



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM141585**

**ANALISIS NUMERIK PENGUJIAN *ROLL-OVER*  
PADA KENDARAAN MULTIGUNA PEDESAAN  
SESUAI DENGAN REGULASI ECE-066**

**MOHAMMAD FAJAR PUTRA UTOMO**  
02111340000135

Dosen Pembimbing  
Dr. Agus Sigit Pramono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM141585

# **ANALISIS NUMERIK PENGUJIAN *ROLL-OVER* PADA KENDARAAN MULTIGUNA PEDESAAN SESUAI DENGAN REGULASI ECE-066**

MOHAMMAD FAJAR PUTRA UTOMO  
02111340000135

Dosen Pembimbing  
Dr. Agus Sigit Pramono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

**ANALISIS NUMERIK PENGUJIAN *ROLL-OVER* PADA  
KENDARAAN MULTIGUNA PEDESAAN SESUAI  
DENGAN REGULASI ECE-066**

**TUGAS AKHIR**

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

Oleh :

**MOHAMMAD FAJAR PUTRA UTOMO**

**NRP. 02111340000135**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Agus Sigit Pramono, DEA  
NIP. 196508101991021001 (Pembimbing)
2. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E  
NIP. 196511031990021001 (Penguji I)
3. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT  
NIP. 196807061999031004 (Penguji II)
4. Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD  
NIP. 197909262005011001 (Penguji III)

**SURABAYA**

**JULI, 2018**

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

# **ANALISIS NUMERIK PENGUJIAN *ROLL-OVER* PADA KENDARAAN MULTIGUNA PEDESAAN SESUAI DENGAN REGULASI ECE-066**

**Nama Mahasiswa** : **Mohammad Fajar Putra Utomo**  
**NRP** : **02111340000135**  
**Jurusan** : **Teknik Mesin FTI-ITS**  
**Dosen Pembimbing** : **Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

## **ABSTRAK**

*Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya bekerja sama dengan Dinas Perindustrian dan Perdagangan mulai mengembangkan kendaraan produksi multiguna pedesaan yang dapat difungsikan sebagai penunjang bermacam-macam kegiatan perindustrian maupun UMKM. Pengembangan kendaraan ini mempertimbangkan banyak hal, salah satu diantaranya adalah keamanan dari penumpang. Keamanan penumpang merupakan hal yang paling utama dalam perancangan sebuah kendaraan, terutama untuk kendaraan yang mengangkut banyak penumpang. Salah satu jenis kecelakaan yang krusial terhadap keamanan dari penumpang dan pengendara kendaraan adalah kecelakaan roll-over atau guling. Apabila kendaraan tidak memiliki kekuatan struktur yang baik, penumpang akan mendapatkan luka yang fatal dan dapat menimbulkan korban pada saat terjadi guling. Untuk itu perlu adanya sebuah pengujian terkait kecelakaan guling yang dilakukan pada kendaraan untuk mendapatkan analisa prediktif dan optimasi kekuatan struktur kendaraan.*

*Analisis pengujian guling dilakukan melalui simulasi komputer dengan membuat model kendaraan yang memiliki dimensi dan propertis serupa dengan kendaraan asli, kemudian disimulasikan menggunakan software Explicit Dynamics ANSYS berdasarkan pembebanan dan kondisi tertentu. Mekanisme pengujian yang dilakukan sesuai pada standar ECE-066, yaitu kendaraan dimiringkan secara perlahan sampai dengan Center of Gravity (CoG) kendaraan berada pada ketinggian maksimal dan*

akan berguling pada kedalaman 800 mm. ECE-066 merupakan standar pengujian guling untuk menentukan kekuatan struktur dari suatu kendaraan, dimana standar tersebut meliputi mekanisme pengujian, ketentuan ukuran Survival Space, metode pengujian yang dapat dilakukan serta ketentuan yang harus dipenuhi oleh manufaktur kendaraan. Survival space merupakan sebuah area yang harus terlindungi pada saat kecelakaan guling terjadi, dimana area tersebut meliputi ruang penumpang, awak kabin dan supir. Ukuran survival space memiliki ketentuan yaitu 500 mm di atas lantai, 150 mm dari sisi samping dinding dalam kendaraan, dan tinggi 750 mm di atas kursi. Variasi uji guling dilakukan terhadap tiga variasi pembebanan yaitu; kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan, kendaraan dengan box berisi muatan sebagian dan kendaraan dengan box berisi muatan penuh.

Deformasi terbesar terjadi pada simulasi ketiga dengan massa total 2220 kg, yaitu sebesar 100,04 mm pada bagian rangka box dan 158,45 mm pada bagian kabin. Penambahan massa mengakibatkan nilai deformasi meningkat sebesar 25% terhadap gap survival space pada bagian rangka box dan 40% terhadap gap survival space pada bagian kabin. Dari keseluruhan variasi simulasi uji guling pada kendaraan multiguna pedesaan, deformasi yang terjadi pada ketiga variasi tidak mengganggu/menyentuh dimensi dari acuan survival space. Sehingga struktur dari kendaraan multiguna pedesaan masih dalam batas **aman** sesuai dengan regulasi ECE-066. Hasil dari simulasi diverifikasi melalui perbandingan hasil perhitungan energi kinetik kendaraan dengan energi kinetik hasil simulasi.

**Kata kunci : roll-over, Center of Gravity, survival space, analisis numerik, deformasi.**

# NUMERICAL ANALYSIS OF RURAL MULTIPURPOSE VEHICLE ROLL-OVER TEST IN ACCORDANCE WITH ECE-066 REGULATION

**Name** : Mohammad Fajar Putra Utomo  
**Student ID** : 02111340000135  
**Department/Faculty** : Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Supervisor** : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

## ABSTRACT

*Tenth Nopember Institute of Technology Surabaya (ITS) in affiliation with Industry and Marketing Agency starting to develop a rural multipurpose vehicle that can be used for various purpose in both industrial nor transportation. There are many consideration in its development, and one of the aspect that needs to be considerate is passenger safety. Passenger safety is an important aspect to develop a vehicle design, especially for a vehicle that has capacity of carrying more passenger. One of the major accident that has a severe damage for passenger safety is a rollover accident. Structure of the vehicle needs to be strong enough to ensure minimum damage and prevent occupant fatality in case of rollover. Due to its fatality rate and catastrophic impact, a rollover test needs to be conduct to obtain a predictive analysis and optimization for strength of vehicle structure.*

*Rollover test is performed with computer simulation using a model that has similiar dimension and properties of actual vehicle, with load and certain condition, finite element software of Explicit Dynamics ANSYS is used. In accordance with ECE-066 regulation, the vehicle model is slowly tilting until the vehicle center of gravity reaching its maximum position and rolls to the depth of 800 mm above ground. Economic Commision for Europe no. 66 (ECE-066) is a regulation to conduct rollover test in which vehicle superstructure need to be strong enough to ensure passenger safety in case of rollover. This regulation including the*

*test mechanism, survival space envelopment, allowable test method, and requirements that needs to be fulfilled by the vehicle manufacturer. Survival space is a space to be preserved in the passengers, crew and driver compartment to provide better survival possibility in case of rollover accidents. The envelope of vehicle survival space is 500 mm above the vehicle floor, 150 mm from vehicle inner surface of the side wall, and 750 mm above passengers seat. Rollover test is performed within 3 conditions for model simulation; empty loaded vehicle, partial loaded vehicle and full loaded vehicle.*

*Maximum deformation is found in the third simulation of a total mass of 2220 kg, with value of 100,04 mm in the box structure section and 158,45 mm in the cabin section. The additional mass affects the deformation in the box structure to increase about 25% towards the survival space gap and the deformation in the cabin to increase about 40% towards the survival space gap. The deformation from all simulations infer that the structure of rural multipurpose vehicle was capable to preserve **safe** passengers space according to ECE-066 regulation. The result is verified by comparing the value of kinetic energy in the vehicle by numerical calculation with the result of the simulations.*

***Keywords : roll-over, Center of Gravity, survival space, numerical analysis, deformation.***



## KATA PENGANTAR



Puji syukur dihaturkan kehadiran Allah SWT, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan Pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksanakan dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Orangtua penulis, Ibu **Farida Sulistiawati** dan Bapak **Afandi Arifin** yang senantiasa mendoakan, membimbing dan memberikan semua hal terbaik untuk penulis.
2. Seluruh keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan, doa, motivasi dan nasihat kepada penulis.
3. **Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA** selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. **Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E, Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD, dan Ir. Julendra B. Ariatedja, MT** selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.
5. Tim sepejuangan Tugas Akhir, **Akbar Robbi Cahyana dan Ahmad Gaffar**, terima kasih atas dukungan dan kerjasama yang diberikan selama ini.
6. Teman-teman cangkruk **BAKOEL STMJ** yang senantiasa menghibur serta memberikan berbagai kenangan bagi penulis.
7. **Semua teman-teman angkatan 2013 (M56)** yang selalu membantu dan memberikan semangat kepada penulis. Terima kasih atas segala kritik dan saran serta motivasi yang telah kalian berikan.

8. **Teman-teman di lab MBP, Otomasi Industri, Desain Otomotif dan Simanu** yang telah menemani mengerjakan tugas akhir dalam 1 semester terakhir.
9. **Sege nap Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Mesin FTI ITS**, Terima kasih atas ilmu yang disampaikan, semoga bermanfaat kedepannya bagi diri penulis dan bagi bangsa dan negara.
10. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Dengan segala keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penulisan .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Mobil Multiguna Pedesaan.....	7
2.2 Kajian Pustaka .....	8
2.2.1 Pengujian Guling Dengan Variasi Beban Muatan .....	8
2.2.2 Penggunaan Metode Simulasi Elemen Hingga Untuk Analisa Pengujian Guling.....	11
2.2.3 Pengaruh <i>Center of Gravity</i> Terhadap Kecenderungan Guling .....	12
2.3 Dasar Teori.....	13
2.3.1 Jenis - Jenis Kecelakaan Guling .....	13
2.3.2 Regulasi Keamanan Kendaraan.....	17
2.3.2.1 <i>Survival Space</i> .....	18
2.3.2.2 Metode Pengujian Berdasarkan Regulasi ECE- 066.....	20
2.3.3 <i>Center of Gravity</i> Kendaraan.....	22
2.3.3.1 Jarak Longitudinal Dari <i>Center of Gravity</i> .....	23
2.3.3.2 Ketinggian <i>Center of Gravity</i> Dari <i>Ground</i> .....	25
2.3.4 Energi Rotasi Kinetik pada Kasus Guling Kendaraan	29
2.3.5 Analisa Metode Elemen Hingga.....	31
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>35</b>

3.1	Prosedur Penelitian.....	35
3.2	Diagram Alir Penelitian.....	36
3.3	Mekanisme Pengujian Untuk Simulasi .....	37
3.4	Data Teknis Kendaraan .....	41
3.5	Diagram Alir Permodelan .....	43
3.6	Input Propertis Material.....	45
3.7	Import Model Geometri Mobil Multiguna Pedesaan ..	47
3.8	<i>Meshing</i> Model Mobil Multiguna Pedesaan.....	49
3.9	Perhitungan Pembebanan .....	51
3.10	Penentuan <i>Initial Condition</i> .....	61
3.11	Simulasi .....	63
<b>BAB IV ANALISA HASIL SIMULASI .....</b>		<b>65</b>
4.1	Simulasi Kendaraan Multiguna Pedesaan Dengan Box Tanpa Muatan.....	65
4.1.1	Energi yang Diterima oleh Model Kendaraan pada Simulasi Pertama .....	66
4.1.2	Verifikasi Hasil Simulasi Pertama.....	67
4.1.3	Analisa Deformasi Terhadap <i>Survival Space</i> pada Simulasi Pertama .....	69
4.2	Simulasi Kendaraan Multiguna Pedesaan Dengan Box Berisi Muatan Sebagian.....	71
4.2.1	Energi yang Diterima oleh Model Kendaraan pada Simulasi Kedua.....	72
4.2.2	Verifikasi Hasil Simulasi Kedua .....	74
4.2.3	Analisa Deformasi Terhadap <i>Survival Space</i> pada Simulasi Kedua.....	76
4.3	Simulasi Kendaraan Multiguna Pedesaan Dengan Box Berisi Muatan Penuh .....	78
4.3.1	Energi yang Diterima oleh Model Kendaraan pada Simulasi Ketiga.....	78
4.3.2	Verifikasi Hasil Simulasi Ketiga .....	80
4.3.3	Analisa Deformasi Terhadap <i>Survival Space</i> pada Simulasi Kedua.....	82
4.4	Analisa Hasil Simulasi .....	84
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>89</b>

5.1	Kesimpulan.....	89
5.2	Saran.....	89
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>91</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>93</b>

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## DAFTAR GAMBAR

### BAB 2

Gambar 2. 1 Mobil multiguna pedesaan rancangan ITS .....	7
Gambar 2. 2 Model elemen hingga dari kendaraan kosong .....	9
Gambar 2. 3 Model elemen hingga dari kendaraan penuh .....	10
Gambar 2. 4 (a) Model box yang digunakan pada simulasi. (b) Model box yang digunakan pada eksperimen .....	11
Gambar 2. 5 Kendaraan terpelanting dari permukaan tanah .....	14
Gambar 2. 6 Kendaraan terjatuh dari permukaan jalan .....	14
Gambar 2. 7 Kendaraan berotasi akibat objek landai .....	15
Gambar 2. 8 Kendaraan tersandung akibat gaya sentrifugal .....	15
Gambar 2. 9 Kendaraan memanjat <i>fixed object</i> yang tinggi .....	16
Gambar 2.10 Gerakan <i>end-over-end</i> pada kendaraan .....	16
Gambar 2.11 Bidang melintang dari <i>survival space</i> .....	18
Gambar 2.12 Bidang membujur dari <i>survival space</i> .....	19
Gambar 2.13 Lokasi penahan pada saat kendaraan diam .....	20
Gambar 2.14 Ilustrasi perubahan <i>center of gravity</i> kendaraan ....	21
Gambar 2.15 <i>Free body diagram</i> dan <i>center of gravity</i> kendaraan sebelum penambahan berat muatan dan penumpang .....	23
Gambar 2.16 <i>Free body diagram</i> dan <i>center of gravity</i> kendaraan setelah penambahan berat muatan dan penumpang .....	24
Gambar 2.17 Ilustrasi kendaraan pada saat membentuk sudut $\Theta$	26
Gambar 2.18 <i>Free body diagram</i> kendaraan pada saat membentuk sudut $\Theta$ .....	26
Gambar 2.19 Skema kendaraan saat terkena gaya reaksi akibat benturan .....	30

### BAB 3

Gambar 3. 1 Model kendaraan muatan kosong pada posisi <i>center of gravity</i> terendah .....	38
Gambar 3. 2 Model kendaraan muatan sebagian pada posisi <i>center of gravity</i> terendah .....	39
Gambar 3. 3 Model kendaraan muatan penuh pada posisi <i>center of gravity</i> terendah .....	39
Gambar 3. 4 Analisa model pada bagian kabin dan box .....	40

Gambar 3. 5 Skema kendaraan pada bagian rangka box dan kabin .....	40
Gambar 3. 6 Model 3D mobil multiguna pedesaan.....	47
Gambar 3. 7 Geometri struktur box, <i>survival space</i> dan <i>surface</i> yang sudah dilakukan <i>import</i> pada <i>software</i> simulasi.....	49
Gambar 3. 8 Hasil mesh dengan metode <i>tetrahedrons</i> pada bagian kendaraan dan <i>quadrilateral dominant</i> pada bagian <i>survival space</i> dan <i>surface</i> .....	50
Gambar 3. 9 Mesh keseluruhan model untuk simulasi.....	51
Gambar 3.10 Skema perubahan letak <i>center of gravity</i> kendaraan .....	52
Gambar 3.11 Letak CG pada kondisi <i>fully tilting</i> kendaraan untuk variasi muatan 1 .....	56
Gambar 3.12 Letak CG pada kondisi <i>fully tilting</i> kendaraan untuk variasi muatan 2 .....	58
Gambar 3.13 Letak CG pada kondisi <i>fully tilting</i> kendaraan untuk variasi muatan 3 .....	59
Gambar 3.14 Kontak berupa <i>bonded</i> .....	61
Gambar 3.15 Pembebanan kecepatan angular pada model .....	61
Gambar 3.16 Pembebanan gaya gravitasi pada model.....	61
Gambar 3.17 Penentuan <i>fix support</i> pada <i>surface</i> .....	62
Gambar 3.18 Penentuan <i>end time</i> pada proses simulasi.....	62
Gambar 3.19 <i>Automatic mass scaling</i> untuk solusi <i>large deformation</i> .....	62
Gambar 3.20 Hasil simulasi berdasarkan output yang telah ditentukan .....	64

#### **BAB 4**

Gambar 4. 1 Simulasi guling kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan .....	66
Gambar 4. 2 Grafik dari <i>Total Energy</i> (TE), <i>Internal Energy</i> (IE) dan <i>Kinetic Energy</i> (KE) pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan .....	66
Gambar 4. 3 Kecepatan pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah pada simulasi pertama .....	68



Gambar 4. 4 Deformasi kabin dan rangka box terhadap <i>survival space</i> pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan .....	69
Gambar 4. 5 (a) <i>Gap</i> pada <i>survival space</i> kabin (b) <i>Gap</i> pada <i>survival space</i> rangka box .....	70
Gambar 4. 6 <i>Directional deformation</i> pada <i>survival space</i> dan box simulasi pertama.....	70
Gambar 4. 7 <i>Directional deformation</i> pada <i>survival space</i> dan kabin simulasi pertama.....	71
Gambar 4. 8 Simulasi guling kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian.....	72
Gambar 4. 9 Grafik dari <i>Total Energy</i> (TE), <i>Internal Energy</i> (IE) dan <i>Kinetic Energy</i> (KE) pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian .....	73
Gambar 4.10 Kecepatan pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah pada simulasi kedua .....	75
Gambar 4.11 Deformasi kabin dan rangka box terhadap <i>survival space</i> pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian .....	76
Gambar 4.12 <i>Directional deformation</i> pada <i>survival space</i> dan box simulasi kedua .....	76
Gambar 4.13 <i>Directional deformation</i> pada <i>survival space</i> dan kabin simulasi kedua .....	77
Gambar 4.14 Simulasi guling kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh .....	78
Gambar 4.15 Grafik dari <i>Total Energy</i> (TE), <i>Internal Energy</i> (IE) dan <i>Kinetic Energy</i> (KE) pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh .....	79
Gambar 4.16 Kecepatan pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah pada simulasi ketiga .....	81
Gambar 4.17 Deformasi kabin dan rangka box terhadap <i>survival space</i> pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh.....	82
Gambar 4.18 <i>Directional deformation</i> pada <i>survival space</i> dan box simulasi ketiga.....	82

Gambar 4.19 <i>Directional deformation</i> pada survival space dan kabin simulasi ketiga.....	83
Gambar 4.20 Ilustrasi deformasi pada simulasi ketiga pada bagian rangka box .....	86

## DAFTAR TABEL

### BAB 3

Tabel 3. 1 Spesifikasi umum kendaraan multiguna pedesaan .....	41
Tabel 3. 2 Massa kendaraan multiguna pedesaan terhadap variasi muatan .....	41
Tabel 3. 3 Jarak titik berat kendaraan terhadap sumbu roda depan .....	42
Tabel 3. 4 Propertis dari material <i>Steuctural Steel NL</i> .....	46
Tabel 3. 5 Propertis dari material <i>Alluminium Alloy NL</i> .....	46
Tabel 3. 6 Propertis dari material <i>Concrete</i> .....	46
Tabel 3. 7 Propertis dari material <i>Resin Epoxy</i> .....	47
Tabel 3. 8 Massa tiap bagian pada model 3D kendaraan .....	48
Tabel 3. 9 Kriteria kualitas dari <i>mesh</i> model kendaraan .....	50
Tabel 3.10 Jumlah <i>elements</i> dan <i>nodes</i> pada tiga variasi pembebanan muatan .....	51
Tabel 3.11 Pembebanan pada variasi muatan kendaraan multiguna pedesaan .....	60

### BAB 4

Tabel 4. 1 Energi yang diterima oleh kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan pada saat terjadi guling .....	67
Tabel 4. 2 Perhitungan deformasi terhadap <i>survival space</i> untuk variasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan .....	71
Tabel 4. 3 Energi yang diterima oleh kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian pada saat terjadi guling.....	74
Tabel 4. 4 Perhitungan deformasi terhadap <i>survival space</i> untuk variasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian .....	77
Tabel 4. 5 Energi yang diterima oleh kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh pada saat terjadi guling.....	80

Tabel 4. 6 Perhitungan deformasi terhadap <i>survival space</i> untuk variasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh .....	83
Tabel 4. 7 Perbandingan nilai energi kinetik hasil simulasi dengan hasil perhitungan .....	84
Tabel 4. 8 Deformasi kendaraan terhadap <i>survival space</i> berdasarkan tiga variasi pembebanan pada bagian kabin dan rangka box .....	84

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Alat transportasi merupakan salah satu teknologi yang terus berkembang guna menyesuaikan kebutuhan dari masyarakat. Salah satu alat transportasi yang dibutuhkan masyarakat saat ini adalah kendaraan multifungsi yang dapat menunjang berbagai kegiatan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) bekerja sama dengan Dinas Perindustrian dan Perdagangan mulai mengembangkan kendaraan produksi multiguna pedesaan yang dapat difungsikan sebagai penunjang bermacam-macam kegiatan perindustrian maupun UMKM<sup>[1]</sup>. Mobil multiguna pedesaan menggunakan desain mobil GEA dengan *box* belakang yang dapat diubah-ubah sesuai kebutuhan masyarakat. Pengembangan kendaraan ini mempertimbangkan banyak hal, salah satu diantaranya adalah keamanan dari penumpang. Keamanan penumpang merupakan hal yang paling utama dalam perancangan sebuah kendaraan, terutama untuk kendaraan yang mengangkut banyak penumpang.

