



ANALISIS TEGANGAN *VON MISES* PEGAS DAUN
MOBIL LISTRIK ANGKUTAN MASSAL
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

SKRIPSI

Skripsi ini ditulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Pendidikan
Program Studi Pendidikan Teknik Mesin S1

Oleh :

Nama : Hasan Syaifuddin

NIM : 5201410037

Prodi : Pendidikan Teknik Mesin S1

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2015

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Hasan Syaifuddin
NIM : 5201410037
Program Studi : Pendidikan Teknik Mesin
Judul : Analisis Tegangan *Von Mises* Pegas Daun Mobil Listrik
Angkutan Massal Menggunakan Metode Elemen Hingga

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan memperoleh gelar Sarjana Pendidikan pada Program Studi Pendidikan Teknik Mesin S1, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Panitia Ujian

Ketua : Dr. M. Khumaedi, M.Pd.
NIP. 196209131991021001
Sekretaris : Wahyudi, S.Pd, M.Eng.
NIP. 198003192005011001

(*M. Khumaedi*)
(*Wahyudi*)

Dewan Penguji

Pembimbing : Drs. Wirawan S., M.T.
NIP. 196601051990021002
Penguji Utama I : Dr. Heri Yudiono, S.Pd, M.T.
NIP. 196707261993031003
Penguji Utama II : Widya Aryadi, S.T., M.T.
NIP. 197209101999031001
Penguji Pendamping : Drs. Wirawan S., M.T.
NIP. 196601051990021002

(*Wirawan S.*)
(*Heri Yudiono*)
(*Widya Aryadi*)
(*Wirawan S.*)

Ditetapkan di Semarang
Tanggal :

Mengesahkan,
Dekan Fakultas Teknik



Drs. M. Harlanu, M.Pd.
NIP. 196602151991021001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama Mahasiswa : Hasan Syaifuddin
NIM : 5201410037
Program Studi : Pendidikan Teknik Mesin S1
Fakultas : Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi saya dengan judul “**Analisis Tegangan Von Mises Pegas Daun Mobil Listrik Angkutan Massal Menggunakan Metode Elemen Hingga**” merupakan hasil karya sendiri dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi manapun, dan sepanjang pengetahuan 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, 25 Juni 2015

Yang membuat pernyataan



Hasan Syaifuddin

NIM. 5201410037

ABSTRAK

Syaifuddin, Hasan. 2014. “Analisis Tegangan *Von Mises* Pegas Daun Mobil Listrik Angkutan Massal Menggunakan Metode Elemen Hingga”. Skripsi : Prodi Pendidikan Teknik Mesin. Fakultas Teknik. Universitas Negeri Semarang.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan desain pegas daun yang optimal digunakan sebagai pendukung sistem suspensi roda belakang mobil listrik angkutan massal Unnes. Desain pegas yang ideal dilihat dari material harus memiliki kekuatan *ultimate* dan *yield* yang tinggi, modulus elastisitas atau modulus geser yang rendah dan *safety factor* minimum 2 hingga 2,5 sedangkan dimesnsi idealnya jika ketebalan 10 mm maka lebar pegas 80 mm dan jika ketebalan 12 mm maka lebar 100 mm.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen berupa modifikasi jumlah, ketebalan, lebar dan material pegas daun yang digunakan. Modifikasi dibuat dalam enam model modifikasi. Permodelan pegas daun dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CATIA dan untuk menganalisis kekuatan pegas daun menggunakan perangkat lunak ANSYS. Analisis kekuatan yang dilakukan adalah analisis tegangan *von mises* dan *safety factor* minimum.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk desain pegas daun dengan *safety factor* minimal 2 dan berat pegas paling ringan, pegas daun modifikasi 2 dan 5 memberikan hasil yang terbaik dibandingkan desain pegas daun original dan desain pegas daun modifikasi lainnya. Tegangan *von mises* maksimum yang dihasilkan sebesar 229,75 MPa untuk pegas daun modifikasi 2 dan 218,30 MPa untuk pegas daun modifikasi 5, sementara nilai *safety factor* minimum yang dihasilkan sebesar 2,17 untuk pegas daun modifikasi 2 dan 2,28 untuk pegas daun modifikasi 5. Pengurangan berat pegas daun modifikasi 2 sebesar 7,25 Kg dan pegas daun modifikasi 5 sebesar 6,92 Kg dari berat pegas daun original.

Kata Kunci : *von mises stress, safety factor, pegas daun, CATIA, ANSYS*

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

- *Never give up*
- *Do the best get the best*
- *Man jadda wa jadda*
- *Akhir dari setiap perjuangan adalah awal bagi perjuangan yang baru*
- *Kebahagiaan orang-orang tercinta adalah motivasi terbesarku*

PERSEMBAHAN

1. Untuk ayah, ibu adik-adikku tercinta
2. Dwi Mukti Pratiwi yang telah memberikan dukungan do'a dan semangat
3. Saudara-saudaraku yang telah membantu doa
4. Sahabat-sahabatku seperjuangan
5. Semua yang telah membantu saya yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu
6. Kampus tercinta UNNES

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Analisis Tegangan *Von Mises* Pegas Daun Mobil Listrik Angkutan Massal Menggunakan Metode Elemen Hingga”.

Skripsi ini disusun dalam rangka menyelesaikan studi strata 1 guna memperoleh gelar sarjana pendidikan di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. Mengingat bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, penelitian ini tidak akan terlaksana dengan baik. Dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, disampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rohman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang.
2. Drs. Muhammad Harlanu, M.Pd., Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
3. Dr. M.Khumaedi, M.Pd., Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang.
4. Drs. Wirawan S., M.T., Dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan dan motivasi dalam penyusunan skripsi ini.
5. Dr. Heri Yudiono, S.Pd, M.T., Dosen penguji I yang juga telah banyak memberi saran dan masukan.
6. Widya Aryadi, S.T., M.T., Dosen penguji II yang juga telah banyak memberi saran dan masukan.

7. Kriswanto, S.Pd., M.T. yang telah memberikan arahan dalam proses perancangan dan analisis desain pegas daun mobil listrik ini.
8. Keluarga besar mahasiswa Pendidikan Teknik Mesin 2010 yang selalu member semangat.
9. Bapak, Ibu dan keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa.
10. Teman-teman dan semua pihak yang telah membantu terlaksananya penelitian skripsi ini dari awal hingga akhir yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Atas bantuannya, karya ini telah diusahakan yang terbaik, namun apabila masih terdapat kesalahan dan kekurangan itu merupakan keterbatasan dalam penulisan skripsi ini. Akhir kata semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semuanya.

Semarang, 25 Juni 2015



Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang Masalah	1
B. Pembatasan dan Perumusan Masalah.....	4
1. Pembatasan Masalah	4
2. Perumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian.....	5
D. Manfaat Penelitian.....	5
1. Manfaat Teoritis	5
2. Manfaat Praktis	5
E. Penegasan Istilah	6
1. Pegas Daun	6

2. Mobil Listrik.....	6
3. Angkutan Massal	6
4. Analisis Tegangan <i>Von Mises</i>	7
5. Metode Elemen Hingga	7
F. Sistematika Penulisan Skripsi	7
1. Bagian Awal	7
2. Bagian Isi	7
3. Bagian Akhir.....	8
BAB II KAJIAN PUSTAKA	9
A. Kajian Teori.....	9
1. Tinjauan Umum Pegas Daun	9
2. Teori Kegagalan Statis dan Tegangan <i>Von Mises</i>	15
3. Faktor Keamanan.....	23
4. Tegangan Statis.....	26
5. Reaksi Tumpuan Balok Sederhana.....	26
6. Teori Umum Metode Elemen Hingga	28
7. <i>Software</i> ANSYS.....	36
8. <i>Software</i> CATIA	38
B. Kajian Hasil Penelitian Terdahulu	39
C. Kerangka Berpikir	41
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	43
A. Pendekatan	43
B. Alat dan Bahan	44

1. Alat	44
2. Bahan	44
C. Spesifikasi dan Desain.....	44
1. Spesifikasi.....	45
2. Desain	45
D. Diagram Alur Penelitian.....	49
E. Prosedur Cara Pelaksanaan Penelitian	51
1. Permodelan	51
2. Pemasukan Data Material	51
3. Pengasumsian	52
4. Pengujian	52
5. Interpretasi Hasil	52
F. Variabel Penelitian.....	52
G. Teknik Pengumpulan Data	52
H. Teknik Analisis Data.....	53
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	54
A. Hasil Penelitian.....	54
1. Dasar-Dasar Perancangan Pegas daun Mobil Listrik Angkutan Massal Unnes	54
2. Permodelan Desain Pegas Daun Mobil Listrik Angkutan Massal Unnes	62
3. Hasil Pengujian	70
B. Pembahasan	87

BAB V PENUTUP.....	92
A. Simpulan.....	92
B. Saran.....	93
DAFTAR PUSTAKA	94
LAMPIRAN	98

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Tingkatan Baja menurut AISI (Efunda, 2014).....	12
Tabel 2.2 Spesifikasi Dimensi Pegas Daun <i>Indian Standart</i> 1135-1966.....	14
Tabel 3.1 Perbandingan Spesifikasi Desain	45
Tabel 4.1 Referensi Spesifikasi <i>Electric Shuttle Bus</i> LQY113B	54
Tabel 4.2 Ukuran Dimensi Pegas Daun Mobil Listrik Angkutan Massal Unnes	56
Tabel 4.3 Komposisi Kimia Hasil Uji Spesimen Pegas Daun	57
Tabel 4.4 <i>Chemical Composition</i> Baja AISI 15B62H	57
Tabel 4.5 <i>Material Properties</i> Baja AISI 15B62H	58
Tabel 4.6 <i>Material Properties E-glass Epoxy</i>	58
Tabel 4.7 Asumsi Beban Pembebanan Pegas daun Mobil Listrik	59
Tabel 4.8 Perbandingan Jumlah Elemen dan Node Desain	66
Tabel 4.9 Perbandingan Hasil <i>Stress Analysis</i> pada masing-masing Desain..	84
Tabel 4.8 Perbandingan Hasil Analisis <i>Safety Factor</i> Minimum	85
Tabel 4.8 Perbandingan Volume dan Berat masing-masing Desain.....	86

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Multi Leaf Spring</i>	10
Gambar 2.2 <i>Mono Leaf Spring</i>	10
Gambar 2.3 <i>Composite Leaf Spring</i>	11
Gambar 2.4 <i>Konstruksi Multi Leaf Springs</i>	13
Gambar 2.5 <i>Distribusi Beban Pada Pegas Daun</i>	14
Gambar 2.6 <i>Tegangan Elemen Tiga Dimensi</i>	17
Gambar 2.7 <i>Grafik Representasi TED dalam Tegangan 2 Dimensi</i>	21
Gambar 2.8 <i>Grafik Representasi Teori Geser Maksimum</i>	22
Gambar 2.9 <i>Bukti Eksperimental Kriteria Kegagalan Luluh Material</i>	23
Gambar 2.10 <i>Sistem Balok Sederhana</i>	26
Gambar 2.11 <i>Balok Sederhana dan Beban Merata</i>	28
Gambar 2.12 <i>Elemen Tetrahedral</i>	30
Gambar 2.13 <i>Elemen Tetrahedral 4 Node</i>	31
Gambar 3.1 <i>Desain Original</i>	46
Gambar 3.2 <i>Desain Modifikasi 1</i>	46
Gambar 3.3 <i>Desain Modifikasi 2</i>	46
Gambar 3.4 <i>Desain Modifikasi 3</i>	47
Gambar 3.5 <i>Desain Modifikasi 4</i>	47
Gambar 3.6 <i>Desain Modifikasi 5</i>	47
Gambar 3.7 <i>Desain Modifikasi 6</i>	48
Gambar 4.1 <i>Electric Shuttle Bus LQY113B (kiri), Mobil Listrik Unnes</i> <i>(kanan)</i>	54

Gambar 4.2	Pegas Daun Mobil Listrik Unnes.....	56
Gambar 4.3	<i>Wheelbase</i> Mobil Listrik Angkutan Massal Unnes.....	59
Gambar 4.4	Sistem pembebanan (a) dan Reaksi Tumpuan (b)	60
Gambar 4.5	Konstruksi Pegas Daun Mobil Listrik Angkutan Massal Unnes	62
Gambar 4.6	Geometri Pegas Daun Mobil Listrik Angkutan Massal Unnes	63
Gambar 4.7	Permodelan Pegas Daun Menggunakan <i>Software</i> CATIA	63
Gambar 4.8	Permodelan Pegas Daun Modifikasi	64
Gambar 4.9	Pemasukan Data <i>Material Properties</i> pada ANSYS	65
Gambar 4.10	Geometri Pegas Daun yang diimporkan ke ANSYS.....	65
Gambar 4.11	Penetapan Material Desain Pegas Daun pada ANSYS	66
Gambar 4.12	<i>Setting</i> Metode Tetrahedron Pegas Daun pada ANSYS	67
Gambar 4.13	<i>Meshing</i> Pegas Daun pada ANSYS	67
Gambar 4.14	Permodelan Beban dan Tumpuan	68
Gambar 4.15	<i>Setting</i> Faktor Keamanan	69
Gambar 4.16	<i>Equivalent Von Mises Stress</i> (Original)	70
Gambar 4.17	<i>Equivalent Von Mises Stress</i> Modifikasi 1.....	71
Gambar 4.18	<i>Equivalent Von Mises Stress</i> Modifikasi 2.....	72
Gambar 4.19	<i>Equivalent Von Mises Stress</i> Modifikasi 3.....	73
Gambar 4.20	<i>Equivalent Von Mises Stress</i> Modifikasi 4.....	74
Gambar 4.21	<i>Equivalent Von Mises Stress</i> Modifikasi 5.....	75
Gambar 4.22	<i>Equivalent Von Mises Stress</i> Modifikasi 6.....	76

Gambar 4.23 <i>Safety Factor</i> (Original)	77
Gambar 4.24 <i>Safety Factor</i> Modifikasi 1	78
Gambar 4.25 <i>Safety Factor</i> Modifikasi 2	79
Gambar 4.26 <i>Safety Factor</i> Modifikasi 3	80
Gambar 4.27 <i>Safety Factor</i> Modifikasi 4	81
Gambar 4.28 <i>Safety Factor</i> Modifikasi 5	82
Gambar 4.29 <i>Safety Factor</i> Modifikasi 6	83
Gambar 4.30 Grafik Perbandingan Tegangan <i>Von Mises</i> Desain	85
Gambar 4.31 Grafik Perbandingan <i>Safety Factor</i> Desain	86
Gambar 4.32 Grafik Perbandingan Berat Desain	87

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

Simbol	Arti
n_f	jumlah daun <i>extra full-length</i>
n_g	jumlah daun <i>graduated</i>
n	jumlah total daun
b	lebar setiap daun (mm)
t	ketebalan setiap daun (mm)
L	panjang <i>cantilever</i> atau setengah panjang pegas daun <i>semi-elliptical</i>
n	faktor keamanan
P	fosfor
P	gaya atau beban
P_f	gaya P yang bekerja pada daun-daun <i>extra full-length</i>
P_g	gaya P yang bekerja pada daun-daun <i>graduated-length</i>
E	modulus elastisitas
	tegangan
F	gaya
A	luas penampang
ν	poisson ratio
σ'	tegangan efektif <i>von mises</i>
τ_{xy}	tegangan luluh N/m ²
$\vec{\delta}$	vektor perpindahan nodal
\vec{p}	vektor gaya pada nodal
$[B]$	matriks hubungan regangan dan perpindahan
$[D]$	matriks elastisitas

$V^{(e)}$	volume elemen
ν	<i>Poisson ratio</i>
$\vec{\sigma}$	vektor tegangan
$\vec{\epsilon}$	vektor regangan
Ori	desain original
M.1	desain modifikasi 1
M.2	desain modifikasi 2
M.3	desain modifikasi 3
M.4	desain modifikasi 4
M.5	desain modifikasi 5
M.6	desain modifikasi 6
L	jarak <i>wheelbase</i> (m)
q	beban merata (N/m)
R_{Dpn}	reaksi tumpuan roda depan (N)
R_{Blk}	reaksi tumpuan roda belakang (N)

Singkatan

Arti

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANSYS	<i>Analysis system</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CATIA	<i>Computer Aided Three-dimensional Interactive Application</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat Tugas Pembimbing.....	99
Lampiran 2. Surat Tugas Penguji.....	100
Lampiran 3. Foto Spesimen Uji Komposisi Pegas Daun.....	101
Lampiran 4. Lembar Hasil Uji Komposisi.....	103
Lampiran 5. Geometri Desain Pegas Daun Original.....	104
Lampiran 6. Permodelan Pegas Daun Original.....	105
Lampiran 7. <i>Meshing</i> Desain Pegas Daun Orginal	106
Lampiran 8. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 1	107
Lampiran 9. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 1.....	108
Lampiran 10. <i>Meshing</i> Desain Pegas Daun Modifikasi 1.....	109
Lampiran 11. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 2	110
Lampiran 12. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 2.....	111
Lampiran 13. <i>Meshing</i> Desain Pegas Daun Modifikasi 2.....	112
Lampiran 14. Geometri Desain Pegas Daun Model 3.....	113
Lampiran 15. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 3.....	114
Lampiran 16. <i>Meshing</i> Desain Pegas Daun Modifikasi 3.....	115
Lampiran 17. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 4	116
Lampiran 18. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 4.....	117
Lampiran 19. <i>Meshing</i> Desain Pegas Daun Modifikasi 4.....	118
Lampiran 20. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 5	119
Lampiran 21. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 5.....	120
Lampiran 22. <i>Meshing</i> Desain Pegas Daun Modifikasi 5.....	121

Lampiran 23. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 6	122
Lampiran 24. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 6.....	123
Lampiran 25. <i>Meshing</i> Desain Pegas Daun Modifikasi 6.....	124
Lampiran 26. Dokumentasi Penelitian.....	118

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Perkembangan industri otomotif nasional dewasa ini tengah mengalami peningkatan yang pesat. Perkembangan ini sejalan dengan kebutuhan teknologi masa kini yang menuntut teknologi yang lebih efisien, efektif dan ramah lingkungan. Dalam *qualitative target roadmap* pengembangan industri kendaraan bermotor kementerian perindustrian yang disampaikan pada *workshop* efisiensi energi di sektor transportasi tanggal 5 Maret 2012 di Jakarta disebutkan bahwa untuk pengembangan industri otomotif nasional kedepannya akan diarahkan pada produksi kendaraan bermotor yang hemat energi dan ramah lingkungan.

Adanya kebutuhan akan hadirnya teknologi kendaraan-kendaraan bermotor yang hemat energi dan ramah lingkungan menjadi perhatian bagi industri otomotif dan berbagai institusi pendidikan di bidang teknik baik nasional maupun internasional untuk turut serta mengembangkan teknologi kendaraan bermotor yang hemat energi dan ramah lingkungan ini. Universitas Negeri Semarang sebagai salah satu institusi pendidikan tinggi nasional juga ambil bagian dalam upaya pengembangan teknologi kendaraan bermotor hemat energi dan ramah lingkungan dengan pembuatan mobil listrik Unnes yang sedang dikembangkan oleh jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang sebagai kendaraan penumpang. Mobil listrik yang sedang dikembangkan oleh Unnes sampai saat ini telah sampai pada pembuatan *chassis*. *Chassis* mobil listrik Unnes yang sudah dibuat ini terdiri dari komponen rangka, suspensi *double wishbone*

dengan pegas batang torsi pada roda depan, suspensi *rigid* pada roda belakang, *axle* roda belakang, roda dan ban.

Pada suspensi roda belakang menggunakan pegas daun sebagai komponen pendukung sistem suspensi. Pegas daun yang dipasang di bawah *axle* roda belakang berfungsi menopang berat kendaraan secara keseluruhan baik berat bodi, mesin, penumpang, rangka, asesoris maupun beban-beban lain yang ditopang di atasnya, menyerap kejutan dari jalan dan getaran roda-roda agar tidak diteruskan ke bodi kendaraan secara langsung serta menambah kemampuan cengkeram ban terhadap permukaan jalan, namun pegas mempunyai kekuatan tertentu yang terbatas untuk menahan beban kerja yang dialaminya sehingga diperlukan analisis ilmiah dalam perencanaan pegas daun yang akan digunakan agar konstruksi pegas daun benar-benar kuat, mempunyai nilai keamanan yang baik dan tidak mengalami gagal fungsi saat digunakan. Pada kenyataannya kekuatan pegas daun yang digunakan belum diketahui secara pasti melalui penelitian ilmiah.

Pengurangan berat merupakan *issue* utama dalam industri otomotif dewasa ini, (Yede dan Sheikh, 2014: 1), begitupun pegas daun sebagai komponen sistem suspensi kendaraan. Dalam hal ini, penelitian yang dilakukan adalah melakukan modifikasi material dan dimensi berupa jumlah, ketebalan dan lebar pegas daun. Modifikasi ini tentu akan mempengaruhi konsentrasi tegangan yang terjadi pada pegas daun. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Regassa, dkk, (2013: 5) yang menyimpulkan bahwa dengan mengubah ketebalan pegas daun dapat mengurangi tegangan yang terjadi. Berdasarkan kajian penelitian terdahulu juga ditemukan bahwa penggunaan material komposit untuk pegas daun

mempunyai kekuatan yang hampir sama dengan pegas daun dari baja dengan besar kapasitas pembebanan yang sama, namun penggunaan material komposit memiliki keuntungan berat pegas menjadi lebih ringan. Pada kenyataannya pegas daun yang digunakan mobil listrik unnes terbuat dari material baja.

Penggunaan metode elemen hingga di bidang *engineering* oleh para insinyur dan ahli dalam meneliti dan menganalisis desain maupun kemampuan pegas daun sampai saat ini terbukti cukup berhasil dengan baik sehingga banyak penelitian terkait yang menggunakan metode ini. Dalam penelitian *Perfomance Analysis of Carbon Fiber with Epoxy Resin Based Composite Leaf Spring* yang (Ravindra dan Belkar, 2014: 541) menyimpulkan bahwa “*The finite element solution show the good correlation for total deformation with analytical results*”. Dalam penelitian lain yang relevan *Mono Composite Leaf Spring for Light Weight Vehicle - Design, End Joint Analysis and Testing* (Shankar dan Vijayarangan, 2006: 225) menyimpulkan bahwa “*The analytical results were compared with FEA and the results show good agreement with the results*”. Madane, dkk, (2013: 8) dalam penelitiannya *Design of Leaf Spring Rear Suspension for Rear Mounted Engine* menyimpulkan bahwa “*vehicle dynamics stability and overall suspension design parameters have been verified by using finite element analysis and running vehicle on the road, the system was having approximate cost saving of 10% and the system has been implemented on the vehicle successfully*”

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan di atas, maka perlu untuk dilakukan analisis kekuatan pegas daun mobil listrik angkutan massal menggunakan metode elemen hingga untuk mengetahui tegangan pegas daun dan

safety factor minimum yang digunakan sebagai komponen suspensi roda belakang mobil listrik angkutan massal.

