran yang terjadi pada hasil analisa metode elemen hingga dapat diverifikasi secara kualitatif dengan pengujian model skala (Brata, 2004).

Kompetisi di dunia industri yang ketat memaksa untuk ditingkatkannya efisiensi pada seluruh lini proses produksi. Area engineering merupakan salah

satu lini yang relevan ditingkatkan efisiensinya, dengan memanfaatkan CAD dan CAE untuk perancangan produk baru dipercaya sebagai cara yang tepat. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang struktur rangka bus yang efisien dan lebih berkualitas. Pemodelan 3D struktur rangka bus ini, dilakukan dengan menggunakan software komersial CAD dan untuk mensimulasikan beban pada struktur rangka bus ini menggunakan software CAE. Keuntungan menggunakan software CAD dan CAE, pada tahap perancangan karena dapat menghasilkan rancangan yang lebih cepat, akurat, dan dapat mencegah terjadinya kesalahan pada tahap manufaktur. Simulasi pembebanan yang terjadi pada struktur, diantaranya diakibatkan oleh struktur, komponen interior dinding interior, peralatan interior, kursi, penumpang, dan bagasi dilakukan dengan software komersial CAE. Hasil perancangan struktur ini, terdiri dari 450 komponen, dan sambungan las. Simulasi pembebanan pada struktur rangka bus ini, memberikan hasil maksimum perpindahan (*displacemet*) yang terjadi adalah 0,04551 mm (Saputra, 2012: 40).

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Analisis

Pengertian analisis menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia adalah penyelidikan terhadap suatu peristiwa (karangan, perbuatan, dan sebagainya) untuk mengetahui keadaan yang sebenarnya (sebab-musabab, duduk perkaranya, dan sebagainya)

Analisis adalah aktivitas yang memuat sejumlah kegiatan seperti mengurai, membedakan, memilih sesuatu untuk digolongkan dan

dikelompokkan kembali menurut kriteria tertentu kemudian dicari kaitannya dan ditafsirkan maknanya. Dalam pengertian lain analisis adalah sikap atau perhatian terhadap sesuatu (benda, fakta, fenomena) sampai mampu menguraikan menjadi bagian-bagian, serta mengenal kaitan antar bagian tersebut secara keseluruhan. Analisa adalah tahap awal dalam pengembangan sistem tahap fundamental yang sangat menentukan kualitas sistem informasi yang dikembangkan, sedangkan menurut Komarudin analisis merupakan suatu kegiatan berfikir untuk menguraikan suatu keseluruhan menjadi komponen sehingga dapat mengenal tanda-tanda komponen, hubungan satu sama lain dan fungsi masing-masing dalam satu keseluruhan yang terpadu. Dari beberapa pendapat para ahli tersebut maka bisa disimpulkan bahwa analisis merupakan suatu kegiatan dalam rangka mempelajari suatu bentuk benda, kegiatan fakta maupun fenomena dalam mempelajari hubungan antar bagian yang saling terkait dari berbagai fungsi yang menjadi satu (Nugroho, 2016: 47).

2.2.2 Rangka Bodi Bus

1. Rangka

Rangka merupakan tempat menempelnya semua komponen kendaraan termasuk bodi. Rangka harus kuat, ringan, kukuh, dan tahan terhadap getaran, atau guncangan yang diterima dari kondisi jalan. Agar kuat maka konstruksi rangka ada yang berbentuk kotak, bentuk U atau pipa, yang pada umumnya terdiri dari dua batang yang memanjang dan dihubungkan dengan bagian yang melintang. Pada awal perkembangan teknologi bodi dan rangka kendaraan,

bodi dan rangka dibuat secara terpisah (*composite body*) namun saat ini bodi dan rangka dibuat menyatu (*monocoque body*, atau disebut juga *integral body*).

a. Konstruksi Terpisah (*Composite Body*)

Merupakan jenis konstruksi bodi kendaraan dan rangkanya terpisah. Pertautan / penyambungan antara bodi dan rangka menggunakan baut dan mur. Untuk meningkatkan kenyamanan saat digunakan, maka di antarabodi dan rangka dipasang karet sebagai alat peredam getaran. Konstruksi bodi dan rangka yang terpisah ini memberikan kemudahan dalam penggantian bagian bodi yang mengalami kerusakan, terutama bodi bagian bawah atau putusnya rangka. Konstruksi ini biasanya digunakan pada kendaraan sedan tipe lama, kendaraan penumpang dan mobil angkutan barang. (misal *truck*, bus, *pick up*, dan lain sebagainya).

b. Konstruksi Menyatu (*Monocoque Body*)

Merupakan jenis konstruksi bodi kendaraan di mana bodi dan rangka tersusun menjadi satu kesatuan. Konstruksi ini menggunakan prinsip kulit telur, yaitu merupakan merupakan satu kesatuan yang utuh sehingga semua beban terbagi merata pada semua bagian kulit. Pertautan antara bodi dan rangka menggunakan las. Karena bodi dan rangka menyatu, maka bentuknya dapat menjadi lebih rendah dibanding dengan tipe *composite body* sehingga titik berat gravitasi lebih rendah menyebabkan kendaraan akan lebih stabil. Konstruksi ini digunakan pada sedan, bahkan beberapa kendaraan MPV (*Multi Purpose Vehicle*) mulai menerapkan konstruksi *monocoque body* (Herminarto & Gunadi, 2004: 17).

2. Bodi

Komponen bodi kendaraan adalah komponen yang berfungsi melindungi dan mengamankan penumpang dari gangguan luar dan melindungi penumpang dari beban impak yang terjadi akibat kecelakaan atau tabrakan. Disamping itu bagian alam bodi berfungsi juga untuk memberikan kenyamanan penumpang dan pengaman pada saat tabrakan. Bodi kendaraan kedepannya dikembangkan menuju bodi cerdas (*intelligent body*) yaitu bodi yang secara cerdas dapat berubah bentuk luarnya untuk mengendalikan beban angin dan perubahan bentuk interiornya untuk menjamin kenyamanan.