Salah satu jenis kecelakaan yang krusial terhadap keamanan dari penumpang dan pengemudi kendaraan adalah kecelakaan *Roll-Over* atau guling. *Roll-over* merupakan sebuah kecelakaan dimana kendaraan berputar sebanyak 90 derajat atau lebih, sehingga dapat menyebabkan kendaraan berada dalam kondisi terjatuh kesamping ataupun berbalik. Pada saat kecelakaan guling terjadi, penumpang akan memiliki resiko untuk terlempar, terlempar sebagian, ataupun terhimpit. Berdasarkan data dari NHTSA (*National Highway Traffic Safety Administration*) salah satu jenis kecelakaan yang paling sering terjadi dan memiliki dampak fatal pada penumpang adalah kecelakaan guling<sup>[2]</sup>. Apabila kendaraan tidak memiliki kekuatan struktur kendaraan yang baik, penumpang akan mendapatkan luka yang fatal dan dapat menimbulkan korban. Struktur kendaraan adalah komponen dari kendaraan yang berperan dalam penyerapan energi mekanis dan

penguat konstruksi bodi kendaraan, sehingga area penumpang dapat terlindungi pada saat terjadi kecelakaan<sup>[3]</sup>.

Negara Eropa dan Amerika Serikat membentuk undang-undang terkait perlindungan kecelakaan *roll-over* untuk kendaraan bus, yaitu regulasi no 66 dari *Economic Commision for Europe* (ECE-066)<sup>[3]</sup>. Regulasi tersebut berisi tentang standar kekuatan pada struktur kendaraan bus guna memastikan perlindungan serta keamanan dari penumpang dan pengemudi kendaraan ketika terjadi kecelakaan guling melalui perlindungan *survival space* penumpang. *Survival space* merupakan area dimana tingkat keselamatan dari penumpang dan pengemudi kendaraan akan lebih tinggi ketika kecelakaan guling terjadi.

Untuk mengetahui kekuatan struktur kendaraan, perlu adanya sebuah pengujian yang dilakukan pada kendaraan tersebut. Namun pengujian guling secara langsung akan menghabiskan banyak biaya dan memerlukan kebutuhan yang cukup rumit. Saat ini dengan berkembangnya teknologi komputer dan ilmu analisis struktur berdasarkan metode elemen hingga, maka akan memungkinkan untuk melakukan suatu analisis prediktif dan pengujian tanpa melakukan eksperimen secara langsung. Simulasi dengan *Finite Element Software* merupakan metode yang paling umum digunakan untuk melakukan analisis pengujian guling guna mengetahui kekuatan struktur dari suatu kendaraan.

Pada penelitian tugas akhir ini akan dilakukan analisis numerik pengujian *roll-over* dari kendaraan produksi multiguna pedesaan dengan mengacu pada regulasi ECE-066 sebagai referensi untuk mengetahui kekuatan struktur (*superstructure*) pada kendaraan mobil tersebut. Pengujian yang dilakukan berupa simulasi dengan menggunakan metode elemen hingga (*finite elemen*). Tujuan utama dari pengujian guling ini adalah untuk menganalisis dampak pada *survival space* penumpang dengan mengacu pada regulasi ECE-066.

## 1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada penelitian tugas akhir ini, antara lain :

1. Bagaimana mendapatkan tingkat keakuratan *software* simulasi pengujian guling melalui perbandingan hasil analisis energi potensial dan energi kinetik yang diterima oleh model simulasi kendaraan dengan perhitungan secara matematis.
2. Bagaimana dampak yang terjadi pada *survival space* pada saat kendaraan mengalami deformasi akibat kecelakaan guling, sehingga dapat menentukan apakah struktur kendaraan aman dan apabila tidak aman maka akan ditambahkan penguat pada bagian yang paling banyak mengalami deformasi.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Maksud dan tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Mendapatkan tingkat keakuratan *software* simulasi pengujian guling melalui perbandingan hasil analisis energi potensial dan energi kinetik yang diterima oleh model simulasi kendaraan dengan perhitungan secara matematis.
2. Menganalisis dampak yang terjadi pada *survival space* pada saat kendaraan mengalami deformasi akibat kecelakaan guling, sehingga dapat menentukan apakah struktur kendaraan aman dan apabila tidak aman maka akan ditambahkan penguat pada bagian yang paling banyak mengalami deformasi

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Analisis dibatasi hanya pada bagian kabin depan dan box mobil multiguna pedesaan
2. Seluruh peralatan yang berada didalam daerah *survival space* diabaikan pada saat pengujian guling.

3. Posisi *transversal* dari *center of gravity (CoG)* kendaraan diasumsikan berada pada titik tengah (setengah dari lebar kendaraan).
4. Sambungan dari tiap *joint* diasumsikan sempurna pada saat dilakukan pengujian.
5. Kecelakaan guling yang terjadi adalah antara kendaraan dan permukaan jalan. Permukaan dengan material lain diabaikan.
6. Material selain dari kabin depan dan box mobil multiguna pedesaan dianggap *rigid*.
7. Bagian roda, *chassis* dan kemudi diabaikan pada saat simulasi pengujian
8. Analisis simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* simulasi *Explicit Dynamics ANSYS* berbasis metode elemen hingga

### 1.5 Manfaat Penulisan

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Sebagai referensi untuk membuat desain kendaraan produksi multiguna pedesaan yang lebih baik.
2. Sebagai media penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan didunia otomotif.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

#### **Bab I Pendahuluan**

Berisikan latar belakang, pokok permasalahan, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penulisan serta sistematika laporan

#### **Bab II Tinjauan Pustaka**

Berisikan teori-teori pendukung yang digunakan dalam menyusun tugas akhir ini.

#### **Bab III Metodologi**



Berisikan prosedur pelaksanaan pengujian dan pengambilan data serta prosedur analisa.

#### **BAB IV Pembahasan**

Berisikan analisa data dari hasil penelitian yang sudah dilakukan.

#### **BAB V Kesimpulan dan Saran**

Berisikan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan dan saran untuk penelitian tersebut.

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Mobil Multiguna Pedesaan

Pada tahun 2016 Kementerian Perindustrian Republik Indonesia mencanangkan pengembangan mobil pedesaan bersama dengan Institut Otomotif Indonesia (IOI). Beberapa perguruan tinggi ikut serta dalam pengembangan rancangan tersebut dan salah satunya adalah Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS).

Dalam proses pembuatannya, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) bekerjasama dengan konsorsium yang terdiri dari PT. Industri Kereta Api (INKA), PT. Railindo Global Karya, Dinas Perindustrian dan Perdagangan Jatim, dan Industri Kecil Menengah (IKM) Jatim dan menghasilkan sebuah mobil dengan sebutan mobil GEA. GEA merupakan singkatan dari Gulirkan Energi Alternatif. Mobil ini pada awalnya dibuat pada tahun 2013 dalam bentuk prototype dan terus dikembangkan hingga saat ini.



Gambar 2.1 Mobil multiguna pedesaan rancangan ITS

Mobil GEA ini memiliki kelebihan mampus melakukan empat fungsi sekaligus, yakni mobil toko untuk berjualan, mobil penumpang, mobil pengangkut barang, serta mobil produksi. Desain mobil dengan bentuk pick up minimalis dan box dibagian

belakang yang dapat dibongkar pasang mendukung keempat fungsi tersebut. Sumber tenaga mobil ini adalah mesin berkapasitas 640 cc yang terletak di bagian bawah *chassis*. Diameter ban berukuran 13 inci yang tergolong mobil mini, *dashboard* didesain minimalis dengan panel kecepatan terletak di bagian tengah. Terdapat jarum penunjuk kecepatan, indikator bahan bakar, temperatur, oli, dan lampu yang terletak didalam panel. Untuk membuka dan menutup kaca pintu depan dilakukan secara manual.

Berbagai penelitian dan pengembangan terus dilakukan guna meningkatkan efisiensi dan optimalisasi kendaraan, salah satunya adalah penelitian tentang kekuatan struktur kendaraan. Kendaraan yang baik tentu mempunyai kekuatan struktur yang baik. Kekuatan struktur pada kendaraan mobil multiguna pedesaan inilah yang menjadi tinjauan dalam penelitian tugas akhir kali ini.

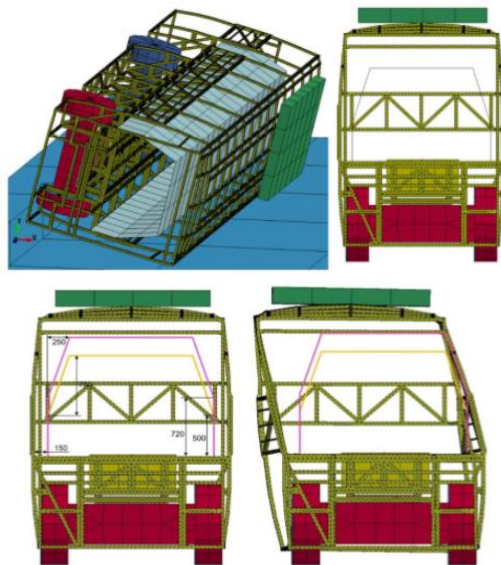
## **2.2 Kajian Pustaka**

Pada beberapa tahun terakhir, telah banyak peneliti yang menaruh perhatian pada kasus guling di kendaraan bus. Dalam sebagian besar penelitian tersebut, objek yang menjadi perhatian adalah dampak dan kerusakan dari kecelakaan guling, bukan penyebab dari kecelakaan guling tersebut. Bagaimanapun penyebab dari kecelakaan guling juga merupakan hal yang penting untuk diperhatikan, serta hubungan penyebab kecelakaan tersebut dengan desain kerangka bus maupun struktur kendaraan dari bus tersebut.

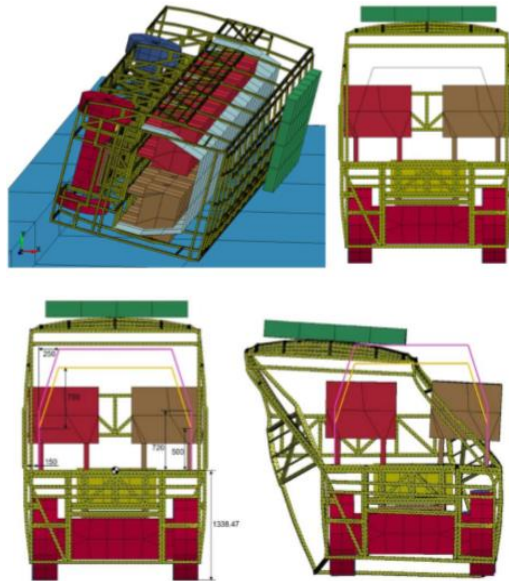
### **2.2.1 Pengujian Guling Dengan Variasi Beban Muatan**

Penelitian mengenai simulasi uji guling kendaraan bus menggunakan model elemen hingga dilakukan oleh Satrio Wicaksono, M. Rizka Faisal Rahman, Sandro Mihradi dan Indra Nurhadi<sup>[4]</sup> pada tugas akhir yang berjudul “*Finite Element Analysis of Bus Rollover Test in Accordance with UN ECE R66 Standart*”, tahun 2017. Simulasi uji guling dilakukan dengan menggunakan model kendaraan bus yang dibuat berdasarkan desain struktur bus dari PT. Rahayu Sentosa tipe R260.

Penulis melakukan analisis variasi pembebanan pada kondisi kendaraan kosong dengan massa total 6191 kg dan kondisi bus diisi oleh penumpang dengan massa total 9233 kg. Kecepatan angular pada pembebanan kendaraan kosong diperoleh sebesar 2,007 rad/s, yang didapatkan melalui konversi seluruh energi potensial kendaraan menjadi energi rotasi kinetik. Pada kondisi kendaraan penuh, terdapat perubahan ketinggian *center of gravity* dari 977 mm menjadi 1283 mm diatas permukaan tanah. Perubahan tersebut menghasilkan perubahan kecepatan angular sebesar 2,119 rad/s.



Gambar 2.2 Model elemen hingga dari kendaraan kosong

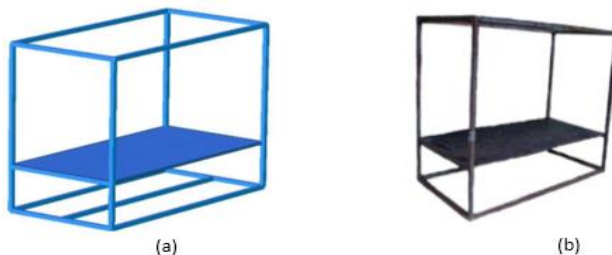


Gambar 2.3 Model elemen hingga dari kendaraan penuh

Hasil dari analisis yang telah dilakukan oleh peneliti pada kendaraan kondisi kosong dan kondisi penuh menunjukkan bahwa struktur dari kendaraan bus tidak cukup kuat untuk menahan beban *impact*, dikarenakan hasil deformasi yang melebihi dimensi dari *survival space*. Pada kondisi muatan penuh kendaraan mengalami dampak kerusakan yang lebih parah dibandingkan dengan kondisi kosong. Hal tersebut disebabkan karena adanya tambahan berat yang mengakibatkan perubahan *center of gravity* sehingga energi potensial dari struktur akan meningkat, yang juga mengakibatkan meningkatnya energi kinetik yang diserap oleh struktur saat terjadi benturan. Penulis menyarankan model bus dari PT. Rahayu Sentosa R260 perlu diperkuat dan dimodelkan kembali (*remodeling*) dan simulasi yang sama perlu dilakukan pada setiap model bus lainnya.

### 2.2.2 Penggunaan Metode Simulasi Elemen Hingga Untuk Analisa Pengujian Guling

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh MD. Liakat Ali <sup>[5]</sup> di tahun 2008, mencoba melakukan validasi pengujian guling kendaraan bus menggunakan *software* elemen hingga. Validasi dilakukan untuk mengamati tingkat keakuratan pengujian berdasarkan simulasi komputer dari *software* simulasi elemen hingga, dengan berbagai input dan material yang digunakan, sebelum melakukan simulasi pada model kendaraan secara keseluruhan. Proses validasi dilakukan dengan membentuk model berupa *simplified box* yang memiliki material dan karakteristik struktur yang hampir menyerupai dengan *frame* dari kendaraan asli, kemudian model box tersebut akan diuji melalui eksperimen uji guling langsung dan dibandingkan dengan hasil pengujian model box melalui *software* simulasi. Parameter yang akan diamati pada proses validasi adalah deformasi pada struktur dan pola dari gerakan guling.



Gambar 2.4 (a) Model box yang digunakan pada simulasi.  
(b) Model box yang digunakan pada eksperimen

Hasil yang didapatkan pada simulasi dibandingkan dengan hasil eksperimen. Nilai deformasi maksimal yang didapatkan dari simulasi *software* elemen hingga sebesar 1947  $\mu\text{m}$  dan yang didapatkan dari eksperimen sebesar 1801  $\mu\text{m}$ . Kemudian untuk parameter penting lain yaitu pola dari gerakan guling, antara simulasi dan eksperimen memiliki pola gerakan yang benar-benar

sama. Hal ini membuktikan bahwa input yang diberikan pada simulasi dari model tersebut akurat jika dibandingkan dengan hasil praktikal. Penulis menyimpulkan bahwa pengujian guling menggunakan *software* elemen hingga adalah metode yang akurat untuk mendapatkan hasil deformasi guling yang menyerupai pengujian secara langsung.

### 2.2.3 Pengaruh *Center of Gravity* Terhadap Kecenderungan Guling

Penelitian lain dilakukan oleh Andrzej Reński <sup>[6]</sup> pada penelitian yang berjudul “*Investigation of The Influence of The Center of Gravity Position on The Course of Vehicle Rollover*” tahun 2015. Peneliti menyatakan bahwa kendaraan yang memiliki letak *center of gravity* yang tinggi memiliki kecenderungan untuk mengalami kecelakaan guling. Dalam dinamika kendaraan, kecelakaan guling dianggap sebagai kehilangan stabilitas kendaraan ( *loss of stability* ). Kehilangan stabilitas dapat menyebabkan kendaraan terpelanting dari jalan, terguling, ataupun tertabrak dengan kendaraan lain. Penulis menitikberatkan pada kasus kehilangan stabilitas kendaraan berupa *Tripped Rollover* pada sumbu melintang yang diakibatkan pada saat kendaraan melewati jalan dengan koefisien gesek yang sangat tinggi seperti pasir, pinggiran jalan (*curb*) ataupun penghalang lain (*obstacle*).

Hasil yang didapatkan dari analisa *tripped rollover*, disimpulkan bahwa pada kasus ini, kriteria keamanan kendaraan dinyatakan dengan *Critical Sliding Velocity* (CSV). CSV merupakan daya tahan kendaraan agar tidak berguling saat kendaraan mengenai *obstacle*. Untuk kendaraan dengan penumpang, nilai CSV sekitar 20 km/jam, atau lebih kecil untuk kendaraan dengan posisi *center of gravity* yang lebih tinggi, dan untuk bus dengan dua dek dan sejenisnya memiliki nilai CSV sekitar 15 km/jam. Berdasarkan analisa, penulis menyimpulkan bahwa semakin tinggi *center of gravity*, maka semakin besar nilai dari kecepatan rotasi kendaraan, sehingga semakin besar pula kecenderungan untuk terjadinya kecelakaan guling.



Dari beberapa penelitian diatas, pengujian guling untuk menentukan kekuatan struktur merupakan hal yang perlu diperhatikan. Salah satu metode yang dapat dilakukan adalah pengujian kendaraan melalui simulasi komputer dengan metode analisa elemen hingga. Dengan semakin berkembangnya teknologi dan analisa struktural melalui metode elemen hingga, analisa prediktif dan perlidungan pada saat terjadi kecelakaan dapat dilakukan.

## **2.3 Dasar Teori**

### **2.3.1 Jenis – Jenis Kecelakaan Guling**

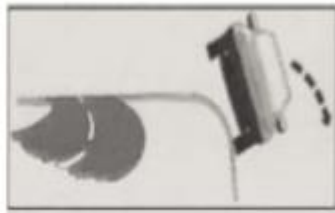
Kecelakaan guling merupakan salah satu tipe kecelakaan yang menimbulkan dampak fatal baik pada penumpang maupun pada kendaraan itu sendiri. Sebagian besar kecelakaan guling terjadi pada saat kendaraan terpelanting atau berotasi kesamping dari jalan akibat adanya lubang, bebatuan, benda licin dan objek lainnya. Disamping itu, kecepatan kendaraan pada saat lurus ataupun berbelok dapat menyebabkan dampak kerusakan yang lebih fatal pada penumpang dan juga kendaraan. Dalam sebagian besar kasus guling, bagian kendaraan yang paling rawan mengalami kerusakan adalah pada bagian atap dan bagian sisi samping akibat energi *impact* yang ditimbulkan dengan permukaan jalan. Kecelakaan guling memiliki beberapa jenis tipe tergantung pada penyebab terjadinya guling itu sendiri. Jenis kecelakaan guling tersebut adalah :

- a. *Trip – Over* : Jika gerakan lateral dari kendaraan secara tiba-tiba semakin pelan atau berhenti akibat penghalang, gerakan tersebut menimbulkan kecenderungan pada kendaraan untuk berguling. Gaya reaksi tersebut dapat disebabkan oleh bebatuan, lubang, atau profil jalan yang tidak lurus.



Gambar 2.5 Kendaraan terpelanting dari permukaan tanah

- b. *Fall-over* : Jenis kecelakaan ini dapat terjadi ketika permukaan jalan, memiliki *slope* atau kemiringan ke arah bawah dari pergerakan kendaraan sehingga perubahan *Center of Gravity* akan terbeban pada bagian roda.



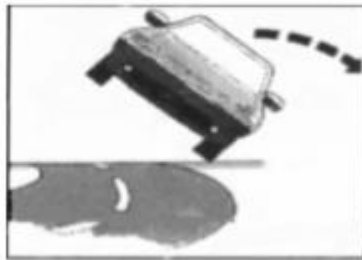
Gambar 2.6 Kendaraan terjatuh dari permukaan jalan

- c. *Flip-Over* : Ketika suatu kendaraan berotasi sepanjang sumbu membujur akibat objek yang melandai seperti rel kereta atau aspal yang menggebu, kendaraan dapat terguncang kemudung berguling.



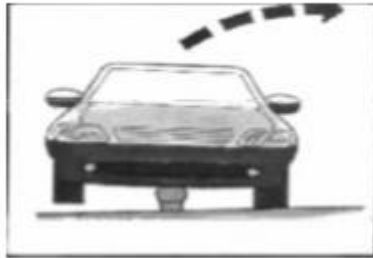
Gambar 2.7 Kendaraan berotasi akibat objek landai

- d. *Turn-over* : Kecelakaan guling ini dapat terjadi akibat gaya sentrifugal dari belokan yang tajam dan tertahan oleh gaya gesek permukaan tanah. Jika sebuah rotasi dan/atau gesekan permukaan menyebabkan *trip* (tersandung), maka jenis guling ini dapat dinyatakan sebagai *turn-over*.



Gambar 2.8 Kendaraan tersandung akibat gaya sentrifugal

- e. *Collision with another vehicle* : Ketika sebuah kendaraan bertabrakan menyamping dengan kendaraan lain, maka kecelakaan guling dapat terjadi.
- f. *Climb-over* : Ketika kendaraan menanjaki *fixed object* yang cukup tinggi untuk mengangkat kendaraan dari permukaan tanah, kendaraan tersebut pasti akan berguling ke arah sisi yang berlawanan dari arah objek yang didekati kendaraan.



Gambar 2.9 Kendaraan memanjat *fixed object* yang tinggi  
 g. *End-Over-End* : Ketika kendaraan berputar pada sumbu melintang (*lateral*), maka gerakan guling dari kendaraan tersebut disebut dengan *end-over-end*.



Gambar 2.10 Gerakan *end-over-end* pada kendaraan  
 Kecelakaan guling untuk semua jenis dapat menimbulkan dampak yang fatal baik pada penumpang maupun pada kendaraan. Pada saat kecelakaan guling terjadi, penumpang akan memiliki resiko untuk terlempar, terlempar sebagian, ataupun terhimpit. Maka dari itu, analisa terhadap dampak akibat kecelakaan guling merupakan hal yang penting untuk diteliti, dan perlu adanya sebuah solusi untuk mengurangi dampak kerusakan yang terjadi akibat guling.