B. Pembatasan dan Perumusan Masalah

1. Pembatasan Masalah

Permasalahan dalam penelitian ini agar menjadi jelas dan tidak menyimpang dari tujuan yang ditetapkan maka penulis perlu membatasi masalah yang diangkat. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a. Objek penelitian adalah pegas daun tipe semi eliptik dengan bentuk penampang persegi panjang pada suspensi roda belakang mobil listrik angkutan massal.
- b. Pemodelan ulang pegas daun mobil listrik angkutan massal dilakukan menggunakan *software* CATIA.
- c. Analisis tegangan pegas daun mobil listrik angkutan massal dilakukan menggunakan *software* ANSYS.
- d. Karakteristik kekuatan yang dianalisis menggunakan *software* ANSYS adalah tegangan *von mises* maksimum, faktor keamanan dan berat pegas daun.
- e. Jenis pembebanan yang digunakan pada pegas daun adalah beban statis
- f. Beban statis yang digunakan untuk pembebanan berasal dari beban penumpang dan beban kendaraan dari hasil pengasumsian.

2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana perbandingan karakteristik kekuatan pegas daun *original* terhadap pegas daun modifikasi 1, modifikasi 2 dan modifikasi 3?

- b. Bagaimana perbandingan karakteristik kekuatan pegas daun *original* terhadap pegas daun modifikasi 4, modifikasi 5 dan modifikasi 6

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan di atas, tujuan dalam penelitian ini adalah:

- a. Untuk mengetahui perbandingan karakteristik kekuatan pegas daun *original* terhadap pegas daun modifikasi 1, modifikasi 2 dan modifikasi 3.
- b. Untuk mengetahui perbandingan karakteristik kekuatan pegas daun *original* terhadap pegas daun modifikasi 4, modifikasi 5 dan modifikasi 6.

D. Manfaat Penelitian

1. Manfaat Teoritis

Melalui penelitian ini dapat menerapkan pengembangan aplikasi keilmuan Mekanika Kekuatan Bahan dan CAD (*Computer Aided Design*) terkait dengan analisis kekuatan bahan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* ANSYS serta perancangan desain pegas daun menggunakan *software* CATIA.

2. Manfaat Praktis

- a. Bagi peneliti dapat menerapkan keilmuan Mekanika Kekuatan Bahan dan CAD (*Computer Aided Design*) terkait dengan analisis tegangan yang diperoleh selama kuliah, sehingga dapat menjadi pengalaman nyata sebagai implementasi dari teori yang telah dipelajari.
- b. Bagi universitas dapat menjadi masukan dalam rangka mengetahui prediksi kekuatan pada pegas daun mobil listrik angkutan massal yang sedang dikembangkan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Unnes.

- c. Bagi masyarakat luas dapat menjadi referensi mengenai metode analisis kekuatan pegas daun menggunakan metode elemen hingga.

E. Penegasan Istilah

Dalam penelitian ini terdapat beberapa istilah yang perlu ditegaskan agar tidak terjadi perbedaan penafsiran dan pandangan mengenai permasalahan yang ada berkaitan dengan judul skripsi ini. Istilah-istilah tersebut yaitu:

1. Pegas Daun

Pegas daun adalah pegas yang berbentuk plat datar dengan lebar tertentu dan dikenai beban lateral yang menjadikan pelat mengalami lenturan. (Hidayat, 2012: 2).

2. Mobil Listrik

Mobil listrik adalah mobil yang digerakkan dengan motor listrik, menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai atau tempat penyimpanan energi lainnya (Widyatama, dkk, 2013) Dalam penelitian ini mobil listrik yang dimaksud adalah mobil listrik angkutan massal yang sedang dikembangkan oleh Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Unnes.

3. Angkutan Massal

Pada dasarnya, yang dimaksud angkutan massal yaitu sistem transportasi publik skala besar di daerah metropolitan tertentu, biasanya terdiri dari bus, kereta bawah tanah, dan kereta api (*Dictionary.reference.com*, 2014). Dalam penelitian ini yang dimaksud dengan angkutan massal adalah mobil listrik berukuran mini bus dengan kapasitas jumlah penumpang 11 orang.

4. Analisis Tegangan *Von Mises*

Tegangan *Von Mises* adalah tegangan yang menyebabkan terjadinya kegagalan pada material apabila material mendapatkan tegangan triaksial yang menghasilkan energi regangan. Kegagalan terjadi ketika besar energi regangan dari tegangan triaksial sama dengan energi regangan dari uji tarik standar material ketika mulai terjadi luluh (Bhandari, 1994: 93). Analisis yang dilakukan adalah mencari besar tegangan *von mises* maksimal pada masing-masing desain model pegas daun untuk kemudian dibandingkan dan dibahas.

5. Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang dapat digunakan untuk mencari solusi akurat pada permasalahan teknik yang kompleks (Rao, 2005). Metode elemen hingga ini adalah metode yang sampai saat ini terbukti cukup berhasil dengan baik digunakan untuk menganalisis tegangan-tegangan yang terjadi pada struktur.

F. Sistematika Penulisan Skripsi

Secara garis besar penulisan skripsi ini terbagi dalam 3 bagian yaitu:

1. Bagian Awal

Bagian awal skripsi memuat hal-hal yang berhubungan dengan judul skripsi, halaman pengesahan, pernyataan, abstrak, motto dan persembahan, kata pengantar, daftar isi, daftar gambar, daftar tabel, daftar simbol dan singkatan serta daftar lampiran.

2. Bagian Isi

Bagian ini terdiri dari 5 bab yaitu:

Bab I : Pendahuluan, bab ini merupakan latar belakang masalah tentang alasan yang mendasari pengambilan atau pemilihan judul skripsi, selain itu juga dikemukakan pembatasan dan rumusan masalah, penegasan istilah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan skripsi.

Bab II : Kajian Pustaka, dalam bab ini berisi tentang landasan teori sebagai landasar kerja penelitian yang mencakup pembahasan masalah yang berkaitan dengan penulisan, penelitian terdahulu serta kerangka berfikir penelitian.

Bab III : Metode penelitian, yang menguraikan langkah-langkah kerja yang ditempuh dalam penelitian meliputi, metode penelitian yang digunakan, variabel penelitian, metode pengumpulan data, dan prosedur pelaksanaan penelitian.

Bab IV : Berisi tentang hasil penelitian dan pembahasan.

Bab V : Berisi penutup yang meliputi simpulan dan saran.

3. Bagian Akhir

Bagian akhir skripsi meliputi daftar pustaka - lampiran.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Kajian Teori

1. Tinjauan Umum Pegas Daun

a. Pegas Daun

Pegas daun adalah pegas yang berbentuk pelat datar dengan lebar tertentu dan dikenai beban lateral yang menjadikan pelat mengalami *bending* (Hidayat, 2012: 2). Pegas daun sebagai komponen sistem suspensi berfungsi menyerap kejutan dari jalan dan getaran roda-roda agar tidak diteruskan ke bodi kendaraan secara langsung serta menambah kemampuan cengkeram ban terhadap permukaan jalan serta menopang berat kendaraan secara keseluruhan baik berat bodi, mesin, penumpang, rangka, asesoris maupun beban-beban lain yang ditopang di atasnya. Menurut Erjavec (2010: 1325) ada tiga jenis dasar pegas daun yaitu *multi leaf springs*, *mono leaf spring*, dan *fiber composite leaf spring*.

1) *Multi Leaf Springs*

Multi Leaf Springs terdiri dari daun-daun baja datar yang dijadikan satu dan diikat menggunakan klip atau menggunakan baut U yang ditempatkan di bagian tengah susunan. *Multi Leaf Springs* terdiri dari daun utama (*main leaf*), *extra full-length leave*, dan *graduated leaves*. Daun utama mempunyai sebuah *eye spring* pada tiap ujung daun. *Extra full-length* sebagai tambahan daun utama dengan panjang daun yang hampir sama dengan daun utama dan ditempatkan di antara daun utama dan *graduated leaves*. *Graduated leaves* dengan panjang yang lebih

pendek dari daun utama dan *extra full-length leaves* di tempatkan di bawah *extra full-length leaves*.



Gambar 2.1 *Multi Leaf Springs*

(Sumber: Hidayat, 2012: 2)

2) *Mono Leaf Springs*

Mono Leaf Springs atau pegas daun tunggal biasanya terdiri dari sebuah pelat baja yang mempunyai kelengkungan disepanjang daun. Pegas daun tipe ini biasa mempunyai kekauan yang rendah. Hal ini memberikan kemampuan pengendalian yang lembut dan pengangkutan barang yang baik. Pegas daun tipe ini juga tidak memiliki karakteristik gangguan dan gesekan statis seperti pada pegas daun ganda (*multi leaf springs*).



Gambar 2.2 *Mono Leaf Spring*

(Sumber: Mithari, dkk, 2012: 4810)

3) *Fiber Composite Leaf Springs*

Pegas daun tipe *fiber composite* biasanya terbuat dari *fiberglass* yang dilapiskan dan diikat bersama menggunakan resin polyerster yang kuat. Serat-serat panjang pada *fiberglass* dipenuhi dengan resin dan diikat bersama melalui balutan atau biasa disebut sebagai proses pelilitan kawat. Pegas tipe ini mempunyai berat yang lebih ringan dari pegas tipe baja namun mempunyai kekuatan yang hampir sama dengan pegas daun dari baja. Nadargi, dkk. (2012: 65) “dibandingkan dengan pegas daun baja, pegas dari bahan komposit mempunyai tegangan yang lebih rendah, frekuensi natural yang lebih tinggi dan berat pegas mendekati 85% lebih ringan”.



Gambar 2.3 *Composite Leaf Spring*

(Sumber: Patunkar, 2013: 132)

b. Material Pegas Daun

Daun-daun biasanya terbuat dari baja, 55Si2Mn90, 50Cr1 atau 50Cr1V23. Faktor keamanan berdasarkan pada kekuatan luluh yaitu antara 2 hingga 2,5 untuk suspensi mobil (Bhandari, 1994: 319). Dalam perkembangannya komposit banyak digunakan sebagai pengganti material pegas daun baja dikarenakan mempunyai kekuatan yang lebih baik dengan berat yang lebih ringan. Gebremeskel, , menjelaskan prosedur detail yang baik untuk membuat *prototype* pegas daun tunggal yang dibuat dari material E-glass fiber *epoxy resin* dengan metode *hand*

layup untuk material E-glass fiber sebanyak 40 *layer* dengan ketebalan serat fiber 0,4 mm.

Baja karbon diklasifikasikan ke dalam tiga klasifikasi dasar yaitu baja karbon rendah yang memiliki kandungan karbon kurang dari 0,30%, baja karbon sedang yang mengandung 0.30% – 0.50% karbon, dan baja karbon tinggi yang memiliki 0,50% – 0,95% karbon. Baja karbon rendah memiliki kekuatan relatif rendah, tetapi mempunyai sifat mampu bentuk (*formability*) yang baik. Baja karbon sedang digunakan pada kebanyakan elemen yang memiliki syarat kekuatan sedang hingga tinggi dengan keuletan yang cukup baik dan syarat kekerasan sedang. Sedangkan baja karbon tinggi memberikan sifat-sifat keausan yang lebih baik yang sesuai untuk aplikasi yang memerlukan sisi-sisi pemotongan yang tahan lama dan untuk permukaan yang mengalami pengikisan yang tetap (Mott, 2004: 47).

Berdasarkan ketentuan AISI (*American Iron and Steel Institute*), baja karbon memiliki kandungan berat maksimal unsur karbon 1.00%, unsur tembaga 0,60%, unsur mangan 1,65%, unsur fosfor 0,40%, unsur silikon 0,60%, dan unsur sulfur 0,05%. AISI membuat kode tersendiri bagi baja karbon. Kode tersebut terdiri dari empat digit angka. Dua digit angka pertama menandakan tingkatan dari baja, sedangkan dua digit terakhir menunjukkan jumlah karbon yang terkandung dalam paduan dalam seperseratus persen (Efunda, 2014).

Tabel 2.1 Tingkatan Baja menurut AISI

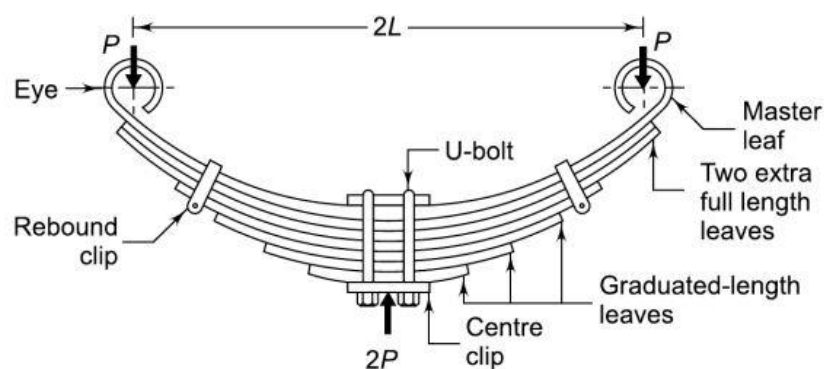
		XX : 0,XX% jumlah kandungan karbon
AISI	10 60	
	10	: Nonresulfurized grades
	11	: Resulfurized grades

12 : Resulfurized and rephosphorized grades
 15 : Nonresulfurized grades; max kandungan Mn > 1%

(Sumber: Efunda, 2014)

c. Konstruksi *Multi Leaf Springs*

Konstruksi *Multi Leaf Springs* seperti gambar 2.4 yang berbentuk semi eliptik terdiri dari rangkaian pelat-pelat datar. Pelat-pelat pegas daun tersebut diikat bersama menggunakan dua baut U dan jepitan (*center clip*) di bagian tengah. *Rebound clips* dipasang untuk menjaga kesejajaran dan kelurusan pelat-pelat pegas daun dan mencegah pergeseran pelat-pelat pegas daun ke arah samping selama beroperasi. Pegas daun terpanjang disebut sebagai *master leaf* yang dibengkokkan pada kedua ujungnya untuk dibentuk *spring eye*. Pada bagian tengah, pegas diikat pada *axle* kendaraan (mobil). *Multi leaf springs* dilengkapi dengan satu atau dua daun *extra full-length* sebagai tambahan *master leaf*. Daun-daun *extra full-length* tersebut ditumpuk diantara *master leaf* dan daun-daun *graduated-length*. Konstruksi *multi leaf springs* seperti Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Konstruksi *Multi Leaf Springs*

(Sumber: Bhandari, 1994: 315)

Menurut Bhandari, (1994: 319), spesifikasi dimensi tebal dan lebar standar pegas daun untuk suspensi mobil sesuai *Indian Standart* 1135-1966 seperti data pada Tabel 2.2.

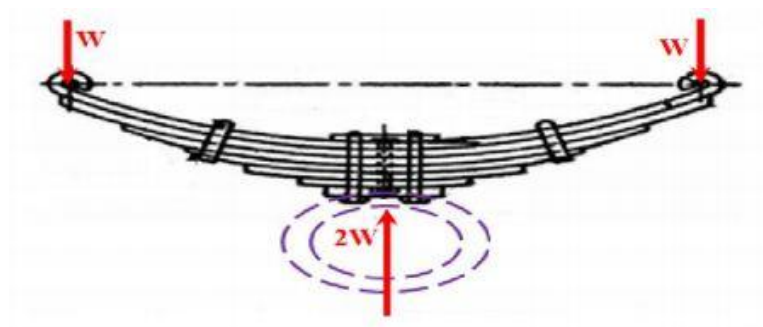
Tabel 2.2 Spesifikasi Dimensi Pegas Daun *Indian Standart* 1135-1966

Tebal (mm)	Lebar (mm)
6,0	50
7,0	60
8,0	70
9,0	75
10,0	80
11,0	90
12,0	100

(Sumber: Bhandari, (1994: 31

d. Distribusi Gaya Pegas Daun

Distribusi gaya pada pegas daun seperti pada Gambar 2.5. Pada pegas daun semi eliptik distribusi beban atau gaya yang terjadi dapat diberlakukan sebagai *cantilever* ganda. Beban w yang diterima pegas daun terkonsentrasi pada *spring eye* daun utama (*master leaf*). Akibat beban w ini, terjadi momen gaya pada bagian tengah dari setiap daun yang melawan beban w sebesar $2w$.



Gambar 2.5 Distribusi Beban pada Pegas Daun

(Sumber: Sudarsono dan Yuspian, 2012: 253)

e. Perhitungan Tegangan dan Defleksi Pegas Daun

Menurut Bhandari (1994: 319 - 321) untuk perhitungan tegangan dan defleksi pada pegas daun dengan lebar daun yang seragam dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{6PL}{nbt^2} \quad (2-1)$$

$$\delta = \frac{12PL^3}{Ebt^3(3n_f + 2n_g)} \quad (2-2)$$

dengan:

n_f : jumlah daun *extra full-length*

n_g : jumlah daun *graduated-length* termasuk *master leaf*

n : jumlah total daun

b : lebar setiap daun (mm)

t : ketebalan setiap daun (mm)

L : panjang *cantilever* atau setengah panjang pegas *semi-elliptical* (mm)

P : gaya yang bekerja pada ujung pegas (N)

P_f : bagian gaya P yang bekerja pada daun-daun *extra full-length* (N)

P_g : bagian gaya P yang bekerja pada daun-daun *graduated-length* (N)

E : modulus elastisitas (N/m²)

2. Teori Kegagalan Statis dan Tegangan *Von Mises*

Kegagalan pada suatu elemen mesin dapat terjadi dalam berbagai wujud seperti misalnya *yielding*, retak, patah, korosi, aus, dan lain-lain. Penyebab kegagalan juga bermacam-macam seperti misalnya salah desain, beban operasional, kesalahan *maintenance*, cacat material, temperatur, lingkungan,

waktu, dan lain-lain. Dalam beberapa kasus kegagalan juga dapat diakibatkan oleh beban mekanis yaitu yang berhubungan dengan jenis tegangan yang terjadi pada komponen mesin. Dengan pengetahuan yang lengkap tentang kegagalan, maka para insinyur dapat mempertimbangkan berbagai aspek penyebab kegagalan dalam perancangan sehingga diharapkan kegagalan tidak akan terjadi selama umur teknisnya.

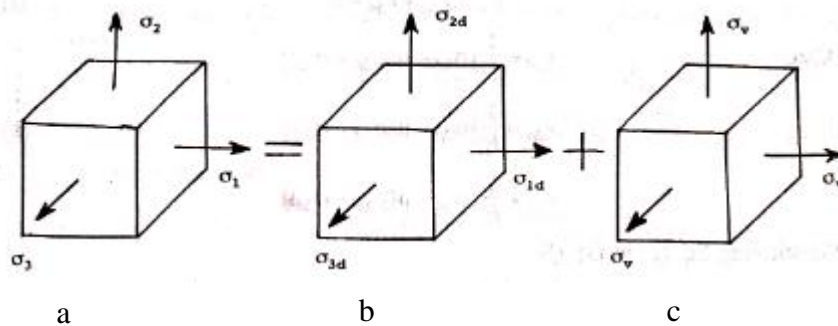
Dalam dunia teknik dikenal beberapa teori kegagalan statik. Teori kegagalan statik dalam perkembangannya dibedakan menjadi dua kategori, yaitu teori kegagalan untuk material ulet (*ductile*) dan teori kegagalan statik untuk material getas (*brittle*). Mengingat jenis material dalam penelitian ini adalah material ulet, maka akan dibahas jenis teori kegagalan untuk material ulet. Pada material ulet akan terjadi patah jika tegangan akibat beban statik di atas kekuatan tarik ultimatnya, sementara kegagalan pada komponen mesin terjadi bila tegangan akibat beban statis di atas kekuatan luluhnya

a. Teori Energi Distorsi (von Mises-Henky)

Teori kegagalan ini diperkenalkan oleh Huber (1904) dan kemudian disempurnakan melalui kontribusi von Mises dan Henky. Teori ini menyatakan bahwa kegagalan diprediksi terjadi pada keadaan tegangan multiaksial bilamana energi distorsi per unit volume sama atau lebih besar dari energi distorsi per unit volume pada saat terjadinya kegagalan dalam pengujian tegangan uniaksial sederhana terhadap spesimen dari material yang sama.