Struktur bodi bus berkaitan dengan keselamatan, tingkat keselamatan dipengaruhi oleh kekuatan bodi bus yang tinggi. Kekuatan berasal dari kerangka yang kuat dan komponen yang kuat. Kekuatannya adalah terkait dengan material. Semakin banyak material yang digunakan, kekuatan bodi bus akan lebih kuat. (Butdee, & Vignat, 2008: 459).

2.2.3 Aluminium

Aluminium merupakan logam ringan yang memiliki kekuatan yang melebihi *mild steel* (baja lunak). Aluminium memiliki *ductility* yang bagus pada kondisi dingin dan memiliki daya tahan korosi yang tinggi. Logam ini dipakai secara luas dalam bidang transportasi, kimia, listrik, bangunan dan alat-alat penyimpanan.

Aluminium didapat dari tanah liat jenis bauksit yang dipisahkan lebih dahulu dari unsur – unsur yang lain dengan menggunakan larutan tawas murni sampai menghasilkan oksid aluminium (Al_2O_3). Melalui proses elektrolitik

oksid aluminium (Al_2O_3) dipisahkan dari unsur – unsur zat asam untuk dijadikan cairan aluminium murni sampai mempunyai kandungan aluminium sebesar 99,9% (Junus, 2011: 23).

Beberapa paduan aluminium, komposisi, dan penggunaannya ditunjukkan pada tabel 2.1 di bawah ini:

Tabel 2.1 Paduan aluminium, komposisi dan penggunaannya.

No	Kode Produk	Komposisi (%)	Sifat dan Penggunaannya
1	1200	99,0 Al	Secara komersial adalah murni, digunakan untuk sendok dan komponen yang dibuat dengan jalan ditarik, dan peralatan penukar kalor.
2	2024	93 Al, 4,3 Cu, 1,5Mg, 0,6 Mn	Paduan dengan kekuatan yang tinggi, cocok untuk konstruksi pesawat terbang, ketahanan korosinya rendah.
3	3003	98 Al, 1,3 Mn, 0,6 Si	Untuk konstruksi bangunan dan keperluan outdoor.
4	5083	94 Al, 4,5 Mg, 0,7 Mn, 0,2 Cr	Ketahanan korosinya dan kekuatan mekaniknya sangat bagus, dan banyak digunakan di lingkungan air laut.
5	5251	97 Al, 2 Mg, 0,3 Mn	Kekuatan tinggi, ketahanan korosinya sangat baik, dapat dilas, banyak digunakan untuk boat kecil, kapal penangkap ikan, dll.
6	6063	99 Al, 0,6 Mg, 0,4 Si	Kekuatan medium , dan banyak digunakan pada bidang arsitektur.
7	7075	90 Al, 5,6 Zn, 2,5 Mg, 1,6 Cu	Kekerasan dan kekuatannya sangat tinggi, banyak digunakan pada konstruksi pesawat terbang, ketahanan korosinya jelek.

2.2.4 Beban

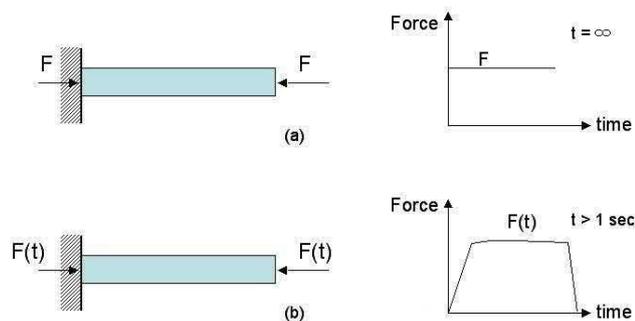
Selama ini telah dipelajari perilaku struktur yang mendapat beban statis, artinya beban- beban tersebut tetap, baik intensitasnya, tempatnya,

arah garis kerjanya. Sedangkan dalam dinamika struktur akan dipelajari perilaku struktur jika struktur tersebut mendapat beban dinamis, yaitu beban yang berubah-ubah menurut fungsi waktu (*time varying*).

Perbedaan antara Beban Dinamik dan Beban Statik:

- a. Beban Statik Adalah beban tetap, baik besarnya (*intensitasnya*), titik bekerjanya dan arah garis kerjanya.
- b. Beban Dinamik:
 - 1) Beban yang besarnya (*intensitasnya*) berubah-ubah menurut waktu, sehingga dapat dikatakan besarnya beban merupakan fungsi waktu.
 - 2) Beban dinamis lebih kompleks dibandingkan dengan beban statis, baik dari bentuk fungsi bebannya maupun akibat yang ditimbulkan.

Perbedaan antara beban dinamik dengan beban statik dapat dilihat pada gambar berikut ini:

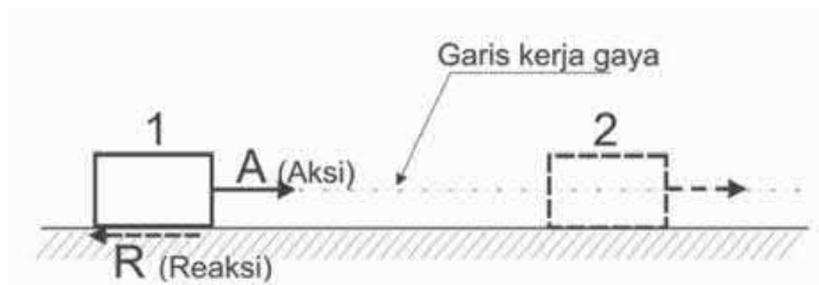


Gambar 2.1 (a) Contoh Beban Statik, (b) Contoh Beban Dinamik (Pribadi, & Hidayat, 2016: 45).

