



**OPTIMASI DESAIN *REAR AXLE FRAME* DAN
AXLE MOUNTING BRACKET PADA *CHASSIS*
BUS LISTRIK DENGAN *SOFTWARE* AUTODESK
INVENTOR PROFESSIONAL 2019**

Skripsi

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

Oleh

Burhanudin Yusuf

NIM.5202414047

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

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Burhanudin Yusuf
NIM : 5202414047
Program Studi : Pendidikan Teknik Otomotif
Judul : Optimasi Desain *Rear Axle Frame* dan *Axle Mounting Bracket*
pada *Chassis* Bus Listrik dengan *software* Autodesk Inventor
Professional 2019

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

Semarang, Desember 2019

Pembimbing



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

PENGESAHAN KELULUSAN

Skripsi/TA dengan judul *Optimasi Desain Rear Axle Frame dan Axle Mounting Bracket* pada *Chassis Bus Listrik* dengan *software Autodesk Inventor Professional 2019* telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi/TA Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 18 bulan November tahun 2019.

Oleh:

Nama : Burhanudin Yusuf
NIM : 5202414047
Program Studi : Pendidikan Teknik Otomotif

Panitia:

Ketua

Sekretaris



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

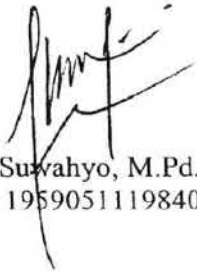


Dr. Ir. Rahmat Doni Widodo, S.T., M.T., IPP.
NIP. 197509272006041002

Penguji 1

Penguji 2

Penguji 3



Drs. Suwahyo, M.Pd.
NIP. 195905111984031002



Samsudin Anis, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197601012003121002



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

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik UNNES



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

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi/TA ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, 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, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, Desember 2019

Yang membuat pernyataan,



Burhanudin Yusuf
NIM. 5202410147

MOTTO

Dimanapun engkau berada selalulah menjadi yang terbaik dan berikan dari yang bisa kau berikan. B. J. Habibie.

Tuhan itu Maha Asik. Terkadang untuk menyelamatkanmu dari orang yang salah, Dia mematahkan hatimu. Sujiwo Tedjo.

Seringkali pilihan Tuhan untuk kita tidak seperti yang kita inginkan. Baru belakangan kita ketahui bahwa pilihan-Nya lah yang terbaik.
K. H. A. Mustofa Bisri.

Hidup itu harus pintar ngegas dan ngerem. Emha Ainun Nadjib.

Gitu aja kok repot. K. H. Abdurrahman Wahid.

RINGKASAN

Burhanudin Yusuf. 2019. Optimasi Desain *Rear Axle Frame* dan *Axle Mounting Bracket* pada *Chassis* Bus Listrik dengan *software* Autodesk Inventor Professional 2019. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. **Wahyudi, S.Pd., M.Eng.**

Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan desain *rear axle frame* dan *axle mounting bracket* pada *chassis* bus listrik yang ringan dan kuat.

Metode penelitian optimasi ini yaitu dengan mengembangkan *existing design* untuk mendapatkan *improvement design* menggunakan *software* Autodesk Inventor Profesional 2019. Kemudian dilakukan pengujian struktur menggunakan *software* Autodesk Nastran In-CAD 2019 dengan asumsi *operation conditions*. Material yang digunakan pada *rear axle frame* adalah STKM16A, sedangkan pada *axle mounting bracket* menggunakan SS400. Parameter yang digunakan yaitu massa, *von mises stress* dan *safety factor*.

Penelitian optimasi ini menghasilkan tiga *improvement design*. Dari data perbandingan antar *improvement design*, didapatkan desain yang optimal yaitu pada *improvement design 3*. Pada *improvement design 3* diperoleh massa *rear axle frame* sebesar 426,73 kg, *air spring bracket* sebesar 14,394 kg dan *shock absorber bracket* sebesar 3,992 kg. Kekuatan struktur pada *improvement design 3* ditinjau dari hasil pengujian pada kondisi *torsion-bending case*. Pada *rear axle frame* diperoleh nilai *von mises stress* sebesar 91,19 MPa sehingga nilai *safety factor* 3,56. Pada komponen *air spring bracket* diperoleh nilai *von mises stress* sebesar 233,4 MPa sehingga nilai *safety factor* 1,05. Pada komponen *shock absorber bracket* diperoleh nilai *von mises stress* sebesar 227,1 MPa sehingga nilai *safety factor* sebesar 1,08.

Kata kunci : *optimasi chassis, kekuatan struktur, massa*

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi/TA yang berjudul **Optimasi Desain Rear Axle Frame dan Axle Mounting Bracket pada Chassis Bus Listrik dengan software Autodesk Inventor Professional 2019**. Skripsi/TA ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Pendidikan pada Program Studi S1 Pendidikan Teknik Otomotif Universitas Negeri Semarang. Shalawat dan salam disampaikan kepada Nabi Muhammad SAW, mudah-mudahan kita semua mendapatkan safaat Nya di yaumul akhir nanti, Aamiin.

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. Fathur Rokhman, M.Hum. Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T., IPM. selaku Dekan Fakultas Teknik UNNES dan Rusiyanto, S.Pd., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin atas fasilitas yang disediakan bagi mahasiswa.
3. Wahyudi, S.Pd., M.Eng. selaku Koordinator Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif sekaligus Dosen Pembimbing yang penuh perhatian dan atas perkenaan memberi bimbingan dan dapat dihubungi sewaktu-waktu

disertai kemudahan menunjukkan sumber-sumber yang relevan dengan penulisan karya ini.

4. Drs. Suwahyo, M.Pd. selaku Penguji 1 dan Samsudin Anis, S.T., M.T., Ph.D. selaku Penguji 2 yang telah memberi masukan yang sangat berharga berupa saran, ralat, perbaikan, pertanyaan, komentar, tanggapan, menambah bobot dan kualitas karya tulis ini.
5. Semua dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UNNES yang telah memberi bekal pengetahuan yang berharga.
6. Pihak PT. Mobil Anak Bangsa yang telah bekerjasama dengan Jurusan Teknik Mesin UNNES sebagai tempat magang sekaligus tempat penelitian skripsi.
7. Keluarga besar mahasiswa Jurusan Teknik Mesin khususnya HIMPRO Teknik Mesin, CRC dan Bengkel Bangkit yang telah memberikan pengalaman diluar ruang kuliah dan selalu memotivasi dalam berbagai bentuk.
8. Berbagai pihak yang telah memberi bantuan untuk karya tulis ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berharap semoga Skripsi/TA ini dapat bermanfaat untuk pelaksanaan pengembangan optimasi desain di industri.

Semarang, Desember 2019



Burhanudin Yusuf

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN KELULUSAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN	iv
MOTTO	v
RINGKASAN.....	vi
PRAKATA	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xx
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	4
1.3 Pembatasan Masalah.....	4
1.4 Rumusan Masalah.....	5
1.5 Tujuan	6
1.6 Manfaat	6
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	
2.1 Kajian Pustaka	6
2.2 Landasan Teori	9
2.2.1 Kendaraan Listrik	9

2.2.2 Chassis	10
2.2.3 Operation Conditions.....	15
2.2.4 Mechanical Properties	17
2.2.5 Finite Element Analysis (FEA).....	22
2.2.6 Safety Factor	26

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan.....	27
3.2 Desain Penelitian	27
3.3 Alat dan Bahan Penelitian	41
3.4 Parameter Penelitian	42
3.5 Teknik Pengumpulan Data.....	43
3.6 Kalibrasi Instrumen.....	44
3.7 Teknik Analisis Data.....	48

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian.....	50
4.2 Pembahasan	77

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	85
5.2 Saran.....	86

DAFTAR PUSTAKA	87
----------------------	----

LAMPIRAN	89
----------------	----

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. <i>Mechanical Properties</i> STKM16A	42
Tabel 3.2. <i>Mechanical Propreties</i> SS400	42
Tabel 3.3. Massa.....	44
Tabel 3.4. Data pengujian <i>bending-torsion</i>	44
Tabel 3.5. Data pengujian <i>lateral loading</i>	44
Tabel 3.6. Data pengujian <i>longitudinal loading</i>	44
Tabel 4.1. Detail kombinasi desain optimasi	50
Tabel 4.2. Massa <i>existing design</i>	51
Tabel 4.3. Data pengujian <i>bending-torsion existing design</i>	53
Tabel 4.4. Data pengujian <i>lateral loading existing design</i>	55
Tabel 4.5. Data pengujian <i>longitudina loading existing design</i>	56
Tabel 4.6. Massa <i>improvement design 1</i>	58
Tabel 4.7. Data pengujian <i>bending-torsion case improvement design 1</i>	59
Tabel 4.8. Data pengujian <i>lateral loading improvement design 1</i>	61
Tabel 4.9. Data pengujian <i>longitudinal loading improvement design 1</i>	63
Tabel 4.10. Massa <i>improvement design 2</i>	65
Tabel 4.11. Data pengujian <i>bending-torsion improvement design 2</i>	67
Tabel 4.12. Data pengujian <i>lateral loading improvement design 2</i>	68
Tabel 4.13. Data pengujian <i>longitudinal loading improvement design 2</i>	70
Tabel 4.14. Massa <i>improvement design 3</i>	72
Tabel 4.15. Data pengujian <i>bending-torsion case improvement design 3</i>	73
Tabel 4.16. Data pengujian <i>lateral loading improvement design 3</i>	75