### 2.3.2 Regulasi Keamanan Kendaraan

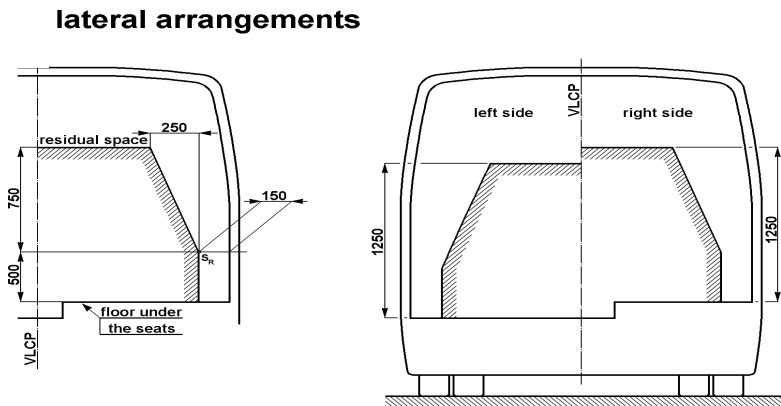
*Economic Commission for Europe Regulation No. 66 (ECE-066)* merupakan sebuah regulasi yang dibuat oleh negara *Eropa* dan *United States of America* untuk memastikan kendaraan dapat tetap aman pada saat terjadi kecelakaan berupa guling. Regulasi ini meliputi mekanisme pengujian, ukuran *survival space*, metode pengujian yang dapat dilakukan, penentuan *center of gravity*, serta syarat dan ketentuan yang harus dipenuhi oleh manufaktur kendaraan. Struktur kendaraan harus memiliki kekuatan yang cukup sehingga pada saat terjadi kecelakaan guling, tidak ada bagian kendaraan seperti rak barang, peralatan ventilasi, dan lain sebagainya yang mengganggu *survival space* penumpang. Struktur suatu kendaraan dapat dinyatakan **aman** apabila pada saat sebelum dan setelah terjadinya guling, *survival space* tidak terganggu dan tetap terlindungi. Pada regulasi ECE-066 ini, terdapat lima metode pengujian yang dapat dilakukan, yaitu :

- *Complete Vehicle Roll-Over Test*  
Pengujian secara langsung pada kendaraan sepenuhnya
- *Body Section Roll-Over Test*  
Pengujian secara langsung pada bagian body kendaraan
- *Body Section Test with Quasi-Static Load*  
Pengujian secara langsung dengan menggunakan beam sebagai beban yang dikenakan menuju bagian samping kendaraan
- *Components Testing Based On Quasi-Static Calculation*  
Pengujian secara langsung dengan menggunakan komponen rigid yang memiliki ukuran yang sama dengan dimensi aktual kendaraan
- *Complete Vehicle Roll-Over Test Based On Computer Simulation*  
Pengujian menggunakan simulasi komputer

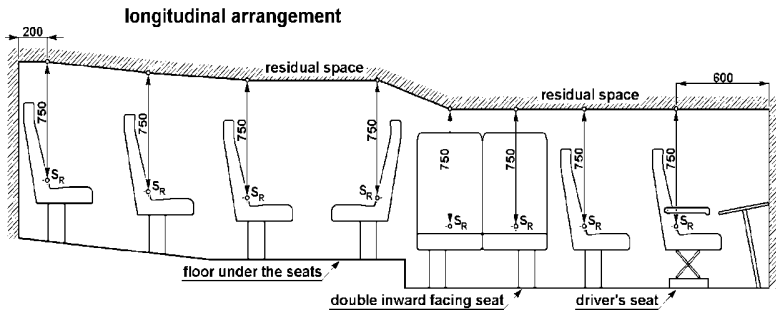
Sebuah kendaraan dapat dinyatakan aman jika kebutuhan dari salah satu pengujian diatas sudah dipenuhi. Pada tugas akhir ini, objek penelitian berupa mobil multiguna pedesaan akan diuji dengan mengacu pada regulasi ECE-066. Pengujian berupa simulasi komputer dengan analisa elemen hingga (*finite elemen*).

### 2.3.2.1 *Survival Space*

*Survival space* atau biasa disebut *residual space* merupakan sebuah area yang harus terlindungi pada saat kecelakaan guling terjadi, dimana area tersebut meliputi ruang penumpang, awak kabin dan supir. *Survival space* merupakan acuan yang sangat penting dalam menentukan apakah struktur pada suatu kendaraan memiliki kekuatan yang cukup untuk melindungi penumpang agar tetap aman pada saat terjadi kecelakaan. Berdasarkan regulasi ECE-066, *survival space* digambarkan dengan bidang melintang vertikal dan penampang berbentuk *trapezoid*.



Gambar 2.11 Bidang melintang dari *survival space*



Gambar 2.12 Bidang membujur dari *survival space*

*Survival space* memiliki beberapa ketentuan ukuran, diantaranya adalah :

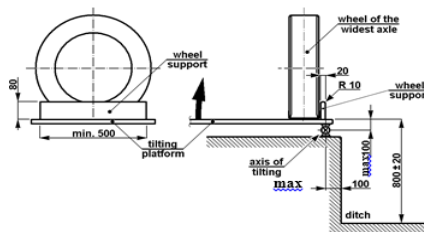
1. Titik  $S_R$  yang terletak pada bagian tengah kursi, baik untuk kursi yang menghadap kedepan maupun menghadap kebelakang (atau diposisi manapun) berada di ketinggian 500 mm diatas lantai bawah kursi dan 150 mm dari sisi samping dinding dalam (*inner surface*) kendaraan.
2. Jika dua sisi dari kendaraan tidak simetris dikarenakan susunan dari lantai, maka ketinggian dari titik  $S_R$ , jarak antara dua garis lantai dari *survival space* akan diambil sebagai *Vertical Longitudinal Center Plane* (VLCP) pada kendaraan
3. Posisi paling belakang dari *survival space* merupakan bidang vertikal sejauh 200 mm dibelakang titik  $S_R$  dari kursi paling belakang. Posisi paling depan dari *survival space* adalah bidang vertikal sejauh 600 mm didepan titik  $S_R$  dari kursi paling depan. Jika posisi kursi paling depan dan kursi paling belakang dari kendaraan tidak berada pada bidang melintang yang sama, maka panjang dari *survival space* pada setiap sisi akan berbeda menyesuaikan dengan posisi kursi.
4. Ketinggian minimal *residual space* adalah 750 mm. *Survival space* meliputi bagian pengendara, awak kabin dan penumpang antara bidang paling depan dan bidang paling belakang dan digambarkan dengan bidang vertikal melintang sepanjang jarak kendaraan melewati titik  $S_R$

Bentuk *survival space* diatas adalah kontinu sesuai dengan panjang kendaraan, dan dapat dimodifikasi oleh manufaktur kendaraan dalam ukuran yang lebih besar untuk kebutuhan simulasi dan improvisasi desain kendaraan.

### 2.3.2.2 Metode Pengujian Berdasarkan Regulasi ECE-066

Untuk mengetahui kekuatan dari struktur kendaraan, perlu dilakukan sebuah pengujian kendaraan secara keseluruhan. Berdasarkan regulasi ECE-066, salah satu metode pengujian yang dapat dilakukan untuk memastikan kekuatan dari struktur kendaraan adalah metode pengujian menggunakan simulasi komputer. Dengan berkembangnya teknologi komputer dan analisa struktur melalui metode elemen hingga maka pengujian dapat dilakukan menggunakan simulasi komputer, dan metode ini juga menghemat biaya dan waktu jika dibandingkan dengan pengujian secara langsung.

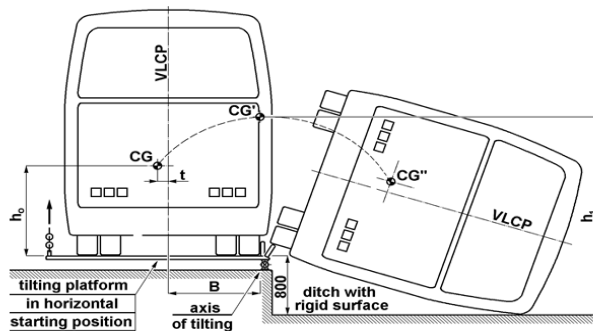
Model dari kendaraan dibuat, lalu disimulasikan menggunakan *software* elemen hingga. Mengacu pada regulasi ECE-066, pengujian kendaraan dilakukan pada bidang datar yang dapat dimiringkan (*tilting platform*). *Tilting platform* berada pada ketinggian 800 mm diatas permukaan dan digunakan untuk merubah posisi dari *center of gravity* dari kendaraan. Sebelum pengujian dimulai, kendaraan berada pada posisi diam diatas *tilting platform* dan roda kendaraan diberi penahan (*wheel support*) agar tidak terjadi *slip* pada saat pengujian.



Gambar 2.13 Lokasi penahan pada saat kendaraan diam



Kendaraan yang berada pada kondisi diam dimiringkan secara perlahan pada kecepatan angular 0,087 rad/sec sampai dengan kondisi kendaraan tidak stabil (*unstable equilibrium state*). Pada saat kendaraan berada di kondisi tidak stabil ini, posisi *center of gravity* kendaraan berada pada ketinggian maksimal dan analisa pengujian guling dimulai. Perubahan dari letak *center of gravity* menyebabkan kendaraan berguling dan berada pada kondisi miring sepenuhnya (*fully tilting state*). Perubahan posisi *center of gravity* kendaraan ditunjukkan oleh gambar berikut :



Gambar 2.14 Ilustrasi perubahan *center of gravity* kendaraan

Dimana :

CG : Posisi awal *center of gravity* kendaraan pada saat kendaraan berada pada kondisi diam diatas *Tilting Platform*

CG' : Posisi kedua *center of gravity* kendaraan di ketinggian maksimal dimana kendaraan akan berada kondisi tidak stabil (*unstable equilibrium state*)

CG'' : Posisi akhir *center of gravity* kendaraan pada saat kendaraan berada pada kondisi miring sepenuhnya (*fully tilt state*)

Kendaraan akan mengalami deformasi struktur dikarenakan adanya penyerapan energi mekanis pada saat berguling. Struktur

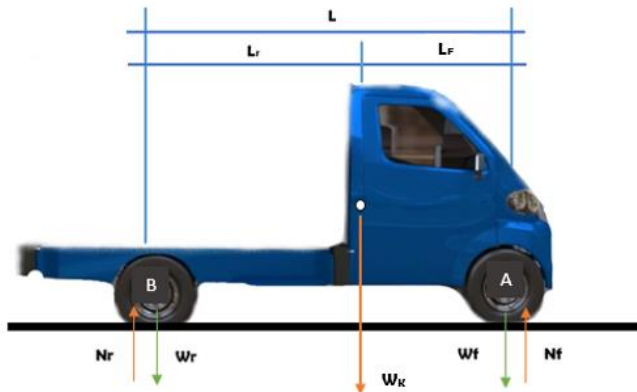
tersebut kemudian dianalisa dan dioptimasi agar *survival space* dapat tetap aman pada saat kecelakaan terjadi.

### 2.3.3 *Center of Gravity* Kendaraan

Penyerapan energi mekanis pada saat terjadi guling bergantung sepenuhnya terhadap posisi dari *center of gravity* kendaraan. Dalam analisa pengujian guling, lokasi titik berat kendaraan memegang peranan penting. Untuk mendapatkan titik berat dari kendaraan, dapat dilakukan dengan cara mengetahui gaya reaksi yang terjadi pada berat kendaraan depan dan gaya reaksi yang terjadi pada berat kendaraan belakang. Pengukuran dilakukan pada saat kendaraan berada pada posisi datar/horizontal. Pada kendaraan kosong, gaya reaksi pada kendaraan bagian depan ( $W_f$ ) dan gaya reaksi pada kendaraan bagian belakang ( $W_r$ ) apabila dijumlahkan akan sama dengan berat total dari kendaraan ( $W$ ). Dimana nilai  $W_f$  dan  $W_r$  bila dijumlahkan akan bernilai  $W$  ( $W = W_f + W_r$ ).

Pada analisa pengujian guling ini, terdapat dua parameter yang perlu ditinjau yaitu jarak longitudinal dari *center of gravity* kendaraan ( $L$ ) dan ketinggian *center of gravity* dari *ground* ( $h$ ). Posisi titik berat yang akan dicari adalah pada saat mobil multiguna pedesaan disertai penambahan muatan dan penumpang didalam *box*.

### 2.3.3.1 Jarak Longitudinal dari *Center of Gravity* (L)



Gambar 2.15 *Free body diagram* dan *center of gravity* kendaraan sebelum penambahan berat muatan dan penumpang

Pada kendaraan multiguna pedesaan tanpa box sebelum penambahan berat muatan dan penumpang, dengan memperhatikan *free body diagram* pada gambar 2.14 dan menggunakan sumbu roda depan sebagai pusat momen, maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\sum M_A = 0$$

$$N_R \cdot L = W_k \cdot L_F \quad (2.1)$$

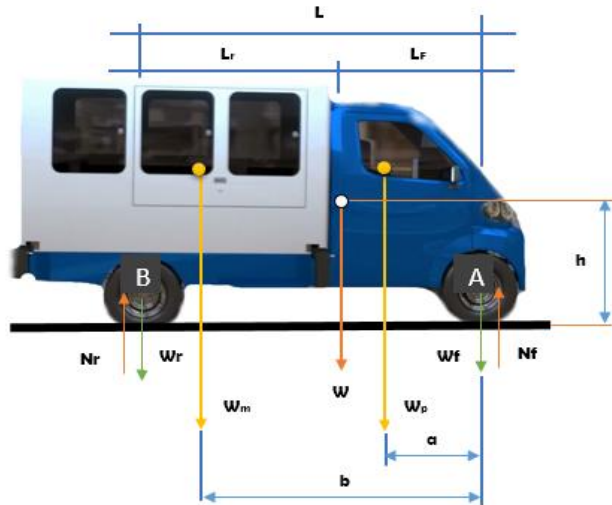
$$L = L_F + L_R \quad (2.2)$$

Dimana :

$W_k$  : Berat total kendaraan =  $W_r + W_f$

$L$  : Jarak sumbu roda =  $L_F + L_R$

Sedangkan untuk posisi titik berat pada kendaraan multiguna pedesaan dengan box setelah menerima penambahan berat muatan dan penumpang dapat dicari dengan memperhatikan *free body diagram* pada gambar 2.15.



Gambar 2.16 *Free body diagram* dari *center of gravity* kendaraan setelah penambahan berat muatan dan penumpang

Persamaan yang digunakan untuk mengetahui titik berat dan posisi *center of gravity* dituliskan pada persamaan dibawah ini :

$$\sum M_A = 0$$

$$N_r \cdot L = W_p \cdot a + W_k \cdot L_f + W_m \cdot b \quad (2.3)$$

Untuk mendapatkan jarak *center of gravity* ke sumbu roda depan sumbu roda belakang dapat dicari menggunakan gaya berat di bagian depan dan bagian belakang :

$$L_F = \frac{N_r \cdot L}{W}$$

$$L_R = \frac{N_f \cdot L}{W} \quad (2.4)$$

Dimana W merupakan gaya berat total :

$$W = W_p + W_k + W_m \quad (2.5)$$

Keterangan :

$W_r = N_r$  : Gaya reaksi berat bagian belakang

$W_f = N_f$  : Gaya reaksi berat bagian depan

$W_k$  : Berat kendaraan =  $W_r + W_f$

$W_m$  : Berat bagian muatan box

$W_p$  : Berat bagian penumpang kabin depan

$W$  : Berat total kendaraan ( $W = W_p + W_k + W_m$ )

$L$  : Jarak sumbu roda

$a$  : Jarak titik berat penumpang ke sumbu roda depan

$b$  : Jarak titik berat muatan ke sumbu roda depan

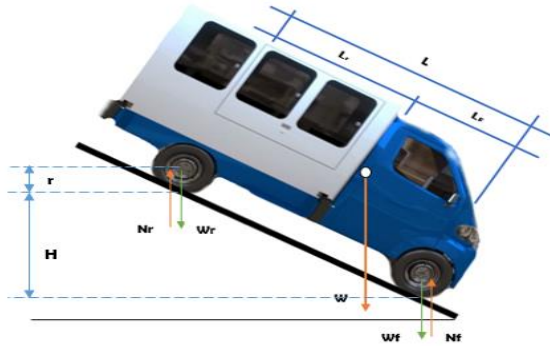
$L_F$  : Jarak *center of gravity* ke sumbu roda depan

$L_R$  : Jarak *center of gravity* ke sumbu roda belakang

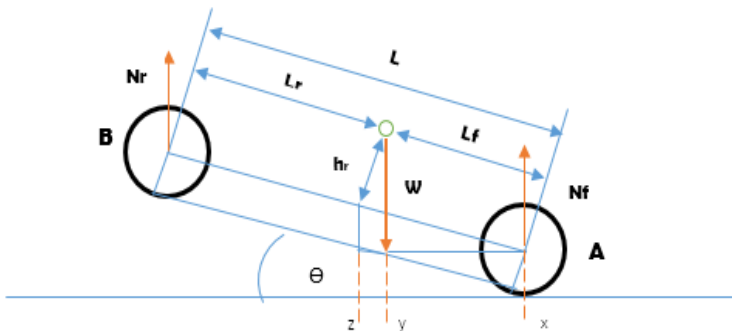
### 2.3.3.2 Ketinggian *Center of Gravity* dari Ground (h)

Ketinggian dari *center of gravity* kendaraan bisa didapatkan dengan cara menopang roda depan atau roda belakang dan mendongkrak roda lainnya hingga membentuk sudut ( $\Theta$ ).

Ilustrasi dan *free body diagram* pada saat membentuk sudut dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.17 Ilustrasi kendaraan pada saat membentuk sudut  $\Theta$



Gambar 2.18 *Free body diagram* kendaraan pada saat membentu sudut  $\Theta$

Sudut kemiringan pada kendaraan didapatkan melalui persamaan :

$$\Theta = \arcsin \frac{H}{L}$$

Ketinggian dari *center of gravity* kendaraan didapatkan melalui persamaan berikut :

$$\Sigma M_A = 0$$

$$N_r \cdot L \cos \theta - W (xy) = 0$$

$$N_r \cdot L \cos \theta = W (xy) \quad (2.6)$$

Dari Gambar didapat :

$$xy = xz - yz$$

Dimana :

$$xz = L_f \cos \theta$$

$$yz = h_r \sin \theta$$

Maka persamaan xy menjadi :

$$xy = L_f \cos \theta - h_r \sin \theta \quad (2.7)$$

Substitusi persamaan (2.7) ke persamaan (2.6), sehingga :

$$N_r \cdot L \cos \theta = W \cdot (L_f \cos \theta - h_r \sin \theta)$$

$$h_r = \frac{W \cdot L_f - N_r \cdot L}{W \cdot \tan \theta} \quad (2.8)$$

Maka ketinggian dari *center of gravity* akan didapatkan :

$$h = h_r + r$$

Nilai dari  $h_r$  akan berubah akibat pengaruh penambahan penumpang pada kabin depan, sehingga persamaan akan menjadi sebagai berikut :

$$h'_r = \frac{W \cdot L_f + W_p \cdot a - N_r \cdot L}{W \cdot \tan \theta} \quad (2.9)$$

Apabila ditambahkan berat penumpang pada kabin depan dan berat muatan pada box, persamaan akan menjadi sebagai berikut :

$$h''_r = \frac{W \cdot L_f + W_p \cdot a + W_m \cdot b - N_r \cdot L}{W \cdot \tan \theta} \quad (2.10)$$

Keterangan :

$h_r$  : Ketinggian *center of gravity* diatas bidang sumbu roda

$h'_r$  : Ketinggian *center of gravity* diatas bidang sumbu roda setelah penambahan berat penumpang

$h''_r$  : Ketinggian *center of gravity* diatas bidang sumbu roda setelah penambahan berat penumpang dan berat muatan

H : Perbedaan ketinggian roda pada sumbu roda pertama dan sumbu roda kedua

r : Jari – jari roda

L : Jarak sumbu roda

a : Jarak titik berat penumpang ke sumbu roda depan

b : Jarak titik berat muatan ke sumbu roda depan

$L_F$  : Jarak *center of gravity* ke sumbu roda depan

$L_R$  : Jarak *center of gravity* ke sumbu roda belakang

$W_p$  : Berat bagian penumpang kabin depan

$W_m$  : Berat bagian muatan box

$W_k$  : Berat Kendaraan

$W$  : Berat total kendaraan

$W_R = N_r$  : Gaya reaksi berat bagian belakang

$W_f = N_f$  : Gaya reaksi berat bagian depan



### 2.3.4 Energi Rotasi Kinetik pada Kasus Guling Kendaraan

Setiap benda yang bergerak memiliki energi kinetik yang tersimpan didalamnya. Dalam gerakan translasi, energi kinetik sebuah benda dapat dihitung dengan menggunakan massa dan kecepatan linear dari benda tersebut. Namun akan berbeda untuk benda *rigid* yang mengalami gerakan rotasi. Energi kinetik dari benda yang berotasi pada dasarnya memiliki nilai yang sama dengan energi kinetik dari benda linear. Energi kinetik dari benda yang berotasi dapat dinyatakan dalam bentuk kecepatan angular dan momen inersia dari benda tersebut. Hal tersebut dikarenakan kecepatan linear di setiap titik pada benda *rigid* memiliki nilai yang berbeda, tetapi kecepatan angular bernilai sama untuk keseluruhan benda *rigid*. Persamaan energi kinetik total pada benda *rigid* yang berotasi adalah :

$$E_K = \sum \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \sum \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r \cdot \omega)^2 = \frac{1}{2} (\sum m \cdot r^2) \cdot \omega^2 \quad (2.11)$$

Rumus untuk momen inersia adalah :

$$I = \sum m \cdot r^2$$

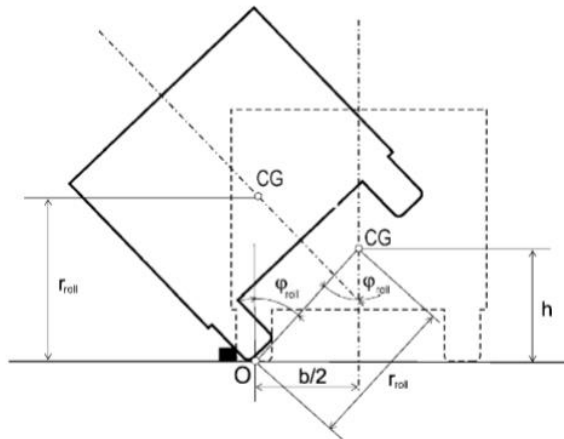
Sehingga persamaan energi kinetik untuk benda *rigid* yang berotasi adalah :

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (2.12)$$

Dimana :

$E_K$	: Energi kinetik benda
$m$	: Massa benda
$v$	: Kecepatan linear benda
$r$	: Jari-jari rotasi
$\omega$	: Kecepatan rotasi/angular benda
$I$	: Momen Inersia benda

Pada kasus guling kendaraan, sebagian besar kecelakaan guling terjadi akibat benturan antara roda kendaraan dengan bebatuan, pinggiran jalan ataupun penghalang lain (*Trip-Over*)<sup>[6]</sup>. Pergerakan dari kendaraan dianggap sebagai gerakan datar pada bidang yang tegak lurus dengan sumbu sepanjang longitudinal (Gambar 2.19). Gaya reaksi yang timbul akibat benturan tersebut menyebabkan kendaraan akan bergerak rotasi sepanjang sumbu rotasi O. Kendaraan akan berguling apabila posisi *center of gravity* kendaraan berada pada ketinggian maksimal dan sejajar langsung dengan sumbu rotasi sepanjang titik kontak roda dan tanah O. Dalam kasus ini, gerakan kendaraan dapat dibagi menjadi dua fasa.