2.2.5 Gaya

Gaya merupakan kekuatan yang dapat membuat benda yang dalam keadaan diam menjadi bergerak. Gaya biasanya dilambangkan

sebagai besaran yang mempunyai arah dan digambarkan seperti vektor. Gaya bekerja sepanjang bidang/jejak yang dilaluinya dan disebut dengan garis kerja gaya. Titik tangkap dari sebuah gaya dapat dipindahkan sepanjang garis kerja gaya. Apabila pada sebuah benda dikerjakan sebuah gaya baik diangkat, ditarik atau didorong maka akan ada perlawanan terhadap gaya tersebut dan gaya perlawanan tersebut disebut dengan Reaksi. Besarnya reaksi sama dengan besarnya gaya yang dikerjakan (aksi).



Gambar 2.2 Gaya Aksi dan Gaya Reaksi (Wesli, 2012: 3).

Hukum-hukum Newton secara sederhana dinyatakan sebagai berikut:

Hukum pertama : Sebuah benda tetap pada keadaan awalnya yang diam atau bergerak dengan kecepatan sama kecuali jika dipengaruhi gaya eksternal resultan.

$$\mathbf{F}_{\text{resultan}} = \sum \mathbf{F} \dots \dots \dots (2.1)$$

Hukum kedua : Percepatan sebuah benda berbanding terbalik dengan massanya dan sebanding dengan gaya eksternal resultan yang bekerja padanya.

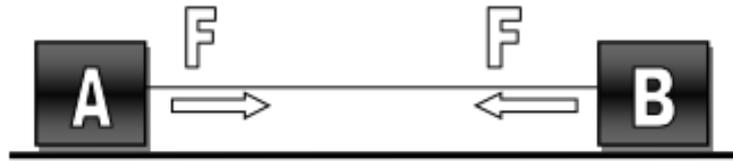
$$\mathbf{F}_{\text{resultan}} = m\mathbf{a} \dots \dots \dots (2.2)$$

Hukum ketiga: Gaya-gaya selalu terjadi berpasangan. Setiap ada aksi selalu ada reaksi yang besarnya sama dan arahnya berlawanan.

Gerak benda disekitar lingkungan kita sangat rumit oleh adanya gaya gravitasi dan gaya gesek. Jika ditinjau sebuah benda yang terisolasi dengan kecepatan konstan dalam sebuah ruangan. Benda terisolasi berarti benda tersebut jauh dengan benda lainnya, sehingga tidak ada interaksi satu dengan lainnya. Hal tersebut menyebabkan tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut. Untuk menjelaskan gerak suatu benda, dibuat suatu sistem koordinat dimana benda bergerak dengan kecepatan konstan, sistem koordinat demikian disebut sebagai sistem inersial. Esensi dari hukum pertama Newton adalah penegasan keberadaan sistem inersial.

Hukum kedua Newton menguraikan berbagai hal antara lain: Apa yang terjadi jika terjadi interaksi antar benda? Bagaimana menggambarkan interaksinya? Dan lebih lanjut apakah inersial itu dan bagaimana mengukur sifat dari benda tersebut? Seperti diketahui, *inersial* adalah sifat dari benda yang melawan terjadinya percepatan atau perubahan gerak ketika benda berinteraksi dengan benda lainnya. Ukuran dari besarnya inersial disebut dengan *massa*.

Misalkan dua buah benda yang dihubungkan dengan karet yang elastic seperti gambar 1.1. kedua benda tersebut disimpangkan sehingga ada interaksi yang menghasilkan percepatan pada kedua benda dengan arah berlawanan.



Gambar 2.3 Interaksi dua benda yang terhubung dengan karet.

Adanya interaksi ini menghasilkan perkalian antara massa dengan percepatan selalu konstan dan menyatakan perubahan gerak. Perkalian ini disebut sebagai *gaya* dan merepresentasikan interaksi. Maka gaya F_A yang bekerja pada A akibat interaksi dengan B adalah

$$F_a = m_a a_a \dots \dots \dots (2.3)$$

Secara umum dengan notasi vektor dapat dinyatakan

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} \dots \dots \dots (2.4)$$

F = Gaya (N)

m = Massa (kg)

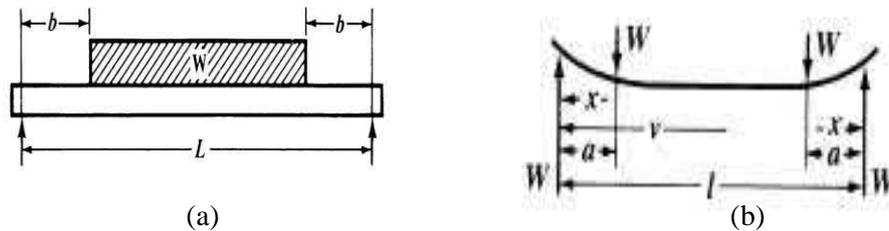
a = Percepatan gravitasi (m/s)

Persamaan ini merupakan definisi *gaya* dengan *massa* konstan dan dalam system inersial dan perlu dicatat bahwa tidak ada percepatan tanpa ada interaksi (Jufriadi, & Ayu, 2015: 5)

2.2.6 Defleksi

Defleksi/lendutan adalah perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertical yang diberikan pada batang material. Deformasi pada balok dapat dijelaskan berdasarkan defleksi sesuai dengan bahan material, dari posisinya sebelum mengalami pembebanan. Defleksi diukur dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah terjadi deformasi.

Konfigurasi yang diasumsikan dengan deformasi permukaan netral dikenal sebagai kurva elastis dari balok.



Gambar 2.4 (a)Balok sebelum terjadi deformasi, (b)Balok dalam konfigurasi terdeformasi.

Jarak perpindahan y didefinisikan sebagai defleksi balok. Dalam menerapkan konsep ini kadang kita harus menentukan defleksi pada setiap nilai x disepanjang material. Hubungan ini dapat ditulis dalam bentuk persamaan yang sering disebut persamaan defleksi kurva (kurva elastis) dari material.