Tabel 4.17. Data pengujian <i>longitudinal loading improvement design 3</i>	76
Tabel 4.18. Data perbandingan hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	79
Tabel 4.19. Data perbandingan hasil pengujian komponen <i>air spring bracket</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	79
Tabel 4.20. Data perbandingan hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	80
Tabel 4.21. Data perbandingan hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	80
Tabel 4.22. Data perbandingan hasil pengujian komponen <i>air spring bracket</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	81
Tabel 4.23. Data perbandingan hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	81
Tabel 4.24. Data perbandingan hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	82
Tabel 4.25. Data perbandingan hasil pengujian komponen <i>air spring bracket</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	82
Tabel 4.26. Data perbandingan hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	83
Tabel 4.27. Data perbandingan massa	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Skema <i>drive train</i> kendaraan listrik.....	9
Gambar 2.2. Platform dasar <i>chassis</i> tipe <i>ladder frame</i>	11
Gambar 2.3. <i>Chassis</i> tipe <i>cruciform</i>	11
Gambar 2.4. <i>Chassis</i> tipe <i>backbone tube</i>	12
Gambar 2.5. <i>Chassis</i> tipe <i>monocoque</i>	12
Gambar 2.6. Platform <i>chassis</i> bus tipe <i>monocoque</i>	13
Gambar 2.7. <i>Sub-assembly chassis rear axle frame</i>	13
Gambar 2.8. <i>Rear Axle</i>	14
Gambar 2.9. <i>Axle mounting bracket</i>	14
Gambar 2.10. <i>Torsion case</i>	15
Gambar 2.11. <i>Bending loading</i>	16
Gambar 2.12. <i>Lateral loading</i>	16
Gambar 2.13. <i>Longitudinal loading</i>	17
Gambar 2.14. Arah gaya dan deformasi benda	18
Gambar 2.15. Deformasi akibat gaya tarik	19
Gambar 2.16. Grafik <i>stress-strain</i>	20
Gambar 2.17. Titik <i>yield strength</i> pada grafik <i>stress-strain</i>	21
Gambar 2.18. Titik <i>tensile strength</i> dan <i>fracture</i> pada grafik <i>stress-strain</i>	22
Gambar 2.19. Tipe elemen	24
Gambar 2.20. Tegangan pada elemen tiga dimensi.....	25
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian	27
Gambar 3.2. Data <i>iProperties</i> pada Autodesk Inventor Professional 2019.....	28

Gambar 3.3. <i>Torsion-bending case combination</i>	29
Gambar 3.4. <i>Lateral loading</i>	30
Gambar 3.5. <i>Longitudinal loading</i>	31
Gambar 3.6. Diagram alir pemodelan <i>improvement design</i>	34
Gambar 3.7. <i>Improvement design 1</i>	35
Gambar 3.8. <i>Shock absorber bracket A</i>	35
Gambar 3.9. <i>Air spring bracket A</i>	36
Gambar 3.10. <i>Improvement design 2</i>	36
Gambar 3.11. <i>Air spring bracket B</i>	37
Gambar 3.12. <i>Improvement design 3</i>	37
Gambar 3.13. Konversi 3D model <i>solid</i> ke <i>surface</i>	38
Gambar 3.14. Tampilan <i>set up</i> Autodesk Nastran In-CAD	39
Gambar 3.15. Proses perhitungan FEA.....	39
Gambar 3.16. Hasil <i>von mises stress</i>	40
Gambar 3.17. Hasil <i>displacement</i>	40
Gambar 3.18. Menu Autodesk Nastran In-CAD.....	45
Gambar 3.19. <i>Set up</i> untuk perhitungan FEA baru.....	45
Gambar 3.20. <i>Set up</i> tipe elemen dan ketebalan <i>surface</i>	46
Gambar 3.21. <i>Set up</i> material	46
Gambar 3.22. Pembuatan <i>mesh</i> dan hasil <i>meshing</i>	47
Gambar 3.23. <i>Set up constraint</i>	47
Gambar 3.24. <i>Set up</i> pembebanan	48
Gambar 3.25. Tampilan <i>set up</i> Autodesk Nastran In-CAD	48

Gambar 4.1. <i>Existing design rear axle frame</i>	50
Gambar 4.2. <i>Bracket existing design</i>	51
Gambar 4.3. <i>Existing design air spring bracket</i>	51
Gambar 4.4. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (existing design)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	52
Gambar 4.5. Hasil pengujian komponen <i>air spring bracket (existing design)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	52
Gambar 4.6. Hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame (existing design)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	53
Gambar 4.7. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (existing design)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	53
Gambar 4.8. Hasil pengujian komponen <i>air spring bracket (existing design)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	54
Gambar 4.9. Hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame (existing design)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	54
Gambar 4.10. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (existing design)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	55
Gambar 4.11. Hasil pengujian komponen <i>air spring bracket (existing design)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	55
Gambar 4.12. Hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame (existing design)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	56
Gambar 4.13. Struktur <i>improvement design 1 shock absorber bracket dan air spring bracket</i>	56

Gambar 4.14. <i>Shock absorber bracket A</i>	57
Gambar 4.15. <i>Air spring bracket A</i>	57
Gambar 4.16. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design I)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case</i>	58
Gambar 4.17. Hasil pengujian komponen <i>air spring bracket (improvement design I)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	59
Gambar 4.18. Hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame (improvement design I)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	59
Gambar 4.19. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design I)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	60
Gambar 4.20. Hasil pengujian komponen <i>air spring bracket (improvement design I)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	60
Gambar 4.21. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design I)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	61
Gambar 4.22. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design I)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	61
Gambar 4.23. Hasil pengujian <i>air spring bracket (improvement design I)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	62
Gambar 4.24. Hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame (improvement design I)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	62
Gambar 4.25. Perbandingan <i>safety factor existing design</i> dengan <i>improvement design 1</i> pada kondisi <i>bending-torsion case</i>	63

Gambar 4.26. Perbandingan massa <i>existing design</i> dengan <i>improvement design 1</i>	63
Gambar 4.27. Struktur <i>improvement design 2</i>	64
Gambar 4.28. <i>Air spring bracket B</i>	64
Gambar 4.29. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design 2)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	65
Gambar 4.30. Hasil pengujian komponen <i>air spring bracket (improvement design 2)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	66
Gambar 4.31. Hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame (improvement design 2)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	66
Gambar 4.32. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design 2)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	67
Gambar 4.33. Hasil pengujian komponen <i>air spring bracket (improvement design 2)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	67
Gambar 4.34. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design 2)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	68
Gambar 4.35. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design 2)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	68
Gambar 4.36. Hasil pengujian <i>air spring bracket (improvement design 2)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	69
Gambar 4.37. Hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame (improvement design 2)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	69

Gambar 4.38. Perbandingan <i>safety factor improvement design 1</i> dengan <i>improvement design 2</i> pada kondisi <i>bending-torsion case</i>	70
Gambar 4.39. Grafik perbandingan massa <i>improvement design 1</i> dengan <i>improvement design 2</i>	71
Gambar 4.40. Struktur <i>Improvement design 3</i>	71
Gambar 4.41. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design 3)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	72
Gambar 4.42. Hasil pengujian komponen <i>air spring bracket (improvement design 3)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	72
Gambar 4.43. Hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame (improvement design 3)</i> pada kondisi <i>torsion-bending case combination</i>	73
Gambar 4.44. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design 3)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	73
Gambar 4.45. Hasil pengujian komponen <i>air spring bracket (improvement design 3)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	74
Gambar 4.46. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design 3)</i> pada kondisi <i>lateral loading</i>	74
Gambar 4.47. Hasil pengujian komponen <i>shock absorber bracket (improvement design 3)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	75
Gambar 4.48. Hasil pengujian <i>air spring bracket (improvement design 3)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	75
Gambar 4.49. Hasil pengujian <i>sub-assembly rear axle frame (improvement design 3)</i> pada kondisi <i>longitudinal loading</i>	76

Gambar 4.50. Grafik perbandingan *improvement design 2* dengan *improvement design 3* pada kondisi *bending-torsion case* 76

Gambar 4.51. Grafik perbandingan massa *improvement design 2* dengan *improvement design 3* 77

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat Tugas Dosen Pembimbing.....	89
Lampiran 2. Surat Tugas Dosen Penguji	90
Lampiran 3. Surat Izin Penelitian	91
Lampiran 4. <i>Overview chassis electric bus full assembly</i>	92
Lampiran 5. Desain <i>rear axle frame</i> dan <i>axle mounting bracket</i>	94
Lampiran 6. Tempat Penelitian	100
Lampiran 7. Dokumentasi Penelitian.....	100

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi transportasi pada zaman sekarang semakin maju. Berbagai jenis transportasi yang ada sekarang mempermudah aktivitas manusia dari aspek darat, laut hingga udara. Pada transportasi darat, banyak produsen dari berbagai merek yang memproduksi kendaraan, antara lain yaitu sepeda motor, mobil, bus, truk dan lain-lain. Kendaraan tersebut umumnya menggunakan mesin pembakaran dalam. Salah satu karakter dari mesin pembakaran dalam yaitu menghasilkan emisi gas buang. Emisi gas buang tersebut mengandung berbagai gas yang dapat mencemari lingkungan. Menurut Erwin (dalam Sasongko, 2014: 1) menyebutkan bahwa polusi udara dari kendaraan bermotor, pembangkit tenaga listrik, industri dan rumah tangga menyumbang 70% dengan komposisi kuantitas karbonmonoksida (CO) 99%, hidrokarbon (HC) sebanyak 89% dan oksida nitrogen (NO_x) sebanyak 73% serta partikulat lainnya yang meliputi timah hitam, sulfur oksida dan partikel debu.

