

SIMULASI UJI GULING *MEDIUM ELECTRIC BUS* BERDASARKAN STANDAR UN ECE R66 MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Eko Wahyu Saputro¹, Rifky Ismail², Ismoyo Haryanto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: ewasaputro@gmail.com

ABSTRAK

Bertambahnya jumlah kendaraan menyebabkan potensi naiknya angka kecelakaan. Berdasarkan data statistik transportasi darat Badan Pusat Statistik, lebih dari 100.000 kasus kecelakaan terjadi setiap tahunnya dengan jumlah korban meninggal akibat kecelakaan lebih dari 20.000 jiwa. Pada tahun 2012-2017 kecelakaan kendaraan bermotor mencapai 103.228 kasus. Salah satu jenis kendaraan yang mempunyai jumlah korban kecelakaan yang besar adalah kendaraan bus. Demi memenuhi kebutuhan transportasi massal, perusahaan pembuat bus diharapkan dapat menciptakan transportasi yang aman sesuai dengan standar yang ada. Standar pengujian *rollover* UN ECE R66 merupakan prosedur pengujian yang paling sesuai dengan kondisi kecelakaan di dunia nyata dan sudah diakui oleh lebih dari 40 negara. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan menganalisis kekuatan superstruktur bus salah satu perusahaan di Indonesia terhadap kecelakaan terguling menggunakan komputasi numerik berbasis metode elemen hingga. Simulasi model awal yang tidak lulus uji guling di evaluasi dan dilakukan penguatan superstruktur pada bagian-bagian kritis saat menerima beban impak. Hasil penelitian ini adalah model akhir medium electric bus yang sudah lolos uji guling berdasarkan standar UN ECE R66. Model akhir memiliki berat total 7.368 kg (turun 0,95% dari model awal) dan dapat menyerap energi *impact* sebesar 97.825 kJ.

Kata kunci: metode elemen hingga; *rollover*; superstruktur bus; UN ECE R66

ABSTRACT

The increase in the number of vehicles leads to the potential for an increase in the number of accidents. Based on land transportation statistics, the Central Bureau of Statistics, more than 100,000 cases of accidents occur each year with the death toll from accidents of more than 20,000. In 2012-2017 motor vehicle accidents reached 103,228 cases. One type of vehicle that has a large number of accident victims is a bus vehicle. In order to meet the needs of mass transportation, bus manufacturing companies are expected to be able to create safe transportation in accordance with existing standards. The UN ECE R66 rollover test standard is the most suitable test procedure for real-world accidents and has been recognized by more than 40 countries. To achieve this goal, this research was conducted by analyzing the strength of the bus superstructure of one company in Indonesia against the overturning accident using numerical computation based on the finite element method. Initial model simulations that do not pass the rolling test are evaluated and the superstructure reinforces the critical parts when receiving impact loads. The results of this study are the final model of the medium electric bus that has passed the roll test based on the UN ECE R66 standard. The final model weighs a total of 7,368 kg (down 0.95% from the original model) and can absorb an impact energy of 97,825 kJ.

Keywords: bus superstructure; finite element method; rollover; UN ECE R66

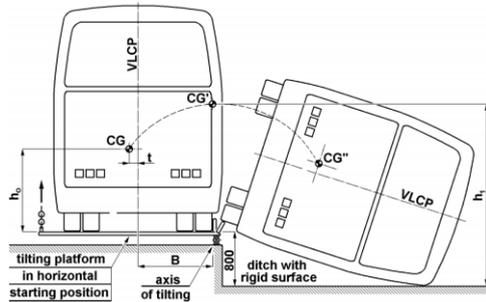
1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan PDB Indonesia pada kuartal kedua tahun 2018 menunjukkan pertumbuhan ekonomi sebesar 5,27 persen [1]. Peningkatan ini dipengaruhi oleh beberapa komponen ekonomi seperti jasa perusahaan, perdagangan, transportasi dan jasa lainnya. Melihat kondisi geografis dan infrastruktur yang sedang dibangun Indonesia, bus masih menjadi solusi utama sebagai transportasi antar kota dan antar provinsi. Selain dapat mengangkut banyak orang, bus dinilai transportasi yang paling efisien dan murah.

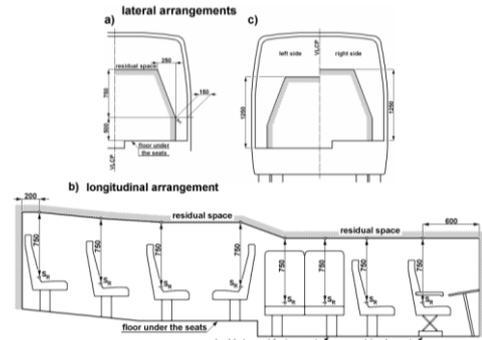
Kondisi geografis Indonesia yang terdiri dari perbukitan dan pegunungan membuat jalan sebagai lalu lintas utama. Berdasarkan data yang dihimpun oleh Komite Nasional Keselamatan Transportasi tahun 2007 – 2016, jenis kecelakaan lalu lintas yang sering terjadi adalah tabrakan sebanyak 42 kasus (65.6%), terguling sebanyak 19 kasus (29.7%) dan terbakar sebanyak 3 kasus (4.7%) [2]. Kecelakaan akibat bus terguling dapat memakan banyak korban jiwa. Terguling

dapat diartikan sebagai bentuk manuver kendaraan dengan sudut 90° atau lebih pada sumbu longitudinal. Kondisi ini akan mengakibatkan bus berkontak langsung dengan jalan ataupun permukaan tanah [3]. Belum adanya standarisasi dalam manufacturing bus juga dapat mengakibatkan kerusakan fatal saat terguling.