Sistem struktur yang diletakkan secara horizontal yang terutama di peruntukkan untuk memikul beban lateral, yaitu beban yang bekerja pada posisi tegak lurus sumbu aksial batang. Beban semacam ini khususnya muncul sebagai beban gravitasi, seperti misalnya pada beban itu sendiri, dan lain-lain. Seperti pada konstruksi balok dapat di kemukakan antara lain, balok lantai gedung, jembatan, dan sebagainya. Sumbu sebuah batang akan terdeteksi dari kedudukannya yang semula bila benda dibawah pengaruh gaya terpakai.

Suatu batang material akan mengalami beban transversal baik itu beban terpusat maupun merata akan mengalami defleksi. Setiap pengujian harus dilakukan ketelitian perhitungan untuk meminimalisir terjadinya kerusakan,

sehingga batang material tidak melentur dan untuk memperkecil atau mencegah defleksi yang berlebihan.

Struktur batang material juga harus menghasilkan defleksi (lendutan) yang berada dalam batas-batas tertentu. Lendutan ini tidak boleh terlalu besar sampai melebihi batas defleksi yang diijinkan (Basori, *et al.*, 2015: 51).

2.2.7 Teori Elastisitas

1. Tegangan

Tegangan merupakan intensitas gaya pada elemen struktur sebagai reaksi terjadinya deformasi yang timbul akibat bekerjanya beban luar, pada umumnya intensitas gaya ini berarah miring pada bidang potongan. Tegangan yang bekerja pada penampang bahan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dimana: σ = Tegangan atau gaya per satuan luas (N/m^2)

P = Beban (N)

A = Luas penampang (m^2)

Dalam menentukan bahan untuk perancangan suatu struktur atau komponen, maka hal yang paling utama yang harus ditentukan adalah tegangan yang mampu diberikan pada struktur tersebut. Tegangan yang harus ditentukan pada bahan sebelum proses perancangan adalah:

- a. Tegangan Batas didefinisikan sebagai tegangan satuan terbesar suatu bahan yang dapat ditahan tanpa menimbulkan kerusakan.

- b. Tegangan ijin yaitu bagian kekuatan batas yang bisa aman digunakan pada perancangan. Para perancang struktur (komponen) umumnya bekerja dengan suatu tegangan ijin yang ditetapkan sebelumnya.

Secara umum tegangan dapat dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:

- a. Tegangan normal

Tegangan normal adalah tegangan yang bekerja normal (tegak lurus) terhadap permukaan yang mengalami tegangan. Tegangan ini dapat berupa tegangan tarik maupun tekan.

- b. Tegangan geser

Tegangan geser adalah tegangan yang bekerja sejajar terhadap permukaan yang mengalami tegangan.

2. Regangan

Regangan digunakan untuk mempelajari deformasi yang terjadi pada benda. Untuk memperoleh regangan, maka dilakukan dengan membagi perpanjangan (δ) dengan panjang (L) yang telah diukur, dengan demikian diperoleh:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana: ϵ = regangan

δ = perubahan bentuk aksial total (mm)

L = panjang batang (mm)

3. Hukum Hooke's

Menurut Sastranegara, (2009) hampir semua logam, pada tahap sangat awal dari uji tarik, hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding

lurus dengan perubahan panjang bahan tersebut, ini disebut daerah linier atau *linear zone*. Di daerah ini, kurva penambahan panjang vs beban mengikuti aturan Hooke sebagai berikut: “*rasio tegangan (stress) dan regangan (strain) adalah konstan*”

Stress adalah beban dibagi luas penampang bahan dan *strain* adalah penambahan panjang dibagi panjang awal bahan.

$$\text{Stress: } \sigma = F/A \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana: F: gaya tarikan (N)

A: luas penampang (m^2)

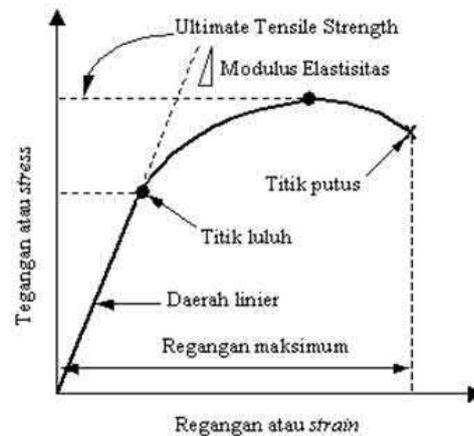
$$\text{Strain: } \varepsilon = \Delta L/L \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana: ΔL : penambahan Panjang (mm)

L: panjang awal (mm)

$$\text{Hubungan antara stress dan strain dirumuskan: } E = \sigma / \varepsilon \dots\dots\dots (2.9)$$

Hubungan antara gaya tarikan dan penambahan panjang menjadi hubungan antara tegangan dan regangan (*stress vs strain*). Gbr 2.5 merupakan kurva standar ketika melakukan eksperimen uji tarik. *E* adalah gradien kurva dalam daerah linier, di mana perbandingan tegangan (σ) dan regangan (ε) selalu tetap. *E* diberi nama "*Modulus Elastisitas*" atau "*Young Modulus*". Kurva yang menyatakan hubungan antara *strain* dan *stress* seperti ini kerap disingkat kurva SS (*SS curve*).



Gambar 2.5 Kurva tegangan-regangan (Sastranegara, 2009)

2.2.8 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik seperti metode beda hingga tetapi lebih umum dan potensial dalam penerapannya untuk masalah-masalah dunia nyata (Silva, *et al.*, 2014: 139). Langkah dasar analisis elemen hingga ada tiga langkah dasar yang terlibat dalam prosedur ini, (1) *PreProcessor* (membangun model atau pemodelan); (2) *Solution* (menerapkan beban dan menyelesaikan); (3) *Post Processor* (meninjau hasil) (Chaphalkar, *et al.*, 2015: 179).