Berbagai upaya meminimalisir emisi gas buang pada mesin pembakaran dalam telah dilakukan di berbagai belahan dunia. Seperti penerapan batas emisi gas buang dengan standar EURO, sehingga memunculkan berbagai teknologi mesin pembakaran dalam yang ramah lingkungan dan beremisi rendah. Sampai saat ini pengembangan kendaraan ramah lingkungan terus dilakukan. Salah satu pengembangannya yaitu kendaraan listrik. Kendaraan listrik ini tidak menghasilkan emisi gas buang (*zero emission*) karena sumber energinya dari listrik.

Di Indonesia, pengembangan kendaraan listrik dilakukan oleh salah satu perusahaan lokal yaitu PT. MAB (Mobil Anak Bangsa). Kendaraan listrik yang dikembangkan merupakan transportasi massal di daerah ibukota yaitu bus. Bus tersebut didesain seperti bus Transjakarta. Selama proses pengembangan bus listrik, PT. MAB sudah memproduksi dua unit *prototype*. Setelah dibuat *prototype* bus listrik pertama dan kedua, pengembangan terus dilakukan hingga pada pembuatan *prototype* bus listrik ketiga. Salah satu pengembangan yang dilakukan yaitu pada struktur *chassis*. Pada *prototype* pertama, tipe *chassis* yang digunakan adalah *chassis* tipe *space frame*, sedangkan pada *prototype* kedua dan ketiga menggunakan *chassis* tipe *monocoque*. Faktor yang memengaruhi pengembangan *chassis* tersebut adalah penyesuaian tipe bus listrik MAB dengan bus Transjakarta dan penyesuaian dimensi bus terhadap Peraturan Pemerintah No. 55 tahun 2012 tentang kendaraan.

Menurut Eddy (dalam Roby, *et al.* 2014: 66), *chassis* merupakan bagian yang penting karena berfungsi sebagai tempat tumpuan *body* dan beban-beban dari komponen lain pada kendaraan. Hal tersebut menjadikan *chassis* bus listrik ini didesain dapat menopang beban-beban statis dari komponen kendaraan itu sendiri. Oleh karena itu, pengembangan pada desain struktur *chassis* kendaraan telah banyak dilakukan. Di bidang *engineering* terutama di pusat *Research and Development* (RnD), pengembangan desain struktur dikenal dengan nama metode optimasi. Metode optimasi merupakan suatu pekerjaan yang fokus untuk mendapatkan desain yang optimal dengan mengembangkan desain yang ada (*existing design*). Cavazutti, *et al* (2010: 1) menjelaskan bahwa pengembangan struktur dengan metode optimasi bertujuan untuk mengurangi massa tapi tetap

memenuhi standar keamanan. Hasil optimasi ini akan mendapatkan desain pengembangan (*improvement design*), yaitu desain yang optimal dinilai dari segi massa maupun kekuatan. Dari segi massa *improvement design* memiliki massa yang ringan dan dari segi kekuatan *improvement design* memiliki *von mises stress* yang tidak melebihi dari *yield strength* dari suatu bahan yang digunakan.

Berdasarkan penelitian optimasi yang dilakukan oleh Ariyansah (2017) mendapatkan peningkatan kekuatan struktur dengan penurunan nilai *von mises stress* sebesar 51,7% dan *displacement* sebesar 3%. Pada umumnya, perancangan desain ataupun metode optimasi melalui tahapan 3D *modelling* dan analisis. Tahapan tersebut berlaku pada *existing design* maupun *improvement design*. Desain struktur tersebut dibuat dalam 3D *modelling* melalui *software CAD (Computer Aided Design)*. Kemudian 3D *modelling* tersebut dianalisis untuk mengetahui kekuatan strukturnya dengan perhitungan *Finite Element Analysis (FEA)* menggunakan *software CAE (Computer Aided Engineering)*.

Desain struktur *chassis* bus listrik ini dianalisis berdasarkan *operation conditions* kendaraan. Dari hasil analisis saat *operation conditions*, terdapat kegagalan pada saat kondisi pengujian *torsion-bending case combination*, ini dikarenakan *von mises stress* yang terjadi pada *shock absorber bracket* dan *air spring bracket* melebihi *yield strength* pada *material properties SS400* yaitu 245 MPa. Pengujian *torsion-bending case combination* dibagian *shock absorber bracket* menghasilkan *maximum von mises stress* dengan nilai 611,2 MPa dan dibagian *air spring bracket* menghasilkan *maximum von mises stress* dengan nilai 286,3 MPa. Oleh karena itu, desain tersebut perlu dikembangkan untuk

memperoleh *improvement design* yang optimal melalui penelitian optimasi desain *rear axle frame* dan *axle mounting bracket* pada *chassis* bus listrik dengan *software* Autodesk Inventor Professional 2019.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dikemukakan di atas, maka identifikasi masalah adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan transportasi bermesin pembakaran dalam yang mencemari lingkungan karena menghasilkan emisi gas buang.
2. Upaya meminimalisir emisi gas buang pada mesin pembakaran dalam diberbagai belahan dunia belum maksimal.
3. Penyesuaian tipe bus listrik MAB dengan bus Transjakarta serta regulasi kendaraan.
4. Komponen kendaraan listrik yang berat menyebabkan *chassis* mudah mengalami deformasi.
5. Analisis kekuatan struktur *chassis* bus listrik mengalami kegagalan pada komponen *rear axle mounting bracket*.

1.3 Pembatasan Masalah

Penelitian ini akan dibatasi permasalahan pada pengembangan *existing design* untuk mendapatkan hasil *improvement design* yang optimal. Desain yang optimal memiliki parameter dinilai dari massa dan kekuatan struktur. Pembatasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan *sub-assembly* pada struktur *chassis frame* hanya dilakukan pada *rear axle frame*.

2. Pengembangan komponen *axle mounting bracket* hanya dilakukan pada *shock absorber bracket* dan *air spring bracket* bagian *rear axle*.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. Manakah *improvement design rear axle frame* bus listrik dengan struktur ringan dan kuat?
2. Manakah *improvement design rear axle mounting bracket* bus listrik dengan struktur ringan dan kuat?

1.5 Tujuan

Berdasarkan rumusan permasalahan diatas, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menghasilkan desain *rear axle frame* bus listrik yang ringan dan kuat.
2. Menghasilkan desain *rear axle mounting bracket* bus listrik yang ringan dan kuat.

1.6 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Menjadikan *improvement design* sebagai referensi desain untuk produksi *chassis* bus listrik selanjutnya.
2. Menambah referensi metode optimasi pada struktur *chassis frame* kendaraan.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Metode optimasi desain struktur biasa digunakan untuk meningkatkan kekuatan ataupun mengurangi massa struktur. Penelitian dengan metode optimasi desain yang bertujuan mengurangi massa struktur dilakukan oleh Patel, *et al* (2013) dengan judul *Structural Analysis of Truck Chassis Frame and Design Optimization for Weight Reduction*. Dari hasil penelitian tersebut terdapat pengurangan massa sebesar 17% pada *chassis* truk, dengan cara membuat variasi ukuran tinggi dan lebar struktur pada *cross section frame*.

Penelitian optimasi desain pada struktur juga dilakukan oleh Sunardi (2017) pada *frame* sepeda dengan judul *Optimalisasi Desain Frame Sepeda* menggunakan *software* Autodesk Inventor 2015. Dari penelitian tersebut didapatkan desain yang optimal pada desain ke-5. Desain awal memiliki *maximum stress* sebesar 14,75 MPa, *maximum displacement* sebesar 0,01617 mm dan massa sebesar 3,1323 kg sedangkan pada desain ke-5 didapatkan *maximum stress* sebesar 8,40 MPa, *maximum displacement* 0,01782 mm dan massa sebesar 3,1343 kg. Optimasi desain pada penelitian tersebut dapat mengurangi *maximum stress* sebesar 43%, mengurangi massa sebesar 0,06% dan menambah *maximum displacement* sebesar 9%. Data tersebut menunjukkan bahwa desain optimasi ke-5 merupakan desain yang paling optimal dengan peningkatan kekuatan struktur dan pengurangan massa, meskipun nilai *maximum displacement* bertambah sedikit.

Penelitian dengan metode optimasi juga dilakukan oleh Ariyansah (2017) dengan judul Modifikasi Desain *Chassis* Kendaraan *Hybrid* pada Bus Scania K360iB. Penelitian tersebut memodifikasi *chassis* untuk mendapatkan kekuatan struktur yang optimal. Desain awal memiliki *von mises stress* sebesar $6,730 \times 10^2$ N/mm² dengan *displacement* sebesar $4,481 \times 10^1$ mm sedangkan pada hasil variasi desain memiliki *von mises stress* sebesar $3,245 \times 10^2$ N/mm² dengan *displacement* sebesar $4,341 \times 10^1$ mm. Dari penelitian modifikasi *chassis* tersebut, maka terdapat peningkatan kekuatan struktur dengan penurunan nilai *von mises stress* sebesar 51,7% dan *displacement* sebesar 3%.