UN ECE-R66 (*United Nations Economic Commission for Europe Regulation 66*) merupakan salah satu standar keamanan untuk mengevaluasi kekuatan superstruktur dari bus [4]. ECE-R66 sangat populer dijadikan sebagai standar keamanan bus dan sudah diterima lebih dari 40 negara [5]. ECE-R66 menggunakan tes uji guling dinamik secara penuh (*full body*) sebagai persetujuan awal. Terbentuknya standar ECE-R66 awalnya digunakan untuk bus tunggal yang dirancang untuk mengangkut 22 orang atau lebih [6]. Regulasi pengujian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Regulasi Pengujian Rollover ECE-R66



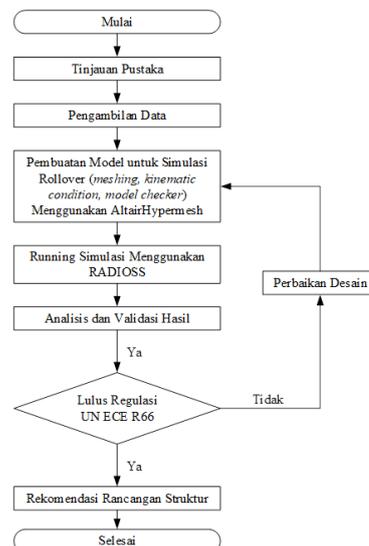
Gambar 2. Spesifikasi dari Residual Space

Berdasarkan pengujian *rollover* jumlah energi yang diterapkan pada bus, sebanding dengan berat kendaraan secara keseluruhan dan pusat gravitasi. Lolos atau tidaknya pengujian ECE-R66 adalah berdasarkan konsep *residual space*. *Residual space* didefinisikan sebagai sebuah area yang dibuat utuh atau tidak tersentuh untuk menciptakan zona keselamatan bagi penumpang dan sopir. Tidak ada bagian dari rangka rusak yang diperbolehkan untuk menembus residual space setelah terjadi impact. Bentuk dari residual space dapat dilihat pada Gambar 2.

Pengujian yang sudah ada pernah dilakukan oleh [7]. Dia melakukan penelitian simulasi *rollover* ECE-R66 terhadap struktur bus menggunakan software RADIOSS. Pemodelan dilakukan dengan memberikan beban gravitasi terhadap semua *nodes* (titik) sehingga bus akan terguling secara bebas. Bus akan mulai deformasi ketika atap menyentuh tanah dan akan berhenti ketika *waist-rail* menyentuh tanah. Deformasi akan berhenti ketika semua energi kinetik terkonversi menjadi energi internal.

2. METODE PENELITIAN

Model bus yang digunakan pada penelitian uji guling berdasarkan UN ECE R66 ini menggunakan model bus listrik tipe sedang dari Karoseri Laksana. Bus ini memiliki *Gross Vehicle Weight Rating* (GVWR) sebesar 7.439 kg dengan total penumpang sebanyak 32 orang. Pengambilan data dilakukan dengan cara mengukur langsung dimensi bus pembanding yang ada di lapangan dan menyesuaikannya dengan data geometri yang diberikan oleh Karoseri Laksana. Berikut adalah diagram alir penelitian, dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Material yang digunakan pada model bus ini dibagi menjadi tiga bagian, yaitu material untuk bagian rangka, chasis, dan karet ban. Superstruktur bus bagian rangka atas (selain chasis) menggunakan dua jenis material, yaitu *duplex stainless steel* dan *ferritic stainless steel*. *Duplex stainless steel* memiliki kekuatan lebih tinggi dan massa jenis yang lebih besar dibandingkan *ferritic stainless steel*. Penjelasan karakteristik material *duplex stainless steel* dan *ferritic stainless steel* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik *duplex stainless steel* dan *ferritic stainless steel* [8]

No.	Keterangan	Duplex Stainless Steel	Ferritic Stainless Steel
1.	Massa Jenis (kg/mm ³)	7,85 x 10 ⁻⁶	7,70 x 10 ⁻⁶
2.	Modulus Young (GPa)	210	210
3.	Yield Strength (GPa)	0,969	0,515
4.	Poisson Ratio	0,3	0,3

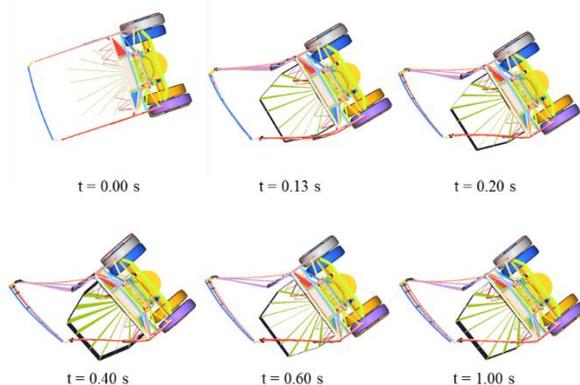
Proses *meshing* dilakukan menggunakan *software HyperMesh 2019*. Selanjutnya akan menggunakan *software Radioss 2019* untuk pengujian rollover. Tujuan dilakukan *meshing* adalah untuk membagi model menjadi bagian-bagian kecil dengan sifat seperti komponen aslinya sehingga akan mempermudah dan meminimalisir kinerja komputer saat simulasi. Kondisi batas yang ditentukan pada pengujian *rollover* ini meliputi pembuatan lantai (*rigid wall*), penentuan permukaan komponen yang akan kontak bertumbukan dengan lantai (*contact surfaces*), input gravitasi dan juga kecepatan ketika bus terguling. Setelah menentukan *rigid wall*, selanjutnya yaitu memasukkan nilai gravitasi terhadap seluruh komponen. Pemodelan gravitasi hanya dilakukan pada *rollover* agar simulasi lebih realistis dan yang nantinya akan berdampak pada adanya tumbukan dengan ground. Langkah terakhir dalam pendefinisian kondisi batas adalah mendefinisikan kecepatan ketika bus terguling. Kecepatan yang digunakan adalah 2.235 rad/s.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

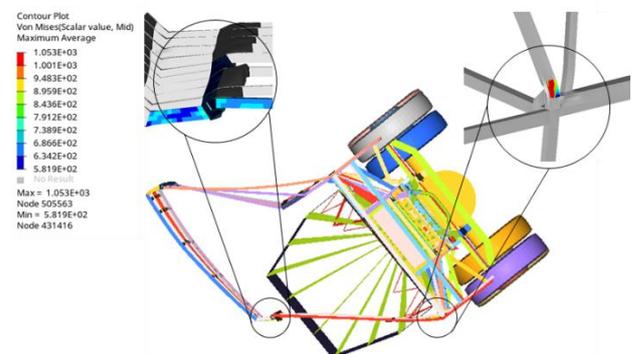
Analisis dari simulasi *rollover medium electric bus* ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga. Simulasi desain awal kemudian dilakukan perbaikan desain hingga lolos uji guling, kemudian dilakukan perbandingan dari hasil simulasi desain awal dengan desain akhir.