2.2.8.1 Istilah Matriks

Di dalam mencari hubungan antara variable-variabel baik dalam ilmu terapan atau ilmu lainnya sering harus dipecahkan suatu persoalan yang terdiri lebih dari dua persamaan. Dengan menggunakan matriks persoalan tersebut dapat lebih mudah dalam analisis-analisisnya yang mencakup hubungan antar variable- variabel. Matriks adalah sebuah susunan bilangan yang disebut “elemen” yang disusun menurut baris dan kolomnya berbentuk persegi panjang. Symbol yang sering digunakan dalam penulisan metriks misalnya

“ A_{mn} artinya sebuah matriks “A” dengan jumlah baris “m” dan jumlah kolom “n”, sering dibaca matriks “A” “m dikali n”. Bilangan-bilangan dalam susunan tersebut disebut elemen dari matriks. Entri di baris “i” dan kolom “j” dinotasikan dengan a_{ij} .

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \ddots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.10)$$

Square Matrix adalah jika nilai m dan n adalah sama, matriks yang terdiri dari baris dan kolom di notasikan dengan tanda kurung siku ([]) sedangkan matriks yang terdiri hanya kolom dinotasikan tanda kurung kurawal ({}).

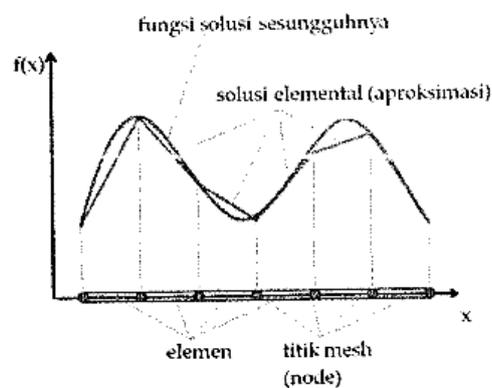
$$a = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 3 & -2 \end{bmatrix} \quad a = [2 \quad 3 \quad 4] \quad a = \begin{Bmatrix} 2 \\ 3 \\ 4 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.11)$$

Metode Elemen Hingga adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) maupun persamaan diferensial biasa (*Partial Differential Equation*). Karena persamaan diferensial seringkali digunakan sebagai model permasalahan engineering maka penting bagi para insinyur untuk dapat memahami dan mampu menerapkan MEH. Saat ini MEH merupakan salah satu metode numerik paling *versatile* untuk memecahkan problem dalam domain *kontinuum*.

Pada awalnya MEH dikembangkan untuk memecahkan problem dibidang mekanika benda padat (*Solid Mechanics*), tetapi kini MEH sudah

merambah ke hampir semua problem engineering seperti mekanika fluida (*fluid mechanics*), perpindahan panas (*heat transfer*), elektromagnetik (*electromagnetism*), getaran (*vibration*), analisis modal (*modal analysis*), dan banyak lagi problem *engineering* lainnya.

Proses inti MEH adalah membagi problem yang kompleks menjadi bagian-bagian kecil atau elemen-elemen dari mana solusi yang lebih sederhana dapat dengan mudah diperoleh. Solusi dari setiap elemen jika digabungkan akan menjadi solusi problem secara keseluruhan. Gambar 1.1 menjelaskan cara kerja MEH di mana solusi suatu problem yang kompleks diaproksimalkan oleh solusi elemen. Untuk mendapatkan solusi elemental, MEH menggunakan fungsi interpolasi untuk mengaproksimalkan solusi elemen. Untuk contoh ini suatu fungsi linear yang sederhana dipergunakan sebagai fungsi interpolasi. Setelah solusi setiap elemen diperoleh, dengan menggabungkan solusi-solusi elemen maka solusi keseluruhan problem dapat diperoleh. Dengan menggunakan fungsi polinomial seperti fungsi kuadratik sebagai fungsi interpolasi, solusi yang lebih akurat bisa diperoleh.



Gambar 2.6 Aproksimasi solusi keseluruhan diperoleh dari gabungan solusi-solusi elemen (Isworo, & Ansyah, 2018: 4).

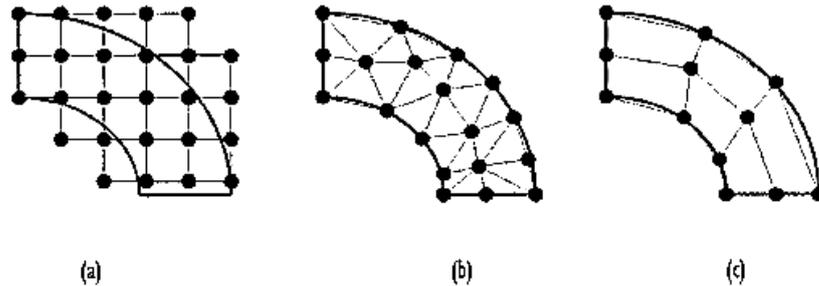
2.2.8.2 Langkah-Langkah Penerapan Metode Elemen Hingga

Prinsip MEH adalah membagi domain permasalahan, baik itu domain ruang (*spatial domain*) atau domain waktu (*time domain*), menjadi sub domain atau elemen yang lebih kecil. Dengan menghitung solusi pada elemen-elemen dan selanjutnya menggabungkan keseluruhan solusi elemental, solusi total dari permasalahan diperoleh. Dalam menghitung solusi per elemen tentunya solusi elemen harus memenuhi beberapa ketentuan, seperti kontinuitas pada titik-titik nodal dan antarmuka (*interface*) elemen.

Disamping Metode Elemen Hingga, metode numerik lain yang umum digunakan adalah Metode Perbedaan Hingga (MPH). Perbedaan utama dari kedua metode ini terletak pada solusi yang diperoleh dan juga bentuk (*geometri*) dari domain. MPH menghasilkan solusi aproksimasi pada titik-titik nodal (*pointwise solution*). Guna memperoleh solusi yang lebih akurat, jumlah titik nodal diperbanyak. MPH sulit digunakan pada domain dengan bentuk geometri yang kompleks. Hal ini dapat dipahami dari Gambar 2.7 yang berupa sebuah seperempat profil annulus. Mesh MPH digambarkan pada Gambar 2.7a dan mesh MEH pada Gambar 2.7b dan 2.7c jelas terlihat bahwa dengan menggunakan MPH, titik-titik mesh (*nodes*) tidak dengan tepat berada pada batas annulus. Hal ini akan mengurangi akurasi hasil dari MPH.