Penelitian lain dengan judul *Design and Static Structural Analysis of a Race Car for Formula Society of Automotive Engineers (FSAE) Event* yang dilakukan oleh Mohamad, *et al* (2017) juga melakukan optimasi desain *chassis*. Dari penelitian tersebut disebutkan ada tiga *improvement design* dari hasil pengembangan dari *existing design*. Dari hasil pengujian *existing design* memiliki *von mises stress* sebesar 0,652 GPa dengan *displacement* sebesar 11,80 mm, pada *improvement design 1* *von mises stress* sebesar 0,336 GPa dengan *displacement* sebesar 7,930 mm, pada *improvement design 2* memiliki *von mises stress* sebesar 0,583 GPa dengan *displacement* sebesar 10,60 mm dan pada *improvement design 3* *von mises stress* sebesar 0,769 GPa dengan *displacement* sebesar 14,70 mm. Data hasil *improvement design* tersebut menunjukkan bahwa *improvement design 1* mengalami penurunan *von mises stress* sebesar 48% dan penurunan *displacement* sebesar 32,7%, sehingga *improvement design 1* merupakan desain yang paling optimal dengan peningkatan kekuatan struktur dan penurunan nilai *displacement*.

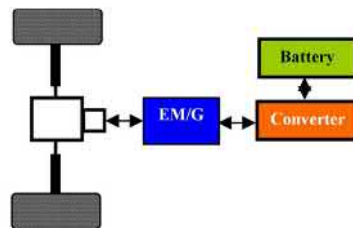
Penelitian optimasi juga dilakukan oleh Utama (2013) dengan judul Optimasi Bentuk Rangka dengan menggunakan *Prestress* pada prototipe kendaraan listrik. Dari penelitian tersebut terdapat 5 varian *improvement design*. Dari hasil pengujian *existing design* terjadi *von mises stress* sebesar 55,53 MPa dengan defleksi sebesar 1,057 mm, pada *improvement design* A terjadi *von mises stress* sebesar 52,41 MPa dengan defleksi sebesar 0,9644 mm, pada *improvement design* B terjadi *von mises stress* sebesar 53,95 MPa dengan defleksi sebesar 0,7718 mm, pada *improvement design* C terjadi *von mises stress* sebesar 72,89 MPa dengan defleksi sebesar 1,086 mm, pada *improvement design* D terjadi *von mises stress* sebesar 52,75 MPa dengan defleksi 0,8272 mm dan pada *improvement design* E terjadi *von mises stress* 63,14 MPa dengan defleksi sebesar 0,6175 mm. Data hasil *improvement design* D merupakan *improvement design* yang paling optimal, dengan peningkatan kekuatan struktur dan penurunan nilai defleksi. Hal ini dikarenakan pada *improvement design* D mengalami penurunan *von mises stress* sebesar 5% dan penurunan defleksi sebesar 21,7%.

Berdasarkan berbagai penelitian di atas, hasil dari optimasi desain yaitu dapat mengurangi massa dan meningkatkan kekuatan struktur. Mengacu pada parameter hasil penelitian optimasi desain tersebut, penelitian dengan judul optimasi desain *rear axle frame* dan *axle mounting bracket* pada *chassis* bus listrik dengan *software* Autodesk Nastran In-CAD juga akan menggunakan parameter massa dan kekuatan struktur. Selain itu, pada penelitian optimasi ini akan menghasilkan beberapa *improvement design*, yang nantinya akan dipilih desain paling optimal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik merupakan kendaraan dengan sumber energi listrik. Kendaraan ini digerakkan oleh motor listrik yang energi listriknya disediakan oleh baterai. Karena tidak terjadi pembakaran seperti pada mesin pembakaran dalam, maka kendaraan listrik ini tidak menghasilkan emisi gas buang (*zero emission*). Selain itu, kendaraan listrik tidak menimbulkan suara yang bising. Secara umum, skema *drive train* kendaraan listrik seperti pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Skema *drive train* kendaraan listrik
(Zivanovic dan Nikolic, 2012: 169)

Komponen penggerak yang terdapat dalam kendaraan listrik adalah baterai, *converter (controller)* dan *electric motor*.

a. Baterai

Baterai merupakan media penyimpanan dan penyedia energi listrik untuk seluruh kebutuhan kendaraan. Semakin besar kebutuhan maka kapasitas baterai juga besar. Baterai yang digunakan pada kendaraan listrik biasanya menggunakan bahan Li-ion, LiPo atau LiFePo.

b. *Converter (controller)*

Converter (controller) merupakan komponen untuk mengatur kecepatan motor listrik. Dengan diaturinya kecepatan motor listrik maka laju kendaraan dapat dikendalikan.

c. *Electric motor*

Electric motor merupakan komponen yang menjadi penggerak utama kendaraan. Selain menjadi penggerak, *electric motor* ini juga dapat menjadi generator bila kendaraan melaju pada jalan menurun dan pedal akselerasi *driver* tidak diinjak. Sehingga dapat menghasilkan listrik dan mengisi baterai. Sistem tersebut dinamakan *regeneration*. *Electric motor* yang digunakan biasanya tipe BLDC dan PMSM.

Di Indonesia kendaraan listrik belum menjadi alat transportasi karena belum ada regulasi tentang penggunaan kendaraan listrik. Tetapi pengembangan kendaraan listrik di Indonesia sudah banyak, antara lain yaitu mobil TUCUXI, mobil SELO, sepeda motor listrik GESITS, bus listrik MAB dan masih banyak lagi.

2.2.2 *Chassis*

Chassis merupakan komponen utama kendaraan yang menopang beban kendaraan, mesin serta penumpang. Material yang digunakan pada struktur *chassis* harus kaku dan kuat sehingga dapat menahan guncangan, tikungan, tekanan dan getaran ketika beroperasi di jalan. Menurut Krisnowo, *et al.* (2017: 103), fungsi utama dari *frame chassis* antara lain yaitu:

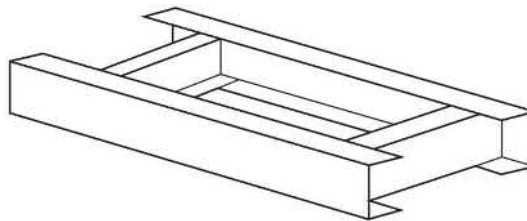
- a. Untuk membawa semua beban stasioner yang melekat pada *chassis* dan beban penumpang dan barang-barang yang diangkut.
- b. Untuk menahan vibrasi torsi yang disebabkan oleh gerakan kendaraan.
- c. Untuk menahan gaya sentrifugal yang terjadi pada saat kendaraan menikung.
- d. Untuk mengontrol vibrasi yang terjadi pada saat kendaraan beroperasi.

- e. Untuk menahan tegangan *bending* karena naik turunnya as roda depan dan belakang.

Ada beberapa tipe *chassis* yang digunakan pada kendaraan, antara lain yaitu *ladder frame*, *cruciform*, *backbone tube* dan *monocoque*.

a. *Ladder Frame*

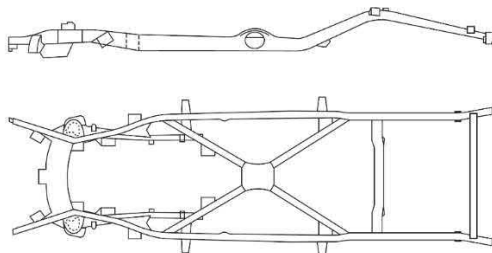
Tipe *Ladder Frame* merupakan tipe *chassis* dengan desain dua buah batang memanjang sebagai tumpuan utama kendaraan. *Chassis* tipe ini sangat kuat sehingga dapat menopang beban yang berat. Biasanya struktur *chassis* ini digunakan pada kendaraan berat, seperti bus dan truk.



Gambar 2.2. Platform dasar *chassis* tipe *ladder frame*
(Smith, 2002: 137)

b. *Cruciform*

Tipe *cruciform* memiliki dua buah batang memanjang seperti pada *chassis* tipe *ladder frame* dengan *cross member* menyilang berbentuk huruf “X” ditengah *frame*. Biasanya struktur *chassis* ini digunakan pada kendaraan berpenumpang.



Gambar 2.3. *Chassis* tipe *cruciform*
(Smith, 2002: 140)

c. *Backbone tube*

Tipe *backbone tube* merupakan tipe *chassis* dengan desain struktur tabung memanjang seperti tulang punggung dari *front axle* hingga *rear axle* disepanjang kendaraan tersebut. Kebanyakan struktur ini digunakan pada *sport car*.