Gambar 2.19 Skema kendaraan pada saat terkena gaya reaksi akibat benturan

Fasa pertama : Pada kondisi ini, kendaraan akan diam sesaat dan memiliki energi potensial terbesar. Setelah itu pergerakan guling akan dimulai. Sehingga karakteristik kendaraan dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$E_p = m \cdot g \cdot r_{roll} \quad (2.13)$$

Fasa 2 : Pergerakan guling terjadi dan mengakibatkan kendaraan bertumbukan dengan tanah. Berdasarkan hukum kekekalan energi mekanis, dikarenakan benda bergerak rotasi, maka seluruh energi potensial yang terjadi di fasa pertama akan dikonversikan menjadi energi kinetik rotasi. Sehingga karakteristik kendaraan dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$E_K = E_P ;$$

$$\frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 = m \cdot g \cdot (r_{roll} - h_{lower}) \quad (2.14)$$

Dimana  $h_{lower}$  merupakan ketinggian *center of gravity* kendaraan pada saat kendaraan terjatuh diatas tanah.

Sehingga kecepatan rotasi/angular pada saat bertumbukan dapat dinyatakan dengan :

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot (r_{roll} - h_{lower})}{I}} \quad (2.15)$$

### 2.3.5 Analisa Metode Elemen Hingga

*Finite Element Analysis* (FEA) atau disebut metode elemen hingga adalah metode numerik yang digunakan untuk memecahkan permasalahan dalam bidang rekayasa atau pun bidang fisik lain. Permasalahan – permasalahan dalam bidang rekayasa yang dapat dipecahkan dengan metode ini meliputi analisis struktur, analisis tegangan, perpindahan panas dan massa, serta medan elektromagnetik. Permasalahan-permasalahan yang melibatkan bentuk geometri, kondisi pembebanan serta sifat mekanik material yang kompleks tidak mungkin untuk dipecahkan dengan menggunakan persamaan yang biasa disebut dengan penyelesaian analitis. Penyelesaian analitis ini umumnya memerlukan penyelesaian persamaan deferensial parsial. Oleh karena itu, metode numerik seperti FEA adalah metode yang banyak digunakan untuk memecahkan permasalahan yang kompleks tersebut. Pada permodelan di dalam FEA, suatu struktur dibagi menjadi bagian yang lebih kecil yang disebut dengan

*element*, yang mana elemen-elemen tersebut saling berhubungan dengan elemen lain pada titik-titik simpul elemen atau dikenal dengan node (*nodal*). Proses pembagian ini disebut dengan diskritisasi.

Keunggulan dari metode elemen hingga adalah mampu menyelesaikan permasalahan yang mencakup geometri yang rumit, pembebanan dan properti material yang tidak bisa diselesaikan dengan metode matematika analitis. Metode matematika analitis menggunakan persamaan diferensial untuk menyelesaikan permasalahan, sehingga memerlukan data terperinci pada setiap bodi. Hal ini tidak mungkin dilakukan pada geometri yang rumit. Saat ini, komputer sangat berperan besar dalam operasi penyelesaian persamaan dalam FEA. Di samping itu, program-program komputer berbasis elemen hingga sudah banyak dikembangkan sehingga penyelesaian permasalahan yang rumit dapat dilakukan. Diantara program – program tersebut yang dapat digunakan untuk analisis berbasis elemen hingga adalah ANSYS, Algor, Abaqus, MARC, SAP2000 dan lain sebagainya <sup>[7]</sup>.

Tahapan langkah-langkah dalam menyelesaikan analisis struktur menggunakan software elemen hingga secara garis besar adalah sebagai berikut <sup>[8]</sup> :

- a. Pembuatan geometri awal struktur yang akan dianalisis (*modeling*)
- b. Penentuan jenis material dan properti dari material yang digunakan. Hal ini berkenaan dengan massa jenis dari material tersebut, modulus elastisitas, *poisson ratio*, dan lain sebagainya.
- c. Penentuan jumlah elemen yang akan diberikan pada model geometri tersebut.
- d. Pembuatan elemen dari hasil permodelan geometri struktur yang akan dianalisa (*mesh generation*).
- e. Pemberian kondisi batas (*boundary condition*). Hal ini bertujuan untuk menentukan bagaimana model bertumpu padaudukannya dalam kondisi nyata. Berbagai macam

kondisi batas adalah *fixed-fixed*, *fixed-free*, *free* dan sebagainya.

- f. Pemberian kondisi pembebanan (*loading condition*). Kondisi pembebanan yang diberikan pada model struktu bergantung dengan kondisi nyata. Hal ini dilalukakn untuk mendapatkan hasil yang sedekat mungkin dengan kondisi nyata. Beban yang biasa digunakan antara lain adalah beban gaya, tekanan, momen statik atau dinamik.
- g. Analisis. Langkah ini merupakan langkah terakhir dalam tahapan analisis metode elemen hingga. Analisis dilakukan dengan bebrbagai variasi, yaitu jenis statis, dinamis, *buckling*, maupun analisis perpindahan panas.

Dengan bantuan kapasitas dan kecepatan memori, kemampuan komputer dapat ditingkatkan untuk menyelesaikan persoalan dangan jumlah ribuan variable yang tidak diketahui. Bahkan saat ini, program komputer berbasis elemen hingga dapat dijalankan dengan hanya menggunakan satu *processor*. Maka dari itu dalam menyelesaikan persamaan matematis yang kompleks dapat dilakukan dengan menggunakan program komputer berbasis elemen hingga, sehingga analisis prediktif dan optimasi suatu struktur dapat dilakukan tanpa memerlukan proses perhitungan dan eksperimen yang rumit.

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB III

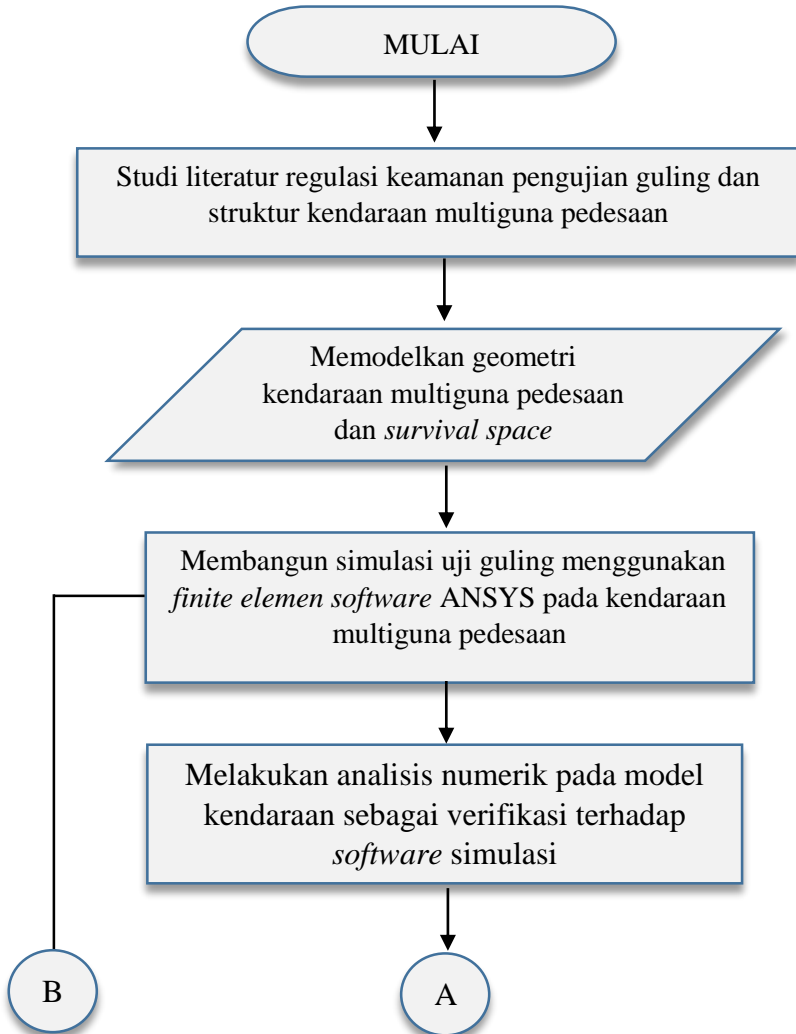
### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Prosedur Penelitian

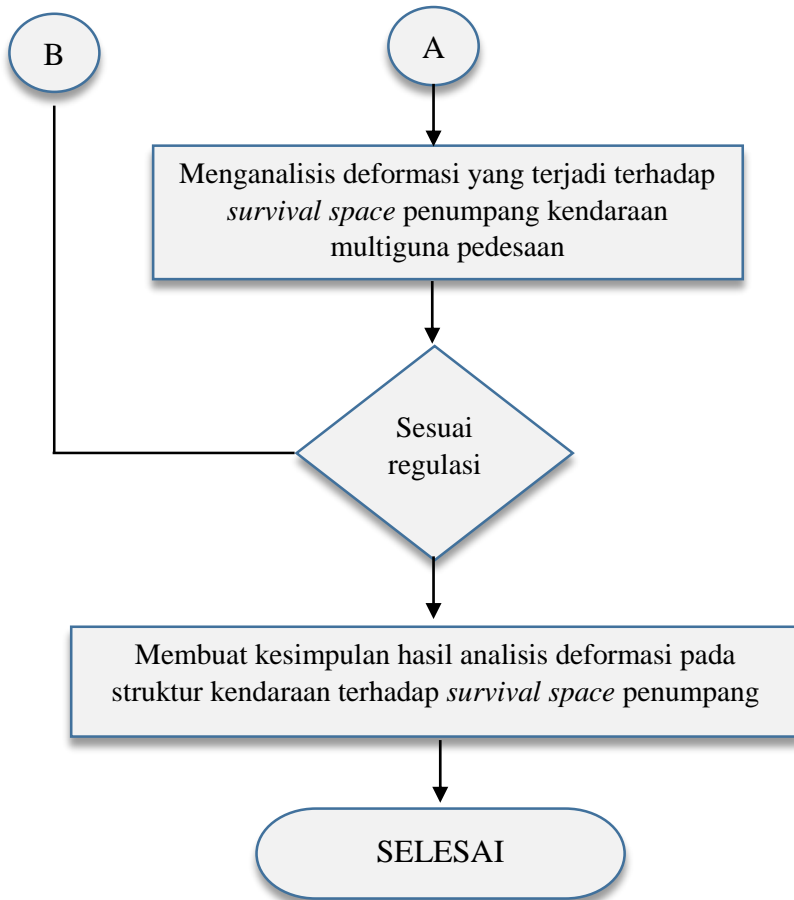
Pada penelitian tugas akhir kali ini, beberapa tahapan dalam melakukan prosedur penelitian adalah sebagai berikut :

1. Melakukan studi literatur tentang regulasi keamanan pengujian guling ECE-066, kendaraan mobil multiguna pedesaan, serta penggunaan *software* elemen hingga.
2. Membuat FE modeling struktur kendaraan multiguna pedesaan dan *survival space* menggunakan *software* CAD.
3. Membangun simulasi uji guling kendaraan multiguna pedesaan berdasarkan regulasi ECE-066 menggunakan *ANSYS Explicit Dynamics* untuk kendaraan dengan box tanpa muatan, box berisi muatan sebagian dan box berisi muatan penuh.
4. Melakukan analisis numerik untuk energi potensial dan energi kinetik pada model kendaraan sebagai verifikasi terhadap *software* simulasi.
5. Menganalisis deformasi yang terjadi terhadap *survival space* penumpang pada kendaraan multiguna pedesaan.
6. Membuat kesimpulan dari analisis deformasi struktur kendaraan terhadap *survival space* penumpang untuk tiga variasi pengujian, yaitu kendaraan dengan box tanpa muatan, box berisi muatan sebagian dan box berisi muatan penuh.

### 3.2 Diagram Alir Penelitian







### 3.3 Mekanisme Pengujian Untuk Simulasi

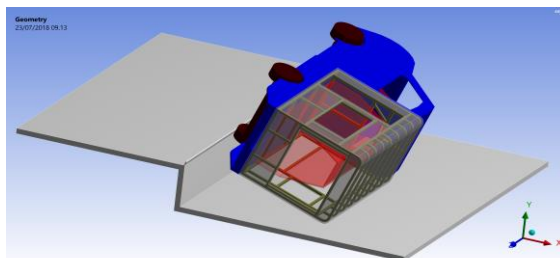
Pengujian yang akan dilakukan pada penelitian kali ini adalah uji guling kendaraan multiguna pedesaan menggunakan metode simulasi komputer. Berdasarkan regulasi keamanan ECE-066 (*Economic Commission for Europe Regulation No. 66*), pengujian kekuatan struktur kendaraan berdasarkan simulasi komputer

merupakan metode ekuivalen untuk mendapatkan hasil kekuatan struktur yang mendekati hasil pengujian guling kendaraan secara langsung. Untuk mengurangi lama waktu perhitungan, simulasi dilakukan pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah. Model kendaraan yang akan diuji telah dilengkapi dengan model *survival space* berbentuk *trapezoid* dengan dimensi sesuai dengan yang telah ditentukan pada regulasi keamanan ECE-066. Pada kondisi akhir pengujian, kendaraan akan mengalami deformasi struktur akibat penyerapan energi mekanis. Deformasi yang dihasilkan tergantung dari variasi pembebanan muatan dan posisi dari *center of gravity* kendaraan. Adapun variasi pembebanan yang akan dianalisa adalah sebagai berikut :

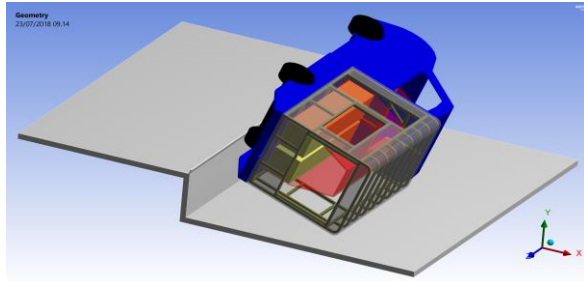
1. Simulasi pengujian guling kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan.
2. Simulasi pengujian guling kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian. (muatan kursi)
3. Simulasi pengujian guling kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh. (muatan kursi dan penumpang)

Mekanisme pengujian guling menggunakan simulasi komputer adalah sebagai berikut :

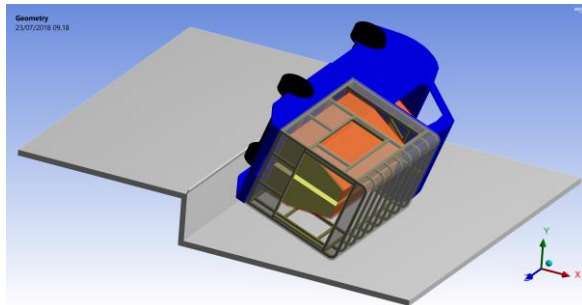
1. Model kendaraan yang akan diuji guling diletakan pada posisi *center of gravity* terendah, yaitu pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah.



Gambar 3.1 Model kendaraan muatan kosong pada posisi *center of gravity* terendah

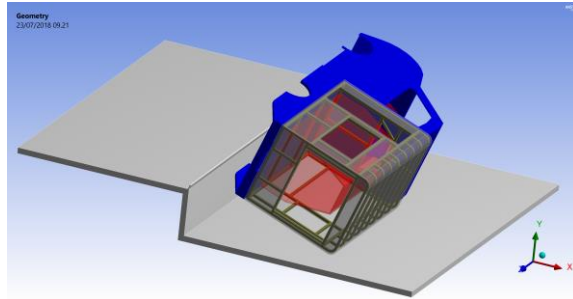


Gambar 3.2 Model kendaraan muatan sebagian pada posisi *center of gravity* terendah



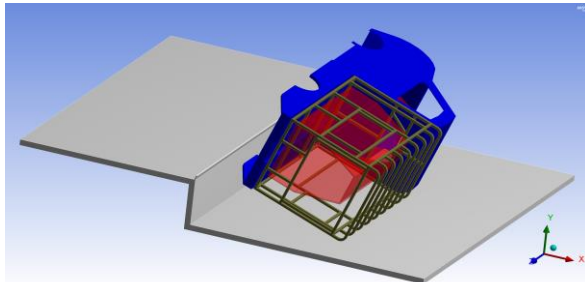
Gambar 3.3 Model kendaraan muatan penuh pada posisi *center of gravity* terendah

2. Analisa dibatasi pada bagian kabin dan box kendaraan. Maka bagian roda akan di *suppress* dan bagian penyangga box (*bridge*) serta *survival space* dibuat *rigid* untuk mengurangi lama waktu perhitungan simulasi.



Gambar 3.4 Analisa model pada bagian kabin dan box

3. Deformasi yang diamati adalah pada bagian struktur kendaraan (*superstructure*). Dalam model kendaraan multiguna pedesaan, bagian yang merupakan struktur penguat kendaraan dan berperan dalam melindungi *survival space* adalah pada bagian rangka box dan kabin.



Gambar 3.5 Skema kendaraan pada bagian rangka box dan kabin

4. Setelah ketiga proses tersebut sudah dilakukan, maka selanjutnya adalah membangun simulasi uji guling dan menganalisa deformasi yang terjadi pada struktur kendaraan terhadap *survival space* dari penumpang

### 3.4 Data Teknis Kendaraan

Spesifikasi umum dari mobil multiguna pedesaan terangkum pada tabel dibawah ini :

Tabel 3.1 Spesifikasi umum kendaraan multiguna pedesaan

Spesifikasi Umum Kendaraan Multiguna		
Dimensi		
Panjang Total		4500 mm
Lebar Total		1560 mm
Tinggi Total		2465 mm
<i>Wheelbase</i>		2550 mm
<i>Trackwidth</i>	<i>Front</i>	1440 mm
	<i>Rear</i>	1480 mm
Diameter Roda		600 mm

Dalam analisa pengujian *roll-over*, data yang diperlukan untuk mengetahui posisi dari *Center of Gravity* kendaraan didapatkan melalui nilai berat muatan dari kendaraan. Adapun untuk berat muatan pada kendaraan multiguna pedesaan terangkum pada tabel berikut :

Tabel 3.2 Massa kendaraan multiguna pedesaan terhadap variasi muatan

Massa Kendaraan (kg)	
Kosong	910 kg
Berat Depan	500 kg
Berat Belakang	410 kg

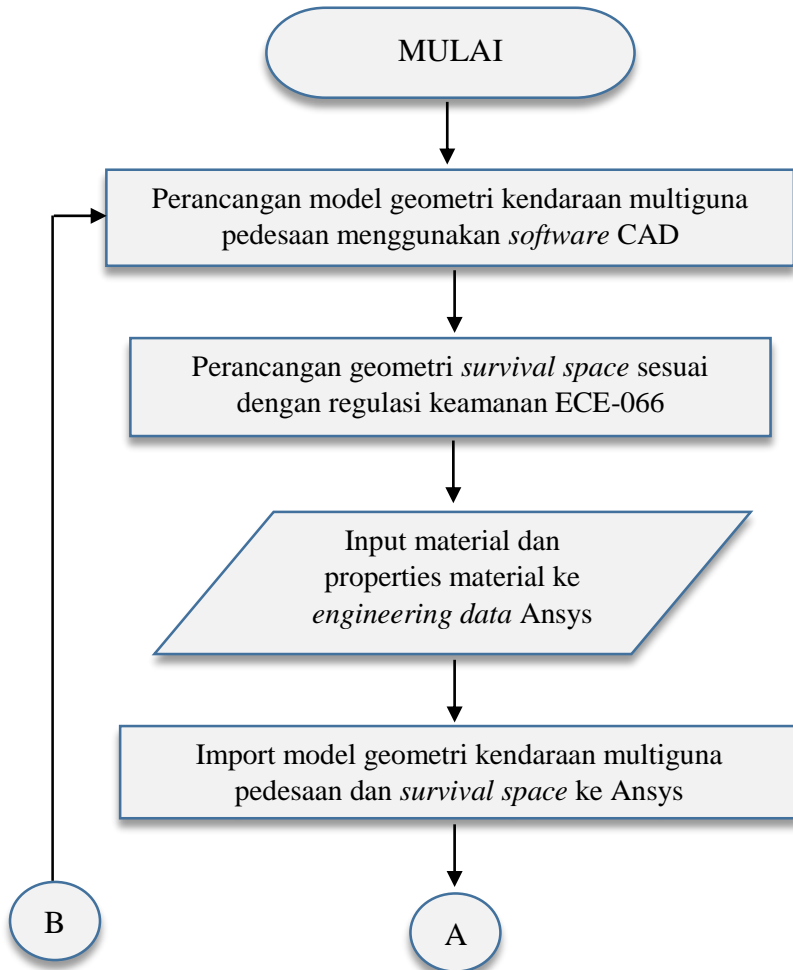
Dengan Box	1320 kg
Berat Kendaraan	910 kg
Berat Box	410 kg
Dengan Box Berisi Muatan Kursi	1620 kg
Berat Kendaraan Dengan Box	1320 kg
Berat Muatan Kursi	300 kg
Dengan Box Berisi Muatan Penuh	2220 kg
Berat Penumpang Depan	120 kg
Berat Penumpang Belakang	480 kg
Box ( <i>Fiber</i> )	410 kg

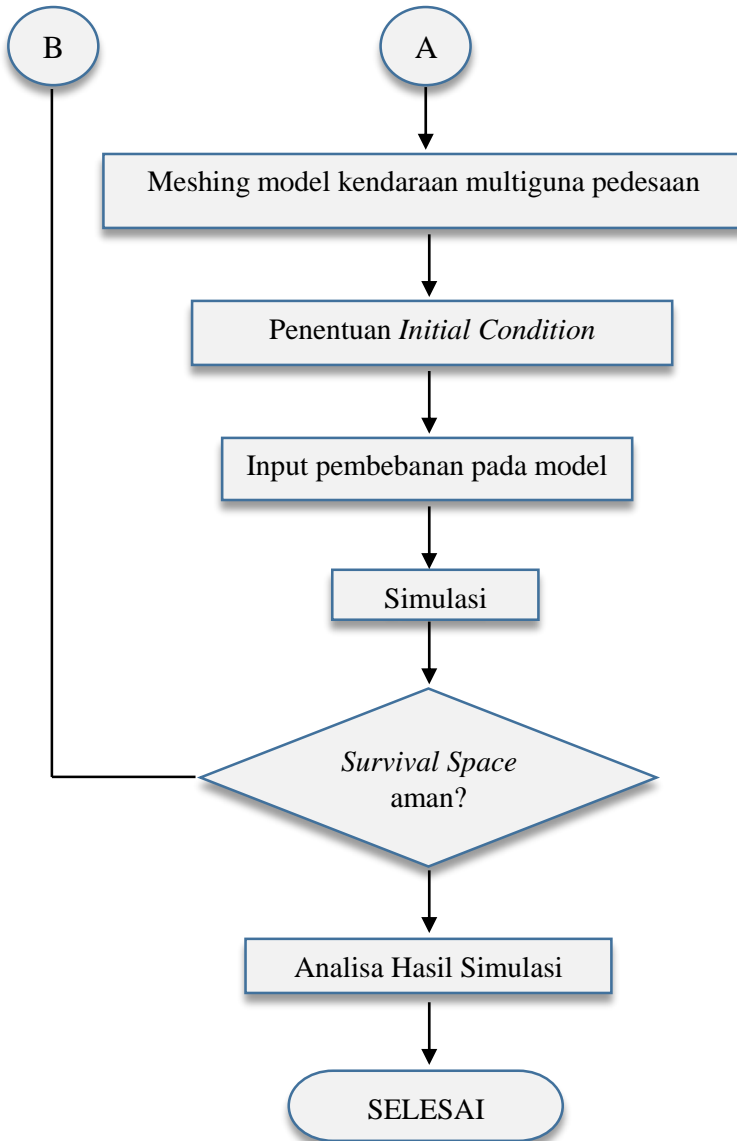
Data input lain yang diperlukan untuk mengetahui posisi *center of gravity* dari kendaraan adalah posisi titik berat muatan dengan jejak sumbu roda. Data tersebut didapatkan melalui software CAD berdasarkan *center of gravity* dari massa muatan.