Secara logika MPH dapat digunakan pada problem dengan domain yang kompleks asalkan kita gunakan ukuran mesh yang kecil sehingga boundary domain dapat diikuti titik-titik mesh secara lebih akurat. Hal ini tidak menjadi masalah jika MEH digunakan karena titik-titik mesh MEH dapat

diletakan pada batas domain (Gambar 2.7b dan 2.7c). Gambar 2.7 menggambarkan dua jenis elemen MEH, yaitu elemen segitiga (*triangular element*) dan segiempat (*quadrilateral element*).



Gambar 2.7 (a) Mesh Metode Perbedaan Hingga, (b) elemen segitiga, (c) elemen segiempat • adalah titik mesh *nodes* (Isworo, & Ansyah, 2018: 4).

Dengan MEH, solusi yang diperoleh adalah fungsi interpolasi setiap elemen. Setelah fungsi interpolasi elemen dihitung, solusi keseluruhan dapat diperoleh. Fungsi-fungsi interpolasi setiap elemen ditentukan oleh nilai pada titik mesh.

Pada prinsipnya penerapan Metode Elemen Hingga terdiri dari langkah-langkah sebagai berikut:

2.2.8.2.1 Diskritisasi Domain

Pada tahap ini kita tentukan jenis elemen yang akan kita gunakan. Untuk problem 2 dimensi, elemen 2 dimensi yang umum digunakan adalah tiga sisi (*triangular*) atau empat sisi (*quadrilateral*). Elemen-elemen ini bisa berupa elemen linear ataupun non-linear. Untuk problem 3 dimensi, elemen 3 dimensi yang umum digunakan adalah elemen *terrahedral* (empat muka) dan *heksahedral* (enam muka). Elemen-elemen yang digunakan mempunyai

ukuran yang berbeda-beda. Ini adalah salah satu keunggulan dari MEH dibanding MPH, dimana elemen-elemen yang berbeda ukuran dapat digunakan. Elemen-elemen berukuran kecil dapat digunakan pada daerah dengan gradiasi nilai yang besar.

2.2.8.2.2 Penentuan Bentuk Fungsi Aproksimasi

Pada tahap ini bentuk dari fungsi interpolasi ditentukan, Fungsi yang umum digunakan adalah fungsi polinomial. Tingkat dari polinomial ini ditentukan oleh jumlah node pada setiap elemen dan syarat kontinuitas yang diperlukan pada batas elemen. Untuk elemen segitiga dengan tiga titik nodal, fungsi interpolasinya adalah fungsi linear atau polinomial tingkat 1. Dengan enam titik nodal, fungsi interpolasi yang digunakan adalah fungsi polinomial tingkat 2 atau fungsi kuadratik.

2.2.8.2.3 Penghitungan Properti Elemen

Fungsi interpolasi yang telah ditentukan pada tahap 2 kemudian disubstitusikan kembali pada persamaan-persamaan diferensial dan diproses guna 15 mendapatkan sistem persamaan linear atau sistem matriks yang merupakan properti dari elemen yang terkait. Ada beberapa cara yang digunakan untuk mendapatkan persamaan linear tersebut, antara lain pendekatan direk, pendekatan variasional, pendekatan residu berbobot (*weighted residue*) dan pendekatan keseimbangan energi.

2.2.8.2.4 Pembentukan Sistem Persamaan Linear

Matriks-matriks elemen yang terbentuk kemudian digabung menjadi matriks global. Ukuran matriks elemen adalah jumlah node perlemen dikalikan jumlah *degree of freedom (dof)* setiap node. Jadi untuk elemen segitiga dengan 3 node dan 1 *dof*, ukuran dari matriks elemennya adalah 3x3. Seandainya setiap node mempunyai 2 *dof* maka ukuran matriks elemennya adalah 6x6.

2.2.8.2.5 Pemecahan Sistem Persamaan Linear

Sistem global yang terbentuk pada tahap 4 dapat berupa sistem persamaan linear atau sistem persamaan non-linear. Jika sistem yang terbentuk berupa sistem persamaan linear teknik-teknik umum untuk memecahkan sistem dapat kita gunakan. Beberapa teknik yang umum digunakan untuk memecahkan sistem persamaan linear telah dibahas oleh penulis.

2.2.8.2.6 Post Process Hasil

Setelah solusi diperoleh dari tahap 5, hasil dapat ditampilkan berupa grafik kountour atau plot. Jika ada parameter lain yang bergantung pada hasil maka parameter ini dihitung setelah hasil diperoleh (Isworo, & Ansyah, 2018:4).

2.2.9 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor merupakan program yang dirancang khusus untuk keperluan bidang teknik seperti desain produk, desain mesin, desain mold, desain konstruksi, atau keperluan teknik lainnya. Program ini merupakan rangkaian program penyempurnaan dari Autodesk Autocad dan Autodesk

Mechanical Desktop. Lebih lanjut, program ini sangat cocok bagi pengguna Autodesk Autocad yang ingin meningkatkan kemampuannya karena memiliki konsep hampir sama dalam menggambar 3D.

Autodesk Inventor adalah program pemodelan solid berbasis fitur parametrik, artinya semua objek dan hubungan antargeometri dapat dimodifikasi kembali meski geometrinya sudah jadi, tanpa perlu mengulang lagi dari awal. Hal ini sangat memudahkan kita ketika sedang dalam proses desain suatu produk atau rancangan. Untuk membuat suatu model 3D yang *solid* ataupun *surface*, kita harus membuat sketch-nya terlebih dahulu atau mengimpor gambar 2D dari *Autodesk Autocad*. Setelah gambar atau model 3D tersebut jadi, kita dapat membuat gambar kerjanya menggunakan fasilitas *drawing*.