Gambar 2.4. *Chassis* tipe *backbone tube*
(Wakeham, 2009: 42)

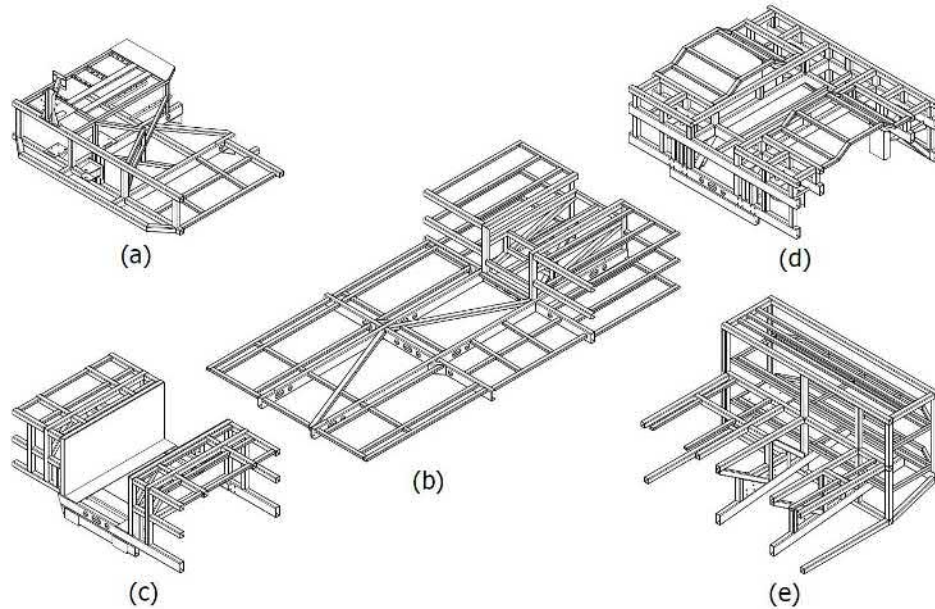
d. *Monocoque*

Tipe *monocoque* merupakan sebuah struktur integral dari bentuk kendaraan yang menyesuaikan dari bentuk kendaraan itu sendiri. Sehingga antara *chassis* dan bodi kendaraan menjadi satu kesatuan. *Chassis* tipe *monocoque* sudah banyak diaplikasikan pada kendaraan zaman sekarang. *Chassis* ini memiliki bobot yang ringan dengan tingkat kekuatan struktur yang aman.



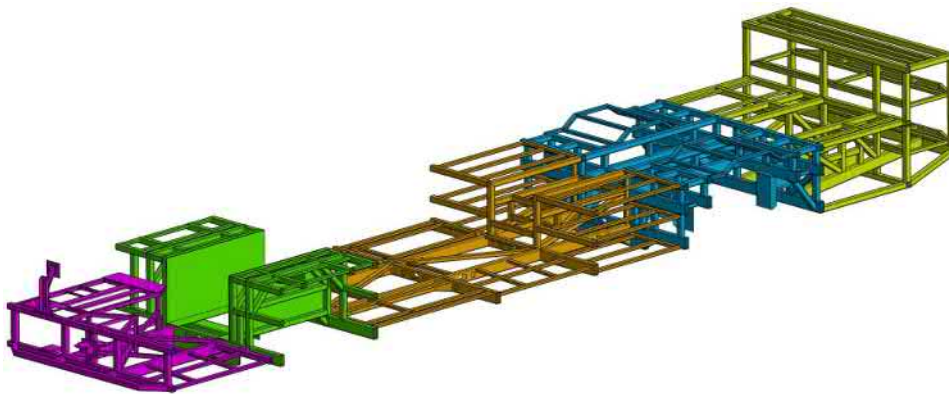
Gambar 2.5. *Chassis* tipe *monocoque*
(Lombogia dan Siahaan, 2016: 2)

Chassis yang digunakan pada bus listrik MAB ini merupakan tipe *monocoque*. Struktur *chassis monocoque* pada bus listrik ini dibagi menjadi lima *sub-assembly* (seperti pada gambar 2.6), antara lain yaitu (a) *driver deck*, (b) *front axle frame*, (c) *space frame*, (d) *rear axle frame* dan (e) *engine compartment*.



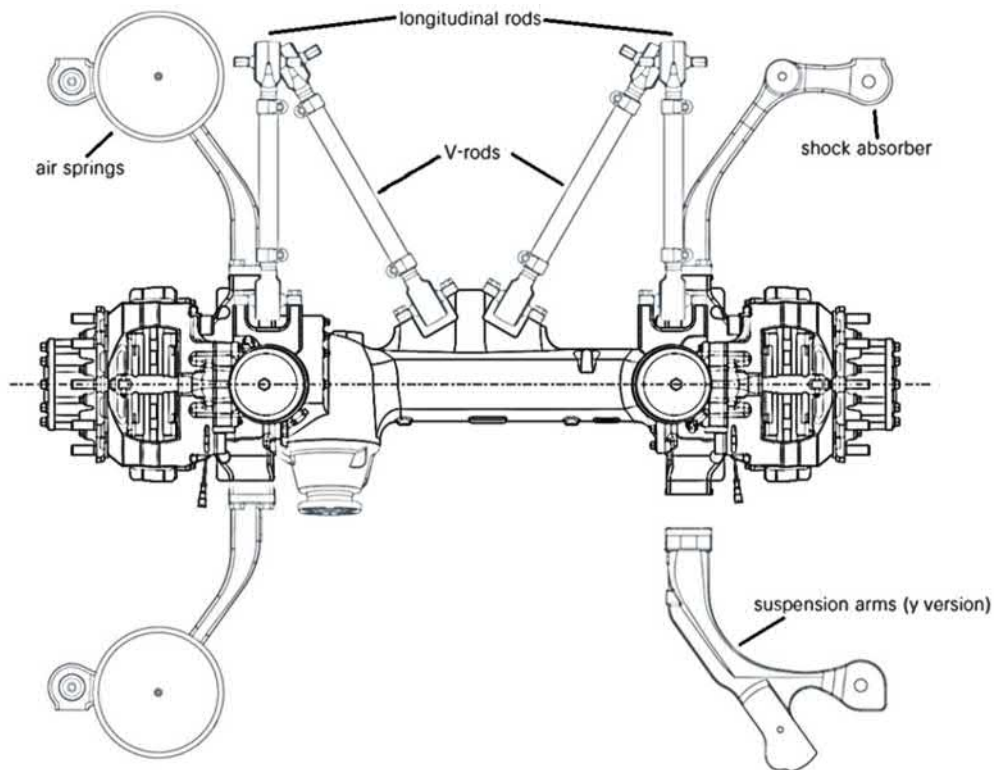
Gambar 2.6. *Sub-assembly* pada *chassis* bus listrik
(Dokumen PT. Mobil Anak Bangsa)

Berikut merupakan platform *chassis* bus listrik secara utuh (*full assembly*) yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



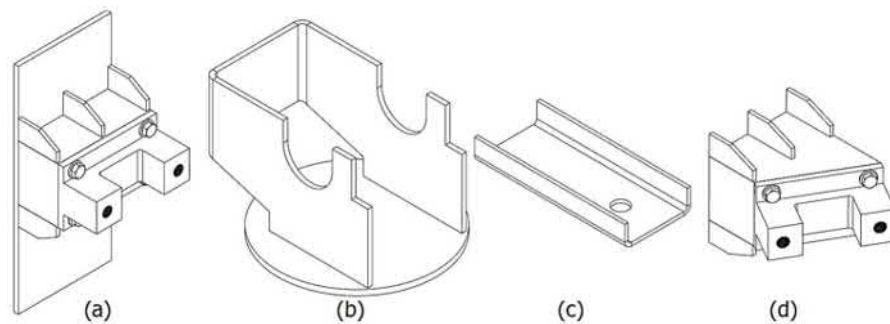
Gambar 2.7. *Chassis full assembly*
(Dokumen PT. Mobil Anak Bangsa)

Bagian lain dari *chassis* yaitu *axle mounting bracket*. *Axle mounting bracket* merupakan komponen untuk menghubungkan antara *axle* dengan *frame chassis*. Berikut merupakan *rear axle* (gambar 2.8) yang dilengkapi sistem *air suspension*.



Gambar 2.8. *Rear Axle*
(Dokumen PT. Mobil Anak Bangsa)

Beberapa *axle mounting bracket* adalah (a) *longitudinal rod bracket*, (b) *air spring bracket*, (c) *shock absorber bracket* dan (d) *v-rod bracket*.