Gambar 2.7 menggambarkan sebuah unit kubus yang dikenai tiga tegangan normal σ_1 , σ_2 , σ_3 , Gambar 2.7a menggambarkan elemen dengan tiga tegangan sumbu, Gambar 2.7b menggambarkan komponen tegangan untuk distorsi, Gambar 2.7c menggambarkan komponen tegangan untuk perubahan volume. Rumus energi regangan total yang diberikan adalah:

$$U = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1 + \frac{1}{2} \sigma_2 \varepsilon_2 + \frac{1}{2} \sigma_3 \varepsilon_3 \quad (2-3)$$



Gambar 2.6 Tegangan Elemen Tiga Dimensi

(Sumber: Bhandari, 1994: 93)

Di mana ε_1 , ε_2 , ε_3 adalah regangan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 + \nu(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 + \nu(\sigma_1 + \sigma_3)]$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 + \nu(\sigma_1 + \sigma_2)]$$

Sehingga rumus untuk energi regangan total menjadi:

$$U = \frac{1}{2E} [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (2-4)$$

Energi regangan total U , diselesaikan dalam dua komponen U_v dan U_d . U_v untuk adalah perubahan volume tanpa distorsi pada elemen dan U_d untuk distorsi pada elemen tanpa perubahan volume. Tegangan juga diselesaikan dalam dua komponen seperti Gambar 2.7. Komponen σ_{1d} , σ_{2d} , dan σ_{3d} menyebabkan distorsi pada kubus sementara σ_v menyebabkan perubahan volume. Oleh karenanya yang dirumuskan sebagai berikut:

$$U = U_v + U_d \quad (2-5)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{1d} + \sigma_v$$

$$\sigma_2 = \sigma_{2d} + \sigma_v$$

$$\sigma_3 = \sigma_{3d} + \sigma_v$$

Tegangan *Von Mises* menurut Bhandari (1985: 152) diperoleh menggunakan persamaan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$U = U_v + U_d$$

$$U_v = \frac{(1-2\nu)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2}{6E} \quad (2-6)$$

$$U_d = U - U_v$$

$$U_d = \frac{1}{2E} [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] - \frac{(1-2\nu)(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)^2}{6E}$$

$$U_d = \frac{(1+\nu)}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2-7)$$

Dalam uji tarik sederhana, ketika spesimen mulai luluh, maka besar elemen tegangannya adalah $\sigma_1 = \sigma_y$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, sehingga,

$$U_d = \left(\frac{(1+\nu)}{6E} \right) \sigma_y^2 \quad (2-8)$$

Dari Persamaan (2-8) dan (2-9), kriteria tegangan kegagalan untuk teori energi distorsi (tegangan *von mises*) dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1\sigma_2)^2 + (\sigma_2\sigma_3)^2 + (\sigma_3\sigma_1)^2]} \quad (2-9)$$

Untuk keadaan tegangan dua dimensi, $\sigma_2 = 0$ maka,

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2}$$

Pada dasarnya tegangan dapat didefinisikan sebagai besaran gaya yang bekerja pada suatu satuan luas. Secara matematis menurut Shigley dan Mitchell (1984: 40) definisi tersebut dapat ditulis sebagai :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2-10)$$

Tegangan efektif Von Mises (σ') didefinisikan sebagai tegangan tarik uniaksial yang dapat menghasilkan energi distorsi yang sama dengan yang dihasilkan oleh kombinasi tegangan yang bekerja.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \quad (2-11)$$

atau,

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

Untuk kasus tegangan dua dimensi, $\sigma_2 = 0$ maka,

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2} \quad (2-12)$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

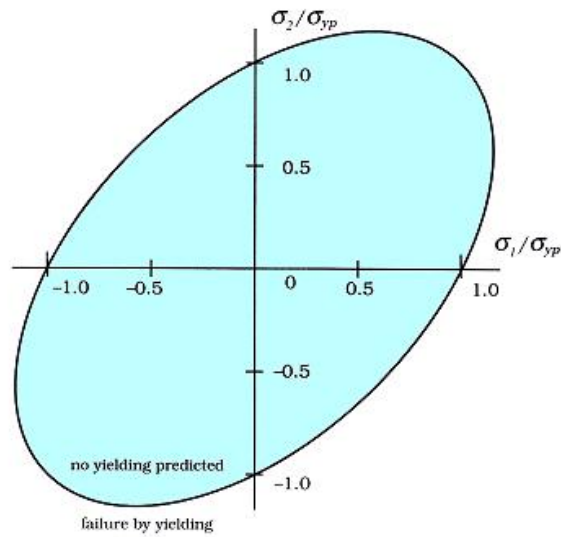
$$\text{Kegagalan akan terjadi apabila } \sigma' \geq \frac{\sigma_y}{n} \quad (2-13)$$

Untuk geseran murni $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau$ dan $\sigma_2 = 0$

$$\sigma_y = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2 = 3\sigma_1^2 = 3\tau_{max}^2$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} = 0,577\sigma_y = \tau_{max} \quad (2-14)$$

Dari persamaan di atas didefinisikan kekuatan luluh (*yield*) terhadap geser dari material ulet adalah fraksi dari kekuatan luluh yang didapat dari uji tarik. Dalam bentuk grafik, teori energi distorsi maksimum ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.7 Grafik Representasi Teori Energi Distorsi dalam Tegangan 2 Dimensi

(Sumber: classes.mst.edu)

Di mana :

E : modulus elastisitas N/m^2

F : gaya N/m^2

ν : poisson ratio

A : luas penampang m^2

σ_y : tegangan luluh N/m^2

σ' : tegangan von mises N/m^2

τ : tegangan geser N/m^2

n : faktor keamanan

b. Teori Tegangan Geser Maksimum

Ide tentang tegangan geser yang berperan dalam menimbulkan kegagalan pertama kali diperkenalkan oleh ilmuwan Perancis, Coulomb (1476-1806). Formula kriteria tegangan geser maksimum dipublikasikan oleh Tresca (1864) dan Guest (1900) membuktikannya melalui eksperimen. Sehingga teori ini sering

disebut teori *Tresca* atau *Guest law*. Teori ini menyatakan bahwa kegagalan diprediksi terjadi pada keadaan tegangan multiaksial jika nilai tegangan geser maksimum sama atau lebih besar dibandingkan tegangan geser maksimum pada saat terjadinya kegagalan dalam pengujian tegangan uniaksial sederhana yang menggunakan spesimen dengan material yang sama.

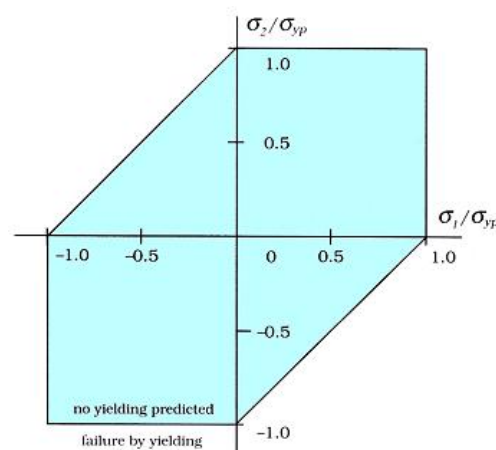
Menurut Bhandari, (1994: 91) secara sederhana kegagalan akan terjadi apabila:

$$|\sigma_1 - \sigma_2| \geq \left| \frac{\sigma_y}{n} \right| \quad (2-15)$$

$$|\sigma_2 - \sigma_3| \geq \left| \frac{\sigma_y}{n} \right|$$

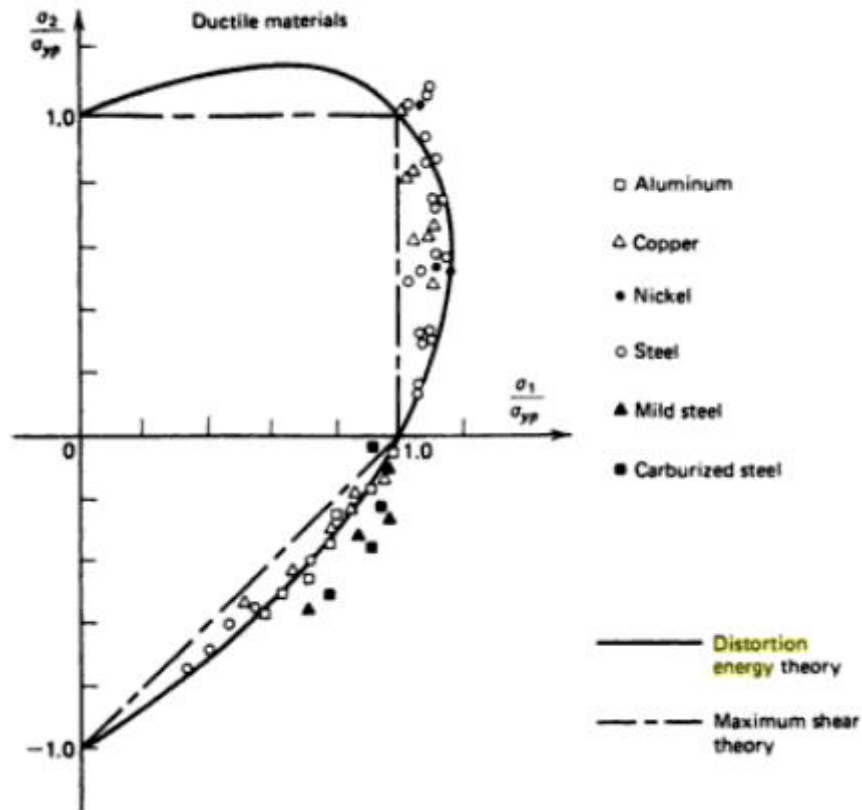
$$|\sigma_3 - \sigma_1| \geq \left| \frac{\sigma_y}{n} \right|$$

Di mana σ_y adalah kekuatan luluh material pada uji tarik. Jadi kegagalan akan terjadi jika salah satu persamaan di atas terpenuhi. Dalam bentuk grafik, teori tegangan geser maksimum ditunjukkan pada Gambar 2.9



Gambar 2.8 Grafik Representasi Teori Geser Maksimum

(Sumber: classes.mst.edu)



Gambar 2.9 Bukti Eksperimental Kriteria Kegagalan Luluh pada Material

(Sumber: Kutz, 2002: 715)

Gambar 2.9 memberikan informasi bahwa untuk material ulet, kriteria kegagalan Teori Energi Distorsi lebih akurat dibandingkan Teori Tegangan Geser Maksimum. Oleh karena itu tegangan *von mises* dari Teori Energi Distorsi cenderung digunakan pada analisis tegangan untuk kepentingan komersial serta kode elemen hingga untuk mendapatkan profil tegangan.

3. Faktor Keamanan

a. Faktor Keamanan

Faktor keamanan adalah faktor yang digunakan untuk mengevaluasi kemandan dari suatu bagian mesin (Shigley dan Mitchell, 1984: 11). Untuk menghindari

terjadinya keruntuhan struktur (*structure-failure*) maka kekuatan sebenarnya dari suatu bahan haruslah melebihi kekuatan yang dibutuhkan. Perbandingan dari kekuatan sebenarnya terhadap kekuatan yang dibutuhkan disebut faktor keamanan (*factor of safety*) n yang dirumuskan :

$$\text{Faktor keamanan } n = \frac{\text{kekuatan sebenarnya}}{\text{kekuatan yang dibutuhkan}} \quad (2-11)$$

Faktor keamanan harus lebih besar dari 1,0 untuk menghindari terjadinya kegagalan atau keruntuhan struktur. Nilai kisaran faktor keamanan berkisar antara 1,0 hingga 10. Keruntuhan struktur dapat berarti patah atau runtuhnya sama sekali suatu struktur atau dapat berarti bahwa deformasinya telah melampaui beberapa harga batas sehingga strukturnya tidak lagi mampu memperlihatkan fungsinya yang diharapkan.

Menurut Mott (2009: 164) untuk menentukan faktor keamanan suatu struktur yang akan dirancang dapat menggunakan aturan berikut:

1) Bahan-bahan ulet

- a) $n = 1,25$ hingga $2,0$ untuk perancangan struktur yang menerima beban statis dengan tingkat kepercayaan yang tinggi untuk semua data perancangan.
- b) $n = 2,0$ hingga $2,5$ untuk perancangan elemen-elemen mesin yang menerima pembebanan dinamis dengan tingkat kepercayaan rata-rata untuk semua data perancangan.
- c) $n = 2,5$ hingga $4,0$ untuk perancangan struktur statis atau elemen-elemen mesin yang menerima pembebanan dinamis dengan ketidakpastian mengenai beban, sifat-sifat bahan, analisis tegangan, atau lingkungan.

d) $n = 4,0$ atau lebih untuk perancangan struktur statis atau elemen-elemen mesin yang menerima pembebanan dinamis dengan ketidakpastian mengenai beberapa kombinasi bahan, sifat-sifat bahan, analisis tegangan, atau lingkungan.

2) Bahan-bahan getas

a) $n = 3,0$ hingga $4,0$ untuk perancangan struktur yang menerima beban statis dengan tingkat kepercayaan yang tinggi untuk semua data perancangan.

b) $n = 4,0$ hingga $8,0$ untuk perancangan struktur statis atau elemen-elemen mesin yang menerima pembebanan dinamis dengan ketidakpastian mengenai beban, sifat-sifat bahan, analisis tegangan, atau lingkungan.

Dalam analisis tegangan pegas daun mobil listrik angkutan massal ini, angka keamanan yang digunakan adalah minimal 2 karena pegas daun akan menerima pembebanan statis.

Dalam praktek, terdapat beberapa cara dalam mendefinisikan dan melaksanakan faktor keamanan. Pada kebanyakan struktur perlu diperhatikan agar bahannya tetap berada dalam jangkauan elastis agar dapat menghindari terjadinya deformasi-deformasi permanen, apabila bebannya diambil. Pada umumnya metoda desain yang digunakan adalah penggunaan faktor keamanan terhadap peluluhan (*yielding*) dari konstruksi. Dengan penerapan faktor keamanan pada tegangan luluh diperoleh tegangan izin (*allowable stress*) atau tegangan kerja (*working stress*) yang tidak boleh dilampaui di bagian manapun dalam struktur yang dirumuskan :

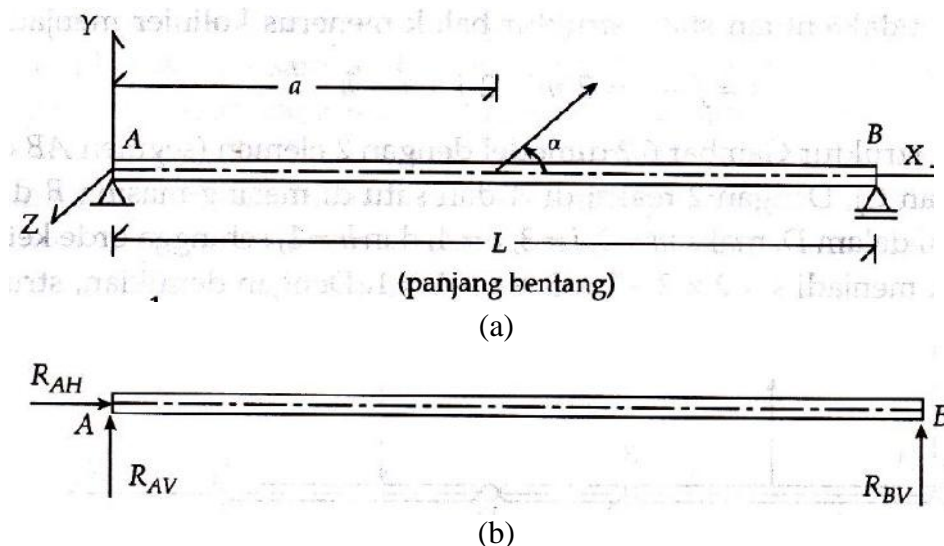
$$\text{Tegangan izin} = \frac{\text{Tegangan luluh}}{\text{faktor keamanan}} \quad (2-12)$$

4. Tegangan Statis

Apabila suatu komponen menerima beban yang diterima secara lambat, tanpa kejutan dan ditahan pada nilai yang konstan, maka tegangan yang dihasilkan pada komponen tersebut disebut tegangan statis (*static stress*). Contohnya adalah beban pada sebuah struktur karena bobot mati pada sebuah bangunan (Mott, 2009: 148).

5. Reaksi Tumpuan Balok Sederhana

Balok sederhana (*simple span*) merupakan sistem struktur yang terdiri atas balok tunggal yang ditumpu sendi dan rol pada ujung-ujungnya (Hariandja, 1996: 63). Tumpuan rol lazimnya dipasang sedemikian hingga arah gerakan rol berimpit dengan sumbu aksial balok, namun rol dapat juga dipasang dengan kemiringan (*skew-support*) yang akhirnya menimbulkan aksi normal pada sumbu aksial balok.



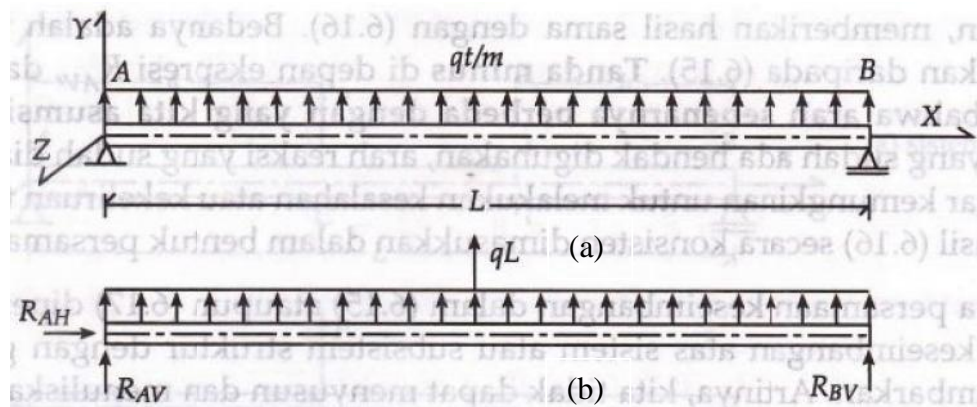
Gambar 2.10 Sistem Balok Sederhana

(Sumber: Hariandja, 1996: 62)

Akibat beban luar yang bekerja di atas balok, umumnya timbul reaksi perletakan sendi dan rol. Gambar 2.10(b) menggambarkan contoh reaksi perletakan sendi dan rol yang dimaksud. Pada ujung A , sendi mengerahkan dua reaksi, yaitu R_{AH} dan R_{AV} , dan satu reaksi vertikal R_{BV} di ujung B oleh rol.

Dalam hal perhitungan reaksi tumpuan balok, apabila semua gaya-gaya bekerja dalam satu bidang, maka tiga persamaan keseimbangan statika harus tersedia yaitu, $\Sigma F_x = 0$, $\Sigma F_y = 0$, dan $\Sigma M_z = 0$. Untuk balok lurus dalam kedudukannya yang horizontal, maka sumbu x akan diambil sebagai arah yang horizontal, sumbu y untuk arah yang vertikal dan sumbu z yang tegak lurus terhadap bidang kertas (Popov, 1989: 107).

Pada balok sederhana dengan beban merata (seragam) beban seperti ini dapat digunakan untuk mewakili beban hidup, lantai, atau bobot balok sendiri (Hariandja, 1996: 67). Kasus ini diberikan dalam Gambar 2.11(a). Badan bebas balok total ditunjukkan dalam Gambar 2.11(b) berikut dengan reaksi perletakan. Sebelum menyusun persamaan keseimbangan badan bebas balok, dapat diketahui bahwa beban terdistribusi dapat diwakili oleh beban terpusat sebesar luas bidang yang dicakup oleh ordinat beban dan bekerja pada titik berat bidang. Beban merata di atas keseluruhan balok pada Gambar 2.11(b) bernilai total qL dan bekerja di tengah bentang L .



Gambar 2.11 Balok Sederhana dan Beban Merata

(Sumber: Hariandja, 1996: 68)

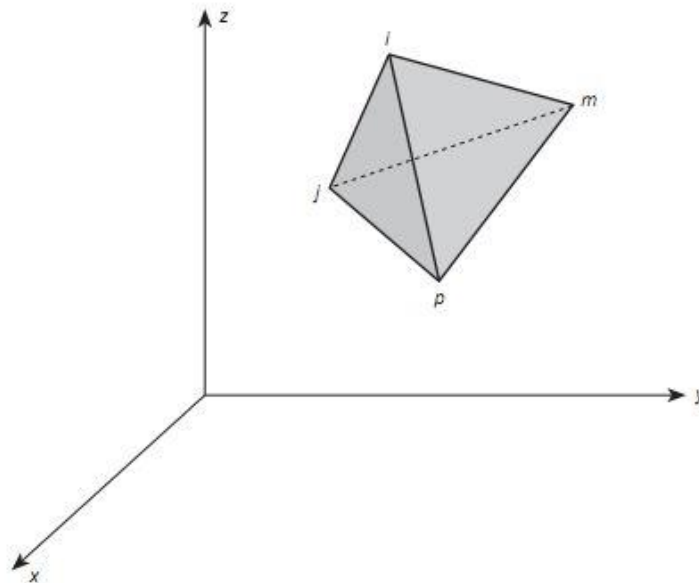
6. Teori Umum Metode Elemen Hingga

a. Konsep Dasar Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang dapat digunakan untuk mencari solusi akurat pada permasalahan teknik yang kompleks (Rao, 2005).. Konsep dasar dari metode ini adalah diskritisasi yaitu membagi benda menjadi bentuk-bentuk yang lebih kecil di mana masih mempunyai sifat yang sama seperti benda penyusunnya. Metode ini banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan problem matematis dari suatu gejala fisis. Tipe masalah teknis dan matematis fisis yang dapat diselesaikan dengan metode elemen hingga terbagi dalam dua kelompok, yaitu kelompok analisa struktur dan kelompok masalah-masalah non struktur. Tipe-tipe permasalahan struktur meliputi analisa tegangan (*stress*), *buckling*, dan getaran, sedang permasalahan non struktur meliputi perpindahan panas dan massa, mekanika fluida, dan distribusi dari potensial listrik dan potensial magnet.

b. Tipe Elemen

Dalam metode elemen hingga, suatu struktur benda atau daerah yang akan dianalisis dilakukan dengan cara membagi struktur menjadi sejumlah besar bentuk yang dinyatakan sebagai elemen. Elemen dapat berupa garis lurus, segitiga, segiempat, tetrahedral dan quadrilateral. Diskritisasi akan menghasilkan sejumlah elemen dan simpul. Simpul diberi nomor demikian pula elemen sehingga diperoleh informasi elemen. Dalam penelitian ini elemen yang digunakan adalah elemen tetrahedral. Elemen tetrahedral yang digunakan mempunyai 4 node. Digunakan elemen tetrahedral dalam penelitian ini dikarenakan elemen ini mempunyai geometri yang sederhana untuk elemen tiga dimensi dan tidak ada integrasi numerik yang diperlukan untuk membentuk persamaan elemen, sehingga waktu perhitungan lebih efisien. Wang, dkk, (2004) dalam penelitiannya *back to elements tetrahedra vs hexahedra* yang membandingkan keuntungan dan kerugian penggunaan elemen tetrahedral dengan elemen hexahedral dalam analisis metode elemen hingga menyimpulkan bahwa elemen hexahedral membutuhkan perhitungan yang lebih mahal.



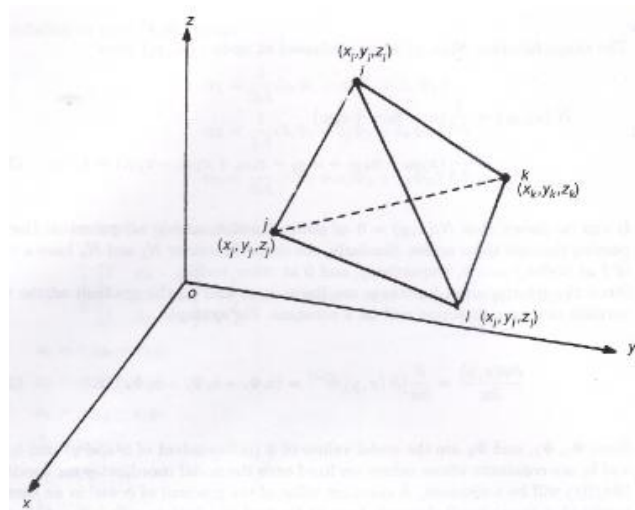
Gambar 2.12 Elemen Tetrahedral

(Sumber: Heinkiewicz dan Taylor, 2000: 128)

c. Fungsi Interpolasi

Fungsi interpolasi digunakan untuk mencari besaran-besaran yang belum diketahui seperti tegangan atau regangan pada elemen serta mewakili sifat solusi dalam sebuah elemen. Fungsi interpolasi jenis polinomial adalah yang paling banyak digunakan karena lebih mudah untuk memformulasikan dan menghitung persamaan elemen hingga, khususnya untuk perhitungan diferensial dan integral.

Elemen hingga dapat dikategorikan dalam tiga kategori elemen, yaitu elemen *simplex*, elemen *complex* dan elemen *multiplex*. Penggunaan elemen ini bergantung pada geometri dan ordo polinomial yang digunakan pada fungsi interpolasi, sehingga perhitungan dapat menjadi lebih efisien.



Gambar 2.13 Elemen Tetrahedral 4 Node

Elemen *simplex* digunakan untuk polinomial dengan suku konstan dan linier. Fungsi polinomial untuk elemen *simplex* sebagai berikut:

$$\text{Satu dimensi} \quad \phi(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x \quad (2-13)$$

$$\text{Dua Dimensi} \quad \phi(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (2-14)$$

$$\text{Tiga Dimensi} \quad \phi(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \quad (2-15)$$

Di mana $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ adalah koefisien polinomial.