Tabel 3.3 Jarak titik berat kendaraan terhadap sumbu roda depan

<b>Jarak Titik Berat Muatan terhadap Sumbu Roda</b>	
<b>Dimensi</b>	
Jarak Titik Berat Penumpang Depan terhadap Sumbu Roda Depan	1043,65 mm
Jarak Titik Berat Box terhadap Sumbu Roda Depan	2652,035 mm
Jarak Titik Berat Box + Muatan Sebagian terhadap Sumbu Roda Depan	2720,72 mm
Jarak Titik Berat Box + Muatan Penuh terhadap Sumbu Roda Belakang	2751,524 mm

### 3.5 Diagram Alir Permodelan







### 3.6 Input Properties Material

Input properties material dari proses simulasi memiliki peranan penting untuk mendapatkan hasil simulasi yang mendekati dengan hasil praktikal. Proses input material dilakukan langsung pada *Engineering Data* di software simulasi ANSYS. Input berikut ini digunakan pada model kendaraan dan model *surface* untuk mendapatkan hasil yang sesuai.

Material model box kendaraan : Box kendaraan dimodelkan dengan 2 bagian yaitu lapisan luar dan bagian rangka box. Material yang digunakan pada lapisan luar box adalah *Fibre Composite/Epoxy Resin* dengan ketebalan 20 mm. Untuk struktur rangka box, material yang digunakan adalah *ASTM A36 Steel* dengan model rangka *hollow* dimensi 40 mm x 40 mm x 5 mm. Propertis dari material box ditunjukkan pada tabel 3.4 dan tabel 3.7<sup>[9]</sup>.

Material model kabin depan kendaraan : kabin depan kendaraan merupakan salah satu bagian yang berperan dalam penyerapan energi mekanis dan perlindungan daerah penumpang. Material yang digunakan pada model kendaraan kabin depan adalah *Aluminium Alloy NL*<sup>[9]</sup>.

Material model *surface* : Model dari *surface* dimodelkan sebagai rigid dan diharuskan untuk memiliki kekuatan yang sangat tinggi dan keras sehingga pada saat simulasi bagian *surface* tersebut tidak akan mengalami deformasi. Material yang digunakan pada *surface* adalah material *concrete*. Propertis dari material *concrete* ditunjukkan pada tabel 3.6.

Bagian kendaraan selain kabin depan dan box mobil dianggap *rigid*. Saat propertis dari material sudah diinputkan seluruhnya, maka tiap bagian dipilhkan material yang sesuai.

Tabel 3.4 Propertis dari material *Structural Steel Non - Linear*

<b><i>Properties</i></b>	<b><i>Value</i></b>
<i>Density</i>	7850 kg/m <sup>3</sup>
<i>Young Modulus</i>	2 x 10 <sup>11</sup> Pa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,3
<i>Bulk Modulus</i>	1,667 x 10 <sup>11</sup> Pa
<i>Shear Modulus</i>	7,692 x 10 <sup>10</sup> Pa
<i>Yield Strength</i>	260 MPa
<i>Tangent Modulus</i>	1450 MPa

Tabel 3.5 Propertis dari material *Aluminium Alloy Non - Linear*

<b><i>Properties</i></b>	<b><i>Value</i></b>
<i>Density</i>	7560 kg/m <sup>3</sup>
<i>Young Modulus</i>	2,07 x 10 <sup>11</sup> Pa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,29
<i>Bulk Modulus</i>	1,642 x 10 <sup>11</sup> Pa
<i>Shear Modulus</i>	8,023 x 10 <sup>10</sup> Pa
<i>Yield Strength</i>	280 MPa
<i>Tangent Modulus</i>	500 MPa

Tabel 3.6 Propertis dari material *Concrete*

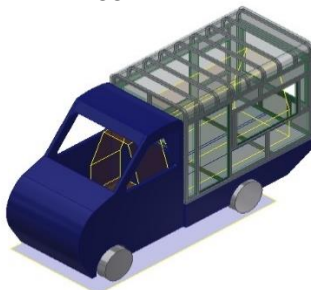
<b><i>Properties</i></b>	<b><i>Value</i></b>
<i>Density</i>	2300 kg/m <sup>3</sup>
<i>Young Modulus</i>	3 x 10 <sup>10</sup> MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,18
<i>Bulk Modulus</i>	1,562 x 10 <sup>10</sup> Pa
<i>Shear Modulus</i>	1,271 x 10 <sup>10</sup> Pa

Tabel 3.7 Propertis dari material *Fibre Composite/Resin Epoxy*

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Density</i>	1160 kg/m <sup>3</sup>
<i>Young Modulus</i>	3780 MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,35
<i>Bulk Modulus</i>	4,2 x 10 <sup>9</sup> Pa
<i>Shear Modulus</i>	1400 MPa

### 3.7 Import Model Geometri Mobil Multiguna Pedesaan

Proses pertama yaitu melakukan perancangan model geometri dan *assembly* dari kendaraan multiguna pedesaan dan *survival space* serta komponen yang akan digunakan untuk simulasi seperti *surface* menggunakan *software* CAD. Model dari kendaraan dirancang menggunakan dimensi yang serupa dengan dimensi kendaraan asli sehingga pada saat simulasi akan didapatkan hasil yang mendekati pengujian secara langsung. Bagian lain pada kendaraan seperti kemudi, *chassis* dan roda dianggap *rigid* karena bagian tersebut bukanlah perhatian utama pada penelitian kali ini. Geometri dari *survival space* dibuat dengan menggunakan ukuran sesuai dengan regulasi ECE-066. Kemudian geometri tersebut akan diimport dalam format file .IGES ke *software* simulasi ANSYS berbasis metode elemen hingga.



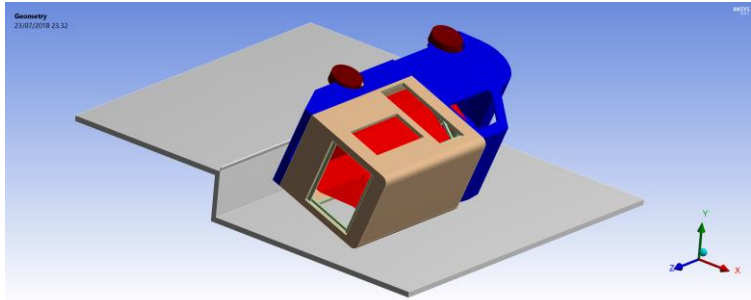
Gambar 3.6 Model 3D mobil multiguna pedesaan

Untuk mengetahui tingkat keakuratan model 3D kendaraan yang sudah dibuat, maka perlu dilihat massa total yang terdapat pada keseluruhan kendaraan. Berdasarkan pada tabel 3.2 massa total kendaraan multiguna dengan box tanpa muatan adalah sebesar 1320 kg. Massa tersebut didistribusikan pada bagian kendaraan depan (kabin), bagian kendaraan belakang (*bridge*) dan bagian box (massa lapisan luar dan massa rangka box). Massa pada tiap bagian pada model kendaraan yang sudah dibuat terdapat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3.8 Massa tiap bagian pada model 3D kendaraan

No.	Bagian	<i>Material</i>	<i>Mass (kg)</i>
1	Kendaraan depan (kabin)	<i>Alluminium Alloy NL</i>	463, 653
2	Kendaraan belakang ( <i>bridge</i> )	<i>Structural Steel (default)</i>	421, 303
3	Lapisan luar box	<i>Resin Epoxy</i>	50,376
4	Rangka box	<i>Structural Steel NL</i>	350,606
		<b>Total Mass</b>	<b>1285,938</b>

Berdasarkan tabel diatas, dapat dilihat bahwa desain model 3D yang dibuat sudah mendekati dimensi kendaraan yang sebenarnya. Pada kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan, massa kendaraan adalah sebesar 1320 kg. Pada model 3D yang dibuat, massa total sebesar 1285,938 kg mendekati dimensi kendaraan yang sebenarnya. Maka model 3D tersebut dapat digunakan sebagai model untuk analisis simulasi uji guling kendaraan.



Gambar 3.7 Geometri struktur box, *survival space* dan *surface* yang sudah dilakukan *import* kedalam *software* simulasi

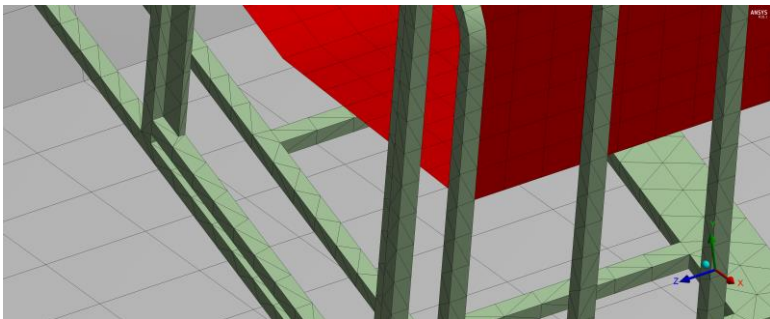
### 3.8 Meshing Model Mobil Multiguna Pedesaan

Selanjutnya adalah proses *meshing* yang dilakukan pada *software* simulasi *Explicit Dynamics ANSYS*. Keakuratan dari hasil simulasi bergantung kepada model 3D geometri yang dibuat dan kualitas dari *meshing* model tersebut (*model quality*). Simulasi pengujian guling yang dilakukan pada kendaraan multiguna pedesaan adalah *Right-Side Rollover*. Pada pengujian guling tersebut, bagian yang mempengaruhi posisi *Center of Gravity* dan penyerapan energi mekanis akibat massa adalah pada bagian kabin, *bridge*, dan box kendaraan.

Jenis *meshing* yang digunakan pada kendaraan adalah *solid mesh* dengan metode *tetrahedrons* sehingga akan didapatkan hasil yang mendekati pengujian secara langsung. Metode *quadrilateral dominant* diterapkan pada bagian *surface* dan *survival space* dikarenakan bagian tersebut tidak termasuk dalam perhitungan analisis simulasi. Kriteria dari kualitas *meshing* untuk jenis *solid mesh* dicantumkan pada tabel berikut.

Tabel 3.9 Kriteria kualitas dari *mesh* model kendaraan

No.	Parameter Kualitas Mesh	Average Value
1	<i>Minimum Length of Elements</i>	7,88 mm
2	<i>Aspect Ratio</i>	2,93 mm
3	<i>Element Quality</i>	0,63
4	<i>Skewness</i>	0,49
5	<i>Characteristic Length</i>	33,153 mm
6	<i>Jacobian Ratio</i>	1,013
7	<i>Parallel Deviation</i>	4,283



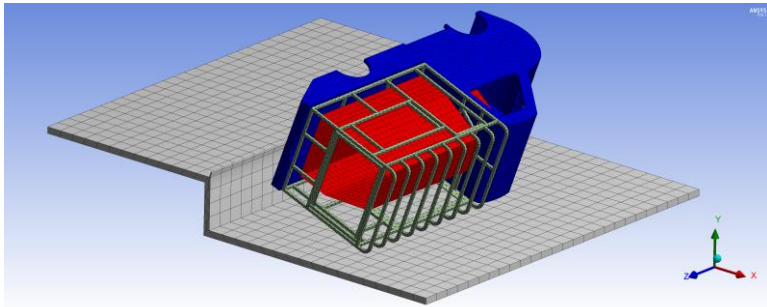
Gambar 3.8 Hasil *mesh* dengan metode *tetrahedrons* pada bagian kendaraan dan *quadrilateral dominant* pada bagian *survival space* dan *surface*

Besar dari ukuran *meshing* yang digunakan adalah *span angle* “coarse” dengan *element order* tipe *linear*. Jumlah keseluruhan dari *element* serta *nodes* yang didapatkan akan bernilai beda untuk tiga variasi pembebanan muatan yang diterapkan pada model kendaraan; yaitu kendaraan dengan box tanpa muatan, kendaraan dengan box berisi muatan sebagian dan kendaraan dengan box berisi muatan penuh. Simulasi kemudian dapat

dilakukan apabila model kendaraan dari tiga variasi pembebanan muatan tersebut telah di *mesh*.

Tabel 3.10 Jumlah *elements* dan *nodes* pada tiga variasi pembebanan muatan

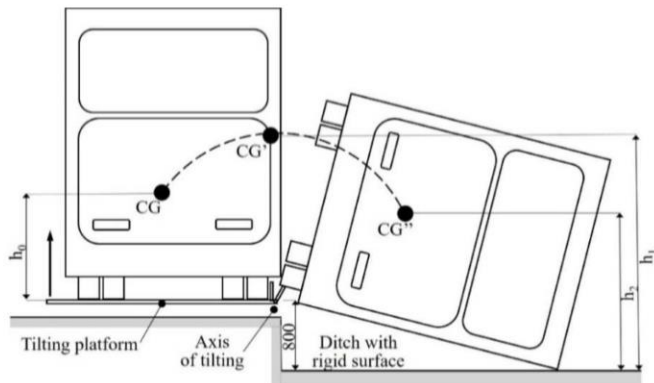
No.	Variasi Simulasi	<i>Nodes</i>	<i>Elements</i>
1	Kendaraan kosong	17950	41564
2	Kendaraan berisi muatan sebagian	29715	43800
3	Kendaraan berisi muatan penuh	35476	43800



Gambar 3.9 *Mesh* keseluruhan model untuk simulasi

### 3.9 Perhitungan Pembebanan

Sebelum dilakukan simulasi guling, perlu dilakukan perhitungan pembebanan yang akan diterapkan pada model kendaraan. Proses simulasi guling dilakukan pada kedalaman 800 mm dengan sumbu rotasi sepanjang titik kontak roda dan tanah (*Wheel - Ground Contact Point*). Beban yang diberikan pada model kendaraan berupa gaya gravitasi dan kecepatan angular akibat perubahan letak dari *center of gravity*.



Gambar 3.10 Skema perubahan letak *center of gravity* dari kendaraan

Kecepatan angular diperoleh dengan mengonversikan seluruh energi potensial kendaraan menjadi energi rotasi. Berikut merupakan perhitungan pembebanan untuk kecepatan angular :

$$m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2$$

Dimana :

- $m$  : Massa dari kendaraan (kg)
- $h_1$  : Ketinggian maksimal *center of gravity* kendaraan pada kondisi tidak stabil dihitung dari permukaan tanah di kedalaman 800 mm.
- $h_2$  : Ketinggian minimal *center of gravity* kendaraan pada kondisi miring sepenuhnya dihitung dari permukaan tanah di kedalaman 800 mm.
- $I$  : Momen inersia kendaraan (kg mm<sup>2</sup>)
- $\omega$  : Kecepatan angular (rad/s)

Untuk mendapatkan nilai dari posisi ketinggian *center of gravity*, perlu dicari terlebih dahulu nilai dari jarak longitudinal



*center of gravity* kendaraan (L). Persamaan untuk mencari jarak longitudinal *center of gravity* kendaraan multiguna pedesaan dengan box adalah sebagai berikut :

$$N_r \cdot L = W_p \cdot a + W_k \cdot L_f + W_m \cdot b$$

$$L_F = \frac{N_r \cdot L}{W} , \quad L_R = \frac{N_f \cdot L}{W}$$

Dimana :

$W_r = N_r$  : Gaya reaksi berat bagian belakang

$W_f = N_f$  : Gaya reaksi berat bagian depan

$W_k$  : Berat kendaraan =  $W_r + W_f$

$W_m$  : Berat bagian muatan box

$W_p$  : Berat bagian penumpang kabin depan

$W$  : Berat total kendaraan ( $W = W_p + W_k + W_m$ )

$L$  : Jarak sumbu roda

$a$  : Jarak titik berat penumpang ke sumbu roda depan

$b$  : Jarak titik berat muatan ke sumbu roda depan

$L_F$  : Jarak *center of gravity* ke sumbu roda depan

$L_R$  : Jarak *center of gravity* ke sumbu roda belakang

Setelah didapatkan jarak longitudinal dari *center of gravity* kendaraan, maka nilai dari ketinggian *center of gravity* kendaraan dapat ditemukan melalui persamaan berikut :

$$h_r = \frac{W \cdot L_f - N_r \cdot L}{W \cdot \tan \theta}$$

$$h'_r = \frac{W \cdot L_f + W_p \cdot a - N_r \cdot L}{W \cdot \tan \theta}$$

$$h''_r = \frac{W \cdot L_f + W_p \cdot a + W_m \cdot b - N_r \cdot L}{W \cdot \tan \theta}$$

$$h = h_r + r$$

Dimana :

$h_r$  : Ketinggian *center of gravity* diatas bidang sumbu roda

- $h'_r$  : Ketinggian *center of gravity* diatas bidang sumbu roda setelah penambahan berat penumpang  
 $h''_r$  : Ketinggian *center of gravity* diatas bidang sumbu roda setelah penambahan berat penumpang dan berat muatan  
 $r$  : Jari – jari roda  
 $h$  : Ketinggian *center of gravity* kendaraan

Ketinggian maksimal dari *center of gravity* pada saat kendaraan berada pada kondisi tidak stabil dapat ditemukan dengan menggunakan persamaan *pythagoras* untuk nilai ketinggian *center of gravity* ( $h$ ) dan setengah dari lebar kendaraan ( $l$ ). Berdasarkan pada standar ECE-066, kendaraan akan digulingkan pada kedalaman 800 mm sehingga nilai dari ketinggian maksimal *center of gravity* adalah :

$$h_1 = \sqrt{h^2 + \left(\frac{1}{2}l^2\right)} + 0,8 \text{ m}$$

Dimana :

- $h_1$  : Ketinggian maksimal *center of gravity* kendaraan pada kondisi tidak stabil dihitung dari permukaan tanah di kedalaman 800 mm  
 $h_0$  : Ketinggian *center of gravity* kendaraan  
 $l$  : Lebar kendaraan

Kecepatan angular pada pembebanan kendaraan divariasikan berdasarkan jenis muatan pada kendaraan multiguna pedesaan. Adapun jenis muatan yang akan dianalisa adalah sebagai berikut :

- a. Kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan, dengan massa total 1320 kg (massa kendaraan kosong dan massa box)

- b. Kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan kursi, dengan massa total 1620 kg (massa kendaraan dengan box dan massa muatan kursi)
- c. Kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh, dengan massa total 2220 kg (muatan kursi dan penumpang).