Berdasarkan hasil simulasi *rollover* yang dilakukan pada desain awal *medium electric bus*, didapatkan hasil ilustrasi pergerakan seperti pada Gambar 4. Bus akan mengalami kontak dengan tanah ketika sudut atap menghantam tanah. Energi kinetik akan mulai diserap dengan deformasi *elasto-plastic*. Selama proses deformasi, pilar utama mulai mengalami *bending* dan akan menyerap sebagian besar energi kinetik. Deformasi akan berhenti ketika rangka samping bawah bus menyentuh tanah dan akan mengalami *sliding*. Deformasi akan berhenti ketika energi kinetik dari model sepenuhnya dan dikonversi menjadi internal energi. *Residual space* ditunjukkan sebagai bagian *trapezoidal* warna hitam, dapat terlihat pada 0.13 detik bahwa model sudah tidak dapat menahan beban *impact* dari *rollover* sehingga struktur menembus *residual space*.

Deformasi terbesar dapat dilihat pada Gambar 5. Tegangan tertinggi terletak pada pilar samping yang menghubungkan antara chasis dengan rangka atap yaitu sebesar $1,05 \times 10^3$ kJ. Beban *impact* akibat menghantam tanah tidak dapat diteruskan ke komponen atap secara halus sehingga membuat model tidak lolos uji guling.

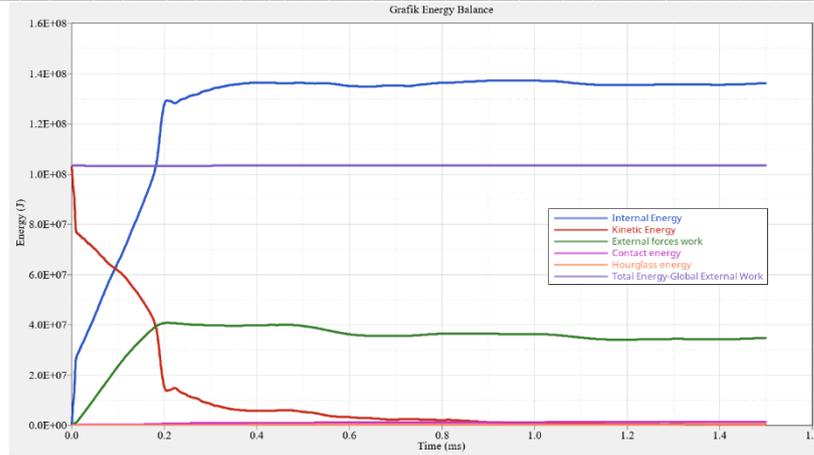


Gambar 4. Time Step Uji Guling



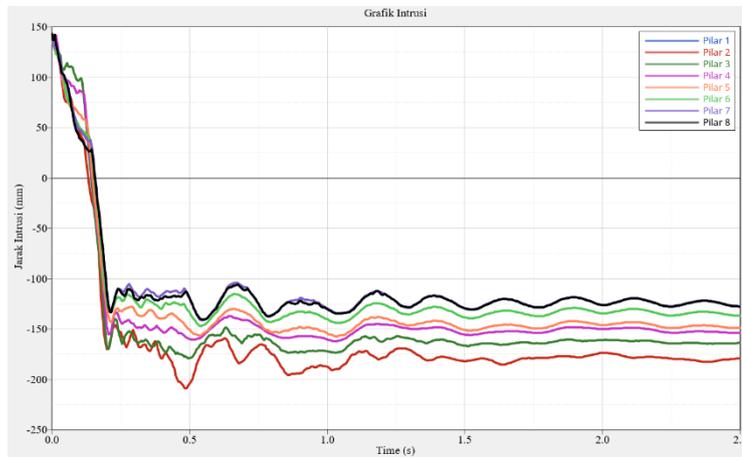
Gambar 5. Deformasi Bus

Grafik keseimbangan energi digunakan untuk mengevaluasi model berdasarkan analisis numerik. Pada Gambar 6, energi kinetik menurun secara kontinu dari 0 s sampai ke 0.7 s. Rangka samping bawah mulai menabrak tanah pada 0.2 s. Akibat massa yang sangat besar, energi kinetik sedikit naik dari 0.2 s sampai 0.23 s. Energi kinetik kembali menurun setelah 0.23 s sampai 0.8 s sehingga akhirnya habis. Bus mulai bergeser ke arah horizontal. Akibat model bus tidak dapat menerima energi kinetik secara penuh, maka internal energi akan naik dan melebihi batas dari total energi seperti terlihat pada 0.2 s. Terlihat internal energi mencapai 136.174 kJ sedangkan total energi yang dapat diserap oleh struktur hanya 103.472 kJ. Dapat disimpulkan bahwa struktur bus ini tidak dapat menyerap energi *impact* secara keseluruhan.



Gambar 6. Grafik Keseimbangan Energi Desain Awal

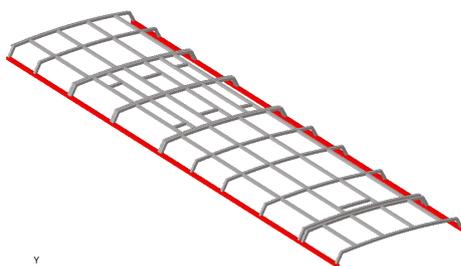
Jarak intrusi setiap pilar yang mengenai *residual space* dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan dari hasil simulasi, ke delapan pilar telah menembus batas *residual space* dengan jarak yang berbeda-beda. Jarak terdalam yang berhasil ditembus adalah sebesar 210 mm (tanda minus berarti menembus *residual space*). Besarnya intrusi ini menunjukkan bahwa ke delapan pilar tidak dapat menahan beban *impact*.