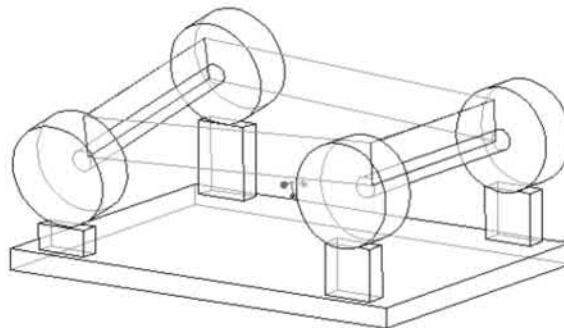
Gambar 2.9. *Axle mounting bracket*
(Dokumen PT. Mobil Anak Bangsa)

2.2.3 *Operation Conditions*

Saat kendaraan melaju di jalan, tidak semua permukaan jalan rata. Dapat dimungkinkan jalan yang dilewati oleh kendaraan tersebut terdapat lubang maupun gundukan. Permukaan jalan yang tidak rata dapat menyebabkan perubahan bentuk (deformasi) pada *chassis* kendaraan apabila terjadi secara ekstrim. Selain itu, deformasi pada *chassis* juga dipengaruhi karena *operation conditions* saat kendaraan melaju. *Operation conditions* yang mempengaruhi deformasi *chassis* kendaraan antara lain yaitu permukaan jalan yang tidak rata, muatan kendaraan, kendaraan melakukan akselerasi, deselerasi ataupun berbelok. Menurut Heisler (dalam Riley dan George, 2002) menyebutkan bahwa ada 4 jenis deformasi yang terjadi pada *chassis* kendaraan, antara lain yaitu:

a. *Torsion case*

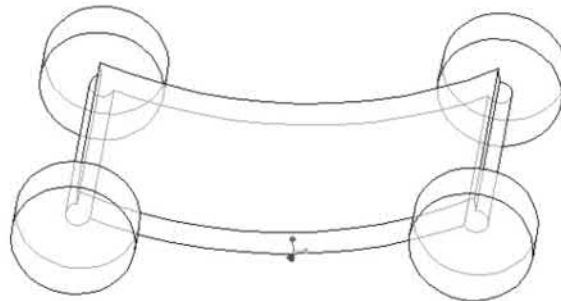
Pada *torsion case*, *chassis* mendapatkan gaya dengan arah yang berlawanan pada bagian *front axle* dan *rear axle*, sehingga *chassis* mendapatkan beban torsi. Kondisi ini terjadi kerana permukaan jalan yang tidak rata (berlubang) dengan salah satu roda masuk ke lubang sehingga *chassis* tersebut seolah-olah terkena gaya puntir.



Gambar 2.10. *Torsion case*
(Riley dan George, 2002: 1)

b. *Bending case*

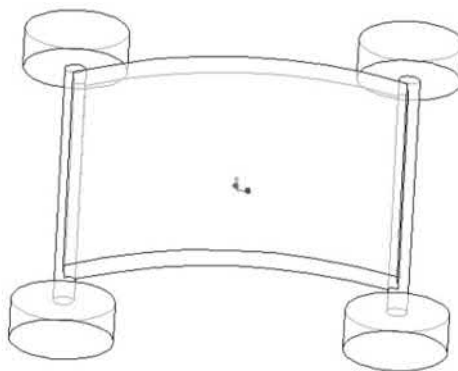
Beban yang menopang pada *chassis* mengakibatkan pembengkokan (*bending*) pada *chassis* kendaraan. Beban tersebut terdistribusi disepanjang *chassis frame* kendaraan. Beban tersebut antara lain, penumpang, bodi kendaraan serta komponen kendaraan itu sendiri.



Gambar 2.11. *Bending case*
(Riley dan George, 2002: 2)

c. *Lateral loading*

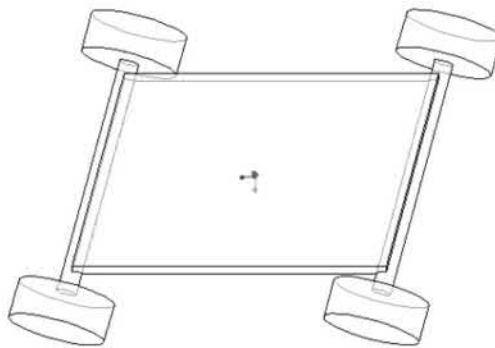
Beban pada *lateral loading* terjadi pada saat kendaraan berbelok dan dipengaruhi oleh gaya sentrifugal kendaraan. Dengan demikian gaya yang bekerja pada seluruh *chassis* ditahan oleh roda. Gaya sentrifugal ini berasal dari massa kendaraan yang berpusat pada titik CoG (*Center of Gravity*).



Gambar 2.12. *Lateral loading*
(Riley dan George, 2002: 2)

d. *Longitudinal loading*

Beban pada *longitudinal loading* terjadi pada saat kendaraan mengalami akselerasi maupun deselerasi. Beban tersebut dipengaruhi oleh gaya inersia kendaraan. Gaya tersebut berasal dari massa kendaraan yang berpusat pada CoG (*Center of Gravity*) dengan penahan pada *axle* roda.



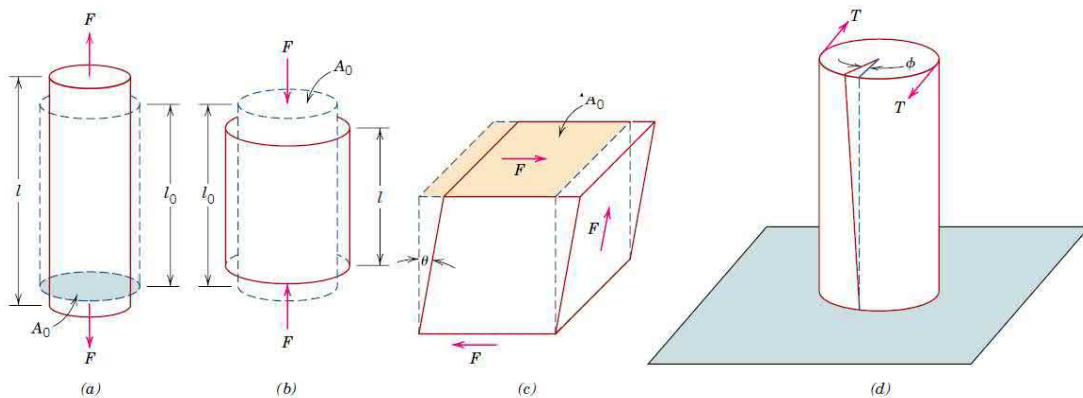
Gambar 2.13. *Longitudinal loading*
(Riley dan George, 2002: 2)

2.2.4 *Mechanical Properties*

Berbagai material yang digunakan pada komponen kendaraan, pada dasarnya didesain untuk menerima gaya dan beban. Hal tersebut menyebabkan pertimbangan dalam pemilihan material. Menurut Callister dan Rethwisch (2010: 151), *mechanical properties* utama pada suatu material adalah *stiffness*, *strength*, *hardness*, *ductility* dan *toughness*. Selain itu, faktor yang harus dipertimbangkan termasuk sifat beban yang diterapkan, durasi pemakaian, serta kondisi lingkungan. Sifat *stiffness*, *strength*, *ductility* dan *toughness* dari suatu material dapat diketahui dengan *tension test* hingga diketahui nilai gaya yang bekerja dan deformasinya. Yang mana akan didapatkan nilai *yield strength* (untuk mengetahui sifat *strength*), *tensile strength* (untuk mengetahui sifat *toughness* dan *ductility*), *modulus of elasticity* (untuk mengetahui sifat *stiffness*) dan *poisson ratio*. Khusus sifat *hardness*

dapat diketahui dengan *Rockwell Hardness Test*, *Brinell Hardness Test* ataupun dengan metode pengujian yang lain.

Beberapa gaya yang bekerja pada suatu benda diilustrasikan pada gambar 2.14. Pada dasarnya ada 4 gaya yang bekerja sehingga mengakibatkan tegangan dan deformasi pada benda yaitu, (a) gaya tarik mengakibatkan tegangan tarik (*tensile stress*), (b) gaya tekan mengakibatkan tegangan tekan (*compressive stress*), (c) gaya geser mengakibatkan tegangan geser (*shear stress*) dan (d) gaya puntir mengakibatkan tegangan puntir (*torsional stress*).



Gambar 2.14. Arah gaya dan deformasi benda (Callister dan Rethwisch, 2010: 153)

Arah gaya yang berbeda akan menimbulkan deformasi yang berbeda pula.

Dengan demikian, *stress* dan *strain* saling memiliki keterkaitan.

e. *Stress*

Bila gaya dari luar bekerja pada suatu benda, maka di dalam benda tersebut juga akan terjadi gaya. Gaya yang terjadi di dalam benda dinamakan tegangan (*stress*). *Stress* didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada suatu bidang benda per satuan luas. *Stress* dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

dengan: $\sigma = \text{Stress/Tegangan (N/mm}^2\text{)}$

$F = \text{Gaya (N)}$

$A_0 = \text{Luas Penampang (mm}^2\text{)}$

f. *Strain*

Saat tegangan tersebut bekerja pada suatu benda, maka akan terjadi deformasi atau regangan (*strain*). *Strain* didefinisikan sebagai perubahan bentuk per satuan panjang karena ada gaya yang bekerja pada benda. *Strain* dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

dengan: $\epsilon = \text{Strain/Regangan}$

$l_i = \text{Panjang akhir (mm)}$

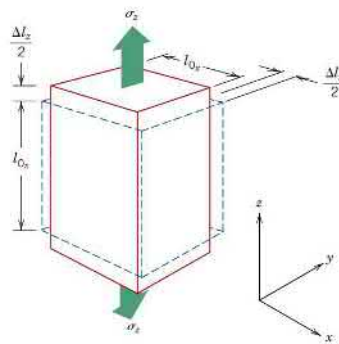
$l_0 = \text{Panjang mula-mula (mm)}$

$\Delta l = \text{Selisih Panjang (mm)}$

g. Hubungan *stress-strain*

1) *Poisson ratio*

Poisson ratio merupakan perbandingan antara regangan lateral (sumbu x dan y) dengan regangan aksial (sumbu z) dalam harga mutlak.