Autodesk Inventor juga mampu memberikan simulasi pergerakan dari produk yang kita desain serta mempunyai alat untuk menganalisis kekuatan. Alat ini cukup mudah digunakan dan dapat membantu kita untuk mengurangi kesalahan dalam membuat desain. Dengan demikian, selain biaya yang harus kita keluarkan akan berkurang, *time to market* dari benda yang kita desain pun dapat dipercepat karena kita sudah mensimulasikan terlebih dahulu benda yang kita desain di komputer sebelum masuk ke proses produksi.

Dalam *autodesk inventor* terdapat pilihan *template* yang ingin kita gunakan. Masing–masing *template* mempunyai kegunaan dan fungsi sesuai pekerjaan yang kita inginkan.

Berikut adalah penjelasan pada masing-masing *template*, yaitu:

1. *Sheet Metal.ipt*

Membuat bidang kerja baru untuk part atau komponen berjenis metal seperti benda-benda yang terbuat dari plat besi yang ditekuk-tekuk.

2. *Standard.dwg*

Membuat bidang kerja baru untuk gambar kerja.

3. *Standard.iam*

Membuat bidang kerja baru untuk gambar *assembly* yang terdiri atas beberapa part atau komponen.

4. *Standard.idw*

Membuat bidang kerja baru untuk gambar kerja atau 2D.

5. *Standard.ipn*

Membuat bidang kerja baru untuk animasi urutan perakitan dari gambar *assembly* yang telah dirakit. Kita dapat memanfaatkannya untuk membuat gambar *Explode View*.

6. *Standard.ipt*

Membuat bidang kerja baru untuk part atau komponen secara umum tanpa spesifikasi khusus seperti dalam pembuatan part pada *Sheet Metal*.

7. *Weldment.iam* Membuat bidang kerja baru untuk *assembly* yang memiliki tool untuk Teknik pengelasan (Widhiada, 2017:1).

Program ini digunakan oleh perusahaan desain / manufaktur kecil yang berspesialisasi dalam produksi produk lembaran logam, perpipaan dan perkabelan peralatan elektronik (Kostic, *et al.*, 2012: 184).

2.2.10 Faktor Keamanan (Safety Factor)

Dalam desain konstruksi mesin, besarnya angka keamanan harus lebih besar dari 1 (satu). Faktor keamanan diberikan agar desain konstruksi dan komponen mesin dengan tujuan agar desain tersebut mempunyai ketahanan terhadap beban yang diterima.

Perbandingan tegangan ultimate dengan Tegangan kerja atau tegangan ijin.

$$SF = \frac{\sigma_u}{\sigma} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dalam desain konstruksi mesin, besarnya angka keamanan harus **lebih besar dari 1** (satu). Faktor keamanan diberikan agar desain konstruksi dan komponen mesin dengan tujuan agar desain tersebut mempunyai ketahanan terhadap beban yang diterima.

Pemilihan SF harus didasarkan pada beberapa hal sebagai berikut:

- a. Jenis beban
- b. Jenis material
- c. Proses pembuatan / manufaktur
- d. Jenis tegangan
- e. Jenis kerja yang dilayani
- f. Bentuk komponen

Makin besar kemungkinan adanya kerusakan pada komponen mesin, maka angka keamanan diambil makin besar. Angka keamanan beberapa material dengan berbagai beban dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2.2 Harga Faktor Keamanan Beberapa Material

No.	Material	Steady Load	Live Load	Shock Load
1.	Cast iron	5 – 6	8 – 12	16 – 20
2.	Wrought iron	4	7	10 – 15
3.	Steel	4	8	12 – 16
4.	Soft material & alloys	6	9	15
5.	Leather	9	12	15
6.	Timber	7	10 - 15	20

Faktor keamanan adalah faktor yang digunakan untuk mengevaluasi keamanan dari suatu bagian mesin. Misalnya sebuah mesin diberi efek yang disebut sebagai F , diumpamakan bahwa F adalah suatu istilah yang umum dan bisa saja berupa gaya. Kalau F dinaikkan, sampai suatu besaran tertentu, sedemikian rupa sehingga jika dinaikkan sedikit saja akan mengganggu kemampuan mesin tersebut, untuk melakukan fungsinya secara semestinya. Jika menyatakan batasan ini sebagai batas akhir, harga F sebagai F_u , maka faktor keamanan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$SF = \frac{F_u}{F} \dots\dots\dots(2.13)$$

Bila “ F ” sama dengan “ F_u ” maka $FS = 1$, dan pada saat ini tidak ada keamanan. Akibatnya sering dipakai istilah batas keamanan (margin of safety). Batas keamanan dinyatakan dengan persamaan:

$$M = FS - 1 \dots\dots\dots(2.14)$$

Istilah faktor keamanan, batas keamanan dan F_u banyak digunakan dalam perancangan. Faktor keamanan untuk memperhitungkan ketidaklenturan yang mungkin terjadi atas kekuatan suatu bagian mesin dan ketidak

lenturan yang mungkin terjadi atas beban yang bekerja pada bagian mesin tersebut (Irawan, 2009: 11).

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis struktur rangka bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa dengan menggunakan *Autodesk Inventor Professional 2019* maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Struktur rangka bodi bus berfungsi sebagai tempat meletakkan komponen-komponen bodi seperti kaca, *ducting*, *air conditioner* dan *accessoris* lainnya. Jadi harus memberi keamanan dan kenyamanan saat kendaraan sudah dioperasikan. Keamanan dan kenyamanan tersebut dapat diukur dengan tingginya angka keamanan (*safety factor*) dimana angka keamanan yang diperoleh dari penelitian ini sangat tinggi yaitu 12.9 dimana standar angka keamanan yang ditentukan perusahaan adalah 3.
2. Dari hasil analisis struktur rangka bodi bus listrik MD12E PT. Mobil Anak Bangsa dengan menggunakan *Autodesk inventor Professional 2019*, menggunakan bahan aluminium 6063 T6 dengan keluaran berupa *deformed*, *von mises stress* sebesar 16,67 Mpa, *displacement* 0,7078 mm dan *safety factor* sebesar 12,9 dimana dengan hasil tersebut dikategorikan sangat aman. Meskipun untuk proses analisis struktur rangka bodi bus listrik tidak dapat dianalisis secara keseluruhan dikarenakan keterbatasan pada spesifikasi komputer dan software yang

digunakan, akan tetapi pada pengujian struktur rangka bodi bus mengambil sampel bagian depan sampai bagian pintu penumpang. Hasil pengujian struktur rangka bodi bus listrik yang diambil sampel dengan menggunakan beban penuh (beban yang diterima bodi utuh) dikategorikan sangat aman.