Gambar 7. Grafik Jarak Intrusi Desain Awal

Berdasarkan hasil simulasi *rollover* yang dilakukan pada desain awal, diketahui bahwa desain tersebut tidak memenuhi kriteria lolos uji *rollover* berdasarkan UN ECE R66. Terlihat masih banyak dari rangka yang menembus *residual space* ketika terjadi tumbukan dengan lantai. Oleh karena itu, perlu dilakukan berbagai perbaikan untuk memperkuat struktur bus agar dapat lolos pengujian. Berikut ini adalah beberapa langkah yang dilakukan untuk melakukan penguatan struktur.

Perubahan ketebalan komponen dilakukan dengan cara merubah tebal komponen yang semula 2 mm menjadi 3 mm atau 4 mm, tanpa dilakukan perubahan dimensi panjang dan lebar. Perubahan ini disesuaikan dengan jenis material yang disediakan oleh katalog material pihak karoseri. Letak komponen yang dilakukan perubahan ketebalan dapat dilihat pada Gambar 8. dan Tabel 1. berikut ini.

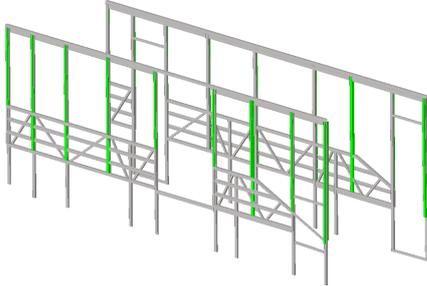


Gambar 8. Time Step Uji Guling

Tabel 1. Hasil Perubahan Material

No	Komponen	Tebal Sebelum Perubahan (mm)	Tebal Sesudah Perubahan (mm)
1	Cant rail 1	2	3
2	Cant rail 2	2	3
3	Cant rail 3	2	3
4	Cant rail 4	2	3

Penambahan dan pergantian komponen dilakukan pada struktur bus yang mengalami deformasi paling besar. Setelah dilakukan analisis tegangan, deformasi, penyesuaian komponen berdasarkan katalog dari Karoseri Laksana serta referensi dari berbagai jurnal penelitian *rollover* yang sudah ada, maka didapatkan hasil optimasi seperti Gambar 9 dan Tabel 2 berikut ini.

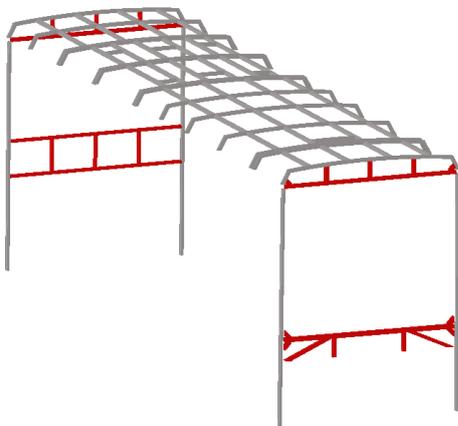


Gambar 9. Komponen Penguat Rangka Samping

Tabel 2. Daftar Komponen Penguat Rangka Samping

No	Komponen p x l x t (mm)	Material	Jumlah
1	Pilar 60x30x3	Duplex stainless steel	2
2	Pilar 60x20x3	Duplex stainless steel	8
3	Pilar 40x20x2	Duplex stainless steel	18

Berikut ini adalah rincian penambahan komponen penguat pada rangka depan dan belakang.

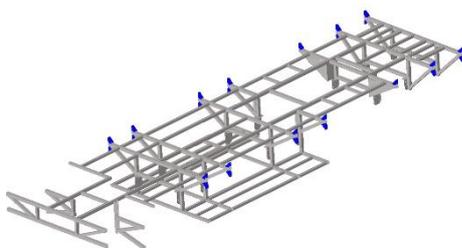


Gambar 10. Komponen Penguat Rangka Depan dan Belakang

Tabel 3. Daftar Komponen Penguat Rangka Depan dan Belakang

No	Komponen p x l x t (mm)	Material	Jumlah
1.	Crossbar atas 40x40x4	Duplex stainless steel	2
2.	Crossbar belakang 40x40x2	Duplex stainless steel	2
3.	Crossbar depan 50x50x2	Duplex stainless steel	1
4	Pipa belakang 40x30x2	Duplex stainless steel	3
5.	Pipa silang 50x40x2	Duplex stainless steel	2
6.	Pipa bawah 40x40x2	Duplex stainless steel	2
7.	Pipa atas 40x40x2	Duplex stainless steel	6
8.	Braket 50x50x4	Duplex stainless steel	4
9.	Braket 50x50x2	Duplex stainless steel	2
10.	Braket 40x40x2	Duplex stainless steel	2

Berikut ini adalah rincian penambahan komponen penguat pada rangka lantai.



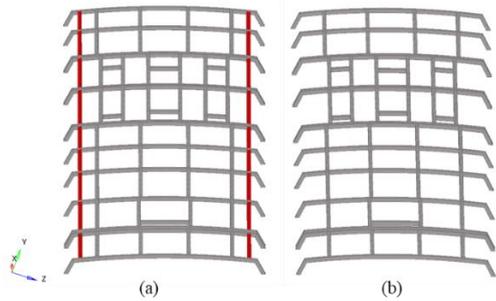
Gambar 11. Komponen Penguat Rangka Depan dan Belakang

Tabel 4. Daftar Komponen Penguat Rangka Lantai

No	Komponen p x l x t (mm)	Material	Jumlah
1.	Braket 50x50x2	Duplex stainless steel	12

Pengurangan komponen dilakukan pada struktur bus yang hanya memiliki konsentrasi tegangan paling kecil. Setelah dilakukan analisis tegangan, deformasi, penyesuaian komponen berdasarkan katalog dari karoseri laksana serta referensi

dari berbagai jurnal penelitian *rollover* yang sudah ada, maka didapatkan hasil optimasi pada rangka atap seperti Gambar 12 berikut ini.