Berdasarkan tiga variasi muatan diatas, terdapat 3 nilai kecepatan angular yang akan digunakan pada analisa guling ini, yaitu :

1. Untuk kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan dengan massa 1320 kg (berat depan 500 kg, berat belakang 410 kg), menghasilkan kecepatan angular :

- Jarak Longitudinal CG (L) :

- a. Berat kosong ( $W_k = 910 \text{ kg}$ ,  $W_f = 500 \text{ kg}$ ,  $W_r = 410 \text{ kg}$ )
 
$$\left(410 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 2,55 \text{ m} = 0 + 0 + \left(910 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot L_f$$

$$L_f = 1,14 \text{ m}$$

$$L_r = 1,41 \text{ m}$$

- b. Dengan box ( $W = 1320 \text{ kg}$ ,  $W_{\text{box}} = 410 \text{ kg}$ )

$$N_r \cdot 2,55 \text{ m} = 0 + \left(410 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 2,65$$

$$+ \left(910 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 1,14$$

$$W_r = N_r = 8220,74 \text{ N}$$

$$W = \left(1320 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 13028,4 \text{ N}$$

$$W_f = N_f = 4807,6 \text{ N}$$

$$(N_r \cdot L) - (W \cdot L_f') = 0$$

$$(8220,74 \text{ N} \cdot 2,55 \text{ m}) - (13028,4 \text{ N} \cdot L_f') = 0$$

$$L_f' = 1,6 \text{ m}$$

$$L_r' = L - L_f' = 2,55 \text{ m} - 1,6 \text{ m} = 0,95 \text{ m}$$

- Nilai ketinggian CG ( $h$ ), dengan jari – jari ban sebesar 300 mm :

$$h_r = \frac{\left(1320 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 1,14 \text{ m} + 0 + \left(410 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 2,65 \text{ m} - 8220,74 \text{ N} \cdot 2,55 \text{ m}}{\left(1320 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot \tan 30}$$

$$h_r = 0,61 \text{ m}$$

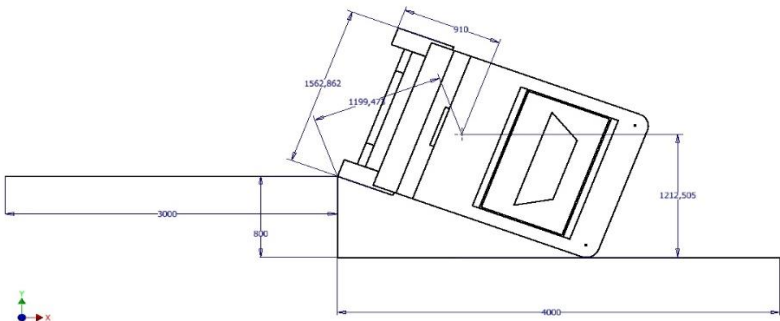
$$h = h_r + r = 0,61 \text{ m} + 0,3 \text{ m} = 0,91 \text{ m}$$

- Ketinggian CG' kendaraan pada kondisi tidak stabil ( $h_1$ ), dengan lebar kendaraan sebesar 1560 mm :

$$h_1 = \sqrt{(0,91 \text{ m})^2 + ((0,5 \cdot 1,56 \text{ m})^2)} + 0,8 \text{ m}$$

$$h_1 = 1,19 \text{ m} + 0,8 \text{ m} = 1,99 \text{ m}$$

- Ketinggian CG'' kendaraan pada kondisi miring sepenuhnya ( $h_2$ ) didapatkan melalui software CAD sebesar 1,21 m



Gambar 3.11 Letak CG pada kondisi *fully tilting* kendaraan untuk variasi muatan 1

- Kecepatan Angular ( $\omega$ ) untuk kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan :

$$1320 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (1,99 \text{ m} - 1,21 \text{ m}) = \frac{1}{2} (1320 \text{ kg} \cdot (1,19 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})^2) \cdot \omega^2$$

$$\omega = 2,76 \text{ rad/s}$$

2. Untuk kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan kursi dengan massa 1620 kg (berat muatan kursi 300 kg), menghasilkan kecepatan angular :

- Jarak Longitudinal CG (L) :

- a. Berat kosong ( $W_k = 910 \text{ kg}$ ,  $W_f = 500 \text{ kg}$ ,  $W_r = 410 \text{ kg}$ )

$$\left(410 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 2,55 \text{ m} = 0 + 0 + \left(910 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot L_f$$

$$L_f = 1,14 \text{ m}$$

$$L_r = 1,41 \text{ m}$$

- b. Dengan box berisi muatan kursi ( $W = 1620 \text{ kg}$ ,  $W_{\text{muatan}} = 300 \text{ kg}$ )

$$N_r \cdot 2,55 \text{ m} = 0 + \left(710 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 2,72 + \left(910 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 1,14$$

$$W_r = N_r = 11490,22 \text{ N}$$

$$W = \left(1620 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 15989,4 \text{ N}$$

$$W_f = N_f = 4299,18 \text{ N}$$

$$(N_r \cdot L) - (W \cdot L_f'') = 0$$

$$(11490,22 \text{ N} \cdot 2,55 \text{ m}) - (15989,4 \text{ N} \cdot L_f'') = 0$$

$$L_f'' = 1,83 \text{ m}$$

$$L_r'' = L - L_f'' = 2,55 \text{ m} - 1,83 \text{ m} = 0,72 \text{ m}$$

- Nilai ketinggian CG ( $h$ ), dengan jari – jari ban sebesar 300 mm :

$$h_r = \frac{\left(1620 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 1,14 \text{ m} + 0 + \left(710 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 2,72 \text{ m} - 11490,22 \text{ N} \cdot 2,55 \text{ m}}{\left(1620 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot \tan 30}$$

$$h_r = 0,86 \text{ m}$$

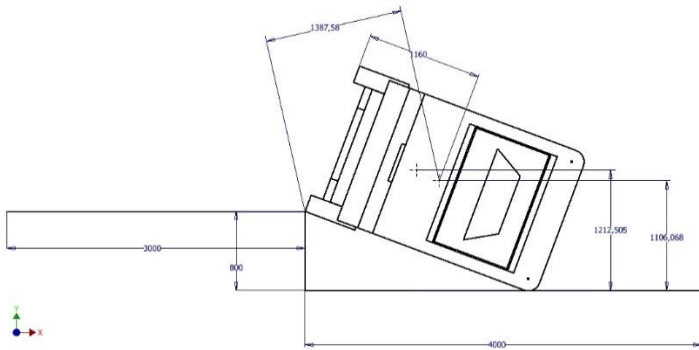
$$h = h_r + r = 0,86 \text{ m} + 0,3 \text{ m} = 1,16 \text{ m}$$

- Ketinggian CG' kendaraan pada kondisi tidak stabil ( $h_1$ ), dengan lebar kendaraan sebesar 1560 mm :

$$h_1 = \sqrt{(1,16 \text{ m})^2 + ((0,5 \cdot 1,56 \text{ m})^2)} + 0,8 \text{ m}$$

$$h_1 = 1,38 \text{ m} + 0,8 \text{ m} = 2,18 \text{ m}$$

- Ketinggian CG'' kendaraan pada kondisi miring sepenuhnya ( $h_2$ ) didapatkan melalui software CAD sebesar 1,21 m



Gambar 3.12 Letak CG pada kondisi *fully tilting* kendaraan untuk variasi muatan 2

- Kecepatan Angular ( $\omega$ ) untuk kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian :

$$1620 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (2,03 \text{ m} - 1,21 \text{ m}) = \frac{1}{2} (1620 \text{ kg} \cdot (1,23 \text{ m})^2) \cdot \omega^2$$

$$\omega = 2,94 \text{ rad/s}$$

3. Untuk kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh dengan massa 2220 kg (berat penumpang 600 kg, berat muatan kursi 300 kg), menghasilkan kecepatan angular :

- Jarak Longitudinal CG (L) :

- a. Berat kosong ( $W_k = 910 \text{ kg}$ ,  $W_f = 500 \text{ kg}$ ,  $W_r = 410 \text{ kg}$ ) :

$$\left(410 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 2,55 \text{ m} = 0 + 0 + \left(910 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot L_f$$

$$L_f = 1,14 \text{ m}$$

$$L_r = 1,41 \text{ m}$$

- b. Dengan box berisi muatan penuh ( $W = 2220 \text{ kg}$ ,  $W_{\text{penumpang}} = 600 \text{ kg}$ ,  $W_{\text{muatan}} = 1190 \text{ kg}$ )

$$N_r \cdot 2,55 = \left(120 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 1,034 + \left(1190 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 2,75$$

$$+ \left(910 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 1,14$$

$$W_r = N_r = 17162,11 \text{ N}$$

$$W = \left( 2220 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 21911,4 \text{ N}$$

$$W_f = N_f = 4749,29 \text{ N}$$

$$(N_r \cdot L) - (W \cdot L_f''') = 0$$

$$(17162,11 \cdot 2,55 \text{ m}) - (21911,4 \text{ N} \cdot L_f''') = 0$$

$$L_f''' = 1,99 \text{ m}$$

$$L_r''' = L - L_f''' = 2,55 \text{ m} - 1,99 \text{ m} = 0,56 \text{ m}$$

- Nilai ketinggian CG ( $h$ ), dengan jari – jari ban sebesar 300 mm :

$$h_r = \frac{\left( 2220 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot 1,14 \text{ m} + \left( 120 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot 1,043 \text{ m} + \left( 1190 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot 2,75 \text{ m} - 17162,11 \text{ N} \cdot 2,55 \text{ m}}{\left( 2220 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cdot \tan 30}$$

$$h_r = 1,16 \text{ m}$$

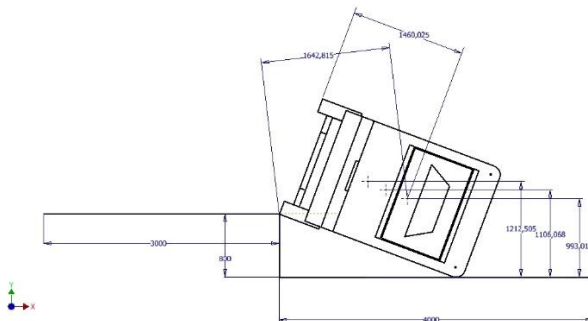
$$h = h_r + r = 1,16 \text{ m} + 0,3 \text{ m} = 1,46 \text{ m}$$

- Ketinggian CG' kendaraan pada kondisi tidak stabil ( $h_1$ ), dengan lebar kendaraan sebesar 1560 mm :

$$h_1 = \sqrt{(1,46 \text{ m})^2 + ((0,5 \cdot 1,56 \text{ m})^2)} + 0,8 \text{ m}$$

$$h_1 = 1,64 \text{ m} + 0,8 \text{ m} = 2,44 \text{ m}$$

- Ketinggian CG'' kendaraan pada kondisi miring sepenuhnya ( $h_2$ ) didapatkan melalui software CAD sebesar 1,14 m



Gambar 3.13 Letak CG pada kondisi *fully tilting* kendaraan untuk variasi muatan 3

- Kecepatan Angular ( $\omega$ ) untuk kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh adalah :

$$2220 \text{ kg} \cdot 9,87 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (2,2 \text{ m} - 1,14 \text{ m}) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{12} \cdot 2220 \text{ kg} \cdot (1,36 \text{ m})^2 \right) \cdot \omega^2$$

$$\omega = 3,12 \text{ rad/s}$$

Tabel 3.11 Pembebanan pada variasi muatan kendaraan multiguna pedesaan

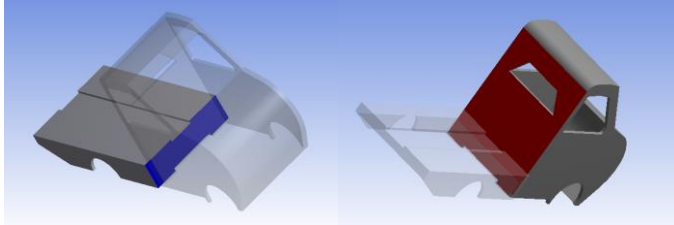
Kendaraan Multiguna Pedesaan dengan Box					
Tanpa Muatan		Muatan Sebagian		Muatan Penuh	
M	1320 kg	M	1620 kg	M	2220 kg
$L_f'$	1,6 m	$L_f''$	1,8 m	$L_f'''$	1,92 m
$L_r'$	0,95 m	$L_r''$	0,75 m	$L_r'''$	0,64 m
$h$	0,91 m	$h$	1,16 m	$h$	1,46 m
$h_1$	1,99 m	$h_1$	2,18 m	$h_1$	2,44 m
$h_2$	1,21 m	$h_2$	1,106 m	$h_2$	0,93 m
$\omega$	<b>2,76 rad/s</b>	$\omega$	<b>2,94 rad/s</b>	$\omega$	<b>3,12 rad/s</b>



### 3.10 Penentuan *Initial Condition*

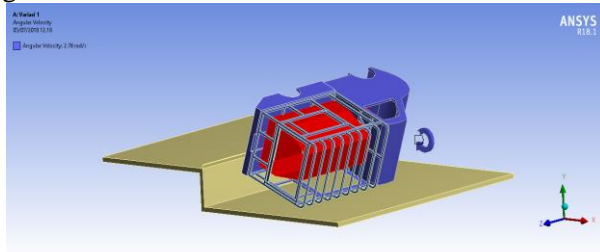
Keadaan awal yang diberikan sebelum simulasi yaitu :

1. Kontak berupa *bonded* pada bagian kabin dengan *bridge* dan box dengan *bridge*



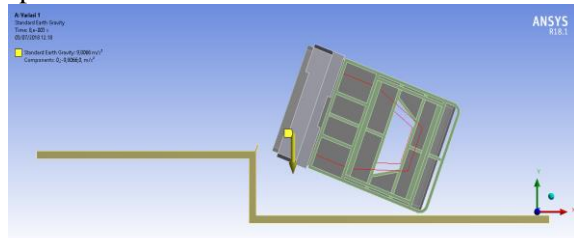
Gambar 3.14 Kontak berupa *bonded*

2. Terdapat kecepatan angular yang diterapkan ke bagian rangka box dan kabin kendaraan.



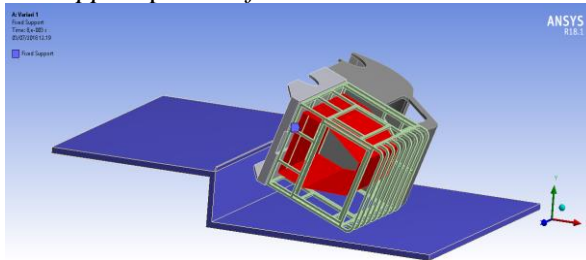
Gambar 3.15 Pembebanan kecepatan angular pada model

3. Terdapat gaya gravitasi ke arah sumbu vertikal yang diterapkan ke seluruh kendaraan.



Gambar 3.16 Pembebanan gaya gravitasi pada model

4. *Fix support* pada *surface*.



Gambar 3.17 Penentuan *Fix Support* pada *surface*

5. Penentuan *end time* proses simulasi guling. Nilai *end time* yang ditentukan adalah sebesar 4 ms untuk variasi pembebanan muatan pertama, 6 ms untuk variasi pembebanan muatan kedua dan 7 ms untuk variasi pembebanan muatan ketiga.

End Time	4,e-003 s
End Time	6,e-003 s
End Time	7,e-003 s

Gambar 3.18 Penentuan *end time* pada proses simulasi

6. *Automatic mass scaling* pada *step control solution* untuk memastikan perhitungan simulasi berupa *large deformation*.

Automatic Mass Scaling	Yes
Minimum CFL Time Step	1,e-020 s
Maximum Element Scaling	100,
Maximum Part Scaling	5,e-002
Update Frequency	0

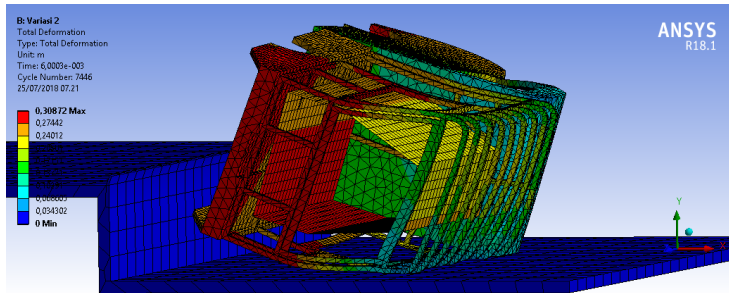
Gambar 3.19 *Automatic mass scaling* untuk solusi *large deformation*

### 3.11 Simulasi

Proses simulasi dilakukan setelah serangkaian proses mulai dari input material sampai dengan penentuan kondisi awal simulasi selesai. Sebelum simulasi dijalankan, terlebih dahulu perlu ditentukan *output* yang diinginkan dari simulasi tersebut. Pada penelitian kali ini, terdapat 3 *output* yang perlu didapatkan yaitu :

1. *Total Deformation* : *Output* ini digunakan untuk mengetahui nilai deformasi dari model kendaraan pada saat terkena tumbukan dengan *surface*. Deformasi tersebut kemudian akan diamati dan disimpulkan terkait apakah *survival space* dari penumpang dapat dinilai aman atau tidak.
2. *Total Velocity* : *Output* berupa *total velocity* diperlukan untuk mengetahui kecepatan yang terdapat pada model kendaraan saat kendaraan akan bertumbukan akibat terguling. Nilai kecepatan tersebut nantinya akan digunakan untuk menghitung nilai energi kinetik pada kendaraan, kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi.
3. *Plot Energy* : *Plot Energy* yang terdiri dari *Kinetic Energy* (KE), *Internal Energy* (IE) dan *Total Energy* (TE) digunakan untuk mengetahui nilai energi yang diterima oleh struktur kendaraan terhadap tiga variasi muatan. *Plot Energy* merupakan bagian penting untuk mengetahui penyebab deformasi yang berbeda pada tiap variasi.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan sistem analisis *Explicit Dynamics* yang terdapat didalam fitur *Workbench ANSYS*. *Explicit dynamics* merupakan salah satu bentuk analisis simulasi dinamis dimana lama waktu simulasi yang dilakukan tidak melebihi dari waktu 1 detik. Pada tugas akhir ini, model kendaraan diletakan pada posisi saat akan bertumbukan dengan tanah. Sehingga analisis deformasi yang diterima oleh model adalah pada *segment* yang sangat singkat dan tidak melebihi dari waktu 1 detik. Hasil dari simulasi dapat langsung dilihat setelah proses berlangsungnya simulasi selesai.



Gambar 3.20 Hasil simulasi berdasarkan *output* yang telah ditentukan

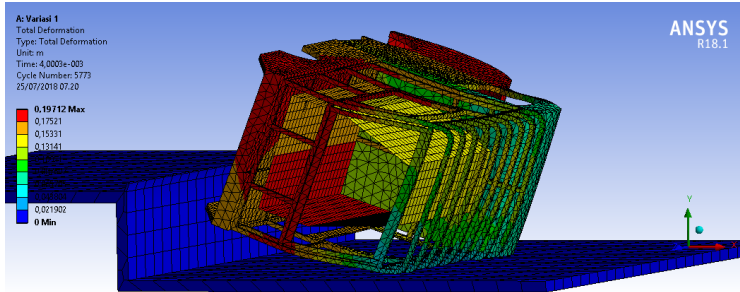
## BAB IV

### ANALISA HASIL SIMULASI

Tujuan utama dari simulasi model kendaraan adalah untuk menemukan desain dan dimensi yang memenuhi ketentuan dari pengujian guling regulasi ECE-066. Beberapa variasi simulasi dilakukan dengan menggunakan desain kendaraan yang sama dengan mengubah pembebanan dari bagian kabin dan box kendaraan multiguna pedesaan. Nilai deformasi, *total velocity*, serta plot energi dari kendaraan didapatkan pada tiga variasi pembebanan yaitu kendaraan multiguna pedesaan dengan box, kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian dan kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh. Desain struktur dari kendaraan dapat dinyatakan aman apabila sebelum dan sesudah pengujian, *survival space* tidak terganggu dan tetap terlindungi.

#### **4.1 Simulasi Kendaraan Multiguna Pedesaan dengan Box Tanpa Muatan**

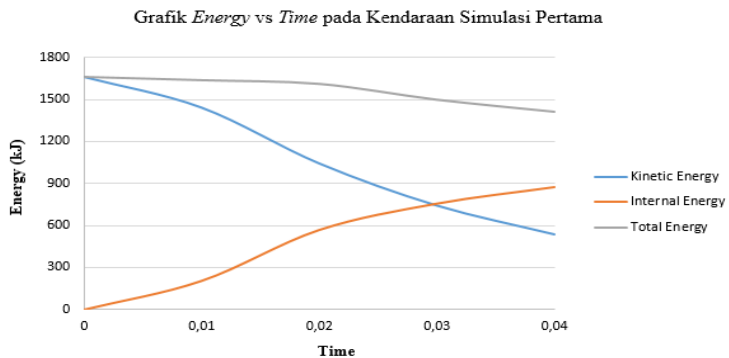
Simulasi uji guling pertama dilakukan pada kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan. Analisis dilakukan pada bagian kabin dan box multiguna pedesaan, sehingga bagian lain seperti roda, *chassis*, dan *engine* diabaikan (*suppress*). Kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan memiliki masa total seberat 1320 kg. Dengan berat bagian depan 500 kg, berat bagian belakang 410 kg dan berat box 410 kg. Pembebanan berupa gaya gravitasi dan kecepatan angular sebesar 2,74 rad/s diberikan pada model kendaraan. Hasil simulasi menunjukkan perubahan yang signifikan pada struktur kendaraan seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Simulasi guling kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan

#### 4.1.1 Energi yang Diterima oleh Model Kendaraan pada Simulasi Pertama

Grafik dari *Total Energy* (TE), *Kinetic Energy* (KE), dan *Internal Energy* (IE) berdasarkan hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.2 untuk simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan.



Gambar 4.2 Grafik dari *Total Energy* (TE), *Internal Energy* (IE) dan *Kinetic Energy* (KE) pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan

Pada gambar 4.2, energi kinetik (KE) mencapai nilai maksimal sebesar 1663 kJ pada awal pengujian, tepat pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah. Setelah mengalami tumbukan dengan permukaan tanah, energi kinetik tersebut kemudian diserap oleh deformasi pada struktur kendaraan dan berubah menjadi energi internal (IE) dengan nilai maksimal sebesar 874 kJ. Energi internal akan mencapai nilai maksimal pada akhir simulasi, yaitu pada saat energi kinetik telah diserap sepenuhnya oleh deformasi struktur. Energi total (TE) merupakan jumlah dari energi kinetik, energi potensial dan gaya yang bekerja dari luar (pada pengujian ini adalah gaya gravitasi). Energi total memiliki nilai terbesar yang sama dengan energi kinetik, yaitu sebesar 1663 kJ. Hal ini disebabkan karena energi internal bukan merupakan energi total, sehingga nilai terbesar energi total terjadi pada saat keseluruhan energi kinetik yang bekerja pada model kendaraan berada pada nilai tertinggi, yaitu saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah.

Tabel 4.1 Energi yang diterima oleh kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan pada saat terjadi guling

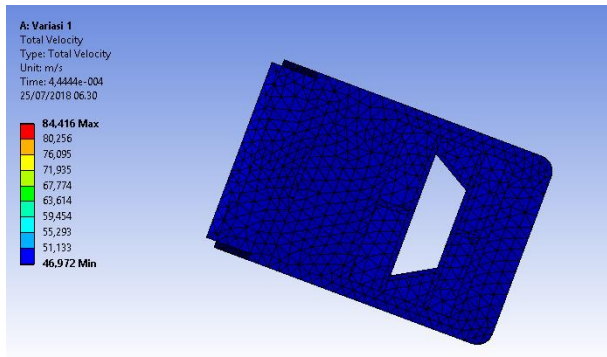
Jenis Model	Jenis Energi	Besar Maksimal
Kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan	<i>Kinetic Energy</i> (KE)	1663 kJ
	<i>Internal Energy</i> (IE)	874 kJ
	<i>Total Energy</i> (TE)	1663 kJ

#### 4.1.2 Verifikasi Hasil Simulasi Pertama

Untuk mengetahui tingkat keakuratan dari hasil simulasi yang diperoleh, sebuah perhitungan sederhana dilakukan dengan tujuan sebagai pembandingan dengan hasil simulasi. Berdasarkan regulasi ECE-066, pengujian guling dilakukan dengan menempatkan kendaraan diatas *tilting platform* yang terletak 800 mm diatas permukaan tanah. Kemudian kendaraan akan dimiringkan secara perlahan sampai posisi *center of gravity*

kendaraan sejajar dengan sumbu rotasi. Ketika posisi ini sudah tercapai, maka analisis guling akan dimulai dan kendaraan akan memiliki energi potensial terbesar. Kemudian kendaraan akan berguling dengan sendirinya dan bertumbukan dengan permukaan tanah. Pada posisi ini, energi potensial kendaraan berubah sepenuhnya menjadi energi kinetik.