Elemen tetrahedral merupakan elemen *simplex* tiga dimensi, dimana mempunyai empat node, maka fungsi interpolasi elemen *simplex* tiga dimensi dapat digunakan untuk elemen tetrahedral. Pada Gambar 2.11 menunjukkan elemen tetrahedral yang memiliki 4 node yang ditandai dengan huruf i, j, k, l. Nilai untuk variabel medan dinotasikan $\Phi_i, \Phi_j, \Phi_k, \Phi_l$, dan koordinat global dinotasikan $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j), (x_k, y_k, z_k)$, dan (x_l, y_l, z_l) pada node i,j,k,l. Oleh karena kondisi nodal $\phi = \Phi_i$ pada (x_i, y_i, z_i) , $\phi = \Phi_j$ pada (x_j, y_j, z_j) , $\phi = \Phi_k$ pada (x_k, y_k, z_k) , dan $\phi = \Phi_l$ pada (x_l, y_l, z_l) , maka maka sistem persamaannya dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned}
\Phi_i &= \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i + \alpha_4 z_i \\
\Phi_j &= \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j + \alpha_4 z_j \\
\Phi_k &= \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k + \alpha_4 z_k \\
\Phi_l &= \alpha_1 + \alpha_2 x_l + \alpha_3 y_l + \alpha_4 z_l
\end{aligned} \tag{2-16}$$

Persamaan untuk koefisien $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= \frac{1}{6V} (a_i \Phi_i + a_j \Phi_j + a_k \Phi_k + a_l \Phi_l) \\
\alpha_2 &= \frac{1}{6V} (b_i \Phi_i + b_j \Phi_j + b_k \Phi_k + b_l \Phi_l) \\
\alpha_3 &= \frac{1}{6V} (c_i \Phi_i + c_j \Phi_j + c_k \Phi_k + c_l \Phi_l) \\
\alpha_4 &= \frac{1}{6V} (d_i \Phi_i + d_j \Phi_j + d_k \Phi_k + d_l \Phi_l)
\end{aligned} \tag{2-17}$$

Di mana V adalah volume tetrahedron $i j k l$ yang ditulis dengan persamaan:

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \tag{2-18}$$

$$a_i = \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \tag{2-19}$$

$$b_i = - \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{vmatrix} \tag{2-20}$$

$$c_i = - \begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_l & 1 & z_l \end{vmatrix} \tag{2-21}$$

$$d_i = - \begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_l & 1 & z_l \end{vmatrix} \tag{2-22}$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2-17) kedalam Persamaan (2-15) maka diperoleh:

$$\phi(x, y, z) = N_i(x, y, z)\Phi_i + N_j(x, y, z)\Phi_j + N_k(x, y, z)\Phi_k + N_l(x, y, z)\Phi_l = [N(x, y, z)] \vec{\Phi}^{(e)} \quad (2-23)$$

$$[N(x, y, z)] = [N_i(x, y, z) \quad N_j(x, y, z) \quad N_k(x, y, z) \quad N_l(x, y, z)]$$

$$N_i(x, y, z) = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z)$$

$$N_j(x, y, z) = \frac{1}{6V} (a_j + b_j x + c_j y + d_j z) \quad (2-24)$$

$$N_k(x, y, z) = \frac{1}{6V} (a_k + b_k x + c_k y + d_k z)$$

$$N_l(x, y, z) = \frac{1}{6V} (a_l + b_l x + c_l y + d_l z)$$

$$\vec{\Phi}^{(e)} = \begin{Bmatrix} \Phi_i \\ \Phi_j \\ \Phi_k \\ \Phi_l \end{Bmatrix} \quad (2-25)$$

d. Matriks Kekakuan

Pemodelan menggunakan metode elemen hingga pada struktur mekanik memerlukan persamaan yang menghubungkan beban atau gaya yang diberikan pada elemen dengan perpindahan berupa translasi pada nodal tersebut. Persamaan tersebut dapat diberikan dalam persamaan berikut:

$$[K] \vec{\Phi} = \vec{f} \quad (2-26)$$

$\vec{\Phi}$ = vektor perpindahan nodal

\vec{f} = vektor gaya pada nodal

Menurut Rao (2005: 410) persamaan matriks kekakuan global untuk elemen tetrahedral dirumuskan sebagai berikut:

$$[K^e] = V^{(e)}[B]^T[D][B] \quad (2-26)$$

Di mana :

$$[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & b_j & 0 & 0 & b_k & 0 & 0 & b_l & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & c_j & 0 & 0 & c_k & 0 & 0 & c_l & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & d_l \\ c_i & b_i & 0 & c_j & b_j & 0 & c_k & b_k & 0 & c_l & b_l & 0 \\ 0 & d_i & c_i & 0 & d_j & c_j & 0 & d_k & c_k & 0 & d_l & c_l \\ d_i & 0 & b_i & d_j & 0 & b_j & d_k & 0 & b_k & d_l & 0 & b_l \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

$[B]$ = matriks hubungan regangan dan perpindahan

$[D]$ = matriks elastisitas

$V^{(e)}$ = volume elemen

E = modulus elastisitas

ν = *poison ratio*

e. Hubungan Tegangan Regangan

Penggunaan persamaan hubungan tegangan regangan dalam metode elemen hingga ada beberapa macam, tergantung kasus dimensi elemen yang dianalisis.

Untuk kasus analisis elemen tiga dimensi diberikan persamaan berikut:

$$\vec{\sigma} = [D]\vec{\epsilon} \quad (2-29)$$

Di mana :

$$\vec{f} = \text{vektor tegangan} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} \quad (2-30)$$

$$\vec{e} = \text{vektor regangan} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{pmatrix} = [B] \vec{u}(e) \quad (2-31)$$

$6 \times 12 \quad 12 \times 1$

f. Langkah Langkah Metode Elemen Hingga

Menurut Rao (2005 : 10) secara umum, proses pemodelan elemen hingga yang lengkap yang terdiri dari enam tahap dasar :

1) Diskritasi

Diskritasi yaitu membagi struktur kedalam subdivisi elemen-elemen. Diskritasi ini juga termasuk menentukan jenis, ukuran dan jumlah elemen yang digunakan.

2) Pemilihan model perpindahan atau interpolasi yang sesuai.

Pemilihan model interpolasi yang hendak digunakan harus memudahkan langkah perhitungan, tetapi mampu memenuhi konvergensi kebutuhan tertentu. Umumnya model interpolasi yang digunakan adalah bentuk polinomial.

3) Menurunkan matriks kekakuan elemen dan vektor gaya

Dari model interpolasi yang diasumsikan, matriks kekakuan dan vektor gaya elemen e diturunkan menggunakan hukum kondisi kesetimbangan atau hukum variasi yang sesuai.

- 4) Menggabungkan persamaan persamaan elemen untuk memperoleh persamaan kesetimbangan keseluruhan.

Oleh karena struktur terdiri dari beberapa elemen hingga, matriks kekakuan dan vektor gaya masing-masing elemen digabungkan dalam sifat yang sesuai dan persamaan kesetimbangan keseluruhan harus diformulasikan sebagai

$$[K] \vec{U} = \vec{F} \quad (2-32)$$

Di mana $[K]$ adalah gabungan matriks kekakuan, \vec{U} adalah vektor perpindahan nodal dan \vec{F} adalah vektor gaya pada nodal untuk struktur yang lengkap.

- 5) Solusi untuk perpindahan nodal yang tidak diketahui

Persamaan kesetimbangan keseluruhan harus dimodifikasi untuk perhitungan masalah kondisi batas. Setelah memasukkan kondisi batas, persamaan kesetimbangan dapat dituliskan:

$$[K] \vec{U} = \vec{F}$$

- 6) Perhitungan tegangan dan regangan elemen

Dari besar perpindahan nodal yang diketahui, jika diperlukan, tegangan dan regangan elemen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang diperlukan struktur mekanik. Terminologi tersebut digunakan dalam enam langkah sebelumnya yang harus dimodifikasi digunakan untuk bidang lain.

7. Software ANSYS

Penggunaan perangkat lunak (*software*) analisis elemen hingga di industri saat ini sangat beragam sesuai dengan bidang disiplin ilmu masing-masing, salah satunya juga di bidang *mechanical engineering*. Perangkat lunak yang sering digunakan untuk permasalahan seperti ini salah satunya adalah CAD dan CAE. CAD (*Computer Aided Design*) adalah perangkat lunak yang digunakan untuk perancangan teknik yang cepat dan akurat dan CAE (*Computer Aided Engineering*) adalah perangkat lunak yang digunakan untuk proses analisis dan simulasi kekuatan dan kinerja desain yang mudah dan efektif. Penggunaan perangkat lunak analisis elemen hingga sangat berguna untuk permasalahan geometri, pembebanan, dan sifat-sifat bahan (*material properties*) yang rumit di mana solusi analisis eksak sangat sulit didapatkan. Perangkat lunak analisis elemen hingga kebanyakan digunakan untuk analisis struktur, termal, dan fluida tetapi secara luas dapat diterapkan untuk jenis simulasi dan analisis yang lain (Ghodake dan Patil, 2013: 68).

a. ANSYS

ANSYS adalah salah satu perangkat lunak yang sangat berguna dan memiliki banyak fungsi sebagai perangkat analisis dan dapat digunakan di berbagai disiplin ilmu *engineering*. ANSYS juga banyak digunakan untuk mensimulasikan berbagai disiplin ilmu fisika baik statis maupun dinamis, analisis struktur (*linier* dan *nonlinier*), perpindahan panas, dinamika fluida, dan elektromagnetik untuk para *engineer* (Nakasone, dkk, 2006: 37).

b. Cara Kerja ANSYS

ANSYS bekerja menggunakan metode elemen hingga. Analisis yang dilakukan pada objek dengan dilakukan diskritisasi atau membagi objek menjadi bagian-bagian yang lebih kecil (elemen) dalam jumlah terbatas elemen hingga. Hasil dari analisis ANSYS ini berupa hasil pendekatan dengan menggunakan analisis numerik di mana tingkat ketelitiannya sangat bergantung pada cara memecah objek (model) dan menggabungkannya. Menurut Madenci dan Guven (2006: 26) tahapan analisis elemen hingga dengan menggunakan ANSYS adalah melalui 3 tahapan sebagai berikut:

1) *Model Generation*

- (a) Model Penyederhanaan / Idealisasi
- (b) Menentukan Bahan / Sifat Material
- (c) Menghasilkan Model Elemen Hingga

2) Solusi

- (a) Tentukan Kondisi Batas
- (b) Menjalankan analisis untuk mendapatkan solusi

3) Hasil Ulasan

- (a) Plot / daftar hasil
- (b) Pemeriksaan Validitas

8. *Software* CATIA

CATIA (*Computer Aided Three Dimensional Interactive Application*) adalah *software* yang digunakan untuk proses desain (CAD), rekayasa (CAE) maupun manufaktur (CAM), yang memungkinkan proses-proses pemodelan seluruhnya dilakukan secara digital sehingga tidak diperlukan lagi gambar manual

maupun model fisik (Akbar, 2006). *Software* ini juga handal dalam memenuhi kriteria artistik, kelayakan mekanis, kenyamanan (ergonomis) dan juga kelayakan secara bisnis dari suatu desain produk.

Sejarah CATIA dimulai saat *Dassault Systemes* mengembangkannya untuk *Dassault Aviation* dan mulai digunakan secara komersial sejak tahun 1981. *Software* ini dipasarkan oleh IBM yang sebelumnya telah memiliki solusi sejenis yang disebut CADAM yang juga digunakan antara lain di IPTN, PAL, National Gobel dan INKA. Pada tahun 1982 CADAM digabungkan dengan CATIA. Saat ini setidaknya CATIA digunakan 80.000 perusahaan di 80 negara dengan proporsi industriomotif sebesar 33%, *aerospace* (16%), alat elektronik dan konsumen (13%), fabrikasi dan *assembly* (34%) serta pabrik dan kapal (4%).

Selain digunakan untuk perusahaan-perusahaan besar, CATIA juga sangat terbuka untuk dimanfaatkan oleh UKM (usaha kecil dan menengah) dalam membuat inovasi-inovasi baru. Hal ini sangat terbantu dengan ketersediaan *software* tersebut dalam paket yang *scalable* bagi industri besar maupun kecil.

B. Kajian Hasil Penelitian Terdahulu

Tinjauan penelitian terdahulu yang digunakan sebagai literatur dalam penelitian ini seluruhnya adalah yang berhubungan dengan analisis pegas daun menggunakan metode elemen hingga.

- 1) Nadargi, dkk, (2012) dalam penelitiannya *Evaluation Of Leaf Spring Replacing With Composite Leaf Spring*, meneliti penggunaan material komposit fiberglass sebagai pengganti material baja pegas daun dengan

spesifikasi desain yang sama. Tujuan penelitiannya adalah untuk mengurangi berat dan biaya fabrikasi pegas daun mono komposit. Material komposit yang digunakan adalah E-glass/Epoxy, Graphite/Epoxy dan Carbon/Epoxy. Dibandingkan dengan pegas daun dari material baja, pegas daun *mono* dari bahan komposit selain menghasilkan tegangan yang lebih rendah juga mengurangi berat pegas daun menjadi 85%. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa pegas daun dari material komposit lebih ringan dan lebih ekonomis.

- 2) Dhosi, dkk, dalam penelitiannya *Analysis and Modification of Leaf Spring of Tractor Trailer Using Analytical and Finite Element Method*, meneliti hasil modifikasi penggunaan jumlah pegas daun untuk optimalisasi berat serta biaya dengan batasan tegangan yang dihasilkan. Hasil penelitian ini menyebutkan bahwa dengan mengurangi jumlah pegas daun dari 17 menjadi 13, akan lebih mengurangi berat sebesar 6 kg dan penghematan biaya sebesar 20 %.
- 3) Jadon dan Kumar (2014) dalam penelitiannya *Static Analysis and Modification of Multi Leaf Spring using CATIA*, meneliti tentang tegangan dan defleksi yang terjadi pada modifikasi pegas daun di bawah beban statis. Modifikasi yang dilakukan berupa modifikasi ketebalan dan lebar pegas daun, yaitu dibuat menjadi lebih tebal namun lebar dikurangi dari ukuran aslinya. Jumlah pegas daun yang digunakan sebanyak 10 lembar pegas daun. Material yang digunakan dalam penelitian ini dibuat sama, yaitu *structural steel*. Dari hasil penelitian ini disimpulkan bahwa tegangan *von*

mises maksimum pegas daun hasil modifikasi lebih kecil dibandingkan tegangan *von mises* maksimum desain aslinya yaitu sebesar 10,4 MPa untuk desain modifikasi dan 21,1 MPa untuk desain original sedangkan untuk defleksi, desain pegas daun yang dimodifikasi menghasilkan defleksi yang lebih kecil daripada desain aslinya yaitu sebesar 0,0159 mm, sementara defleksi untuk desain asli sebesar 0,141 mm. Peneliti juga menyimpulkan bahwa pegas daun dengan dimensi tebal yang lebih besar tetapi lebar lebih kecil lebih aman dibandingkan dengan pegas daun dengan dimensi tebal lebih kecil tetapi lebar lebih besar.

C. Kerangka Berpikir

Dari literatur hasil penelitian terdahulu, peneliti menemukan formulasi permasalahan baru yang dijelaskan sebagai berikut.

Dalam penelitian Nadargi, dkk, (2012) yang meneliti penggunaan material komposit fiberglas sebagai pengganti material baja untuk pegas daun, hanya memodifikasi material yang digunakan, tetapi belum melakukan modifikasi berupa jumlah pegas dan variasi ukuran tebal dan lebar pegas daun.

Dalam penelitian Dhosi, dkk, penelitian yang dilakukan hanya sebatas pengurangan jumlah pegas daun, tetapi belum melakukan modifikasi berupa penggunaan material yang berbeda dan variasi dimensi tebal dan lebar.

Dalam penelitian Jadon dan Kumar, (2014), penelitian yang dilakukan hanya dengan memodifikasi ukuran tebal dan lebar pegas daun, tetapi belum melakukan modifikasi penggunaan material dan jumlah pegas daun.

Dari permasalahan baru ini, peneliti memutuskan untuk mengidentifikasi parameter desain kritis dari tinjauan literatur penelitian terdahulu. Dalam penelitian ini, peneliti akan mendesain ulang pegas daun untuk tujuan optimasi. Hal ini dimulai dengan desain spesifikasi pegas daun yang ada, selanjutnya akan didesain pegas daun dengan variasi material, jumlah, tebal dan lebar pegas daun, namun dengan luas penampang yang sama, menggunakan bantuan *software* CATIA (*Computer Aided Three Dimensional Interactive Application*). Untuk selanjutnya, akan dianalisis tegangan *von mises* dan faktor keamanan desain pegas daun tersebut menggunakan bantuan *software* ANSYS (*Analysis System*).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Pendekatan

Pada penelitian ini digunakan jenis pendekatan eksperimen dengan disain *one shot case study* dengan menggunakan bantuan *software* yang dapat mensimulasikan pengujian analisis tegangan pada pegas daun yang dilakukan dengan permodelan. Dalam penelitian ini produk yang diteliti adalah pegas daun yang digunakan pada suspensi belakang mobil listrik angkutan massal.

Pada pendekatan eksperimen ini sengaja dibangkitkan timbulnya suatu kejadian atau keadaan, kemudian diteliti bagaimana akibatnya. Pembangkitan kejadian atau pengkondisian untuk analisis tegangan *Von Mises* dalam penelitian ini berupa penggunaan material, jumlah, tebal dan lebar yang berbeda pada pegas daun. Geometri pegas daun mobil listrik yang dianalisis mengacu pada pengukuran manual/langsung pada struktur yang hendak dianalisis. Geometri tersebut selanjutnya dipelajari untuk didesain ulang menggunakan *software* CATIA. Permodelan pegas daun yang telah dibuat menjadi tiga dimensi kemudian siap untuk dianalisis.

Proses analisis dijalankan dengan menggunakan bantuan *software* ANSYS dan dapat menampilkan *output* sesuai jenis analisis yang dilakukan. Setelah *output* diketahui, kemudian dapat diketahui bagaimana dan seberapa besar tegangan yang terjadi pada struktur pegas daun.

B. Alat dan Bahan

1. Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Alat ukur Mistar Panjang, Jangka Sorong, Meteran yang digunakan untuk mengukur panjang, lebar serta tebal pegas daun.

- b. Perangkat komputer dengan spesifikasi :

<i>Type Processor</i>	: <i>AMD E-300 APU with Radeon(tm) HD Graphics (2 CPUs), ~1,3 GHz</i>
<i>Memory</i>	: <i>2048 MB RAM</i>
<i>DirectX Version</i>	: <i>DirectX 11</i>
<i>VGA</i>	: <i>AMD Radeon HD 6310 Graphics</i>
<i>Memory VGA</i>	: <i>938 MB</i>
<i>Display Mode</i>	: <i>1366 x 768 (32 bit) (60Hz)</i>

- c. *Software* CATIA P3 V5R19 untuk permodelan pegas daun.

- d. *Software* ANSYS 14.0 untuk pengujian pembebanan.

2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Pegas daun mobil listrik
- b. Spesifikasi kendaraan yang akan dibuat
- c. Asumsi pembebanan yang akan terjadi pada kendaraan

C. Spesifikasi dan Desain

1. Spesifikasi

Data spesifikasi pegas daun dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Perbandingan Spesifikasi Desain

Parameter	Desain						
	Ori.	M.1	M.2	M.3	M.4	M.5	M.6
<i>Camber</i> (mm)	120	120	120	120	120	120	120
Jarak <i>Span</i> (mm)	970	970	970	970	970	970	970
Ketebalan (mm)	6	10	10	10	12	12	12
Lebar (mm)	50	50	50	50	45	45	45
Radius <i>eye</i> depan (mm)	19	19	19	19	19	19	19
Radius <i>eye</i> belakang (mm)	24	24	24	24	24	24	24
Jumlah daun <i>full length</i>	2	2	2	2	2	2	2
Jumlah daun <i>graduated</i>	4	2	1	-	2	1	-
<i>Material</i>	AISI 15B62H Epoxy	E- Glass Epoxy	E- Glass Epoxy	E- Glass Epoxy	E- Glass Epoxy	E- Glass Epoxy	E- Glass Epoxy

(Sumber: Jadon dan Kumar 2014)

Keterangan:

Ori : desain original

M.1 : desain modifikasi 1

M.2 : desain modifikasi 2

M.3 : desain modifikasi 3

M.4 : desain modifikasi 4

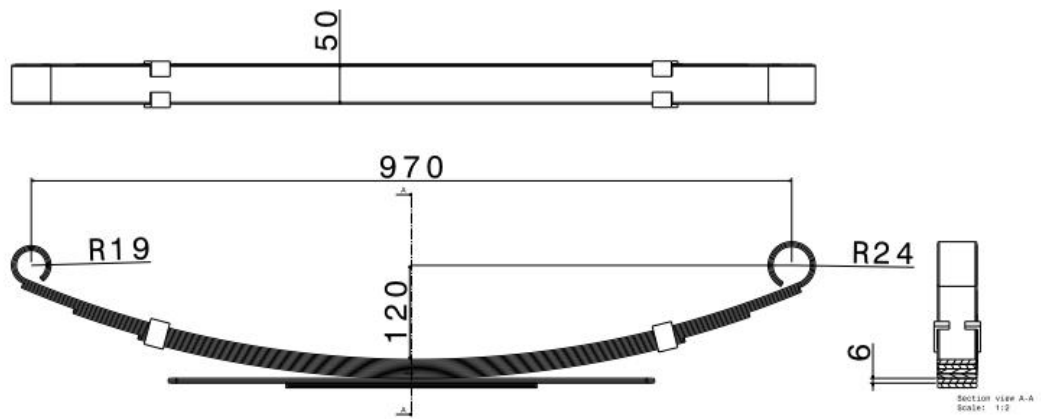
M.5 : desain modifikasi 5

M.6 : desain modifikasi 6

2. Desain

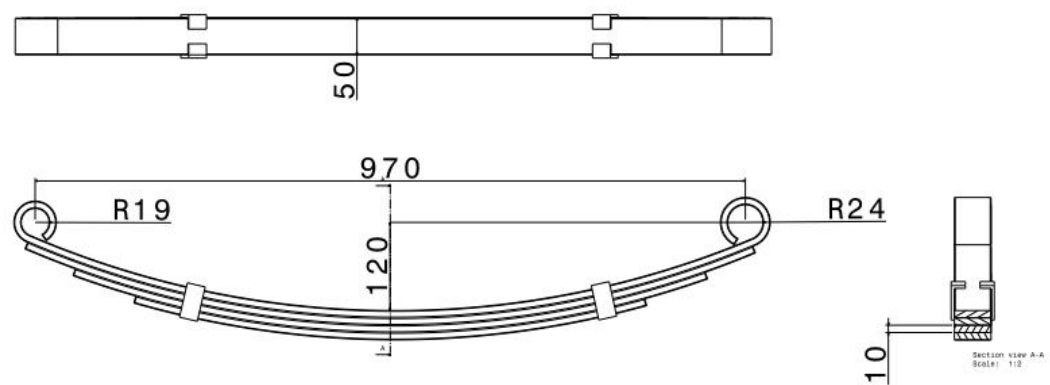
Desain pegas daun seperti data pada tabel perbandingan spesifikasi desain pegas daun sebagai berikut:

- 1) Desain Original



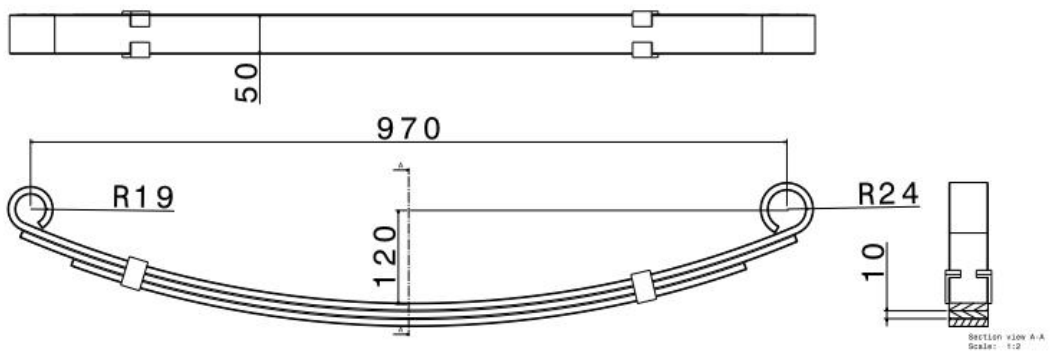
Gambar 3.1 Desain Original

2) Desain modifikasi 1



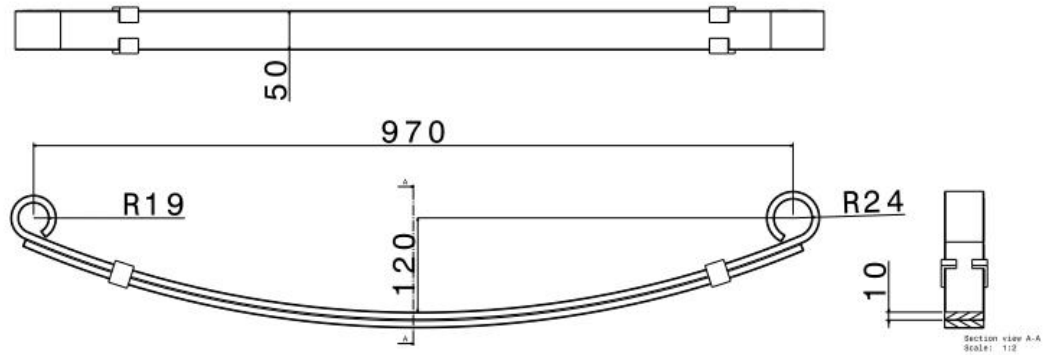
Gambar 3.2 Desain Modifikasi 1

3) Desain modifikasi tipe 2



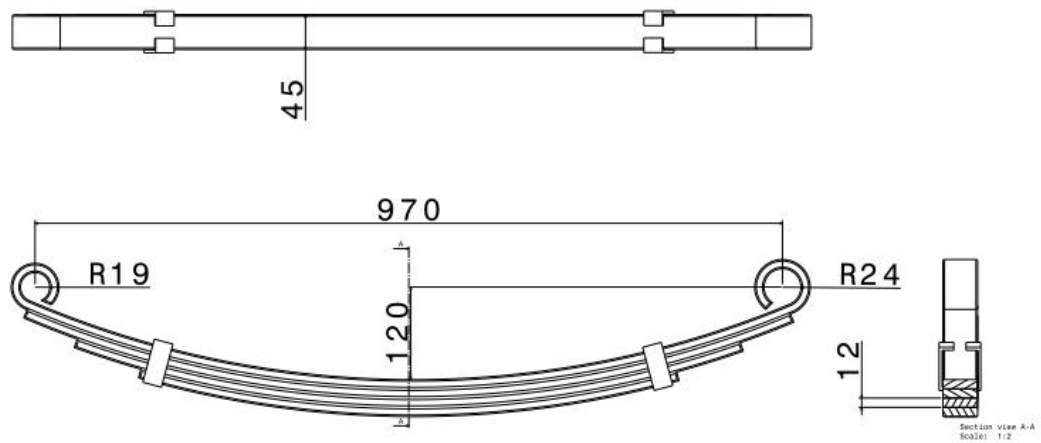
Gambar 3.3 Desain Modifikasi Tipe 2

4) Desain modifikasi 3



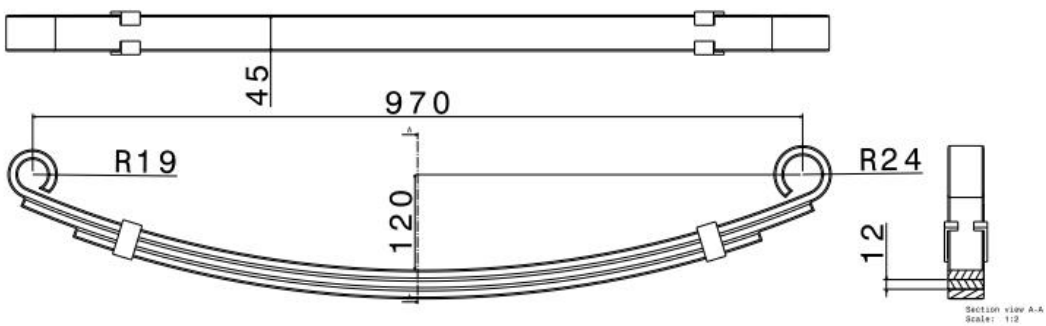
Gambar 3.4 Desain Modifikasi 3

5) Desain modifikasi 4



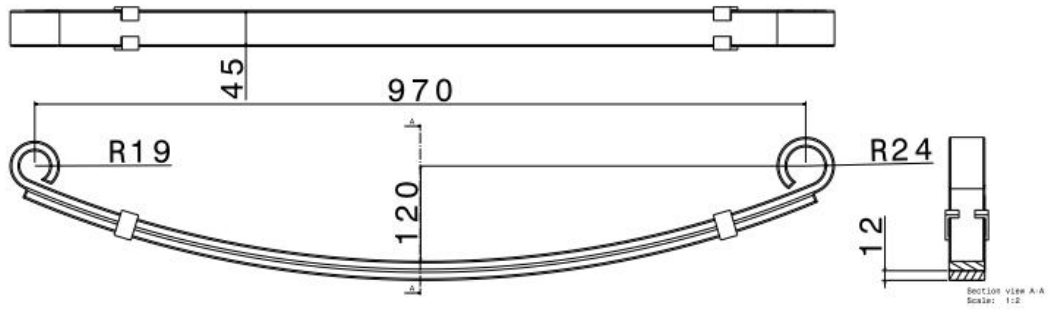
Gambar 3.5 Desain Modifikasi 4

6) Desain modifikasi 5



Gambar 3.6 Desain Modifikasi 5

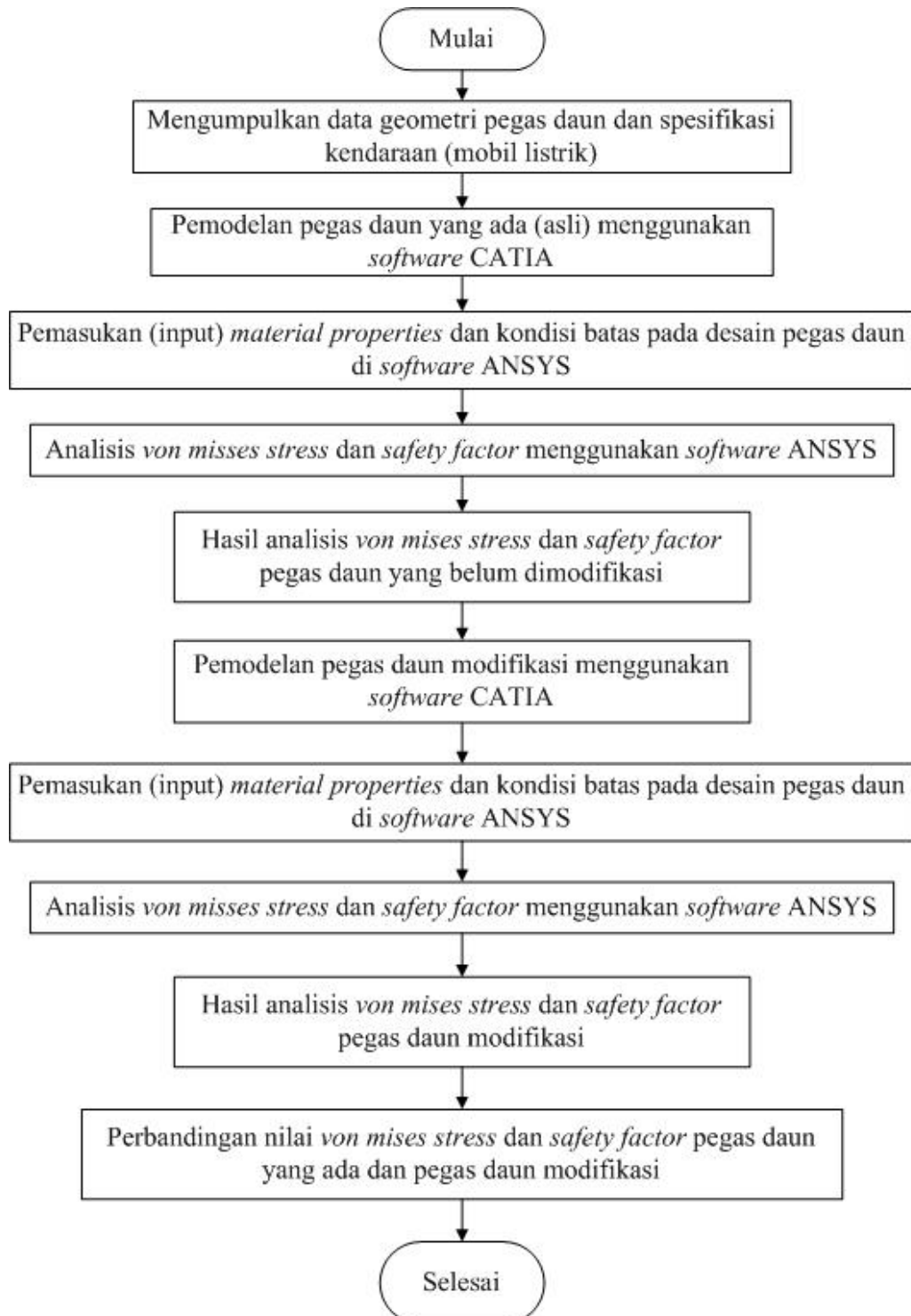
7) Desain modifikasi 6



Gambar 3.7 Desain Modifikasi 6

D. Diagram Alur Penelitian

Agar penelitian berjalan sistematis maka digunakan alur penelitian. Alur penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat seperti diagram alur berikut.



Alur penelitian analisis kekuatan pegas daun mobil listrik angkutan massal menggunakan metode elemen hingga ini dari mulai hingga selesai adalah sebagai berikut:

1. Setelah penelitian dimulai maka dilakukan pengumpulan data geometri pegas daun dan spesifikasi kendaraan serta kelengkapan data pendukung untuk analisis tegangan.
2. Langkah selanjutnya setelah didapatkan ukuran geometri pegas daun, kemudian dilakukan proses permodelan pegas daun yang diteliti menggunakan bantuan *software* CATIA.
3. Langkah berikutnya yaitu dilakukan penginputan *material properties* dan kondisi batas pada desain pegas daun menggunakan bantuan *software* ANSYS.
4. Langkah selanjutnya dilakukan proses analisis *von mises stress* dan *safety factor*
5. Dari hasil analisis didapatkan hasil analisis *von mises stress* dan *safety factor*.
6. Langkah selanjutnya yaitu permodelan pegas daun modifikasi menggunakan *software* CATIA.
7. Kemudian dilakukan penginputan *material properties* dan kondisi batas pada desain pegas daun modifikasi pada *software* ANSYS.
8. Selanjutnya dilakukan proses analisis *von mises stress* dan *safety factor* menggunakan *software* ANSYS.
9. Didapatkan hasil analisis *von mises stress* dan *safety factor* pada pegas modifikasi.

10. Setelah didapatkan data hasil analisis *stress* dan *safety factor* pada masing-masing desain pegas daun, kemudian dilakukan perbandingan nilai *von mises stress* dan *safety factor*.

E. Prosedur Cara Pelaksanaan Penelitian

Prosedur dalam penelitian ini terdiri dari 5 langkah yaitu:

1. Permodelan

Pada tahap ini dilakukan pembuatan model yang didasarkan pada pengamatan dan pengukuran manual/langsung pada struktur pegas daun mobil listrik angkutan massal yang diteliti. Langkah-langkah dalam permodelan sebagai berikut:

- a. Melakukan pengamatan dan pengukuran langsung pada pegas daun yang sedang diteliti.
- b. Pengambilan foto pegas daun sebagai acuan dalam permodelan dan sebagai bahan dokumentasi.
- c. Penggambaran geometri pegas daun sesuai foto dan data yang telah diperoleh dari pengukuran.
- d. Permodelan atau mendesain gambar pegas daun mobil listrik dalam bentuk tiga dimensi menggunakan CATIA.

2. Pemasukan Data Material

Pemasukan data material di ANSYS dapat diakses melalui menu *Engineering Data*. Data untuk baja yang digunakan dalam pembuatan pegas daun mobil listrik diperoleh dari hasil observasi dan pengujian pada spesimen material pegas daun yang diteliti.

3. Pengasumsian

Asumsi digunakan untuk memudahkan dalam melakukan analisis. Adapun beberapa asumsi yang diperlukan dalam analisis tegangan adalah:

- a. Beban kelengkapan mobil listrik (bodi, motor, baterai, dan lain-lain).
- b. Beban maksimum yang diterima pegas daun.

4. Pengujian

Pengujian pegas daun dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS. Pengujian ini dilakukan pada desain pegas daun mobil listrik angkutan massal yang telah dibuat menggunakan *software* CATIA.

5. Interpretasi Hasil

Hasil (*output*) analisis berupa data distribusi tegangan *von mises* dan *safety factor* yang ditampilkan dalam kontur warna pada geometri pegas daun serta angka-angka dan grafik yang menunjukkan besarnya tegangan dan *safety factor* yang terjadi.

F. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam analisis tegangan *von mises* pegas daun mobil listrik angkutan massal menggunakan metode elemen hingga ini adalah penggunaan jenis material, jumlah, tebal dan lebar pegas daun.

G. Teknik Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data yang dilakukan dalam penelitian ini adalah metode tes melalui pengujian dan simulasi menggunakan perangkat lunak ANSYS. Pengambilan data didasarkan pada hasil analisis *von mises stress* dan *safety factor* menggunakan *software* ANSYS. Metode eksperimen sering

digunakan dalam penelitian ilmu-ilmu eksakta dalam menyelidiki ada atau tidaknya hubungan sebab akibat serta berapa besar hubungan sebab akibat tersebut dengan cara memberikan perlakuan-perlakuan tertentu pada beberapa kelompok eksperimental dan menyediakan kontrol untuk perbandingan. Parameter yang dimasukkan dalam program ANSYS ini adalah berupa desain pegas daun, data *material properties*, geometri pegas daun serta asumsi pembebanan yang terjadi pada pegas daun.

H. Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang digunakan pada penelitian ini menggunakan teknik analisis deskriptif. Angka-angka yang ditampilkan dari hasil pengujian desain pegas daun mobil listrik angkutan massal kemudian dipaparkan dan dideskriptifkan. Data-data yang dianalisis adalah angka dan tabel yang diperoleh dari hasil pengujian *von mises stress* dan angka *safety factor* menggunakan *software* ANSYS.

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis tegangan *Von Mises* pegas daun mobil listrik angkutan massal menggunakan metode elemen hingga, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a. Dari hasil perbandingan karakteristik kekuatan pegas daun original terhadap pegas daun modifikasi 1, modifikasi 2 dan modifikasi 3 diperoleh hasil terbaik adalah pada pegas daun modifikasi 2.
- b. Dari hasil perbandingan karakteristik kekuatan pegas daun original terhadap pegas daun modifikasi 4, modifikasi 5 dan modifikasi 6 diperoleh hasil terbaik adalah pada pegas daun modifikasi 5.

B. Saran

Berdasarkan hasil analisis tegangan dan angka keamanan yang telah dilakukan, maka disarankan beberapa hal berikut untuk maksud meningkatkan hasil yang lebih efisien dan maksimal, baik dari segi material maupun kekuatan pegas.

- a. Untuk mengurangi atau meminimalkan tegangan yang terjadi pada pegas daun, dalam hal ini dapat dilakukan modifikasi dengan mengubah besar *camber*, *span* atau sudut pegas.
- b. Dalam upaya untuk meningkatkan efisiensi bahan. Hal ini dapat dilakukan dengan memvariasikan ketebalan dan lebar dari bagian tengah pegas daun hingga ujung-ujung pegas, pada pegas yang memiliki angka keamanan tinggi.

- c. Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan material komposit yang berbeda, misalnya komposit *carbon fiber epoxy* atau *graphite fiber epoxy* sebagai pembanding material *e-glass fiber epoxy*.
- d. Untuk tim dosen pengembang kendaraan mobil listrik Unnes dapat menjadikan desain pegas dalam penelitian ini sebagai referensi dalam rangka meningkatkan kualitas mobil listrik yang sedang dikembangkan, khususnya desain pegas daun sebagai pendukung sistem suspensi belakang mobil listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aher, V. K. dan P. M. Sonawane. 2012. Static and Fatigue Analysis of Multi Leaf Spring Used in Suspension System of LCV. *International Journal of Engineering Research and Applications*. Volume 2 Issue No.4 : 1786 – 1791.
- Alibaba.com. n.d. *11 Seat Electric Shuttle Bus LQY113B*. Online at http://langqing.en.alibaba.com/product/555746636-50125844/11_seats_electric_shuttle_bus_LQY113B.html [accessed 09/08/2014]
- Akbar, Azhar M. 2006. *Sekilas tentang software CATIA dan “CATIA UMS Training Center*. Online at <http://teknik.ums.ac.id/index.php?pilih=news&aksi=lihat&id=24> [accessed 12/06/2015]
- At Battery Company. 2014. *US Battery US125XC 6V Deep Cycle Golf Cart Battery*. Online at <http://www.atbatt.com/us-battery-us125xc-6v-deep-cycle-golf-cart-battery.asp> [accessed 24/06/2015]
- Bhandari, V.B. 1994. *Design of Machine Elements*. New Delhi: Tata McGraw-Hill
- Classes.mst. n.d. *Theories of Failure*. Online at <http://classes.mst.edu/civeng120/lessons/failure/theories/index.html> [accessed 9/07/2015]
- Departement of Homeland Security. 2010. *Passenger Weight and Inspected Vessel Stability Requirements Final Rule*. Online at <http://www.uscg.mil/hq/cgcvc/policy/pwivsr.pdf> [accessed 24/06/2015]
- Dhoshi, N.P., N.K. Ingole dan U.D. Gulhane. Analysis and Modification of Leaf Spring of Tractor Trailer Using Analytical and Finite Element Method. *International Journal of Modern Engineering Research*. Volume 1.
- Dictionary.reference.com. 2014. *Mass Transit*. n.d. Online at <http://dictionary.reference.com/browse/mass+transit> [accessed 18/07/2014]
- Efunda. 2014. *General Information on Carbon Steels*. Online at http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm [accessed 2/12/2014]

Efunda. 2014. *Properties of Carbon Steel AISI 15B62H*. Online at http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?ID=AISI_15B62B&prop=all&page_Title [accessed 2/12/2014]

Erjavec, Jack. 2010. *Automotive Technology*. Clifton Park: Delmar.

Ghodake, A. P. dan Patil K. N. 2013. Analysis of Steel and Composite Leaf Spring for Vehicle. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. Volume 5 No. 4: 68 – 76.

Hariandja, Binsar. 1996. *Statika Dalam Analisis Struktur Berbentuk Rangka*. Jakarta: Erlangga.

Hidayat, Taufiq. 2012. Analisa Kegagalan Pegas Daun (Leaf Spring) Pada Toyota Kijang Kapsul 7K-EI Tahun 2000. *Jurnal Simetris*. Volume 1. No. 1: 1 – 8.

Jadon, Jitender Kumar Singh dan Sanjeev Kumar. 2014. Static Analysis and Modification of Multi-Leaf Spring Using Catia V5. *International Journal of Engineering Research and technology*. Volume 3.

Kuzt, Myer. 2002. *Handbook of Materials Selection*. Ney York: John Wiley and Sons.

Lakshmi, B. Vijaya dan I. Satyanarayana. 2012. Static and Dynamic Analysis on Composite Leaf Spring in Heavy Vehicle. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*. Volume 2 No. 1 : 81.

Madane, Vyankatesh, Akshay Baviskar, Anil Gaikwad dan S.S. Sane. 2013. Design of Leaf Spring Rear Suspension for Rear Mounted Engine. *SAE International and Symposium on Internatonal Automotive Technology 2013*. No.0148: 1 – 8.

Madenci, Erdogan dan Ibrahim Guven. 2006. *The Finite Element Method and Application in Engineering using Ansys*.

Mithari, Ranjet, Amar Patil dan E. N. Aitavade . 2012. Analysis of Composite Leaf Spring by Using Analytical & FEA. *International Journal of Engineering Science and Technology*. Volume 4 No. 12: 4809 – 4814.

Mott, R. L. 2004. *Machine Elements in Mechanical Design* (4th Ed.). New Jersey: Pearson Education, Inc.

Mott, R. L. 2009. *Elemen-Elemen Mesin dalam Perancangan Mekanis*. Translated by Rines, Agus Unggul Santoso, Wibowo Kusbandono, Rusdi Sambada, I Gusti Ketut Puja, dan A. Teguh Siswantoro. Yogyakarta: ANDI.

- Nadargi, Yogesh G., Deepak R. Gaikwad dan Umesh D. Sulakhe. 2012. A Performance Evaluation Of Leaf Spring Replacing With Composite Leaf Spring. *International Journal Of Mechanical and Industrial Engineering*. Volume 2 No. 4: 65 – 68.
- Nakasone, Y., S. Yoshimoto dan T. A. Stolarski. 2006. *Engineering Analysis With ANSYS Software*. Jordan Hill: Elsevier Butterwrth-Heinemann.
- Patunkar, M.M. dan D. R. Dolas. 2013. Experimental Investigation and FEA of Mono Composite Leaf Spring Under the Static Load Condition. *International Journal of Mechanical Engineering & Computer Application*. Volume 1 No. 7: 130 – 139.
- Popov, Egor P. 1989. *Mekanika Teknik*. Translated by Tanisan, Zainul A. Jakarta: Erlangga.
- PT. Sukses Baja Semesta. n.d. *Plat Bordes*. Online at <http://suksesbajasemesta.com/?p=145> [accessed 10/08/2014]
- Ramakanth, U.S. dan K. Sowjanya. 2013. Design and Analysis of Automotive Multi Leaf Springs Using Composite Materials. *International Journal of Mechanical Production Engineering Research and Development*. Volume 3 No. 1 : 157.
- Rao, Singiresu S. 2005. *The Finite Element Method in Engineering*. United Kingdom: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Ravindra, Parkhe dan Sanjay Belkar. 2014. Performance Analysis of Carbon Fiber with Epoxy Resin Based Composite Leaf Spring. *International Journal of Current Engineering and Technology*. Volume 4 No. 2: 536 – 541.
- Regassa, Yohannes, R. Srinivasa dan Ratnam Uppala. 2013. Failure Analysis of Semi-elliptical Master Leaf Spring of Passenger Car Using Element Method. *Global Journal of Researches in Engineering Mechanical and Mechanics Engineering*. Volume 13 No. 2: 5.
- Rumah Belajar. 2012. Kriteria Kegagalan Statik. Online at <http://www.slideshare.net/rumahbelajar/bab-05-kriteria-kegagalan-1> [accessed 9/07/2015]
- Saini, Pankaj, Ashish Goel dan Dushyant Kumar. 2013. Design and Analysis of Composite Leaf Spring for Light Vehicle. *International Journal of Innovative in Science, Engineering and technology*. Volume 2.