Gambar 2.15. Deformasi akibat gaya tarik
(Callister dan Rethwisch, 2010: 160)

Poisson ratio dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

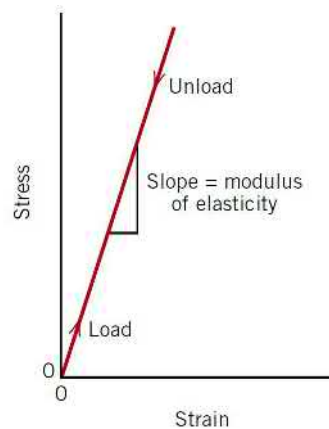
$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (2.3)$$

atau

$$\nu = \left| \frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}} \right| = -\frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}} \quad (2.4)$$

2) Modulus of Elasticity

Modulus of elasticity merupakan perbandingan antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) yang berasal dari diagram *stress-strain*.



Gambar 2.16. Grafik *stress-strain*
(Callister dan Rethwisch, 2010: 157)

Menurut Hukum Hooke tegangan sebanding dengan regangan, yang dikenal dengan deformasi aksial, dengan persamaan:

$$\sigma = E \epsilon \quad (2.5)$$

Sehingga *modulus of elasticity* dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.6)$$

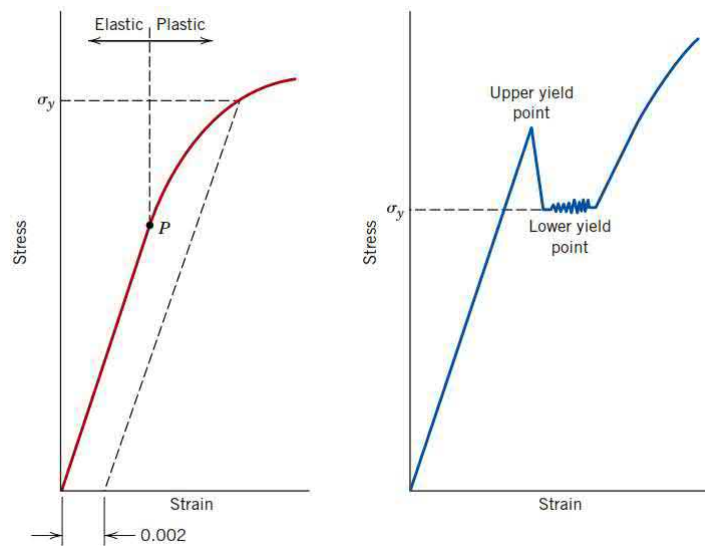
dengan: $E = \text{Modulus of elasticity}$

$\sigma = \text{Stress/Tegangan}$

$\epsilon = \text{Strain/Regangan}$

3) Yield strength

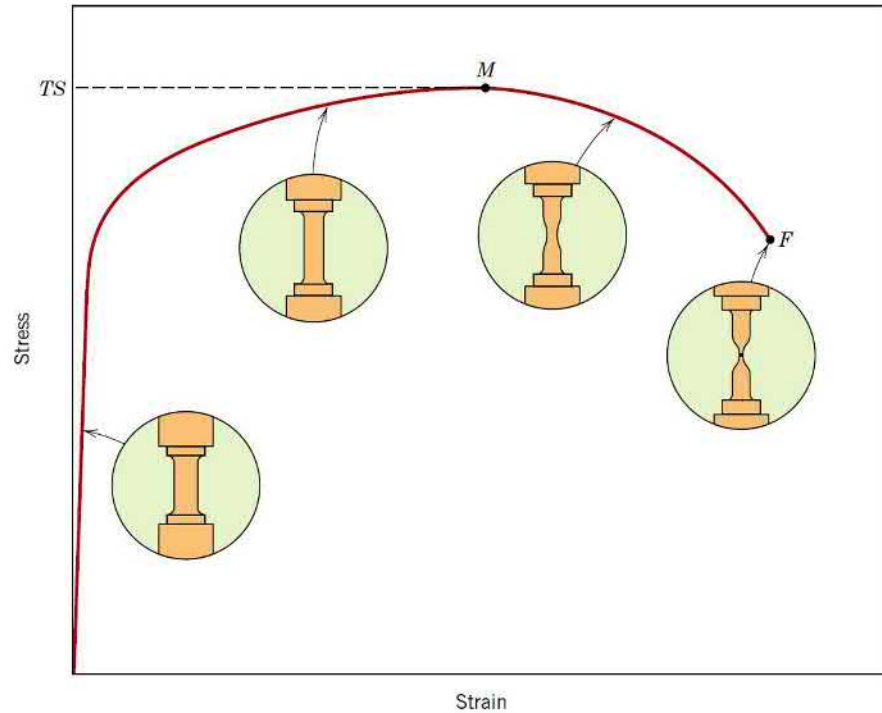
Yield strength (tegangan luluh) merupakan batas antara sifat elastis dengan plastis dari suatu material atau nilai tegangan maksimal suatu material sebelum masuk ke sifat plastis. Bila suatu material menerima tegangan yang melebihi nilai *yield strength*, maka benda tersebut akan mengalami deformasi plastis.



Gambar 2.17. Titik *yield strength* pada grafik *stress-strain* (Callister dan Rethwisch, 2010: 163)

4) *Tensile strength*

Tensile strength (tegangan tarik) merupakan tegangan maksimum yang dapat ditahan suatu material saat ditarik, sebelum material tersebut patah (*fracture*). Semakin tinggi nilai *tensile strength*, maka material tersebut akan semakin tahan terhadap gaya tarik dan tidak mudah putus saat menerima tegangan tarik.



Gambar 2.18. Titik *tensile strength* dan *fracture* pada grafik *stress-strain* (Callister dan Rethwisch, 2010: 164)

2.2.5 *Finite Element Analysis (FEA)*

FEA merupakan salah satu dari cara-cara pendekatan *numeric* yang didasarkan atas proses diskritisasi sistem struktur dan mengambil asumsi perpindahan dengan pendekatan kepada perpindahan eksak (sebenarnya). Berdasarkan perpindahan pendekatan ini, dihitung gaya-gaya yang terjadi dalam struktur. Dengan menerapkan kriteria keseimbangan, diperoleh (sistem) persamaan yang mengaitkan gaya luar dengan komponen perpindahan. Solusi (sistem) persamaan akan menghasilkan besar komponen perpindahan, yang pada gilirannya digunakan untuk menghitung gaya-gaya dalam. Di akhir analisis, diperoleh perpindahan dan gaya-gaya dalam maupun reaksi perletakan secara lengkap (Paggaru, 2014: 57).

a. Prosedur FEA

Pada dasarnya, perhitungan FEA suatu struktur yang dilakukan pada *software* CAE memiliki prosedur yang sama. Adapun *software* CAE yang umumnya digunakan untuk perhitungan FEA antara lain yaitu Autodesk Nastran In-CAD, Abaqus, Altair, LS-DYNA, ANSYS, MSC NASTRAN. Menurut Hutton (2004: 10) ada tiga tahap dalam melakukan FEA:

1) *Preprocessing*

Tahap *preprocessing* umumnya mendefinisikan model desain yang meliputi:

- a) Geometri utama (model struktur)
- b) Tipe elemen yang digunakan (pemilihan elemen *line/shell/solid* dan *meshing*)
- c) *Material properties* dari elemen (*yield strength, tensile strength, poisson ratio*)
- d) *Geometric properties* dari elemen (panjang, luas dan lain-lain)
- e) Keterkaitan elemen (*contact*)
- f) Batasan fisik (*boundary conditions*)
- g) Pembebanan (*load, gravity*)

2) *Solution*

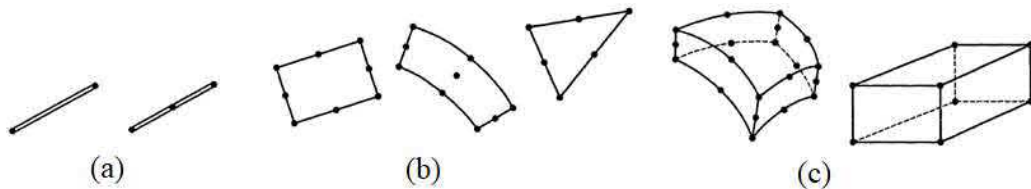
Tahap ini dilakukan oleh komputer melalui perangkat lunak (*software*). *Software* CAE akan melakukan perhitungan FEA sesuai dengan input nilai pada tahap *preprocessing*. Semakin kecil ukuran *mesh*, maka *software* akan semakin lama perhitungannya.