Pada tugas akhir ini, analisa simulasi dilakukan pada posisi saat kendaraan akan bertumbukan dengan permukaan tanah. Pada posisi ini, energi terbesar yang terdapat pada kendaraan adalah energi kinetik akibat kecepatan yang dimiliki benda. Pada simulasi pertama, kecepatan saat model kendaraan akan bertumbukan dengan tanah adalah sebesar 46,972 m/s



Gambar 4.3 Kecepatan pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah pada simulasi pertama

Nilai energi kinetik (KE) terbesar yang dimiliki kendaraan saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah adalah :

$$KE = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

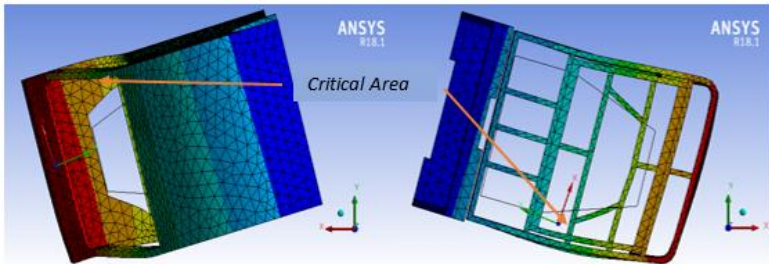
$$KE = \frac{1}{2} \cdot 1320 \text{ kg} \cdot (46,972 \text{ m/s})^2$$

$$KE = 1456 \text{ kJ}$$



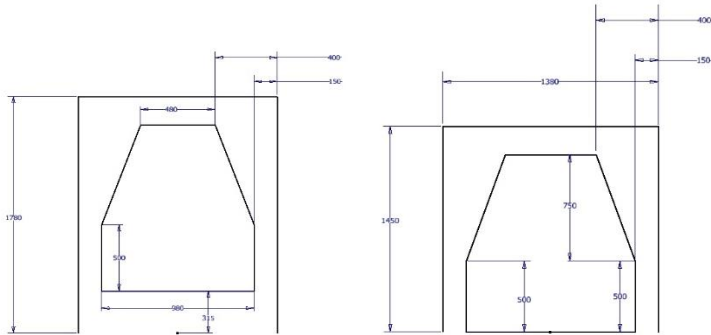
Nilai energi kinetik yang diperoleh dari perhitungan numerik dengan hasil simulasi memiliki nilai yang berdekatan, maka hasil simulasi dapat dinyatakan **akurat**.

#### 4.1.3 Analisa Deformasi Terhadap *Survival Space* pada Simulasi Pertama



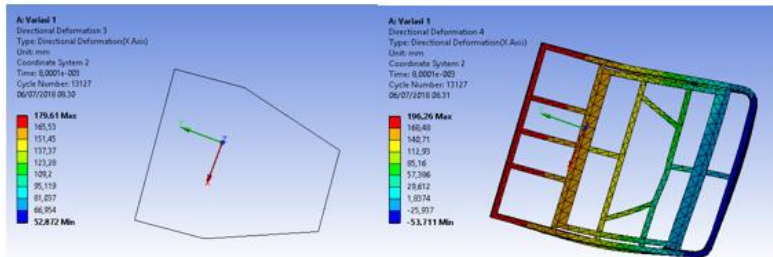
Gambar 4.4 Deformasi kabin dan rangka box terhadap *survival space* pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan

Deformasi pada kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan ditunjukkan pada gambar 4.4. Untuk melihat nilai deformasi terhadap dimensi dari *survival space*, maka perlu dihitung selisih perpindahan antara *survival space* dengan bagian kabin dan rangka box. Sebelum pengujian guling dimulai, terdapat *gap* antara sisi bagian luar *survival space* dengan dinding dalam rangka box dan kabin. Besar *gap* adalah 150 mm pada bagian bawah dan 400 mm pada bagian atas *survival space*.

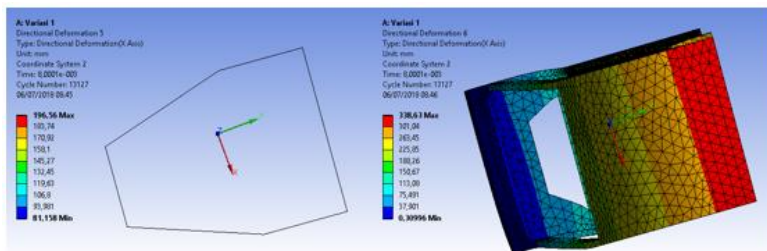


Gambar 4.5 (a) *Gap* pada *survival space* kabin (b) *Gap* pada *survival space* rangka box

Selisih perpindahan didapat dengan mencari nilai “*directional deformation*” pada koordinat yang tegak lurus terhadap bagian samping kendaraan. Nilai *directional deformation* tersebut didapatkan dengan cara mengurangi nilai deformasi maksimal antara kabin dan *survival space* kabin, serta deformasi maksimal antara rangka box dan *survival space* rangka box.



Gambar 4.6 *Directional deformation* pada *survival space* dan box simulasi pertama



Gambar 4.7 *Directional deformation* pada *survival space* dan kabin simulasi pertama

Selisih deformasi pada bagian *survival space* rangka box dan rangka box adalah sebesar 20,97 mm. Hal ini menunjukkan bahwa bagian samping rangka box bergeser sebesar 20,97 mm dari posisi semula. Kemudian untuk selisih deformasi pada bagian *survival space* kabin dan kabin adalah sebesar 94,81 mm. Deformasi yang terjadi pada bagian kabin dan rangka box kendaraan multiguna pedesaan berisi muatan sebagian menunjukkan bahwa struktur kendaraan dapat tetap melindungi *survival space* pada saat terjadi guling, sehingga desain dari struktur kendaraan **aman**

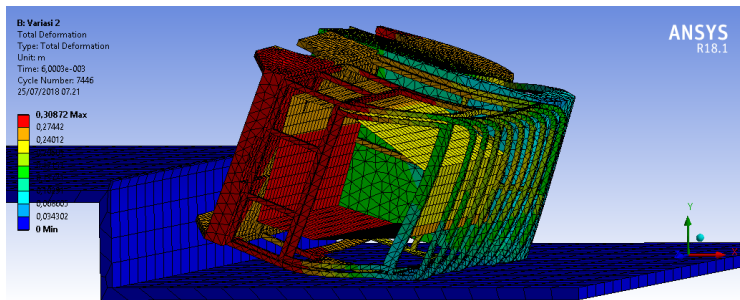
Tabel 4.2 Perhitungan deformasi terhadap *survival space* untuk variasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box tanpa muatan

No	Sisi	Selisih Perpindahan	<i>Survival Space</i>
1	Kabin	94,81 mm	<b>Aman</b>
2	Rangka Box	20,97 mm	<b>Aman</b>

## 4.2 Simulasi Kendaraan Multiguna Pedesaan dengan Box Berisi Muatan Sebagian

Simulasi uji guling kedua dilakukan pada kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian. Analisis simulasi dilakukan dengan menambahkan berat pada bagian box dan kabin kendaraan. Penambahan berat tersebut dilakukan dengan menambahkan model *rigid* pada bagian kabin dan box kendaraan.

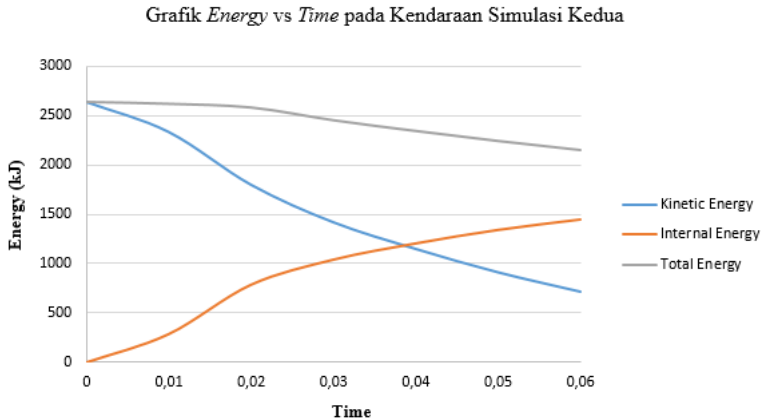
Kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian memiliki masa total sebesar 1620 kg. Berat muatan kursi sebesar 250 kg ditambahkan pada bagian box kendaraan, dan berat muatan kursi sebesar 50 kg ditambahkan pada bagian kabin. Pembebanan berupa gaya gravitasi dan kecepatan angular sebesar 2,96 rad/s diberikan pada model kendaraan. Hasil simulasi pada kendaraan ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Simulasi guling kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian

#### 4.2.1 Energi yang Diterima oleh Kendaraan pada Simulasi Kedua

Grafik dari *Total Energy* (TE), *Kinetic Energy* (KE), dan *Internal Energy* (IE) berdasarkan hasil simulasi kedua ditunjukkan pada gambar 4.9 untuk simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian.



Gambar 4.9 Grafik dari *Total Energy* (TE), *Internal Energy* (IE) dan *Kinetic Energy* (KE) pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian

Pada gambar 4.9, energi kinetik (KE) mencapai nilai maksimal sebesar 2639 kJ pada awal pengujian, tepat pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah. Setelah mengalami tumbukan dengan permukaan tanah, energi kinetik tersebut kemudian diserap oleh deformasi pada struktur kendaraan dan berubah menjadi energi internal (IE) dengan nilai maksimal sebesar 1340 kJ. Energi internal akan mencapai nilai maksimal pada akhir simulasi, yaitu pada saat energi kinetik telah diserap sepenuhnya oleh deformasi struktur. Energi total (TE) merupakan jumlah dari energi kinetik, energi potensial dan gaya yang bekerja dari luar (pada pengujian ini adalah gaya gravitasi). Energi total memiliki nilai terbesar yang sama dengan energi kinetik, yaitu sebesar 2639 kJ. Hal ini disebabkan karena energi internal bukan merupakan energi total, sehingga nilai terbesar energi total terjadi pada saat keseluruhan energi kinetik yang bekerja pada model kendaraan berada pada nilai tertinggi, yaitu saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah.

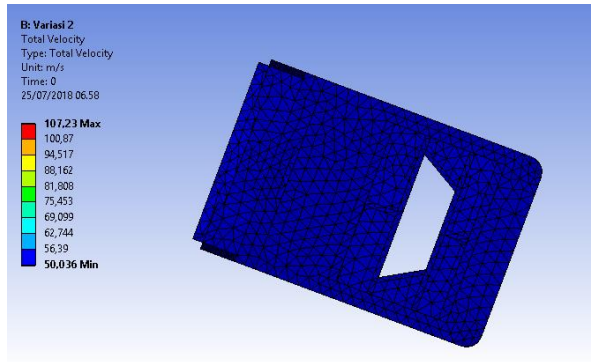
Tabel 4.3 Energi yang diterima oleh kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian pada saat terjadi guling

Jenis Model	Jenis Energi	Besar Maksimal
Kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian	<i>Kinetic Energy (KE)</i>	2639 kJ
	<i>Internal Energy (IE)</i>	1340 kJ
	<i>Total Energy (TE)</i>	2639 kJ

#### 4.2.2 Verifikasi Hasil Simulasi Kedua

Untuk mengetahui tingkat keakuratan dari hasil simulasi yang diperoleh, sebuah perhitungan sederhana dilakukan dengan tujuan sebagai pembandingan dengan hasil simulasi. Berdasarkan regulasi ECE-066, pengujian guling dilakukan dengan menempatkan kendaraan diatas *tilting platform* yang terletak 800 mm diatas permukaan tanah. Kemudian kendaraan akan dimiringkan secara perlahan sampai posisi *center of gravity* kendaraan sejajar dengan sumbu rotasi. Ketika posisi ini sudah tercapai, maka analisis guling akan dimulai dan kendaraan akan memiliki energi potensial terbesar. Kemudian kendaraan akan berguling dengan sendirinya dan bertumbukan dengan permukaan tanah. Pada posisi ini, energi potensial kendaraan berubah sepenuhnya menjadi energi kinetik.

Pada tugas akhir ini, analisa simulasi dilakukan pada posisi saat kendaraan akan bertumbukan dengan permukaan tanah. Pada posisi ini, energi terbesar yang terdapat pada kendaraan adalah energi kinetik akibat kecepatan yang dimiliki benda. Pada simulasi kedua, kecepatan saat model kendaraan akan bertumbukan dengan tanah adalah sebesar 50,036 m/s



Gambar 4.10 Kecepatan pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah pada simulasi kedua

Nilai energi kinetik (KE) terbesar yang dimiliki kendaraan saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah adalah :

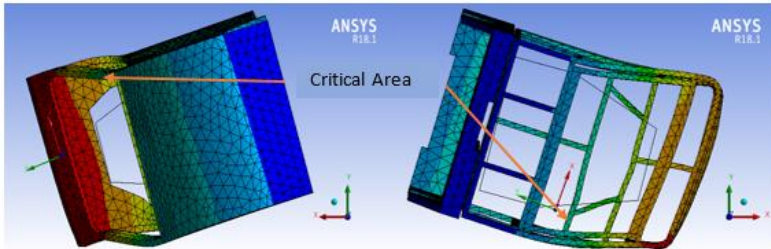
$$KE = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$KE = \frac{1}{2} \cdot 1620 \text{ kg} \cdot (50,036 \text{ m/s})^2$$

$$KE = 2027 \text{ kJ}$$

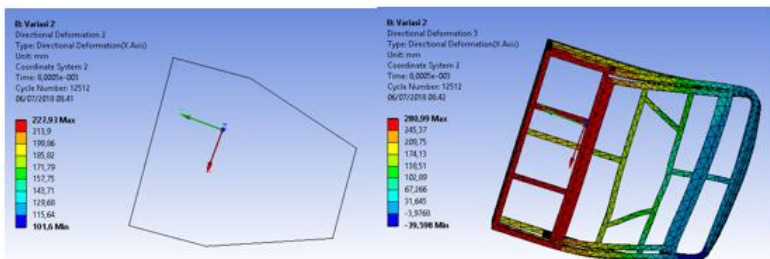
Nilai energi kinetik yang diperoleh dari perhitungan numerik dengan hasil simulasi memiliki perbedaan yang cukup jauh, namun masih dalam batas yang dapat diterima. Hasil simulasi kedua perlu ditinjau kembali.

### 4.2.3 Analisa Deformasi Terhadap *Survival Space* pada Simulasi Kedua



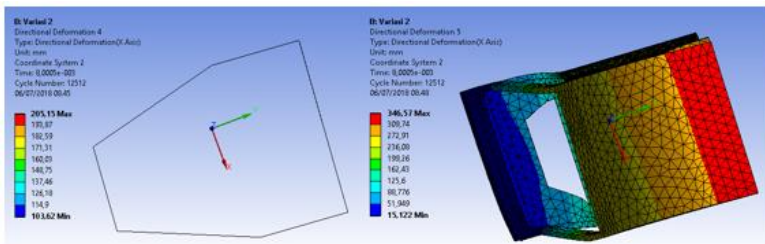
Gambar 4.11 Deformasi kabin dan rangka box terhadap *survival space* pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian

Deformasi pada simulasi kedua ditunjukkan di gambar 4.11. Sama seperti simulasi pertama, nilai deformasi didapatkan dengan cara mencari selisih perpindahan antara *survival space* di bagian kabin dan rangka box dengan struktur kabin dan rangka box.



Gambar 4.12 *Directional deformation* pada *survival space* dan box simulasi kedua





Gambar 4.13 *Directional deformation* pada *survival space* dan kabin simulasi kedua

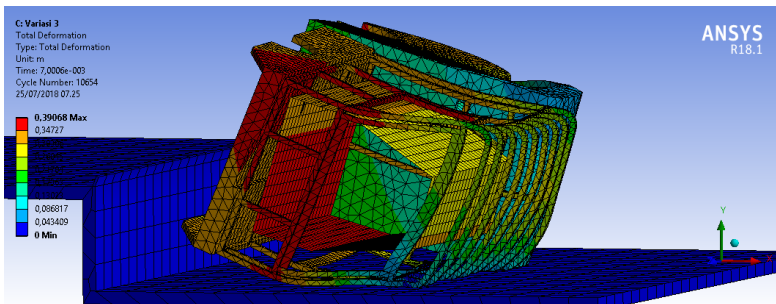
Selisih deformasi pada bagian *survival space* rangka box dan rangka box adalah sebesar 53,06 mm. Hal ini menunjukkan bahwa bagian samping rangka box bergeser sebesar 53,06 mm dari posisi semula. Kemudian untuk selisih deformasi pada bagian *survival space* kabin dan kabin adalah sebesar 141,42 mm. Deformasi yang terjadi pada bagian kabin dan rangka box kendaraan multiguna pedesaan berisi muatan sebagian menunjukkan bahwa struktur kendaraan dapat tetap melindungi *survival space* pada saat terjadi guling, sehingga desain dari struktur kendaraan **aman**.

Tabel 4.4 Perhitungan deformasi terhadap *survival space* untuk variasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan sebagian

No	Sisi	Selisih Perpindahan	<i>Survival Space</i>
1	Kabin	128,28 mm	<b>Aman</b>
2	Rangka Box	47,5 mm	<b>Aman</b>

### 4.3 Simulasi Kendaraan Multiguna Pedesaan dengan Box Berisi Muatan Penuh

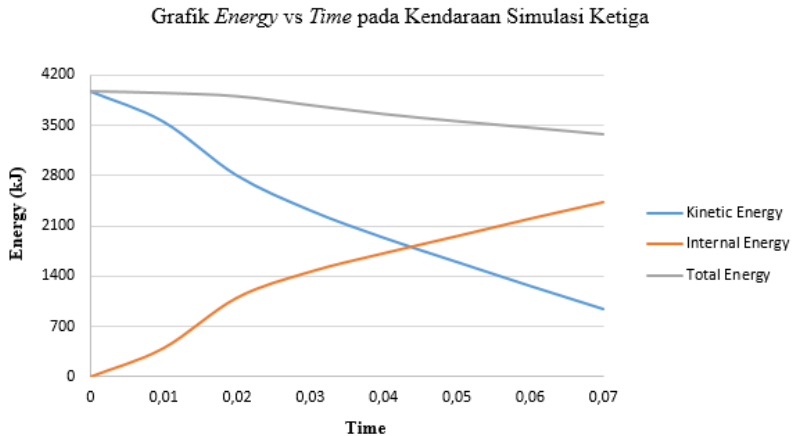
Simulasi uji guling ketiga dilakukan pada kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh. Analisis simulasi dilakukan dengan menambahkan berat pada bagian box dan kabin kendaraan. Penambahan berat tersebut dilakukan dengan menambahkan model *rigid* pada bagian kabin dan box kendaraan. Kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh memiliki masa total sebesar 2220 kg. Berat muatan kursi sebesar 250 kg serta berat muatan penumpang sebesar 480 kg ditambahkan pada bagian box kendaraan, dan berat muatan kursi sebesar 50 kg serta berat muatan penumpang sebesar 120 kg ditambahkan pada bagian kabin. Pembebanan berupa gaya gravitasi dan kecepatan angular sebesar 3,12 rad/s diberikan pada model kendaraan. Hasil simulasi pada kendaraan ditunjukkan pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Simulasi guling kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh

#### 4.3.1 Energi yang Diterima oleh Kendaraan pada Simulasi Ketiga

Grafik dari *Total Energy* (TE), *Kinetic Energy* (KE), dan *Internal Energy* (IE) berdasarkan hasil simulasi kedua ditunjukkan pada gambar 4.15 untuk simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh.



Gambar 4.15 Grafik dari *Total Energy* (TE), *Internal Energy* (IE) dan *Kinetic Energy* (KE) pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh

Pada gambar 4.15, energi kinetik (KE) mencapai nilai maksimal sebesar 3974 kJ pada awal pengujian, tepat pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah. Setelah mengalami tumbukan dengan permukaan tanah, energi kinetik tersebut kemudian diserap oleh deformasi pada struktur kendaraan dan berubah menjadi energi internal (IE) dengan nilai maksimal sebesar 1961 kJ. Energi internal akan mencapai nilai maksimal pada akhir simulasi, yaitu pada saat energi kinetik telah diserap sepenuhnya oleh deformasi struktur. Energi total (TE) merupakan jumlah dari energi kinetik, energi potensial dan gaya yang bekerja dari luar (pada pengujian ini adalah gaya gravitasi). Energi total memiliki nilai terbesar yang sama dengan energi kinetik, yaitu sebesar 3974 kJ. Hal ini disebabkan karena energi internal bukan merupakan energi total, sehingga nilai terbesar energi total terjadi pada saat keseluruhan energi kinetik yang bekerja pada model kendaraan berada pada nilai tertinggi, yaitu saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah..

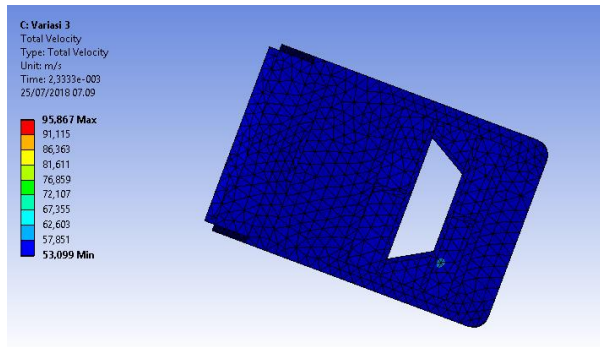
Tabel 4.5 Energi yang diterima oleh kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh pada saat terjadi guling

Jenis Model	Jenis Energi	Besar Maksimal
Kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh	<i>Kinetic Energy (KE)</i>	3974 kJ
	<i>Internal Energy (IE)</i>	1961 kJ
	<i>Total Energy (TE)</i>	3974 kJ

### 4.3.2 Verifikasi Hasil Simulasi Ketiga

Untuk mengetahui tingkat keakuratan dari hasil simulasi yang diperoleh, sebuah perhitungan sederhana dilakukan dengan tujuan sebagai pembandingan dengan hasil simulasi. Berdasarkan regulasi ECE-066, pengujian guling dilakukan dengan menempatkan kendaraan diatas *tilting platform* yang terletak 800 mm diatas permukaan tanah. Kemudian kendaraan akan dimiringkan secara perlahan sampai posisi *center of gravity* kendaraan sejajar dengan sumbu rotasi. Ketika posisi ini sudah tercapai, maka analisis guling akan dimulai dan kendaraan akan memiliki energi potensial terbesar. Kemudian kendaraan akan berguling dengan sendirinya dan bertumbukan dengan permukaan tanah. Pada posisi ini, energi potensial kendaraan berubah sepenuhnya menjadi energi kinetik.