- Shankar, Gulur Siddaramanna Shiva dan Sambagam Vijayarangan. 2006. Mono Composite Leaf Springs for Light Weight Vehicle Design, End Joint Analysis and Testing. *Material Science*. Vol 12 No. 3: 220 – 225.
- Shigley, J. E. dan L. D. Mitchel. 1984. *Perencanaan Teknik Mesin* Ed. 4 Jilid 1. Translated by Harahap, G. Jakarta: Erlangga.
- Steels. 2015. *AISI 15B62H Carbon Steel*. Online at <http://www.steelss.com/Carbon-steel/aisi-15b62h-carbon-steel.html> [accessed 2/9/2015].
- Sudarsono dan Yuspian Gunawan. 2012. Analisis Kekuatan Pegas Daun (Leaf Spring) pada Suzuki Carry 1.5 Mega Cargo. *Dinamika Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. Volume 3 No.2 : 251-259.
- Wang, Erke, Thomas Nelson, dan Rainer Rauch. 2004. Back to Elements Tetrahedra Vs Hexahedra. Online at <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2004-Int-ANSYS-Conf-9.PDF>. [accessed 9/07/1015]
- Widyatama, Monelis, Pramono dan Dony Hidayat Al Janan. 2013. Perancangan Rear Part Mobil Listrik Menggunakan Software 3D SIEMENS NX8. *Automotive Science and Education Journal*. Volume 2, No.1.
- Yede, Sarika S. dan M.J. Sheikh. Design and Modification of Leaf Spring by Finite Element Method. *IORD Journal of Science & Technology*. Volume 1.
- Zienkiewich O.C. dan R.L. Taylor. 2000. *The Finite Element Method* (5th Ed.). Volume 1: The Basis. Oxford: Butterworth – Heinemann.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Surat Tugas Pembimbing



**KEPUTUSAN
DEKAN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

Nomor: 47 / F2-UNNES / 2014

**Tentang
PENETAPAN DOSEN PEMBIMBING SKRIPSI/TUGAS AKHIR SEMESTER
GASAL/GENAP
TAHUN AKADEMIK 2014/2015**

- Menimbang** : Bahwa untuk memperlancar mahasiswa Jurusan/Prodi Teknik Mesin/Pend. Teknik Mesin Fakultas Teknik membuat Skripsi/Tugas Akhir, maka perlu menetapkan Dosen-dosen Jurusan/Prodi Teknik Mesin/Pend. Teknik Mesin Fakultas Teknik UNNES untuk menjadi pembimbing.
- Mengingat** : 1. Undang-undang No.20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional (Tambahan Lembaran Negara RI No.4301, penjelasan atas Lembaran Negara RI Tahun 2003, Nomor 78)
2. Peraturan Rektor No. 21 Tahun 2011 tentang Sistem Informasi Skripsi UNNES
3. SK. Rektor UNNES No. 164/O/2004 tentang Pedoman penyusunan Skripsi/Tugas Akhir Mahasiswa Strata Satu (S1) UNNES;
4. SK Rektor UNNES No.162/O/2004 tentang penyelenggaraan Pendidikan UNNES;
- Menimbang** : Usulan Ketua Jurusan/Prodi Teknik Mesin/Pend. Teknik Mesin Tanggal 2 Januari 2014

MEMUTUSKAN

Menetapkan :
PERTAMA :

Menunjuk dan menugaskan kepada:

Nama : Drs. Wirawan Sumbodo, M.T.
NIP : 196601051990021002
Pangkat/Golongan : IV/B
Jabatan Akademik : Lektor Kepala
Sebagai Pembimbing

Untuk membimbing mahasiswa penyusun skripsi/Tugas Akhir :

Nama : HASAN SYAIFUDDIN
NIM : 5201410037
Jurusan/Prodi : Teknik Mesin/Pend. Teknik Mesin
Topik : ANALISA TEGANGAN DEFORMASI PEGAS DAUN PADA SUSPENSI MOBIL LISTRIK PENUMPANG AKIBAT BEBAN STATIS MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

KEDUA :

Keputusan ini mulai berlaku sejak tanggal ditetapkan.

Tembusan
1. Pembantu Dekan Bidang Akademik
2. Ketua Jurusan
3. Petinggal



DITETAPKAN DI : SEMARANG
PADA TANGGAL : 10 Januari 2014
DEKAN

Muhammad Harlanu
NIP 196602151991021001

5201410037

.... FM-03-AKD-24/Rev. 00

Lampiran 2. Surat Tugas Penguji



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
FAKULTAS TEKNIK

Gedung E5 Lt. 3, Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229
Telepon: 024 8508103
Laman: mesin.unnes.ac.id, surel: mesin_ftunnes@yahoo.com

No. : 5239/UT37-1.5/TT/2015
Lamp. :
Hal : Surat Tugas Panitia Ujian Sarjana

Dengan ini kami tetapkan bahwa ujian Sarjana Fakultas Teknik UNNES untuk jurusan Teknik Mesin adalah sebagai berikut:

I. Susunan Panitia Ujian:

- | | |
|---------------------|---|
| a. Ketua | : Dr. Muhammad Khumaedi, M.Pd. |
| b. Sekretaris | : Wahyudi, S.Pd, M.Eng |
| c. Pembimbing Utama | : Drs. Wirawan Sumbodo, M.T. |
| d. Penguji | : 1. Dr. Heri Yudiono, S.Pd., M.T.
2. Widya Aryadi, S.T. |

II. Calon yang diuji:

Nama	: HASAN SYAIFUDDIN
NIM/Jurusan/Program Studi	: 5201410037/Teknik Mesin /Pendidikan Teknik Mesin, S1
Judul Skripsi	: ANALISIS TEGANGAN VON MISES PEGAS DAUN MOBIL LISTRIK ANGKUTAN MASSAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

II. Waktu dan Tempat Ujian:

Hari/Tanggal	: Kamis / 2 Juli 2015
Jam	: 09:00:00
Tempat	: Ruang Ujian
Pakaian	:

Tembusan
1. Ketua Jurusan Teknik Mesin
2. Calon yang diuji



Semarang, 6 Juli 2015

Dekan

Urs Muhammad Harlanu, M.Pd.

RIP-106602151991021001

5201410037

Lampiran 3. Foto Spesimen Uji Komposisi Pegas Daun



Memberi Tanda Pemotongan Spesimen Uji Komposisi

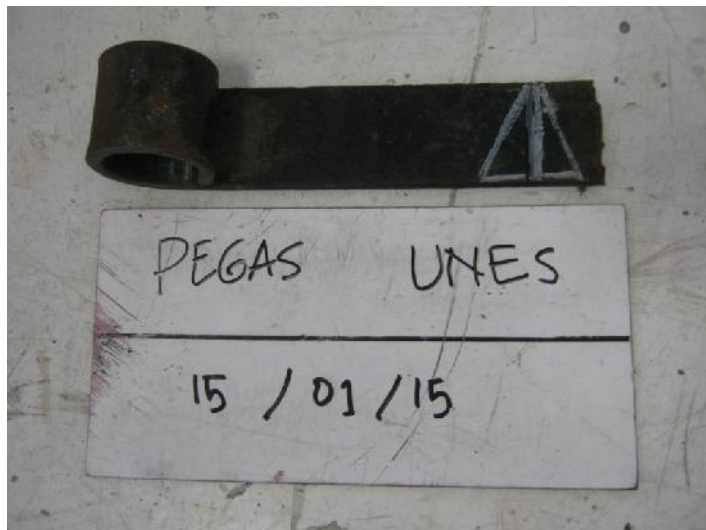
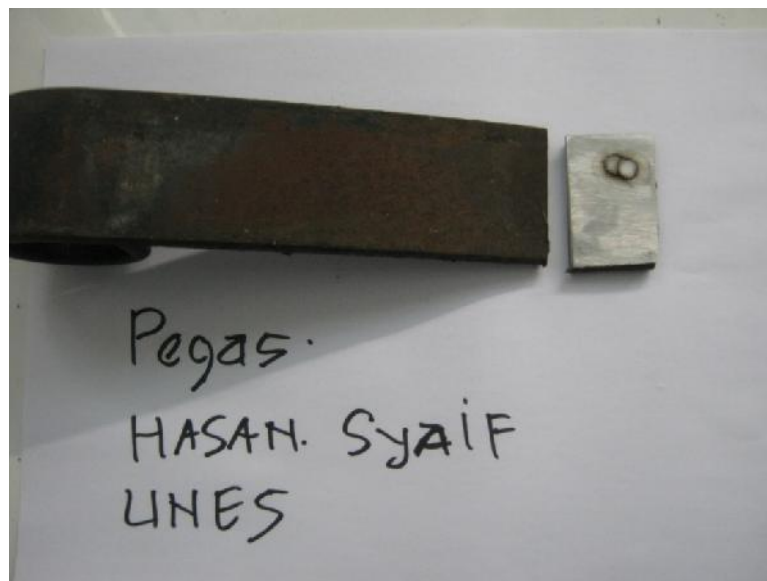


Foto Bahan Spesimen Uji Komposisi




Pemotongan Spesimen Uji Komposisi




Spesimen Uji Komposisi

Lampiran 4. Hasil Uji Komposisi



PT. ITOKOH CEPERINDO
Stainless Steel & Alloy Casting



COMPANY : PT. ITOKOH CEPERINDO
 SAMPLE NAME : PEGAS
 CUSTOMER : HAZAN SYAIF UMES
 FURNACE : TALS61E02/8960
 OPERATOR : LEO
 DATE / TIME : 15-JAN-2015 14:36:24
 TASK : Conc_Fai METHOD : EDGLPE

	Fe	S	Al	C	Ni	Nb	Si	Cr	V
11	97.8666	0.0180	0.0098	0.5674	0.0334	0.0019	0.2530	0.0510	0.019
2	97.5796	0.0186	0.0085	0.5508	0.0330	0.0019	0.2530	0.0509	0.019
AVG	97.5731	0.0188	0.0081	0.5591	0.0332	0.0019	0.2530	0.0507	0.019
SD	0.0028	0.0013	0.0023	0.0117	0.00031	0.00003	0.00007	0.00053	0.000
SD%	0.01	0.04	29.73	2.10	0.94	2.35	0.03	1.05	1.05

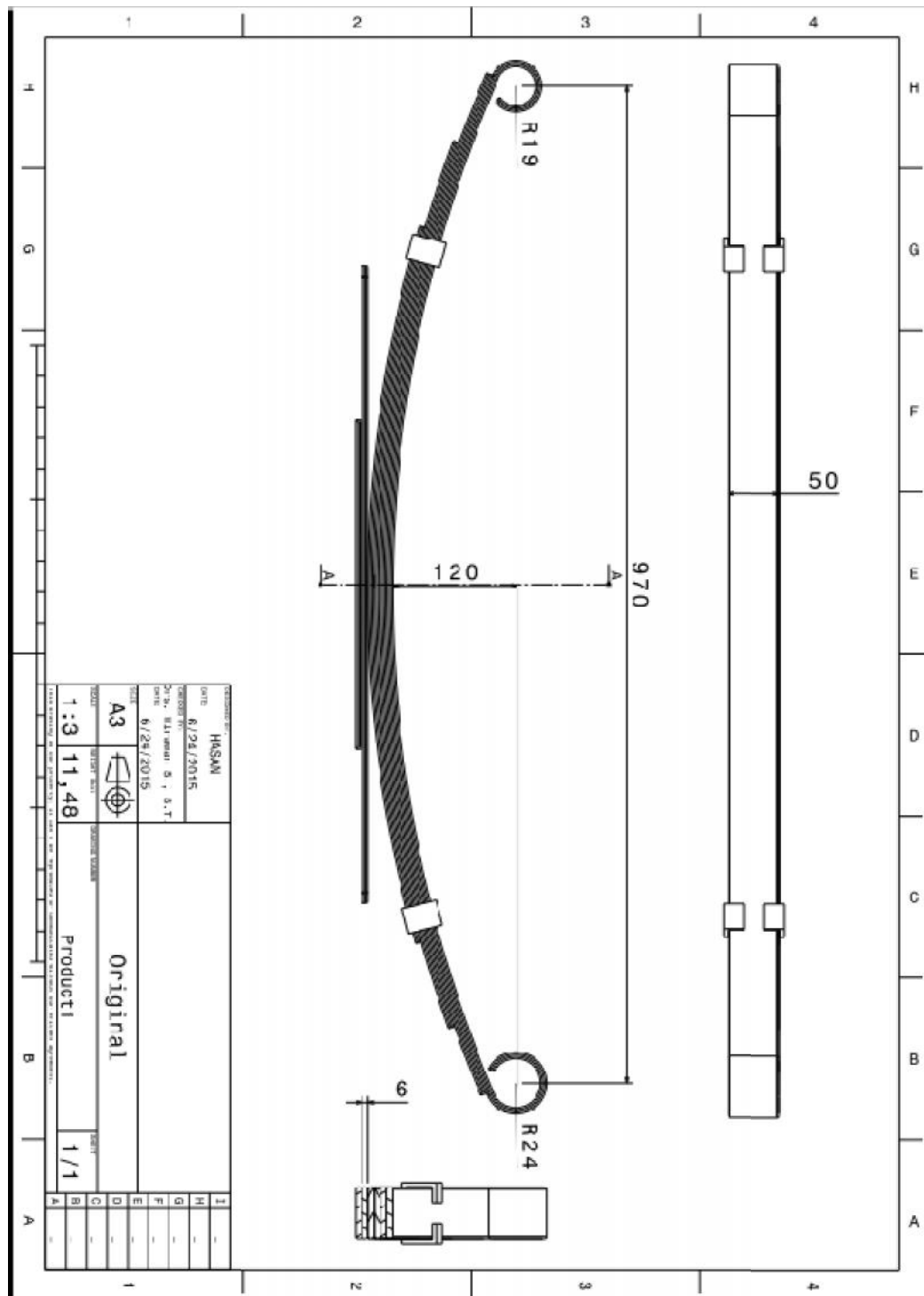
	Mn	Mo	W	P	Cu	Ti	N	B	Pb
1	1.3322	-0.0000	0.0046	0.0221	0.0472	0.0046	0.0052	0.0009	0.003
2	1.3368	-0.0001	0.0046	0.0222	0.0471	0.0048	0.0067	0.0005	0.003
AVG	1.3344	-0.0001	0.0046	0.0221	0.0471	0.0047	0.0060	0.0005	0.003
SD	0.0031	0.0000	0.0000	0.00007	0.00005	0.00019	0.00102	0.00001	0.000
SD%	0.24	76.19	0.05	0.32	0.11	4.07	17.02	1.02	1.46

	Sb	Ca	Mg	Sn	Co
1	0.0065	0.0001	-0.0006	0.0006	0.0328
2	0.0064	0.0001	-0.0007	0.0006	0.0327
AVG	0.0064	0.0001	-0.0008	0.0006	0.0326
SD	0.0000	0.00002	0.00007	0.00000	0.00008
SD%	0.68	20.79	9.19	0.73	0.24

INDONESIA OFFICE & FACTORY : Jl. KH. Hasyim As'ari By Pass Selatan Klaten 57438 PO. BOX 130, Jateng - Indonesia
 Phone : (0272) 324208, 324038, Fax. (324213), E-mail : itokohci@indosat.net.id

JAPAN OFFICE : 3-22-2 Motogo, Kawaguchi City, Saitama, Japan
 Phone : 81 482 248 401, Fax : 81 482 242070

Lampiran 5. Geometri Desain Pegas Daun Original



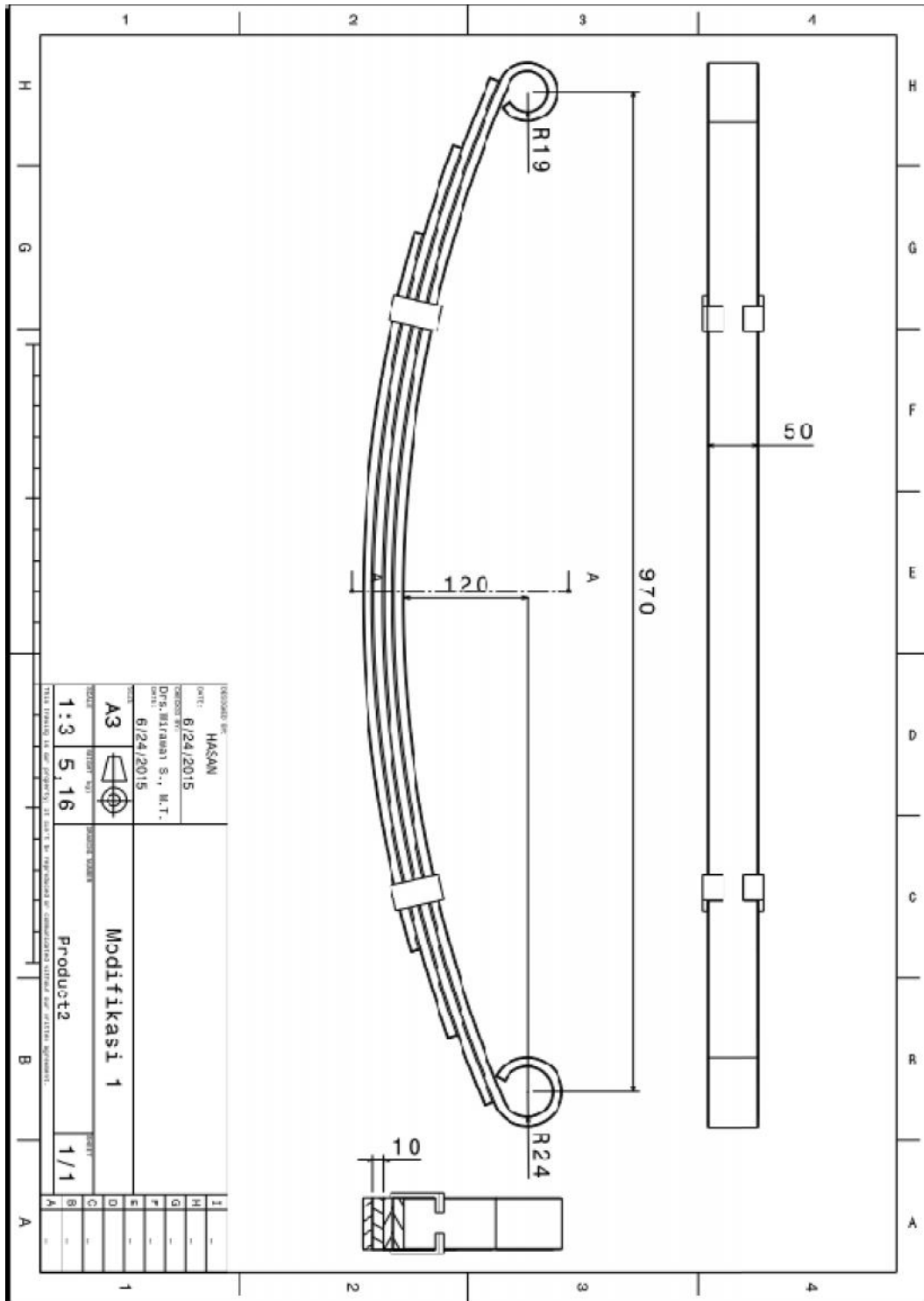
Lampiran 6. Permodelan Pegas Daun Original



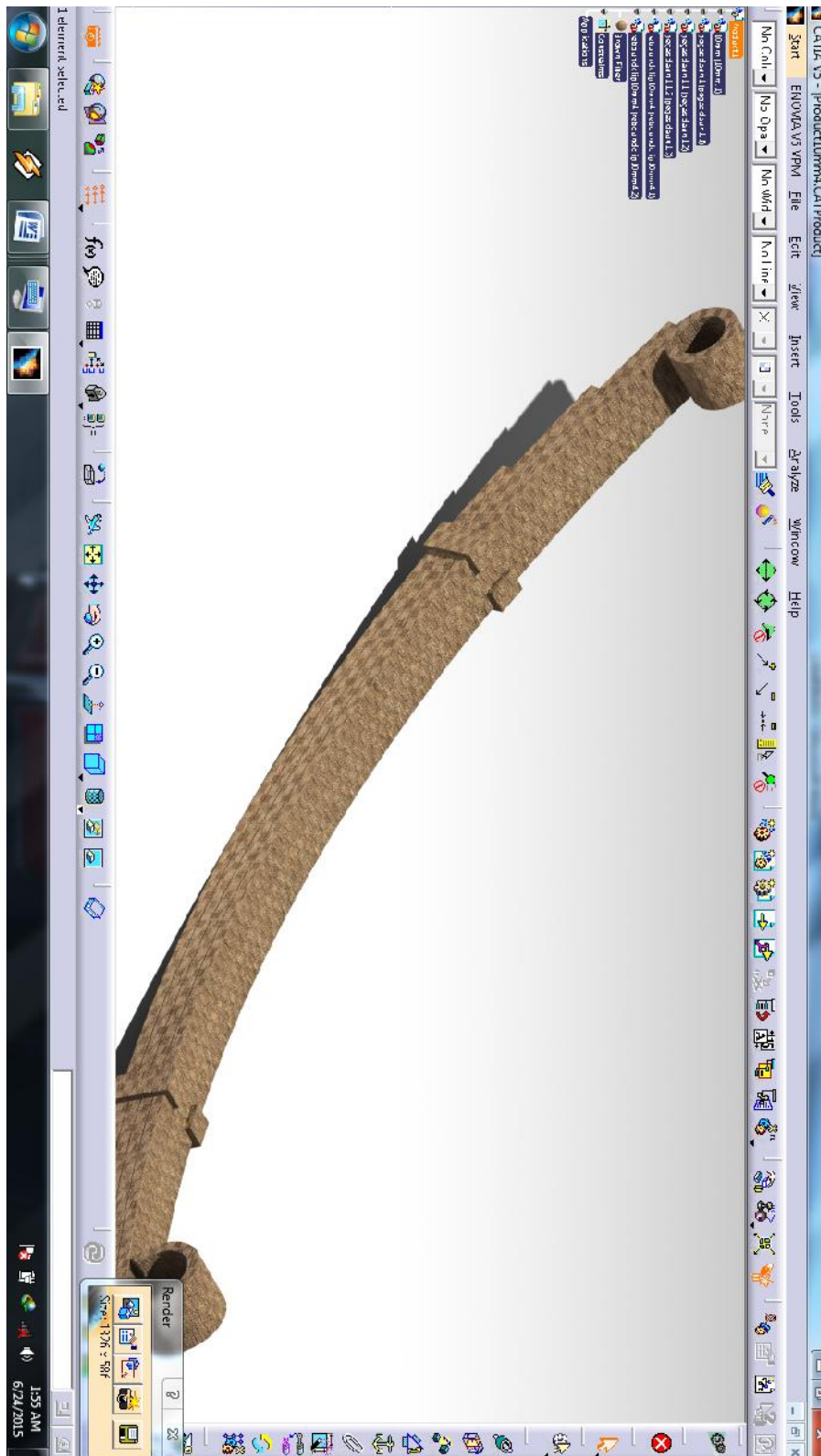
Lampiran 7. *Meshing* Desain Pegas Daun Original