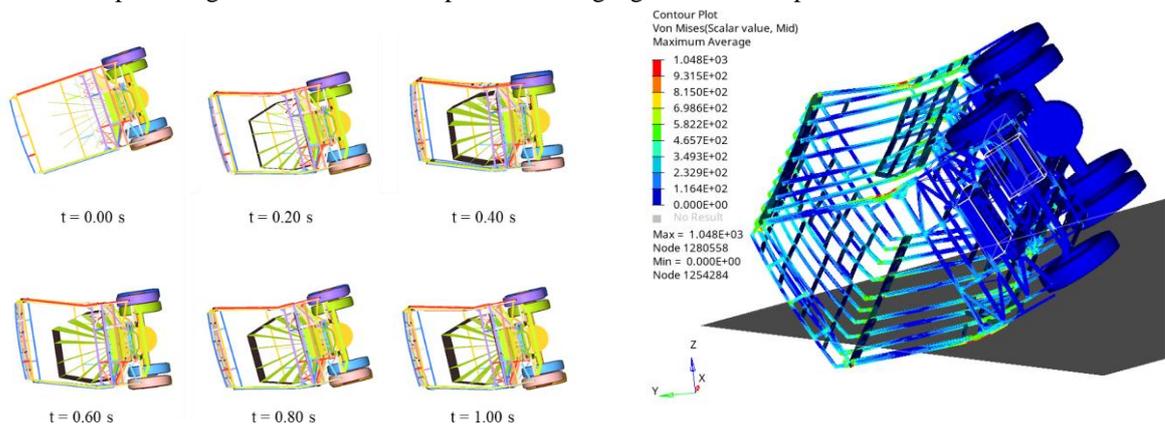
Tabel 5. Daftar Komponen Rangka Atap Yang Dihilangkan

No	Komponen p x l x t (mm)	Material	Jumlah
1.	Braket 50x50x2	Duplex stainless steel	12

Gambar 12. Optimasi Komponen pada Rangka Atap (A) Sebelum Optimasi dan (B) Sesudah Optimasi

Bagian yang berwarna merah adalah komponen yang memiliki tingkat tegangan rendah sehingga dioptimasi dengan cara dihilangkan. Berikut ini adalah rincian pengurangan komponen pada rangka atap. Setelah dilakukan penguatan superstruktur bus, didapatkan berat total struktur adalah 5.192 kg dan berat penumpang sebanyak 32 orang adalah 2.176 kg (berat satu penumpang 68 kg). Jadi total keseluruhan berat bus adalah 7.368 kg. Berat total kendaraan masih di bawah 8.000 kg sehingga masih sesuai dengan Peraturan Pemerintah (PP) No. 55 Pasal 5 Tahun 2012 dimana berat bus tipe medium memiliki berat maksimum 8.000 kg.

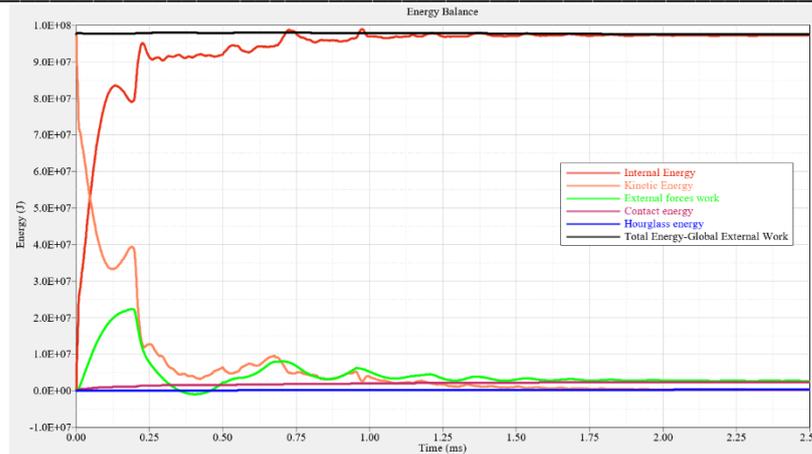
Berdasarkan hasil simulasi *rollover* yang dilakukan pada desain akhir *medium electric bus*, didapatkan hasil ilustrasi pergerakan seperti pada Gambar 13. Terjadi pengurangan deformasi yang cukup signifikan terutama pada rangka pilar dan sambungan antara rangka lantai dengan rangka samping. Rangka atap yang semula tidak mampu menahan beban sudah diperkuat dengan crossbar sehingga dapat menahan beban tumbukan. Terlihat pada waktu 0.20 s bus mengalami tumbukan dengan lantai dan mengalami *sliding* sampai waktu 1.00 s. Tidak ada *residual space* yang tertembus oleh rangka. Dapat disimpulkan bahwa struktur bus ini sudah dapat menyerap semua energi impact pada lantai dan lolos uji guling. Tegangan von Mises paling tinggi terletak di pilar samping pada bagian depan bus. Letak tegangan ini dapat menjadi pertimbangan untuk tahap pengembangan struktur selanjutnya. Dari hasil analisis dapat divisualisasikan dengan perbedaan warna pada rangka bus. Berikut merupakan hasil tegangan von Mises pada struktur desain akhir.



Gambar 13. Deformasi Struktur Bus Desain Akhir

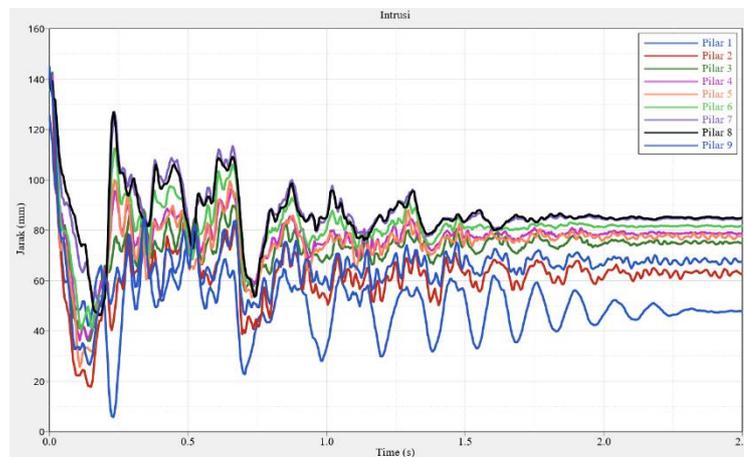
Gambar 14. Tegangan Von Mises pada Desain Akhir Bus