Pada tugas akhir ini, analisa simulasi dilakukan pada posisi saat kendaraan akan bertumbukan dengan permukaan tanah. Pada posisi ini, energi terbesar yang terdapat pada kendaraan adalah energi kinetik akibat kecepatan yang dimiliki benda. Pada simulasi ketiga, kecepatan saat model kendaraan akan bertumbukan dengan tanah adalah sebesar 53,099 m/s



Gambar 4.16 Kecepatan pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah pada simulasi ketiga

Nilai energi kinetik (KE) terbesar yang dimiliki kendaraan saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah adalah :

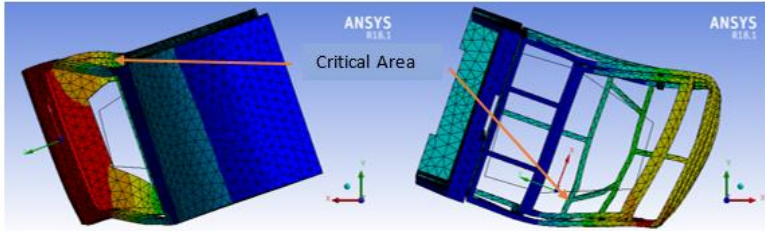
$$KE = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$KE = \frac{1}{2} \cdot 2220 \text{ kg} \cdot (53,099 \text{ m/s})^2$$

$$KE = 3129 \text{ kJ}$$

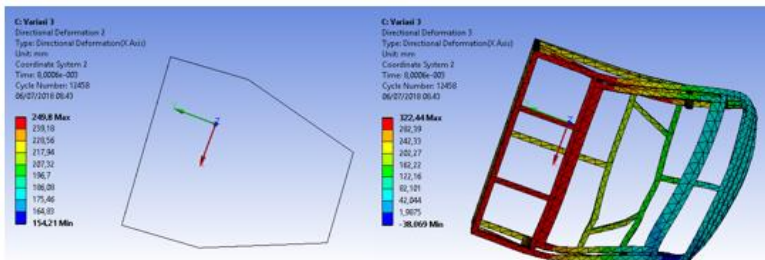
Nilai energi kinetik yang diperoleh dari perhitungan numerik dengan hasil simulasi memiliki perbedaan yang cukup jauh, namun masih dalam batas yang dapat diterima, Hasil simulasi ketiga perlu ditinjau kembali.

### 4.3.3 Analisa Deformasi Terhadap *Survival Space* pada Simulasi Ketiga

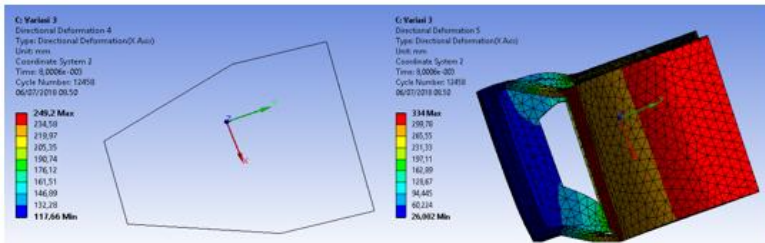


Gambar 4.17 Deformasi kabin dan rangka box terhadap *survival space* pada simulasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh

Deformasi pada simulasi ketiga ditunjukkan di gambar 4.17. Sama seperti simulasi pertama, nilai deformasi didapatkan dengan cara mencari selisih perpindahan antara *survival space* di bagian kabin dan rangka box dengan struktur kabin dan rangka box.



Gambar 4.18 *Directional deformation* pada *survival space* dan box simulasi ketiga



Gambar 4.19 *Directional deformation* pada *survival space* dan kabin simulasi ketiga

Selisih deformasi pada bagian *survival space* rangka box dan rangka box adalah sebesar 100,04 mm. Hal ini menunjukkan bahwa bagian samping rangka box bergeser sebesar 100,04 mm dari posisi semula. Kemudian untuk selisih deformasi pada bagian *survival space* kabin dan kabin adalah sebesar 158,45 mm. Deformasi yang terjadi pada bagian kabin dan rangka box kendaraan multiguna pedesaan berisi muatan sebagian menunjukkan bahwa struktur kendaraan dapat tetap melindungi *survival space* pada saat terjadi guling, sehingga desain dari struktur kendaraan **aman**.

Tabel 4.6 Perhitungan deformasi terhadap *survival space* untuk variasi kendaraan multiguna pedesaan dengan box berisi muatan penuh

No	Sisi	Selisih Perpindahan	<i>Survival Space</i>
1	Kabin	158,45 mm	<b>Aman</b>
2	Rangka Box	100,04 mm	<b>Aman</b>

#### 4.4 Analisis Hasil Simulasi

Dari ketiga hasil simulasi diatas, maka dapat ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 4.7 Perbandingan nilai energi kinetik hasil simulasi dengan hasil perhitungan

No	Objek Simulasi	Nilai <i>Kinetic Energy</i> (KE)		Deviasi
		Hasil Simulasi	Hasil Perhitungan	
1	Kendaraan dengan Box tanpa Muatan	1663 kJ	1456 kJ	14 %
2	Kendaraan dengan Box Berisi Muatan Sebagian	2639 kJ	2027 kJ	30 %
3	Kendaraan dengan Box Berisi Muatan Penuh	3974 kJ	3129 kJ	27 %

Tabel 4.8 Deformasi kendaraan terhadap *survival space* berdasarkan tiga variasi pembebanan pada bagian kabin dan rangka box

No	Objek Simulasi	Bagian			
		Kabin		Rangka Box	
		Deformasi	Survival Space	Deformasi	Survival Space
1	Kendaraan dengan Box Tanpa Muatan	94,81 mm	Aman	20,97	Aman
		Deformasi	Survival Space	Deformasi	Survival Space
2	Kendaraan dengan Box Berisi Muatan Sebagian	128,78 m	Aman	47,5 m	Aman
		Deformasi	Survival Space	Deformasi	Survival Space
3	Kendaraan dengan Box Berisi Muatan Penuh	158,45 mm	Aman	100,04 m	Aman
		Deformasi	Survival Space	Deformasi	Survival Space

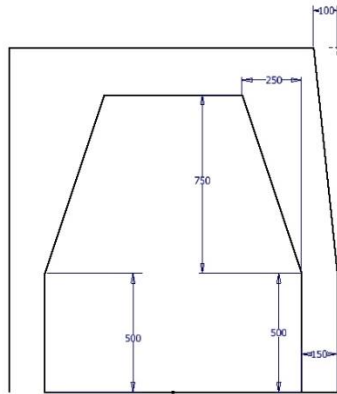
Dari tabel 4.7 dapat dilihat bahwa deviasi terbesar antara hasil simulasi dengan hasil perhitungan untuk nilai energi kinetik ditemukan pada simulasi ketiga dengan nilai deviasi sebesar 30%. Pada simulasi pertama, nilai energi kinetik yang diterima pada saat simulasi sebesar 1663 kJ memiliki nilai yang mendekati hasil perhitungan energi kinetik 1456 kJ. Namun pada simulasi kedua dengan penambahan berat muatan 300 kg, nilai energi kinetik yang diterima pada saat simulasi semakin menjauhi hasil perhitungan energi kinetik dengan deviasi sebesar 30%. Dan pada simulasi



ketiga dengan penambahan muatan 900 kg, nilai energi kinetik yang diterima pada saat simulasi dengan nilai energi kinetik hasil perhitungan memiliki deviasi yang menyerupai dari simulasi kedua, yaitu sebesar 27%.

Nilai deviasi energi kinetik hasil simulasi dengan hasil perhitungan yang semakin besar tersebut dapat disebabkan karena material yang digunakan untuk penambahan muatan tidak sesuai dengan penambahan muatan yang sebenarnya. Dalam tugas akhir ini, penambahan muatan kendaraan adalah berupa kursi dan penumpang. Pada simulasi kendaraan kosong tanpa muatan, nilai energi kinetik hasil simulasi masih mendekati energi kinetik hasil perhitungan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *software* simulasi merupakan metode yang **akurat** untuk mendapati hasil pengujian secara langsung, namun perlu ditinjau kembali *input* yang digunakan untuk penambahan muatan pada model kendaraan.

Tabel 4.8 menunjukkan deformasi terbesar terdapat pada objek simulasi ketiga, yaitu kendaraan dengan box berisi muatan penuh. Kendaraan akan berada pada kondisi tidak aman apabila nilai deformasi yang terjadi melebihi *gap* dari *survival space* yang dibuat. Pada simulasi pertama dengan massa kendaraan sebesar 1320 kg, nilai deformasi pada rangka box sebesar 20,97 mm masih terlampaui jauh dari *gap* pada *survival space* yang terletak pada sisi atas *survival space* yang berjarak 400 mm dari dinding dalam kendaraan. Dan pada bagian kabin, nilai deformasi yang terjadi mencapai 23,5% dari *gap survival space*. Nilai deformasi yang terjadi pada rangka box simulasi ketiga dengan adanya penambahan massa muatan total sebesar 900 kg meningkat menjadi 25% dari *gap* yang ada pada *survival space*. Sedangkan untuk bagian kabin, nilai deformasi yang terjadi mencapai 40% dari *gap* pada *survival space* bagian atas. Ilustrasi dari deformasi terbesar pada rangka box ditunjukkan oleh gambar berikut.



Gambar 4.20 Ilustrasi deformasi pada simulasi ketiga pada bagian rangka box

Semakin bertambahnya massa pada kendaraan, maka deformasi yang terjadi akan semakin besar. Hal ini disebabkan karena semakin besar massa yang dibebankan kendaraan, maka akan mengakibatkan meningkatnya energi potensial pada kendaraan tersebut. Dalam kasus guling, energi potensial akan berada pada nilai maksimal saat *center of gravity* dari benda berada pada posisi yang sejajar dengan sumbu rotasi. Semakin besar energi potensial pada kendaraan, maka akan semakin besar pula energi kinetik yang dimiliki kendaraan pada saat kendaraan tersebut terguling/terjatuh. Energi kinetik berada pada nilai maksimal tepat pada saat kendaraan akan bertumbukan dengan tanah.

Energi kinetik terbesar ditemukan pada objek simulasi ketiga, yaitu sebesar 3974 kJ. Energi kinetik tersebut kemudian akan berubah menjadi energi internal dan mengakibatkan deformasi pada kendaraan. Begitu pula untuk nilai energi internal terbesar ditemukan pada objek simulasi ketiga, yaitu sebesar 1961 kJ. Semakin besar nilai energi internal yang diserap, maka deformasi yang terjadi pada kendaraan juga akan semakin besar.

Dari keseluruhan variasi simulasi uji guling pada kendaraan multiguna pedesaan, deformasi yang terjadi pada ketiga variasi tidak mengganggu/menyentuh dimensi dari acuan *survival space*. Sehingga struktur dari kendaraan multiguna pedesaan masih dalam batas **aman** sesuai dengan regulasi ECE-066.

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi uji guling pada kendaraan multiguna pedesaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Metode pengujian guling menggunakan *software* simulasi merupakan metode yang **akurat** untuk mendapati hasil pengujian secara langsung, namun perlu ditinjau kembali *input* yang digunakan untuk penambahan muatan pada model kendaraan
2. Deformasi terbesar terjadi pada simulasi ketiga dengan massa total 2220 kg, yaitu sebesar 100,04 mm pada bagian rangka box dan 158,45 mm pada bagian kabin. Penambahan massa mengakibatkan nilai deformasi meningkat sebesar 25% terhadap *gap survival space* pada bagian rangka box dan 40% terhadap *gap survival space* pada bagian kabin. Dari keseluruhan variasi simulasi uji guling pada kendaraan multiguna pedesaan, deformasi yang terjadi pada ketiga variasi tidak mengganggu/menyentuh dimensi dari acuan *survival space*. Sehingga struktur dari kendaraan multiguna pedesaan masih dalam batas **aman** sesuai dengan regulasi ECE-066.

#### 5.2 Saran

Model kendaraan yang digunakan pada simulasi dibuat sedemikian mungkin sehingga dimensi model dapat menyerupai dimensi kendaraan asli. Namun bagian sambungan dan propertis material yang digunakan pada model kendaraan tidak sepenuhnya sama dengan kendaraan pada aslinya. Untuk penelitian mengenai kendaraan multiguna pedesaan berikutnya, perlu diperhatikan secara rinci mengenai dimensi dan detail lain seperti sambungan,

material dan berat dari kendaraan itu sendiri. Semakin banyak data yang diperoleh, maka simulasi yang dilakukan dapat semakin realistis dan mendekati hasil pengujian secara langsung

## DAFTAR PUSTAKA

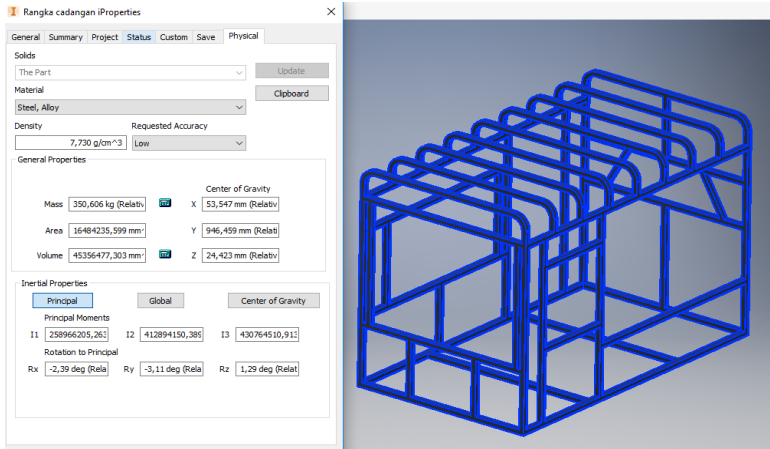
- [1] Pramono, A.S. 2014. “Rancang Bangun Kendaraan Multiguna Pedesaan”. **Laporan Kemajuan II Tahap ke 3**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [2] US Department of Transportation. 2007. **Federal Motor Vehicle Safety Standart; Rollover Resistance**. United States : Docket No. NHTSA-2001-9663.
- [3] United Nations, 2006. **Uniform Technical Prescriptions Concerning The Approval of Large Passenger Vehicle with Regards to The Strength of Vehicle Superstructures (Revision I)**, Regulation No. 66 of the Economic Commision for Europe of The United Nations (UN/ECE).
- [4] Wicaksono, S., Rahman, R F., Miharadi, S., Nurhadi, I. 2017. **Finite Element Analysis of Bus Rollover Test in Accordance with UN ECE R66 Standart**. Bandung : Intitut Teknologi Bandung.
- [5] Ali, M. L., 2008. **Impact on Bus Superstructure Due to Rollover**. Malaysia : Universiti Teknologi Malaysia.
- [6] Reński, A. 2015. **Investigation of The Influence of The Center of Gravity Position on The Course of Vehicle Rollover**. Poland : Warsaw University of Technology.
- [7] Choiron, M. A., Anindito, P., Anam, K. 2014. **Modul Ajar Metode Elemen Hingga**. Malang : Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
- [8] Syah, K. 2018. **Analisis Deformasi pada Stent Asymentric dengan Variasi Tipe Connector**. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [9] Ahmad, H. M. 2014. **Pengembangan Penyangga Box Mobil Pick-up Multiguna Pedesaan**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [10] Material Property Data. Diambil dari : [www.matweb.com](http://www.matweb.com) (15 April 2018).

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

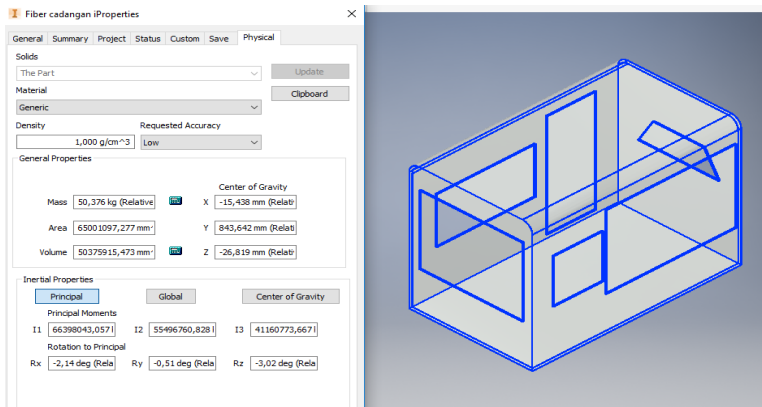


## LAMPIRAN

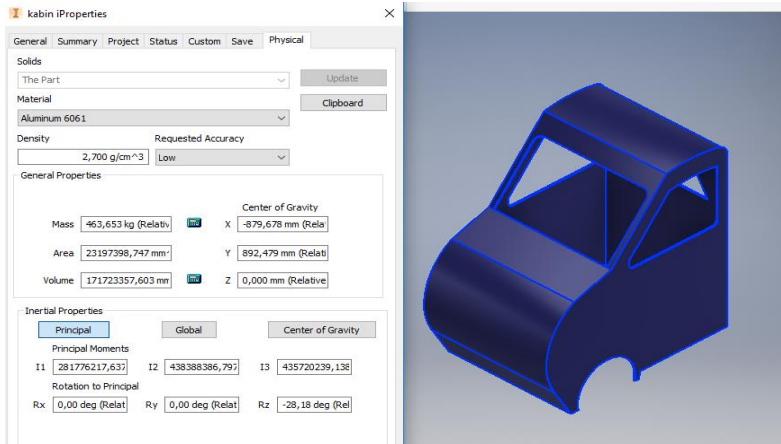
### Lampiran 1. Massa bagian rangka box pada 3D model *software INVENTOR*



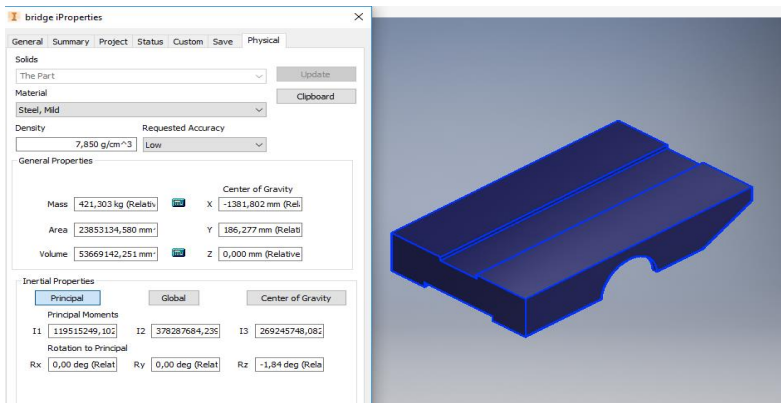
### Lampiran 2. Massa bagian lapisan luar box pada 3D model *software INVENTOR*



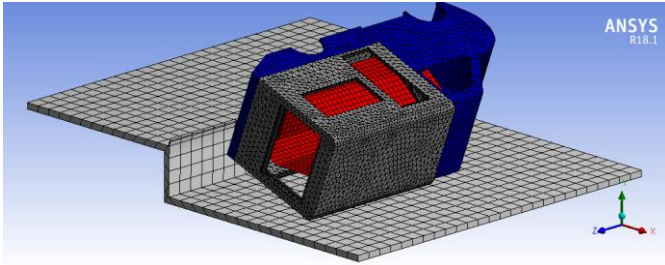
### Lampiran 3. Massa bagian kabin pada 3D model *software INVENTOR*



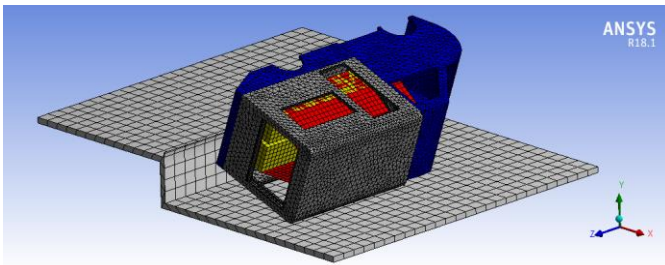
### Lampiran 4. Massa bagian *bridge* pada 3D model *software INVENTOR*



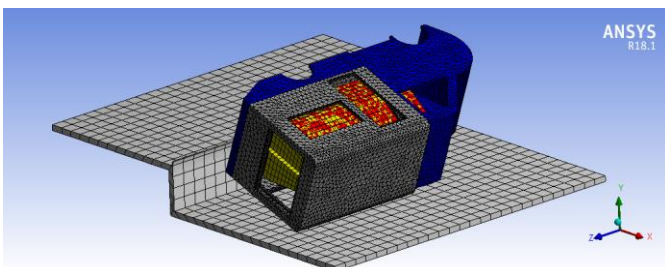
**Lampiran 5.** Mesh kendaraan dengan box tanpa muatan pada *Explicit Dynamics ANSYS*



**Lampiran 6.** Mesh kendaraan dengan box bermuatan sebagian pada *Explicit Dynamics ANSYS*



**Lampiran 7.** Mesh kendaraan dengan box bermuatan penuh pada *Explicit Dynamics ANSYS*



**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Mohammad Fajar Putra Utomo, dilahirkan di Tangerang pada 19 Januari 1995. Merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh Pendidikan sekolah dasar pada tahun 2001-2007 di SD Muhammadiyah 12 Pamulang, pendidikan sekolah menengah pertama pada tahun 2007-2010 di Madrasah Tsanawiyah Pembangunan Jakarta, lalu sekolah menengah atas pada 2010-2013 di MAN 4 Jakarta Selatan. Lalu penulis melanjutkan pendidikan yang lebih tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dengan Departemen Teknik Mesin bidang studi desain dan mekanika benda padat sebagai bahan tugas akhir.

Selama menjadi mahasiswa di kampus ITS, penulis secara aktif bergabung di organisasi mahasiswa Mesin Music Club (MMC). Penulis adalah staff divisi HRD pada tahun 2014, serta Ketua Organisasi Mesin Music Club periode jabatan 2015-2016. Selain itu penulis juga aktif mengikuti kegiatan kemahasiswaan serta menjadi panitia dan koordinator dari berbagai kegiatan yang diselenggarakan di tingkat jurusan dan universitas.

Penulis dapat dihubungi di mubaroko@gmail.com atau 089670135990