Lampiran 8. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 1

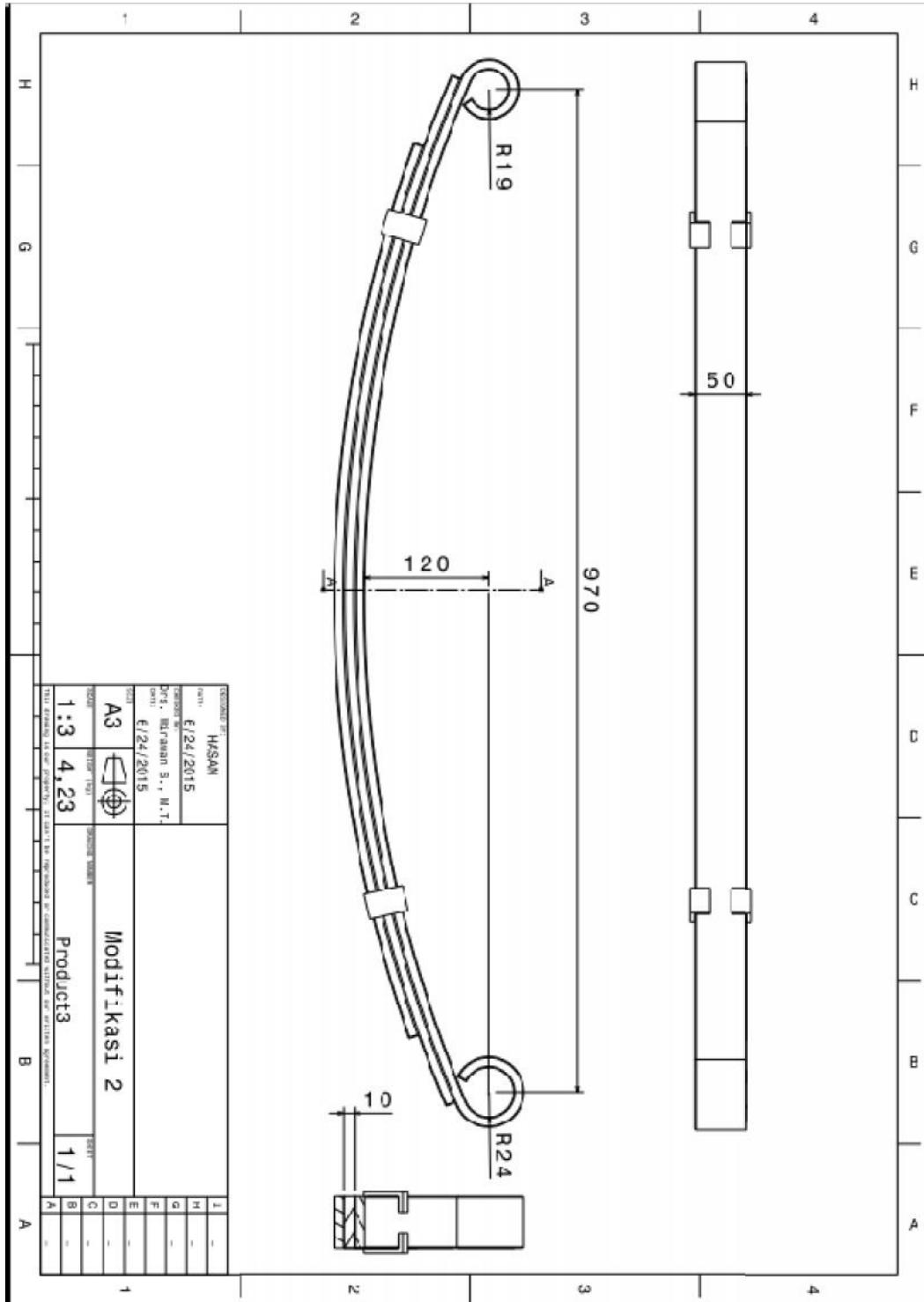


Lampiran 9. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 1

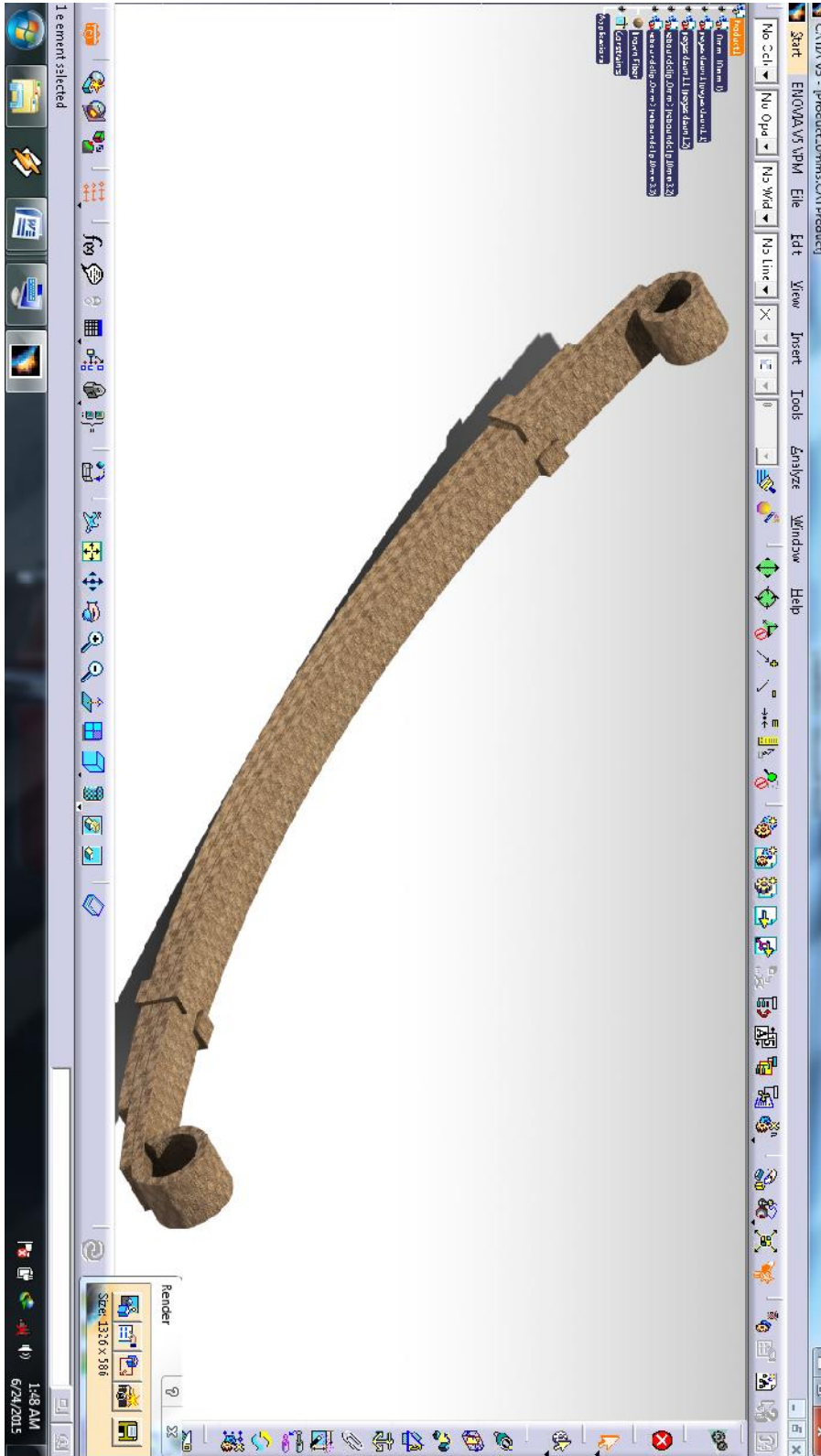


Lampiran 10. Meshing Desain Pegas Daun Modifikasi 1

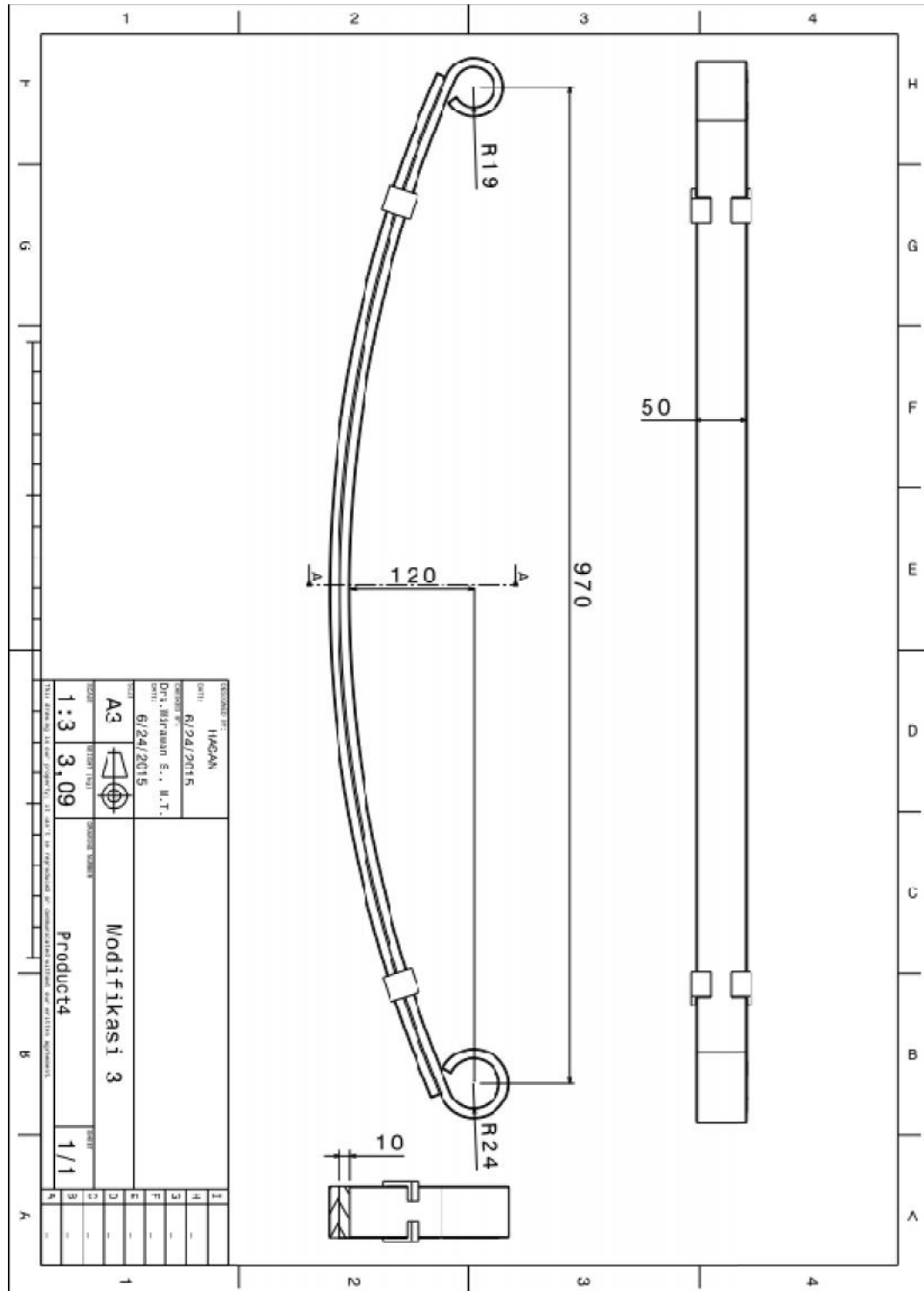
Lampiran 11. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 2



Lampiran 12. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 2



Lampiran 13. Meshing Desain Pegas Daun Modifikasi 2

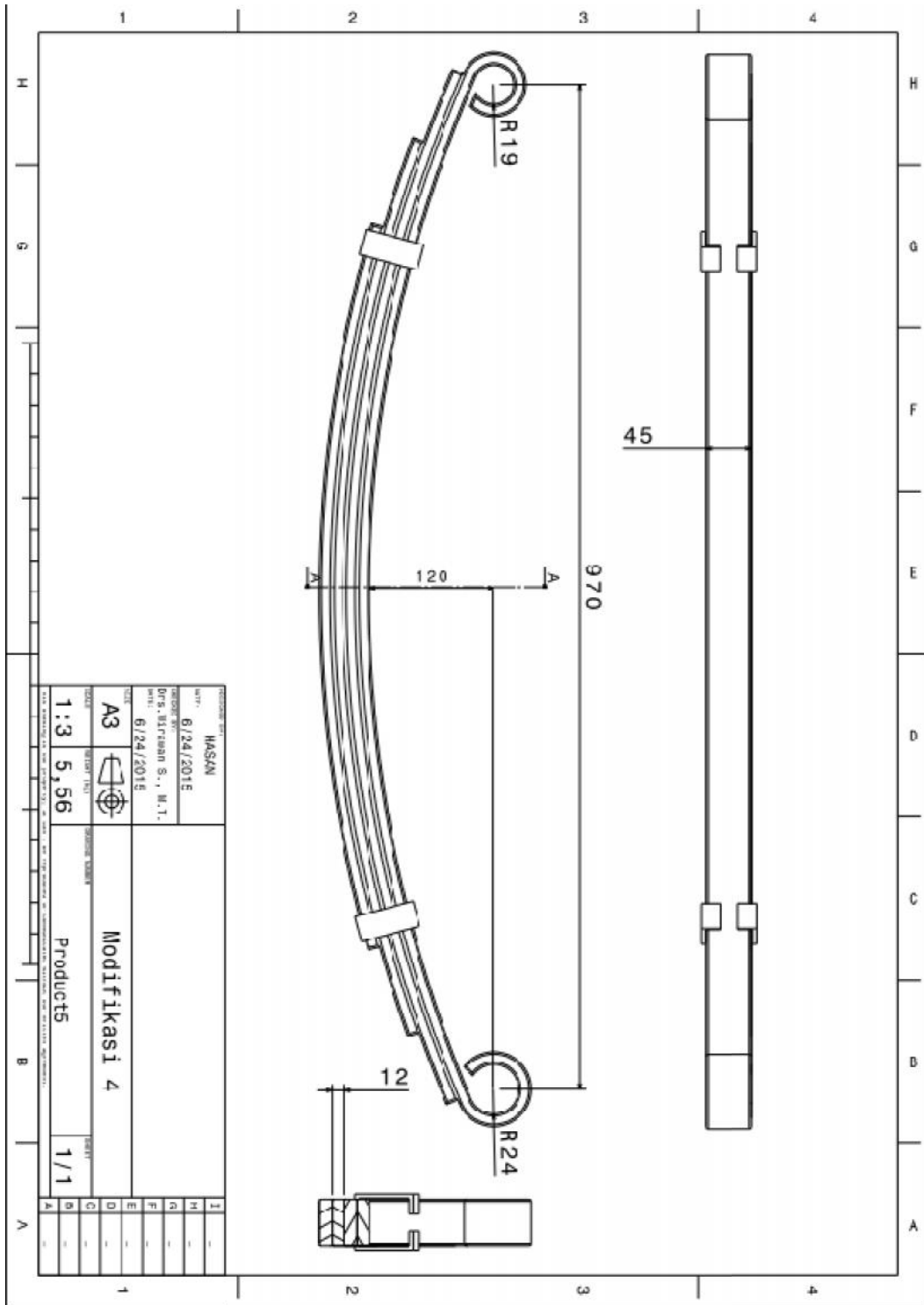
Lampiran 14. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 3

Lampiran 15. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 3



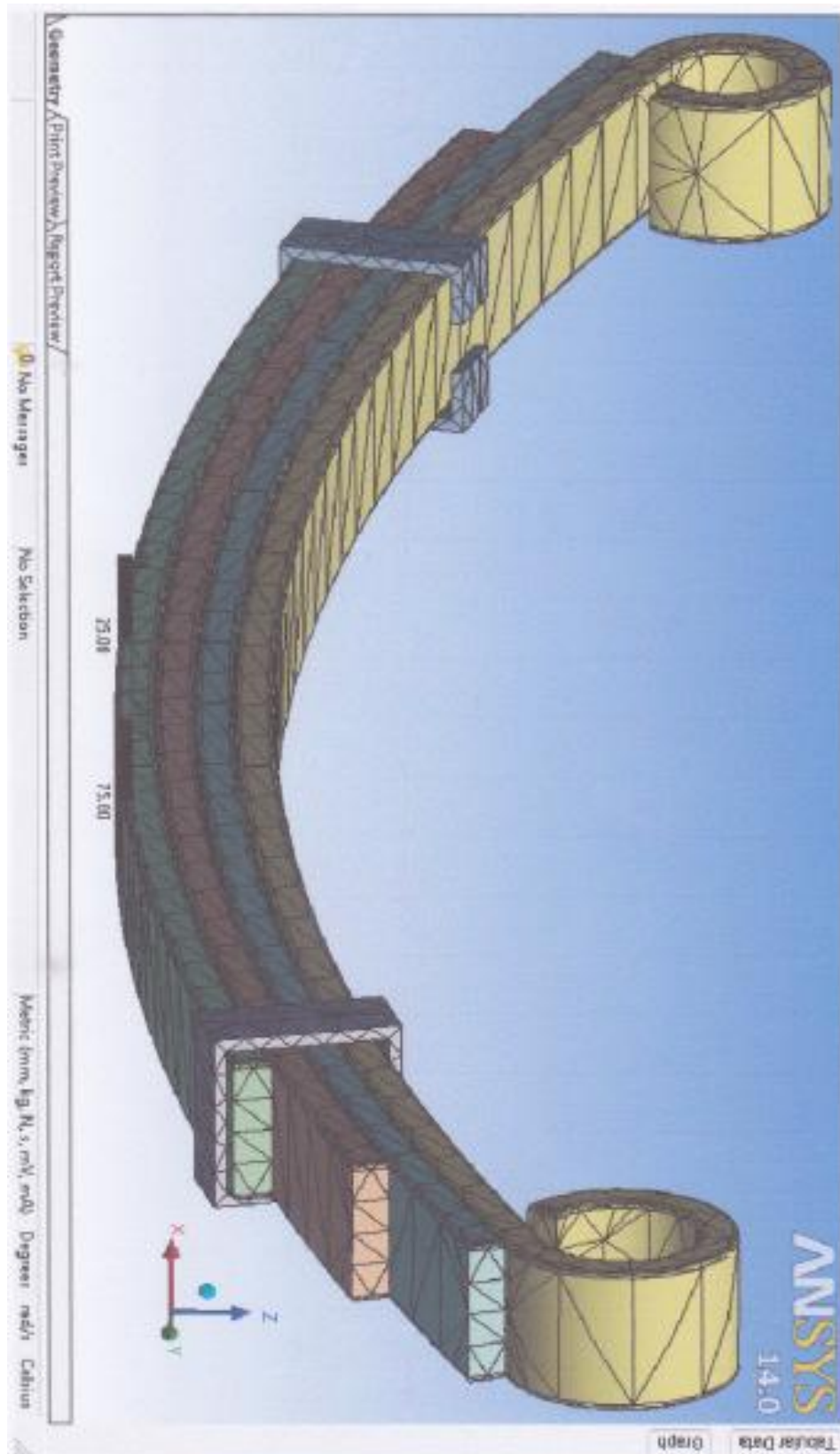
Lampiran 16. Meshing Desain Pegas Daun Modifikasi 3