3) *Postprocessing*

Tahap ini akan menampilkan dan mengevaluasi hasil perhitungan FEA. Setiap *software* CAE dapat menampilkan tegangan yang terjadi, deformasi dan lain-lain. Dari tahap ini *engineer* dapat menentukan bahwa struktur tersebut aman atau tidak.

b. Diskritisasi

Diskritisasi merupakan proses pemecahan geometri menjadi beberapa bagian kecil (jejaring). Pada *software* CAE, diskritisasi biasa disebut dengan *meshing*. Menurut Pagaru (2014: 58-59), proses diskritisasi suatu sistem struktur merupakan salah satu langkah dalam penerapan metoda numerik dan mencakup pembagian keseluruhan sistem atas beberapa bagian dengan mengambil suatu jejaring elemen (*element meshing*), yang terdiri atas garis-garis atau bidang pembatas antar bagian dan dilengkapi dengan titik-titik simpul (*nodes*), yang mana nantinya komponen-komponen perpindahan dan gaya reaksi akan dihitung. Ada 3 jenis elemen untuk dilakukan *meshing*, antara lain yaitu:



Gambar 2.19. Tipe elemen
(a) *Line element*, (b) *Shell element*, (c) *Solid element*
(Bathe, 2016: 341)

c. Matriks Kekakuan

Matriks kekakuan elemen adalah matriks yang mengaitkan vektor perpindahan elemen kepada vektor gaya elemen. Kekakuan matriks diibaratkan seperti pegas linier, yang dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$F = K \times U \quad (2.7)$$

Sehingga persamaan tersebut menjadi:

$$U = \frac{F}{K} \quad (2.8)$$

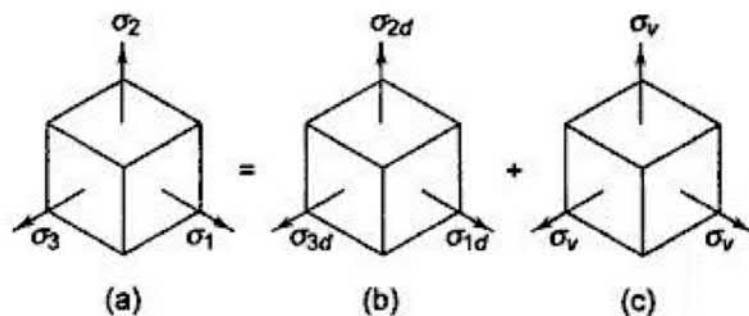
dengan: F = Gaya (N)

K = Konstanta (N/m)

U = Perpindahan elemen (m)

d. *Von Mises Stress*

Von mises stress merupakan teori kegagalan yang diperkenalkan oleh Huber (1904) dan disempurnakan oleh Von Mises dan Henky. Teori ini menyatakan bahwa kegagalan komponen mekanik yang mengalami tegangan bi-aksial atau tri-aksial akan terjadi regangan energi distorsi per satuan volume pada setiap titik komponen, yang hasilnya sama dengan regangan energi distorsi per satuan volume pada spesimen standar dari uji tarik. Pada gambar 2.20 menggambarkan sebuah unit kubus yang dikenai tiga tegangan normal.



Gambar 2.20. Tegangan pada elemen tiga dimensi
(Bhandari, 2010: 110)

Von mises stress dirumuskan dengan persamaan seperti berikut:

$$\sigma_e = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ MPa} \quad (2.9)$$

2.2.6 *Safety Factor*

Safety factor (faktor keamanan) merupakan faktor yang digunakan untuk mengevaluasi agar perencanaan desain terjamin keamanannya. *Safety factor* dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\sigma_y}{sf} = \sigma_e \quad (2.10)$$

Sehingga,

$$sf = \frac{\sigma_y}{\sigma_e} \quad (2.11)$$

dengan: sf = *safety factor*

σ_y = *yield strength* (MPa)

σ_e = *von mises stress* (MPa)

Menurut Irawan (2009: 11), dalam desain konstruksi mesin, besarnya angka keamanan harus lebih besar dari 1 (satu). *Safety factor* diberikan agar desain konstruksi tersebut mempunyai ketahanan terhadap beban yang diterima.

BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian optimasi struktur *chassis* bus listrik diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain *rear axle frame* bus listrik yang ringan dan kuat diperoleh pada *improvement design 3 (rear axle frame A)* dengan massa 426,737 kg. Massa tersebut diperoleh dengan mengurangi ketebalan *frame* sebesar 1 mm. Dan dari hasil pengujian struktur dengan kondisi *torsion-bending case combination* didapatkan nilai *von mises stress* sebesar 91,19 MPa sehingga nilai *safety factor* menjadi 3,56.
2. Desain *rear axle mounting bracket* bus listrik yang ringan dan kuat diperoleh pada *improvement design 3 (air spring bracket B dan shock absorber bracket A)*. Pada *air spring bracket B* memiliki massa 14,394 kg dan dari hasil pengujian struktur dengan kondisi *torsion-bending case combination* didapatkan nilai *von mises stress* sebesar 233,4 MPa sehingga nilai *safety factor* menjadi 1,05. Kekuatan struktur dari komponen *air spring bracket B* tersebut dikarenakan terdapat perubahan struktur serta bertambahnya ketebalan dari 8 mm menjadi 10 mm. Pada *shock absorber bracket A* memiliki massa 3,992 kg dan dari hasil pengujian struktur dengan kondisi *torsion-bending case combination* didapatkan nilai *von mises stress* sebesar 227,1 MPa sehingga nilai *safety factor* menjadi 1,08. Kekuatan struktur dari komponen *shock absorber bracket A* tersebut

dikarenakan terdapat tekukan sebagai penguat serta bertambahnya ketebalan dari 6 mm menjadi 10 mm.

5.2 SARAN

Berdasarkan penelitian optimasi struktur *chassis* bus listrik maka diperoleh beberapa saran sebagai berikut:

1. Struktur *improvement design 3* dapat dijadikan referensi untuk produksi pada *sub-assembly chassis* bus listrik.
2. Melakukan *improvement design* pada *sub-assembly* dan komponen *bracket* yang lain sehingga didapatkan struktur yang ringan dan kuat secara keseluruhan.
3. Mengganti material struktur *chassis* bus listrik dengan spesifikasi *yield strength* dan *tensile strength* yang tinggi untuk mendapatkan struktur yang kuat.
4. Pengujian struktur dengan *software* CAE yang lain untuk mendapatkan hasil yang detail dan akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariyansah, R. 2017. Modifikasi Desain Chasis Kendaraan Hybrid Pada Bus Scania K360iB. *Jurnal Ilmiah TEKNOBIZ* 7(3): 156-165.
- Bathe, K. J. 2016. *Finite Element Procedures*. 2nd ed. Watertown: Prentice Hall.
- Bhandari, V. B. 2010. *Design of Machine Elements*. 3rd ed. Laxmi Nagar: Tata McGraw-Hill.
- Callister, W. D., dan D. G. Rethwisch. 2010. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 8th ed. Danver: John Wiley & Sons.
- Cavazzuti, M., A. Baldini, E. Bertocchi, D. Costi, E. Torricelli, dan P. Moruzzi. 2011. High Performance Automotive Chassis Design: A Topology Optimization Based Approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 44(1): 45-56.
- Hutton, D. V. 2004. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. 1 st ed. New York: McGraw-Hill.
- Irawan, A. G., 2009. *Diktat Elemen Mesin*. Jakarta Barat: Universitas Tarumanegara.
- Krisnowo, A., M. Abubakar, H. Suryaputra dan B. Noviantoro. 2017. Desain dan Analisis Statik Rangka Chassis Square Bar dengan FEM. *MESIN* 26(2): 102-111.
- Lombogia, T. I. P., dan I. H. Siahaan. 2016. Perancangan Alat Peraga Lift Suspension pada Chassis Monocoque. *Mechanova*. 5: 1-5.
- Mohamad, M. L., M. T. A. Rahman, S. F. Khan, M. H. Basha, A. H. Adom dan M. S. M. Hashim. 2017. Design and Static Structural Analysis of a Race Car Chassis for Formula Society of Automotive Engineers (FSAE) Event. *Journal of Physics: Conference Series* 908(1): 1-8.
- Paggaru, I. B. 2014. *Metoda Elemen Hingga: Teori dan Konsep Dasar*. Edisi Pertama. Jakarta: John Hi-Tech Idetama.
- Patel, H., K. C. Panchal dan C. S. Jadav. 2013. Structural Analysis of Truck Chassis Frame and Design Optimization for Weight Reduction. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)* 2(4): 665-668.

- Riley, W. B., dan A. R. George. 2002. *Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis*. Makalah disajikan pada Motorsports Engineering Conference & Exhibition. Indianapolis.
- Roby, D. W. Utama, dan N. Eddy. 2014. Optimasi Massa Rangka Kendaraan Elektrik Pengangkut Sampah Dengan Simulasi Metode Elemen Hingga. *POROS* 12(1): 66-73.
- Sasongko. 2014. *Emisi Gas Buang dan Permasalahannya*. VEDC Malang : Otomotif. <https://www.vedcmalang.com/pppstkboemlg/index.php/baru/47-otomotif/999-sasongko1?tmpl=component&print=1&page=>. 18 July 2019 (21:22).
- Smith, J. H. 2002. *An introduction to Modern Vehicle Design*. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Sunardi. 2017. Optimalisasi Desain Frame Sepeda Menggunakan Software Autodesk Inventor 2015. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik* 20(2): 187-192.
- Utama, D. W., Chandra, W. D., dan Danardono, R. 2013. Optimasi Bentuk Rangka dengan Menggunakan Prestress pada Prototipe Kendaraan Listrik. *Seminar Nasional Mesin dan Industri (SNMI8)* TM-51: 346-353.
- Wakeham, K. J. 2009. Introduction to Chassis Design. 1st rev. Kanada: *Memorial University of Newfoundland and Labrador*.
- Zivanovic, Z., dan Z. Nikolic. 2012. The Application of Electric Technologies in City Buses. *INTECH* 6: 165-203.