Berdasarkan grafik keseimbangan energi, energi kinetik menurun secara kontinu dari 0 s sampai ke 0.7 s. Rangka samping bawah mulai menabrak tanah pada 0.2 s. Akibat massa yang sangat besar, energi kinetik sedikit naik dari 0.2 s sampai 0.23 s. energi kinetik kembali menurun setelah 0.23 s sampai 0.8 s sampai akhirnya habis. Bus mulai bergeser (*sliding*) ke arah *horizontal*. Seiring dengan turunnya energi kinetik, terjadi kenaikan dengan waktu yang sama pada energi internal. Hal ini mengindikasikan terjadinya penyerapan energi kinetik oleh struktur bus menjadi energi internal. Terlihat pada gambar bahwa energi internal tidak melebihi dari total energi sehingga dapat disimpulkan bahwa struktur menyerap beban impact secara keseluruhan. Besarnya internal energi yang diserap oleh struktur adalah 97.825 kJ dan total energi yang 97.819 kJ.



Gambar 15. Keseimbangan Energi pada Desain Akhir Bus

Berdasarkan dari hasil simulasi pada desain bus yang sudah diperkuat, ke sembilan pilar tidak ada yang menembus batas *residual space*. Jarak terdekat pilar dengan *residual space* adalah Pilar ke-9 yaitu 10 mm dan kedua pilar ke-2 sebesar 20 mm. Hasil desain akhir ini memiliki perubahan struktur yang signifikan dibandingkan desain awal. Deformasi terkuat terjadi pada Pilar ke-9 pada waktu ke 0.25 s. Hal ini karena terjadi karena bus mulai mengalami tumbukan dengan lantai. Jarak pilar mengalami kenaikan dan penurunan terhadap *residual space* dikarenakan terjadi pantulan dan sliding sesaat setelah terjadi tumbukan dengan lantai sampai akhirnya stabil. Dapat disimpulkan bahwa desain struktur bus yang sudah dimodifikasi ini lolos pengujian rollover berdasarkan standar UN ECE R66.



Gambar 16. Jarak Intrusi Desain Akhir Bus

Setelah dilakukan simulasi *rollover* dan perbaikan struktur dari bus didapatkan hasil analisis simulasi. Modifikasi yang sudah dilakukan adalah pengoptimalan jenis material yang digunakan, perubahan ketebalan komponen, penambahan struktur penguat dan juga pengurangan komponen pada bagian yang tidak kritis. Berikut ini adalah tabel perbandingan desain awal sebelum terjadi penguatan struktur dengan desain akhir yang sudah diperkuat strukturnya.

Tabel 6. Perbandingan Desain Awal dan Akhir

No	Parameter	Desain Awal	Desain Akhir
1.	Berat Total	7.439 kg	7.368 kg
2.	Intrusi	210 mm	Tidak ada
3.	Von Mises Maksimum	1.050 kJ	1.048 kJ
4.	Center of Gravity	1.608 mm	1.609 mm
5.	Status Keamanan	Tidak lolos	Lolos

Berdasarkan simulasi *rollover* pada desain yang sudah dilakukan modifikasi dapat disimpulkan bahwa desain ini lolos pengujian berdasarkan standar UN ECE R66.

Validasi proses dapat dilakukan dengan validasi secara numerik, yaitu dengan cara mengecek output simulasi seperti laporan *error* saat *running*, *time step*, tingkat *error* pada energi dan massa. Mengecek *Engine output file: runname_001.out*

merupakan salah satu cara validasi numerik pada file *output* simulasi. Setelah *software* RADIOSS memproses simulasi tanpa ada eror maka *software* akan melakukan komputasi dari model yang sudah diinput.

CYCLE	TIME	TIME-STEP	ELEMENT	ERROR	I-ENERGY	K-ENERGY T	K-ENERGY R	EXT-WORK	MAS_ERR
0	0.000	0.1900E-05	1213212	0.0X	0.4624E-04	0.9739E+08	0.2081E+06	0.000	0.1854E-01
ANIMATION FILE: 31 T2_SAB01 WRITTEN									
100	0.1900E-03	0.1900E-05	753011	0.0X	0.2254E+06	0.9701E+08	0.4506E+06	0.5048E+05	0.1927E-01
200	0.3800E-03	0.1900E-05	755161	0.0X	0.3624E+06	0.9697E+08	0.4196E+06	0.1198E+06	0.1944E-01
300	0.5700E-03	0.1900E-05	79036	0.0X	0.4534E+06	0.9686E+08	0.4920E+06	0.1786E+06	0.1954E-01
400	0.7600E-03	0.1900E-05	85556	0.1X	0.4901E+06	0.9687E+08	0.5377E+06	0.2381E+06	0.1972E-01
500	0.9500E-03	0.1900E-05	85358	0.1X	0.5075E+06	0.9696E+08	0.5229E+06	0.2976E+06	0.1998E-01
600	0.1140E-02	0.1900E-05	101548	0.1X	0.5275E+06	0.9697E+08	0.5819E+06	0.5574E+06	0.2089E-01
700	0.1330E-02	0.1900E-05	538196	0.2X	0.1264E+07	0.9601E+08	0.5738E+06	0.5884E+05	0.2035E-01
800	0.1520E-02	0.1900E-05	111895	0.2X	0.2542E+07	0.9476E+08	0.5235E+06	0.1229E+05	0.2057E-01
900	0.1710E-02	0.1900E-05	101873	0.2X	0.3756E+07	0.9365E+08	0.4474E+06	0.2824E+05	0.2067E-01
1000	0.1900E-02	0.1900E-05	101122	0.2X	0.4916E+07	0.9254E+08	0.4118E+06	0.4573E+05	0.2072E-01
1100	0.2090E-02	0.1900E-05	105822	0.2X	0.5868E+07	0.9164E+08	0.3696E+06	0.5743E+05	0.2075E-01
1200	0.2280E-02	0.1900E-05	97132	0.2X	0.6634E+07	0.9088E+08	0.3294E+06	0.3755E+05	0.2078E-01
1300	0.2470E-02	0.1900E-05	85997	0.2X	0.7293E+07	0.9017E+08	0.3192E+06	-3768.	0.2081E-01
1400	0.2660E-02	0.1900E-05	83914	0.2X	0.7940E+07	0.8951E+08	0.3042E+06	-0.1665E+05	0.2083E-01
1500	0.2850E-02	0.1900E-05	84770	0.2X	0.8481E+07	0.8895E+08	0.3107E+06	-0.1350E+05	0.2084E-01
1600	0.3040E-02	0.1900E-05	8015	0.1X	0.8950E+07	0.8847E+08	0.3167E+06	2197.	0.2086E-01
1700	0.3230E-02	0.1900E-05	752892	0.1X	0.9368E+07	0.8806E+08	0.3183E+06	0.2581E+05	0.2088E-01
1800	0.3420E-02	0.1900E-05	103468	0.1X	0.9798E+07	0.8768E+08	0.2614E+06	0.4104E+05	0.2089E-01
1900	0.3610E-02	0.1900E-05	772483	0.1X	0.1026E+08	0.8721E+08	0.2649E+06	0.5922E+05	0.2090E-01
2000	0.3800E-02	0.1900E-05	533030	0.1X	0.1070E+08	0.8685E+08	0.1953E+06	0.8188E+05	0.2092E-01
2100	0.3990E-02	0.1900E-05	112959	0.1X	0.1112E+08	0.8645E+08	0.1780E+06	0.1812E+06	0.2093E-01
2200	0.4180E-02	0.1900E-05	85383	0.0X	0.1145E+08	0.8618E+08	0.1821E+06	0.1332E+06	0.2094E-01
2300	0.4370E-02	0.1900E-05	84888	0.0X	0.1187E+08	0.8578E+08	0.1502E+06	0.1684E+06	0.2094E-01
2400	0.4560E-02	0.1900E-05	102685	0.0X	0.1226E+08	0.8539E+08	0.1881E+06	0.2066E+06	0.2095E-01
2500	0.4750E-02	0.1900E-05	113110	0.0X	0.1272E+08	0.8496E+08	0.1866E+06	0.4554E+06	0.2095E-01
2600	0.4940E-02	0.1900E-05	10823	0.0X	0.1317E+08	0.8449E+08	0.2288E+06	0.2840E+06	0.2096E-01
ANIMATION FILE: 31 T2_SAB02 WRITTEN									
2700	0.5130E-02	0.1900E-05	85169	-0.0X	0.1361E+08	0.8402E+08	0.2909E+06	0.3198E+06	0.2097E-01
2800	0.5320E-02	0.1900E-05	449497	-0.0X	0.1404E+08	0.8356E+08	0.3412E+06	0.3561E+06	0.2097E-01
2900	0.5510E-02	0.1900E-05	101363	-0.0X	0.1445E+08	0.8316E+08	0.3693E+06	0.3922E+06	0.2098E-01
3000	0.5700E-02	0.1900E-05	74501	-0.0X	0.1487E+08	0.8273E+08	0.4030E+06	0.4301E+06	0.2098E-01
3100	0.5890E-02	0.1900E-05	363763	-0.0X	0.1527E+08	0.8236E+08	0.4813E+06	0.4659E+06	0.2099E-01
3200	0.6080E-02	0.1900E-05	87594	-0.0X	0.1573E+08	0.8193E+08	0.4805E+06	0.4957E+06	0.2099E-01
3300	0.6270E-02	0.1900E-05	102777	-0.0X	0.1634E+08	0.8137E+08	0.3741E+06	0.5221E+06	0.2100E-01
3400	0.6460E-02	0.1900E-05	537723	-0.0X	0.1701E+08	0.8077E+08	0.3236E+06	0.5454E+06	0.2100E-01
3500	0.6650E-02	0.1900E-05	102733	-0.0X	0.1768E+08	0.8014E+08	0.3050E+06	0.5645E+06	0.2101E-01

Gambar 17. Engine Output File (Time Step, Energy Error, dan Mass Error)

Berdasarkan gambar diatas, ada tiga poin utama dalam menentukan apakah hasil simulasi tersebut valid atau tidak. Pertama adalah *time step* (warna biru), kedua ada *energy error* (warna merah), dan ketiga adalah *mass error* (warna hijau). *Time step* dapat divalidasi dengan cara mengecek apakah nilainya turun secara drastis atau tidak. Jika *time step* turun secara drastis, maka dapat menimbulkan eror dan perlu dicek ukuran, bentuk, serta material yang digunakan pada elemen. *Energy error* memiliki kasus yang berbeda untuk setiap model. Jika energi negatif, berarti beberapa dari energi telah hilang (seperti *impact* dan gesekan). Jika energi eror positif, berarti terdapat energi yang terbentuk. Pada kasus tumbukan *hourglass energy* dapat menyebabkan energi eror karena tidak dihitung di dalam keseimbangan energi. Pada kasus ini, *hourglass energy* yang dapat diterima adalah 10%-15%. *Mass error* harus kurang dari 0.05 (5%), jika lebih dari itu maka perlu dicek ulang pada node dimana massa tersebut ditambahkan [9].

Jika proses simulasi berjalan tanpa ada eror maka kondisi diatas akan dipertahankan sampai akhir simulasi selesai. Selain itu, akan muncul pesan "NORMAL TERMINATION" pada akhir laporan file output dari simulasi. Selain pesan tersebut, terdapat laporan total waktu simulasi dan jumlah siklus. Berikut adalah gambar pesan yang dikeluarkan di akhir laporan file output.

ELAPSED TIME	=	17260.34 s
		4:47:40
NORMAL TERMINATION		
USER BREAK		
TOTAL NUMBER OF CYCLES	:	246421

Gambar 18. Engine output file ("NORMAL TERMINATION")

Selain kedua hal yang sudah dijelaskan, parameter lain yang menentukan hasil simulasi dapat diterima adalah ringkasan dari tingkat error dan peringatan pada output file. Pada simulasi yang sudah dilakukan pada desain akhir bus tidak ditemukan eror, hanya ada beberapa peringatan (*warning*). Jika terdapat *warning*, maka simulasi dapat diterima. Tetapi jika ditemukan adanya laporan eror maka perlu dilakukan pengecekan kembali terhadap elemen, kondisi batas, dan sebagainya sesuai dengan laporan yang ditampilkan, kemudian dilakukan perbaikan dan running simulasi ulang. Berikut ini contoh ringkasan yang dihasilkan dari file output simulasi, dapat dilihat pada Gambar 19.

TERMINATION WITH WARNING	
ERROR(S) SUMMARY	WARNING(S) SUMMARY
	--- ELEM/PROP/MAT COMPATIBILITY 2 WARNING(S) --- 2 WARNING ID : 1084 ** WARNING IN MATERIAL LAW1 --- INTERFACES 2 WARNING(S) --- 1 WARNING ID : 343 ** WARNING : INITIAL PENETRATIONS IN INTERFACE --- 1 WARNING ID : 477 ** WARNING IN INTERFACE GAP --- ELEMENT INITIALIZATION 1 WARNING(S) --- 1 WARNING ID : 432 ** WARNING IN SPRING ELEMENT --- KINEMATIC CONDITIONS 2 WARNING(S) --- 1 WARNING ID : 312 ** INCOMPATIBLE KINEMATIC CONDITIONS IN MODEL --- 1 WARNING ID : 446 ** WARNING IN RIGID WALL
0 ERROR(S)	
7 WARNING(S)	

Gambar 19. Laporan Error dan Peringatan pada Output File

Berdasarkan grafik keseimbangan energi diketahui nilai-nilai dari *internal energy*, *kinetic energy*, *contact energy*, *hourglass energy*, dan *total energy* dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 7. Perbandingan Nilai Awal dan Akhir

No	Parameter	Nilai Awal (J)	Nilai Akhir (J)
1.	<i>Internal energy</i>	417.972	97.825.936
2.	<i>Kinetic energy</i>	97.394.656	198.006
3.	<i>Hourglass energy</i>	0	285.517
4.	<i>Contact energy</i>	0	2.324.000
5.	<i>Total energy</i>	97.602.800	97.504.304

Berdasarkan tabel nilai *internal energy*, *kinetic energy*, *contact energy*, *hourglass energy*, dan *total energy* pada tabel di atas, didapatkan kesimpulan sebagai berikut ini:

1. *Total energy* awal dan akhir bernilai sama yaitu sekitar 97×10^6 J. Menurut validasi secara numerik hasil ini dapat diterima.
2. *Hourglass energy* bernilai positif yaitu sebesar 285.517 J dan memiliki nilai 0,29% dari *total energy*. Menurut validasi secara numerik hasil ini dapat diterima karena *hourglass energy* tidak melebihi 10% dari *total energy*.
3. *Contact energy* bernilai positif yaitu sebesar 2.324.000 J dan memiliki nilai 2,3% dari *total energy*. Menurut validasi secara numerik hasil ini dapat diterima karena *contact energy* tidak melebihi 5% dari *total energy*.
4. Perubahan energi dari *kinetic energy* ke *internal energy* sama yaitu sekitar 97×10^6 J sehingga penyerapan energi yang dilakukan oleh struktur bus sudah maksimal.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan tentang perancangan Simulasi Uji Guling *Medium Electric Bus* Berdasarkan Standar Un Ece R66 Menggunakan Metode Elemen Hingga adalah sebagai berikut:

1. Penelitian *rollover* (uji guling) bus berdasarkan standar UN ECE R66 dengan metode elemen hingga telah berhasil dilaksanakan. Penelitian dilakukan dengan cara membandingkan desain struktur bus awal dengan desain struktur bus akhir yang sudah dimodifikasi (diperkuat strukturnya).
2. Desain struktur bus awal memiliki berat total 7.439 kg dapat menyerap energi impact sebesar 103.472 kJ dan memiliki nilai intrusi paling tinggi yaitu sebesar 210 mm. Sedangkan untuk desain struktur bus yang sudah dilakukan modifikasi penguatan struktur memiliki berat total 7.368 kg (turun 0,95% dari berat awal) dapat menyerap energi impact sebesar 97.825 kJ dan tidak ada intrusi yang menembus residual space.
3. Desain bus yang sudah dilakukan modifikasi (penguatan struktur) telah memenuhi standar UN ECE R66 atau lulus pengujian *rollover*, serta memenuhi regulasi untuk peraturan Pemerintah (PP) No. 55 tahun 2012 Pasal 5 [10] dimana untuk kendaraan bus tipe medium memiliki berat maksimal 8.000 kg.

5. REFERENSI

- [1] Badan Pusat Statistik, 2018. Online. Available: <https://www.bps.go.id/linkTableDinamis/view/id/1133>.
- [2] Badan Pusat Statistik. in Statistik Transportasi Darat 2016. Jakarta. 2018. p. 33.
- [3] Gillespie, T.D. 1994: Fundamentals of Vehicle Dynamics, Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc.
- [4] United Nations Economic Commission for Europe. Feb. 22 2006. Regulation 66, Addendum 65, Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure.
- [5] Bojanowski, C. 2009, Verification, validation and optimization of finite element model of bus structure for rollover test, Florida State University. 2016.
- [6] Gepner, B. 2014. Rollover Procedures for Crashworthiness Assessment of Paratransit Bus Structures. Electronic Theses, Treatises and Dissertations. Florida State University Libraries
- [7] Belsare, V. 2012. Rollover Analysis of Passenger Bus as per AIS-031. International Journal of Engineering Research and Development Volume 4, Issue 5. University of Pune.
- [8] Karoseri Laksana. 2019.
- [9] Manual book Altair Radioss. 2018. Altair University
- [10] PP No. 55 Tahun 2012. 2012. Tentang Kendaraan. Jakarta. Indonesia. Presiden Republik Indonesia.