Lampiran 17. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 4

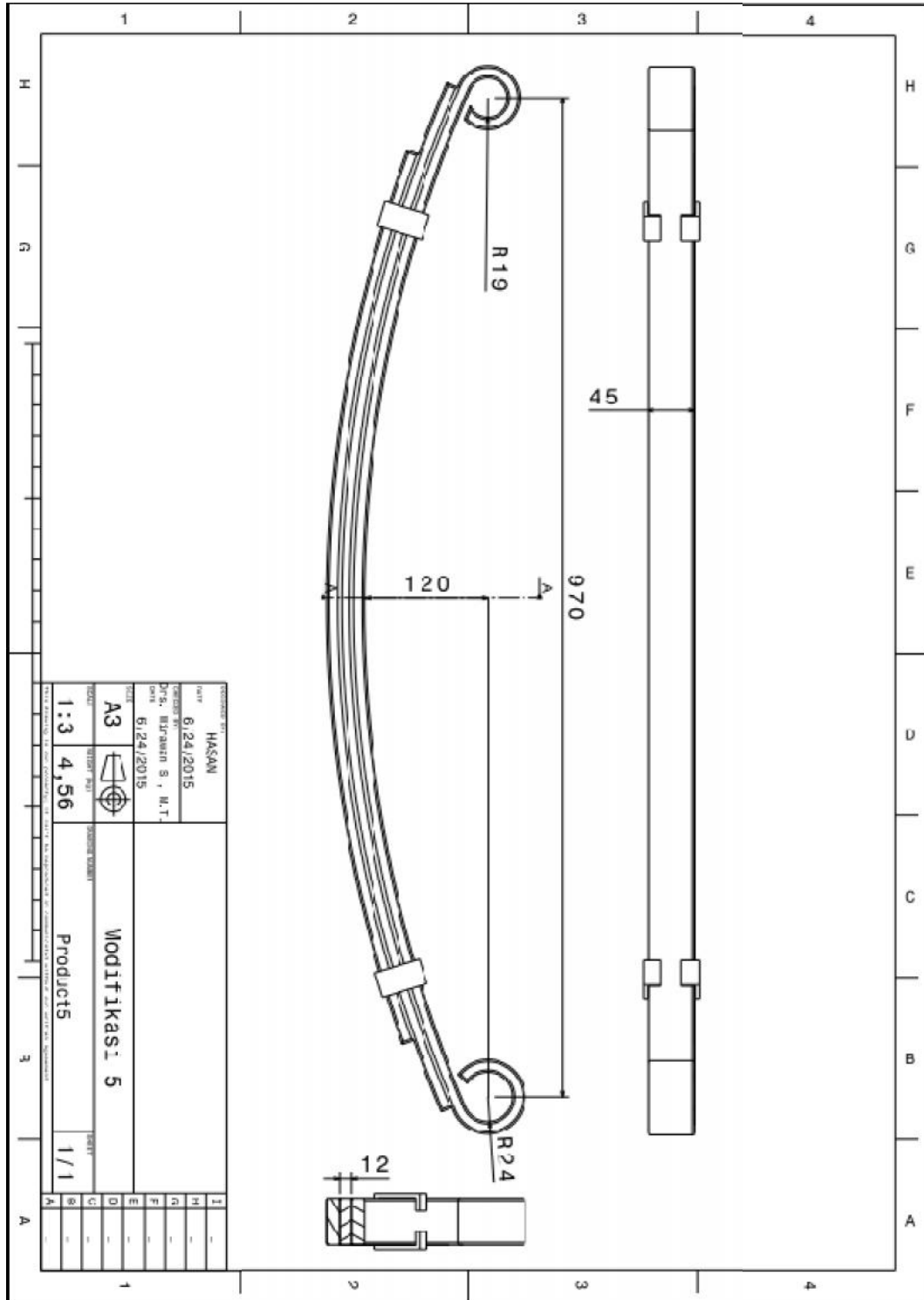


Lampiran 18. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 4



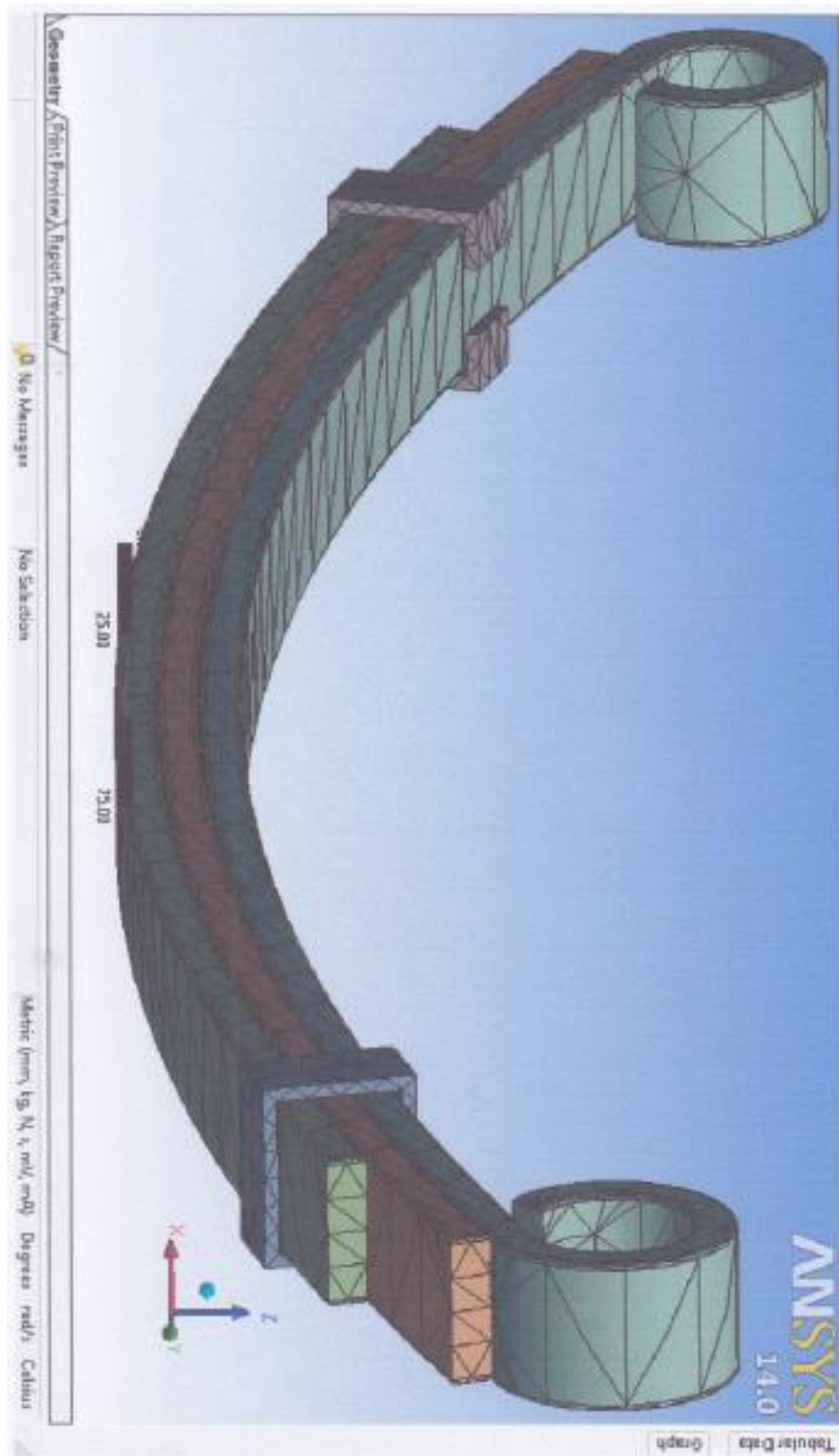
Lampiran 19. Meshing Desain Pegas Daun Modifikasi 4

Lampiran 20. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 5

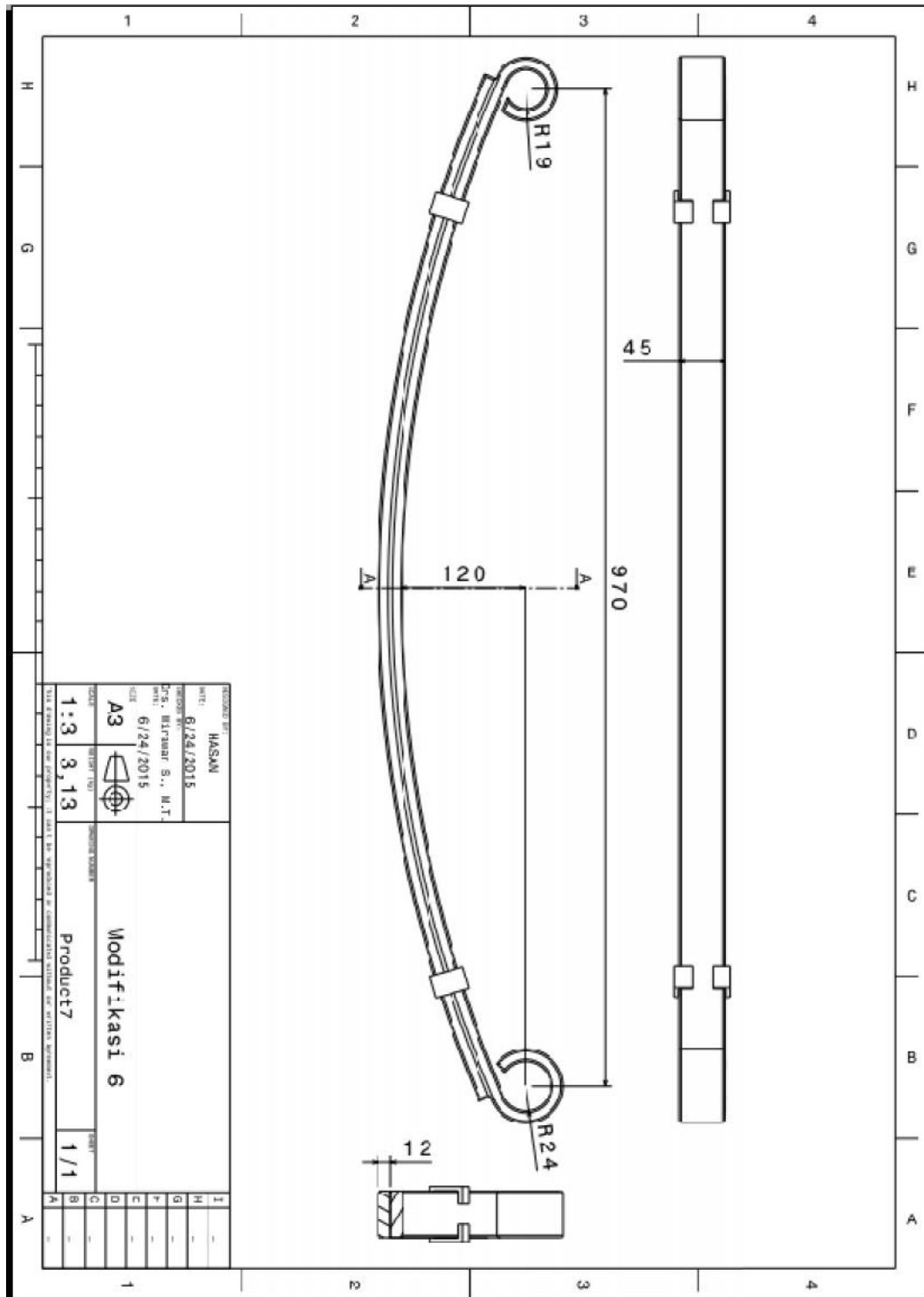


Lampiran 21. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 5

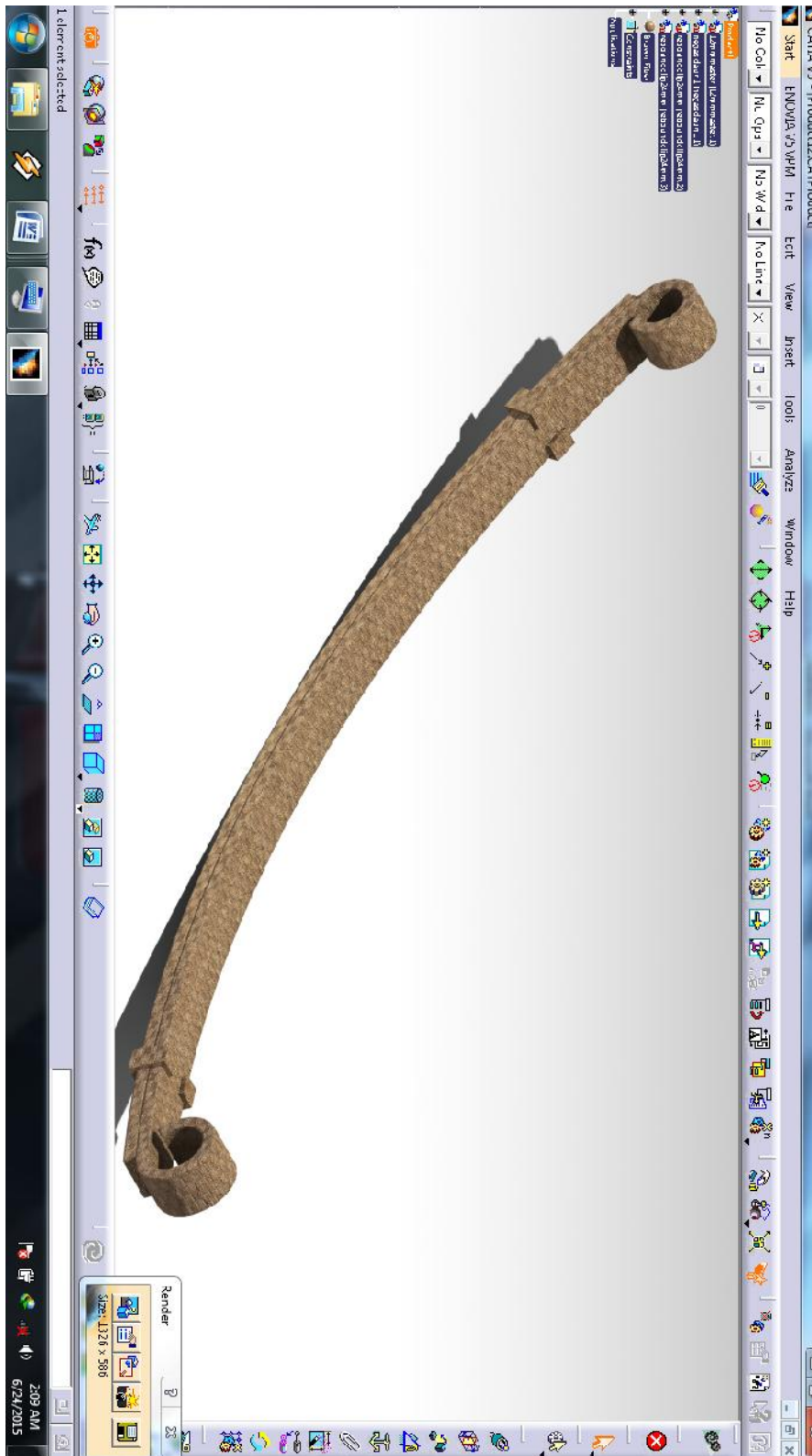


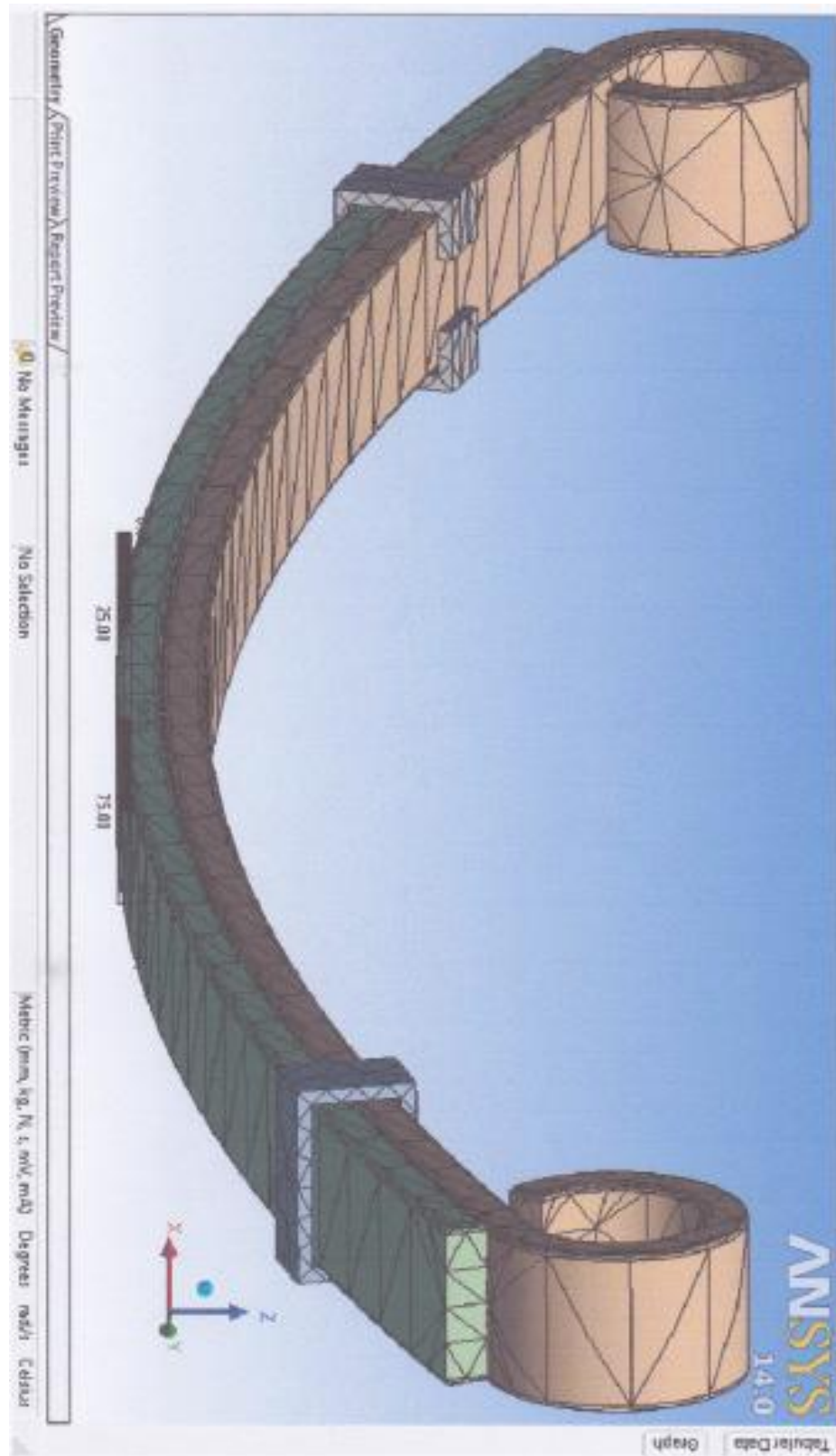
Lampiran 22. Meshing Desain Pegas Daun Modifikasi 5

Lampiran 23. Geometri Desain Pegas Daun Modifikasi 6



Lampiran 24. Permodelan Pegas Daun Modifikasi 6



Lampiran 25. Meshing Desain Pegas Daun Modifikasi 6

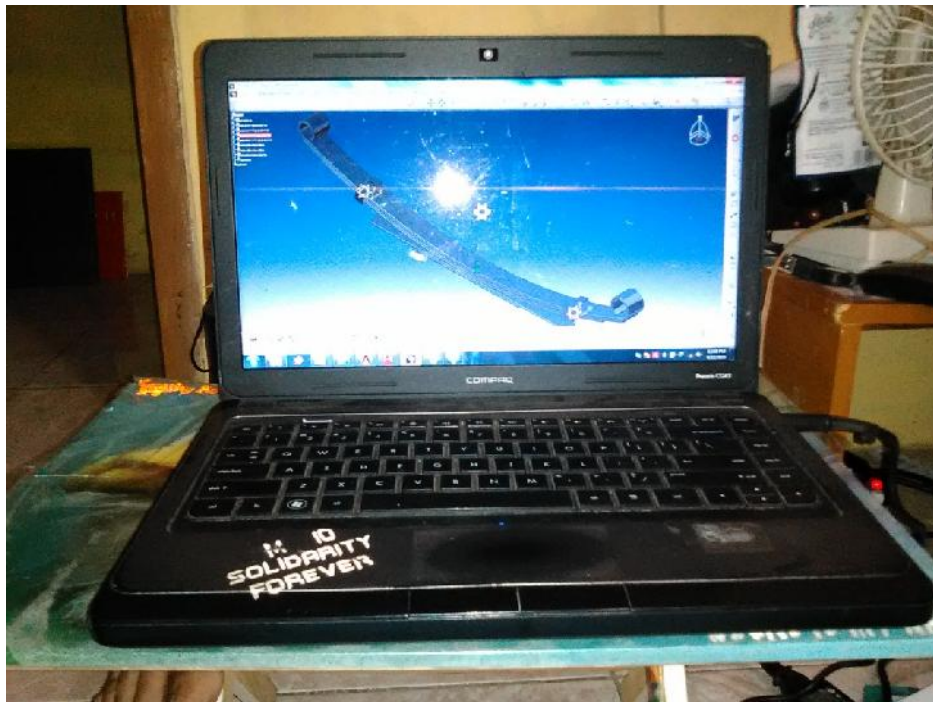
Lampiran 26. Dokumentasi Penelitian



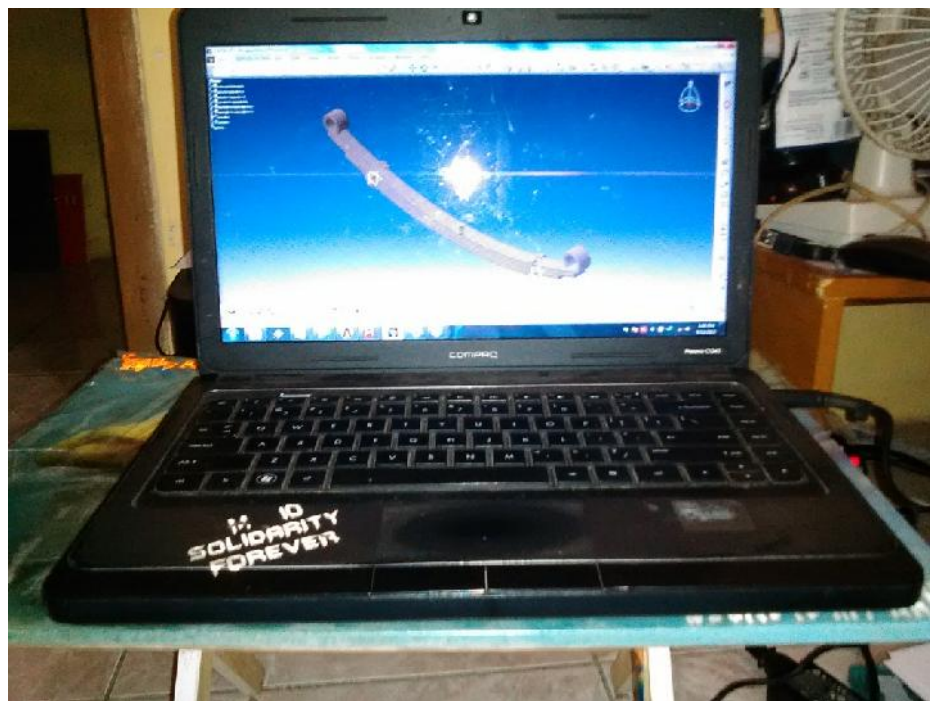
Pengukuran geometri pegas daun



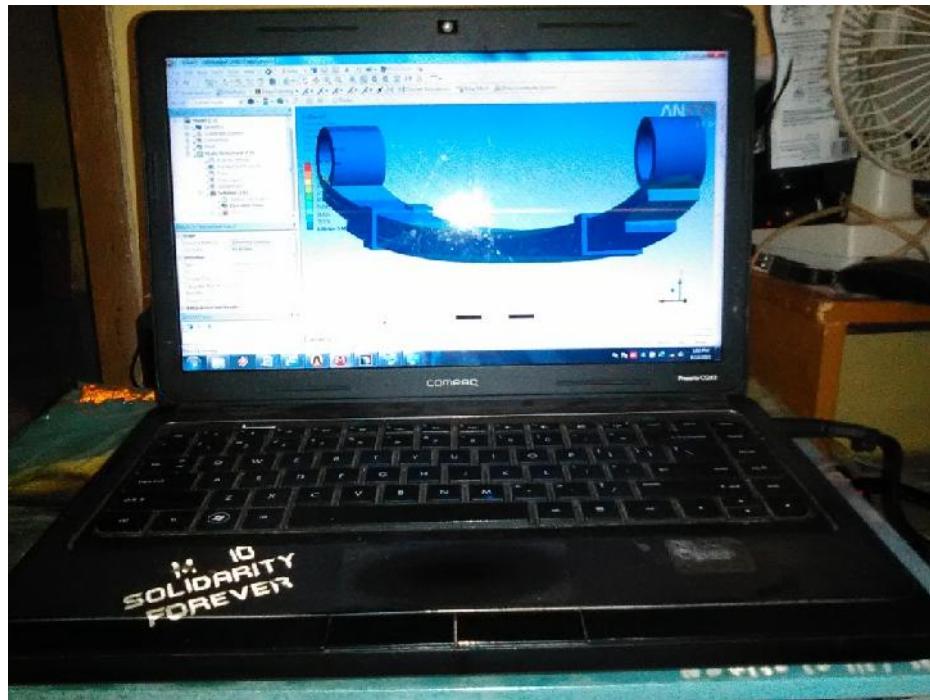
Pengukuran Geometri Pegas Daun



Permodelan Desain Pegas Daun menggunakan CATIA



Permodelan Desain Pegas Daun menggunakan CATIA



Analisis Desain menggunakan ANSYS