5.2 Saran

Untuk lebih mengembangkan penelitian ini maka penulis memberikan saran bagi peneliti yang akan menilite hal serupa dengan penelitian ini maka gunakan struktur rangka bodi bus secara keseluruhan dan menggunakan spesifikasi komputer dan *software* yang lebih tinggi dan mendukung proses analisis yang dilakukan.

Angka keamanan yang didapatkan dalam penelitian ini sangat tinggi yaitu 12,9 sehingga saran peneliti yaitu untuk mengurangi konstruksi struktur rangka bodi bus terutama pada bagian bodi yang menopang *air conditioner*. Sehingga dengan pengurangan konstruksi pada bagian tersebut akan mengurangi berat dari struktur rangka bodi dan menjadi lebih ringan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aalco Metals Ltd. 2018. Aluminium Alloy 6063 - T6 Extrusions. *Fdg Creative Ltd.*
- Basori, Syafriyal, Suharwanto. 2015. Analisis Defleksi Batang Lentur Menggunakan Tumpuan Jepit dan Rol pada Material Aluminium 6063 Profil U Dengan Beban Terdistribusi. *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur UNJ*, 4(1), 22-28.
- Brata, K. A. 2004. Perancangan dan Pengembangan Rangka Bus pada Chassis Central Truss Frame dengan Analisa Beban Puntir Statis pada Kondisi Jalan Datar. *Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.*
- Butdee, S., dan F. Vignat. 2008. TRIZ Method For Light Weight Bus Body Structure Design. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 31(2), 456-462.
- Chaphalkar, S. P., S. N. Khetre, dan A. M. Meshram. 2015. Modal Analysis Of Cantilever Beam Structure Using Finite Element Analysis and Experimental Analysis. *American Journal of Engineering Research*, 4(10), 178-185.
- da Silva, E. P., F. M. da Silva, dan R. R. Magalhães. 2014. Application of Finite Elements Method for Structural Analysis in a Coffee Harvester. *Engineering*, 6(03), 138-147.
- Eddy, N., M. I. Nofa, dan A. C. Arya. 2016. Optimalisasi Struktur Rangka Bus Wisata dengan Analisa Metode Elemen Hingga. *In Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains dan Teknologi (SNAST)* (Vol. 1, No. 1).
- Herminarto, & Gunadi. 2004. *Perkembangan Bodi Kendaraan*. Jurusan Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Teknik UNY.
- Irawan, A. P. 2009. *Diktat Elemen Mesin*. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara.
- Iswordo, H. 2018. *Buku Ajar Metode Elemen Hingga Hmkb654*. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lambung Mangkurat.
- Jufriadi, A. dan H, D, Ayu. 2015. *Mekanika*. Universitas Kanjuruhan Malang.
- Junus, S. 2011. Pengaruh Besar Aliran Gas Terhadap Cacat Porositas dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan MIG pada Paduan Aluminium 5083. *ROTOR*, 4(1), 22-31.
- Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI). *Analisis*. <http://kbbi.web.id/analisis> 09 september 2018 (10.30).
- Kostic, Z., D. Radakovic, D. Cvetkovic, S. Trajkovic, dan A. Jevremovic. 2012. Comparative Study of CAD Software, Web 3D Technologies and Existing Solutions to Support Distance-Learning Students of Engineering Profile. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 9(4), 181-187.
- Mulyadi, R., Artika, K. D., & Khalil, M. (2019). Perancangan Sistem Kelistrikan Perangkat Elektronik pada Mobil Listrik. *Elemen: Jurnal Teknik Mesin*, 6(1), 07-12.

- Muthuvel, A., Murthi, M. K., Sachin, N. P., Koshy, V. M., Sakthi, S., dan Selvakumar, E. 2013. Aerodynamic Exterior Body Design of Bus. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(7), 2453-2457.
- Nugraheni, I. K., dan Haryadi, R. 2017. Pengujian Emisi Gas Buang Motor Bensin Empat Tak Satu Silinder Menggunakan Campuran Bahan Bakar Premium dengan Etanol. *Elemen: Jurnal Teknik Mesin*, 4(1), 22-28
- Nugroho, K. 2016. Model Analisis Prediksi Menggunakan Metode Fuzzy Time Series. *INFOKAM*, 12(1), 46-50.
- Nugroho, U., S. Anis, R. Kusumawardani, A. M. Khoiron, S. S. Maulana, M. Irvandi, dan Z. P. Mashdiq. 2018. Frame Analysis of UNNES Electric Bus Chassis Construction Using Finite Element Method. *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 1941, No. 1, p. 020017), 1-4.
- Pribadi, H. P. R., dan I. Hidayat. 2016. Analisis beban statik winglet n-219. *Jurnal Industri Elektro dan Penerbangan*, 6(2), 42-49.
- Saputra, H. 2012. Studi Perancangan Struktur Rangka Bus Menggunakan CAD/CAE. *Jurnal Teknologi*, 5(1), 40-47.
- Sastranegara, A. 2009. Mengenal Uji Tarik dan Sifat-sifat Mekanik Logam. *Situs Informasi Mekanika, Material, dan Manufaktur*, 8.
- Subarkah, B. A., dan T. Prahasto. 2014. Pemodelan Dan Analisa Uji Pendulum Pada Struktur Rangka Bus Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(2):160-166.
- Wesli. 2012. *Mekanika Rekayasa*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Widhiada, I, W. 2017. *Mechanical Engineering Drawing and Design Dengan Menggunakan Software Autodesk Inventorversi 2014 an 2017*. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana