



UNIVERSITAS NASIONAL

**KOMPUTASI *ROLLOVER TEST* PADA UNIT BUS MEDIUM
UNTUK KAWASAN PERUMAHAN DAN KOTA**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana strata satu

Oleh

Sylvia Carina Nugroho
197005426017

Fakultas Teknik dan Sains
Program Studi Teknik Fisika
JAKARTA
FEBRUARI 2020



UNIVERSITAS NASIONAL

**KOMPUTASI *ROLLOVER TEST* PADA UNIT BUS MEDIUM
UNTUK KAWASAN PERUMAHAN DAN KOTA
SKRIPSI**

Sylvia Carina Nugroho
197005426017

Fakultas Teknik dan Sains
Program Studi Teknik Fisika
JAKARTA
FEBRUARI 2020

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar

Nama: Sylvia Carina Nugroho
NPM: 197005426017



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Saya sivitas akademik Universitas Nasional, saya bertanda tangan di bawah ini:

Nama: Sylvia Carina Nugroho

NPM: 197005426017

Program Studi: Teknik Fisika

Fakultas: Fakultas Teknik dan Sains

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Nasional Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Komputasi Rollover Test pada Unit Medium Bus untuk Perumahan dan Kota

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Nasional berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data, merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya

Dibuat: Jakarta

Pada Tanggal 24 Februari 2020

Yang Menyatakan

Sylvia Carina Nugroho

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Sylvia Carina Nugroho
NPM : 197005426017
Program Studi : Teknik Fisika
Judul Skripsi : Komputasi Rollover Test pada Unit Medium Bus untuk Kawasan Perumahan dan Kota

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian dari persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar sarjana pada program studi Teknik Fisika Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Nasional

Dewan Penguji

Dosen Pembimbing I: Ir Ajat Sudrajat, M.T (.....)

Dosen Pembimbing I: Erna Kusumawati S.Pd.Si., M.Sc (.....)

Dosen Penguji I: Dr.V. Vekky R Repi, ST., MT (.....)

Dosen Penguji II: Dr. Arief Sudarmadji, MT (.....)

Dosen Penguji III: Ir. Raymond Amir, MS, Aero (.....)

Mengesahkan

Ketua Program Studi Teknik Fisika



(Kiki Rezki Lestari, ST., M. Sc)

NIDN:0323039102

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : Februari 2020

ABSTRACT

Name: Sylvia Carina Nugroho
Study Program: Physics Engineering
Title: Rollover Test Computation on Medium Bus Unit for Housing and Cities

Bus rollover crash is the accident that caused many fatalities. This accident caused by the strength of superstructure when it's rolled. This research done by using UNECE R66 regulation for determine the strength of the superstructure when the bus rolled and to identify the location of maximum stress and deformation of bus body frame. Rollover test computation using computer has been done. Computation obtained by two methods, static test, which is used for validating the accuracy of the model and dynamic tests. Static Test Results found that the location of the maximum stress and deformation found on the roof and cantrail. The result is 34692,4 Pa and 268,428 mm. The convergence test results show that the bus model has converged with an error value below 5 percent and the dynamic results show that the bus model has a very small deformation of 164.456mm and the maximum stress is 235,500 MPa, also the bus frame does pass through the residual space according to UNECE R 66 regulation is 150mm.

Keyword: Computation, Rollover Test, UN-ECE R66



ABSTRAK

Nama: Sylvia Carina Nugroho
Program Studi: Teknik Fisika
Judul: Komputasi Rollover Test pada Unit Medium Bus untuk Perumahan dan Kota

Kecelakaan bus terguling merupakan kecelakaan yang paling memakan banyak korban. Kecelakaan ini dipengaruhi oleh faktor kekuatan struktur bus. Pada penelitian ini dilakukan uji guling berdasarkan regulasi UNECE R66 untuk mengetahui kekuatan struktur bus ketika terguling dan mengidentifikasi letak tegangan dan deformasi maksimum rangka bus. komputasi uji guling dilakukan dengan menggunakan komputer. Komputasi dijalankan dengan dua metode yaitu statik yang digunakan untuk memvalidasi keakuratan model dan dinamik. Hasil uji statik ditemukan bahwa lokasi tegangan dan deformasi yang besar terdapat di bagian atap dan *cantrail* sebesar 3469,24 Pa mm dan 268,428. Hasil uji konvergensi menunjukkan bahwa model bus sudah konvergen dengan nilai error di bawah 5 persen dan hasil dinamik menunjukkan bahwa model bus mengalami deformasi sebesar 164.456mm, tegangan maksimum sebesar 235,500 MPa dan rangka bus melewati ruang residual dimana ruang residual yang diperbolehkan menurut regulasi UNECE R66 adalah 150mm

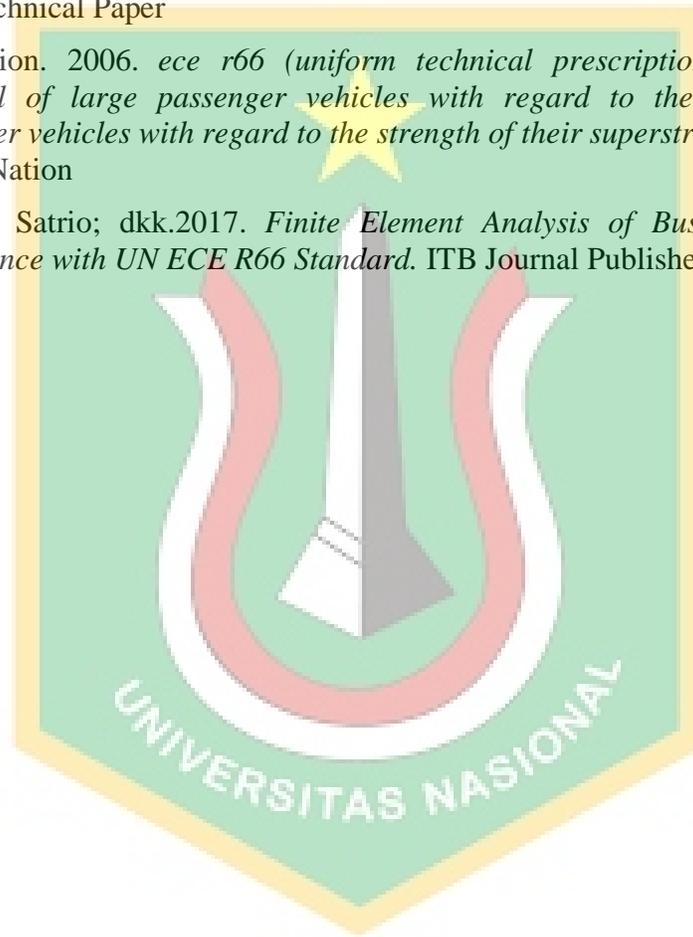
Kata kunci: Komputasi, UN-ECE R66, Uji Guling



REFERENSI

- A, H Ishkandar., Li, Q M. 2013. *Ageing Effect on Crashworthiness of Bus Rollover*. 9th European LS-DYNA Conference 2013
- Alexandru, Dan; Iozsa, Mihail Daniel; Fratila, Gheorgie. 2014. *Experimental Test and Computer Simulation Research on Rollover Impact of a Bus Structure*. Journal of Advances in Automatic Control
- Castejon, L., Miravete, A., Cuartero, J. 2006. *Composite bus rollover simulation and testing*. International Journal of Heavy Vehicle.
- Chu, Hsing-Chung. 2013. *Assessing Factor Causing Severe Injuries in Crashes of High Deck Buses in Long Distance Freeway*. Accident Analysis. Elsevier
- Deshmuk, Pankaj S. 2006. *Rollover and Roof Crush Analysis of Low Floor Mass Transit Bus*. Wichita State University. Wichita
- Fukumachi, Kazuhiro; dkk. 2000. *Study of Crash Worthiness of Super High-Decker Large-sized Bus by CAE Approach*. SAE Publication
- Gepner, B., dkk. 2014. *effectiveness of ece r66 and fmvss 220 standards in rollover crashworthiness assessment of paratransit buses*. International Journal of Automotive Technology
- Gursel, K.T. & Gursesli, S. 2009. *Analysis of the Superstructure of a Designed Bus in Accordance with Regulations ECE R 66*. Journal of Science
- Haryanti, Rosiana. 2018. *Melihat Catatan Mudik dari Tahun ke Tahun*. Diperoleh 27 Oktober 2018 dari <https://nasional.kompas.com/read/2018/06/06/16324121/melihat-catatan-mudik-dari-tahun-ke-tahun?page=all>
- Hibbeler, R.C. 2015. *Mechanics of Material Tenth Edition*. Pearson
- Kumar, D Senthil. 2012. *Rollover Analysis of Bus Body Structure as Per AIS 031/ECE R66*. HTC 2012
- Komite Nasional Keselamatan Transportasi. 2016. *Data kecelakaan LLAJ Tahun 2010-2016*. Jakarta: Sub Komite Investigasi kecelakaan LLAJ
- Logan, D. 2011. *A First Course in the Finite Element Method*. University of Wisconsin Ceneage Learning
- Nurhadi, Indra., dkk. 2011. *computer modeling of energy absorbing capability of bus superstructure for rollover safety*. Journal of KONES Powertrain and Transport
- Patil, Ajinkya., Pawar, S.R. 2016. *Rollover Analysis of Sleeper Coach Bus by Virtual Simulation in LS-DYNA*. International Journal of Science, engineering, and Technology Research

- Phadarthe, V.D., Hujare, P.P. 2017. *Performance Improvement of Bus Structure for Rollover Analysis Using FEA and Validation of Roll Bar*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering
- R, M Rizka Faizal. 2014. *Simulasi Uji Guling Bus Karoseri Indonesia Berdasarkan Standar UNECE R66 dengan Metode Elemen Hingga*. Tugas Akhir. Institut Teknologi Bandung
- Sidhu, M S. 2012. *Rollover bus*. Hyperworks Technology Conference. India
- T Sheekar, Vigness, dkk.2014. *Bus Body Modularity-Design and Manufacturing*. SAE Technical Paper
- United Nation. 2006. *ece r66 (uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure) revision 1,* United Nation
- Wicaksono, Satrio; dkk.2017. *Finite Element Analysis of Bus Rollover Test in Accordance with UN ECE R66 Standard*. ITB Journal Publisher



BAB I

LATAR BELAKANG

1.1 Latar Belakang

Bus merupakan salah satu transportasi favorit yang digunakan oleh sebagian besar masyarakat Indonesia untuk bepergian. Namun akhir-akhir ini masyarakat pengguna bus jumlahnya cenderung menurun, sebagai perbandingan pada arus mudik tahun 2018 jumlah penumpang pengguna bus sebesar 4,22 juta orang atau menurun sebanyak 0,49 persen dibandingkan tahun 2017 sebanyak 4.24 juta. Menurut Kemenhub, jumlah pengguna bus masih akan mengalami penurunan setiap tahunnya. Salah satu faktor penyebab menurunnya jumlah pengguna bus tersebut adalah faktor keselamatan yang menurut kemenhub masih sangat rendah (Haryanti,2018).

Kecelakaan bus yang sering terjadi di Indonesia, banyak menimbulkan kerugian baik moril maupun material, bahkan menimbulkan korban jiwa. Berikut rangkuman data kecelakaan bus tahun 2015-2019 berdasarkan data Polda Metro Jaya dan KNKT (Tabel 1.1).

Tabel 1.1 Data Kecelakaan Bus yang Terjadi di Indonesia Selama 2015-2019 (sumber: KNKT dan Polda Metro Jaya)

Tahun	Tabrakan (Kejadian)	Meninggal	Luka- luka	Terguling (Kejadian)	Meninggal	Luka- luka
2015	11	17	31	6	33	107
2016	20	32	161	26	33	216
2017	14	14	12	18	23	123
2018	31	25	17	24	64	53
2019	36	8	13	23 (hingga Juni 2019)	20	59

Catatan: Pihak kepolisian hanya memberikan data tentang berapa korban luka ringan, luka berat, meninggal, dan kerugian material. Data yang didapatkan diatas seolah-olah tidak sebanding dengan banyaknya berita kecelakaan lalu lintas, karena

pihak kepolisian hanya mencatat jumlah kecelakaan, sedangkan identifikasi jenis kecelakaan dilakukan oleh KNKT. Pihak kepolisian baru melaporkan suatu kecelakaan kepada KNKT jika kecelakaan tersebut mengakibatkan banyak korban, kecelakaan beruntun, atau kasusnya viral.

*Tabrakan yang tertera pada tabel di atas adalah tabrak depan, samping kanan dan kiri, dan tabrak belakang.

Dari data tersebut ternyata jumlah tabrakan (bagian depan dan belakang) lebih banyak dibandingkan insiden bus terguling, namun jumlah korban jiwanya lebih banyak pada bus terguling dibandingkan pada kasus tabrakan, oleh karena itu, terguling merupakan kecelakaan yang fatal. Gambar 1.1 merupakan contoh kondisi ketika bus dalam keadaan terguling, dapat dilihat bahwa rangka bus terdeformasi berat.

Faktor yang mempengaruhi kurangnya keselamatan bus adalah faktor pengemudi. Faktor lain yang berpengaruh terhadap banyaknya korban kecelakaan bus adalah faktor kekuatan struktur rangka bus tersebut. Struktur rangka bus merupakan faktor penting yang harus diperhatikan sebagai syarat mutlak pembuatan bus. Struktur rangka bus disebut superstruktur. Superstruktur meliputi komponen atap, rangka samping kanan dan kiri, serta lantai yang lazim disebut komponen *load bearing*. Komponen-komponen tersebut merupakan bagian terpenting *bodywork* terutama dalam penyerapan energi dan mempertahankan *residual space* ketika terguling.

Dalam mendesain bus, desain bus harus mengikuti regulasi yang berlaku baik standar Nasional (yang merujuk pada PP 55 Tahun 2012) atau standar International yang merujuk pada *European Safety Commission*. Struktur rangka bus ada yang terbuat dari bahan baja yang digalvanis, namun ada juga yang terbuat dari aluminium alloy. Penelitian tentang rangka bus telah dilakukan oleh pihak manufaktur *Ashok Leyland* cabang India dengan memodularisasi struktur bus dengan cara membagi pipa rangka berukuran 60x40x2 mm menjadi dua bagian yaitu kiri dan kanan serta

mengurangi ketebalannya menjadi 1,6mm. Hasil penelitian tersebut ternyata pipa rangka tidak perlu dibagi menjadi dua pipa karena ketika dilakukan uji guling, hasilnya pipa tersebut mengalami kerusakan yang cukup serius (T Shekar,2014). Sedangkan untuk mengetahui seberapa besar kekuatan struktur rangka bus, dilakukan suatu uji yang disebut uji guling.

Uji guling yang dilakukan telah diatur dalam *European safety commission* yang disebut dengan UN-ECE. R66. Penelitian tentang uji guling sudah banyak dilakukan. Di Indonesia pun sudah ada pabrikan karoseri yang telah melakukan uji guling ini. Meskipun demikian, Indonesia belum mempunyai regulasi yang mengatur tentang kekuatan struktur bus. Regulasi kekuatan struktur bus yang tertera pada PP No 55 Tahun 2012 hanya menyatakan bahwa struktur rangka bus harus kuat menahan segala beban. Hal tersebut masih bersifat relatif karena masing-masing pabrikan memiliki standard kekuatan struktur yang berbeda, karena belum adanya acuan baku yang menetapkan kekuatan struktur bus. Uji guling dapat dilakukan dengan dua cara yaitu secara eksperimental dan menggunakan *software*. *Software* yang digunakan ada banyak macam salah satunya adalah *Altair Hyperworks*. Secara eksperimental, Uji guling dilakukan dengan cara menggulingkan bus dari ketinggian 800 mm dengan kemiringan yang dihitung berdasarkan yang tertera di regulasi. Di dalam bus, diberi suatu tanda imajiner yang disebut *residual space*, yang berfungsi untuk mengetahui seberapa besar kemungkinan penumpang, pengemudi, dan awak bus selamat ketika bus mengalami *rollover*. *Rollover* adalah kejadian di mana kendaraan berguling ketika berbelok sehingga menyebabkan rangka kendaraan khususnya bagian samping dan atap menabrak tanah setelah bus digulingkan, rangka bus akan mengalami deformasi, jika deformasi rangka bus mengenai tanda imajiner (*residual space*), maka dapat dikatakan bus tersebut tidak aman.

Penelitian uji guling yang paling terkenal dilakukan oleh K Turgut Gursel dan Serap Gursesli (Gursel,2009). Gursel meneliti tentang seberapa kuat struktur rangka *monocoque* ketika bus mengalami *rollover*. Hasilnya menyatakan bahwa desain rangka bus *monocoque* yang dimodelkan oleh Gursel adalah aman. Hal ini

ditunjukkan oleh jarak ruang residual dengan rangka yang terdeformasi sangat jauh. Selain itu, Gursel mengatakan bahwa parameter penting dalam mendesain bus adalah karakteristik kendaraan khususnya penempatan titik berat, *displacement* pada main *bearer*, dan besarnya energi yang diserap oleh cincin pada superstruktur bus.

Meskipun komputasi uji guling bus telah dilakukan di seluruh negara, namun peneliti ingin meneliti apakah bus medium yang digunakan untuk kawasan perumahan dan perkotaan yang dimodelkan dengan beberapa penyederhanaan, sudah memenuhi regulasi atau belum. Peneliti akan mengkomputasikan uji guling struktur rangka bus ketika terjadi *rollover* mengingat bus tipe medium sering digunakan di kawasan perumahan dan perkotaan. Komputasi ini akan menggunakan *software* Altair *Hypermesh* untuk memodelkan uji guling dengan metode elemen hingga. *Output* penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai evaluasi dalam merancang struktur rangka bus medium yang lebih aman.



Gambar 1.1 Bus yang terguling (sumber: tribunnews.com)

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan permasalahan pada penelitian ini adalah melakukan komputasi uji guling pada unit bus medium yang

dimodelkan peneliti yang diharapkan dapat meningkatkan keamanan dari struktur rangka bus.

1.3. Tujuan

1. Menganalisa integritas struktur rangka bus ketika bus mengalami *rollover*.
2. Menganalisa lokasi dimana deformasi dan tegangan terbesar yang dialami oleh struktur rangka bus ketika mengalami *rollover*.

1.4 Batasan Masalah

Dengan keterbatasan biaya, waktu, dan kualitas, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah

1. Komputasi ini hanya dilakukan dengan menggunakan *software* saja. Tidak dilakukan secara eksperimental
2. Gambar 3D bus medium dibuat dan diukur sendiri oleh peneliti karena minimnya data pendukung seperti spesifikasi material. Hal ini berkaitan dengan kerahasiaan perusahaan pihak karoseri tersebut.
3. Untuk mempercepat simulasi, maka struktur rangka kursi tidak akan dimodelkan sebagai gantinya berat kursi dan penumpang hanya dihitung sebagai beban saja.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Bagi perusahaan karoseri di Indonesia, dapat dijadikan acuan dalam merancang bus medium perkotaan yang aman bagi karoseri di Indonesia
2. Dapat digunakan sebagai referensi untuk peneliti yang sedang mengerjakan proyek atau tugas yang sama.
3. Meningkatkan kesadaran akan pentingnya uji guling ketika mendesain bus.

1.6 Sistematika Penelitian

Sistematika penelitian yang akan digunakan pada penelitian ini adalah:

BAB I- Latar Belakang

Berisi latar belakang penelitian, rumusan permasalahan, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penelitian.

BAB II- Dasar Teori

Berisi tentang penjelasan mengenai bus, tegangan (*stress*), *displacement*, dan mengenai uji guling UN-ECE R66.

BAB III- Metodologi Penelitian

Berisi tentang metode pengumpulan data, dimensi bus, gambar CAD bus, kriteria meshing, penetapan *constrain* dan beban, serta data material yang digunakan.

BAB IV- Hasil dan Pembahasan

Berisi tentang hasil uji statik dan dinamik.

BAB V- Kesimpulan dan Saran

Berisi kesimpulan hasil uji guling serta saran untuk pihak-pihak terkait.



BAB II

DASAR TEORI

2.1 Kebaharuan Penelitian (*State of the art*)

Uji Guling untuk bus pertama kali dilakukan di Swedia pada tahun 1984. Uji guling ini dilakukan dengan metode eksperimental dengan cara menggulingkan bus dari ketinggian 1000 mm dan 1750 mm dan memberikan hasil bahwa semakin tinggi posisi bus jatuh maka deformasinya akan semakin tinggi. Pada tahun 1985, standar UN-ECE R66 menetapkan menentukan ketinggian ditch (ketinggian meja guling) adalah 800mm. Hal tersebut didapatkan pemerintah Inggris dan Hungaria melakukan uji guling pada ketinggian 500mm-800mm. Ternyata pada ketinggian 800 mm memiliki penyerapan energi yang ideal yaitu 75 persen. (M. Rizka Faizal,2014)

Penelitian dengan menggunakan *software* computer sudah banyak dilakukan oleh para peneliti. Sebut saja pada tahun 2002, Pankaj S. Deshmukh meneliti tentang rollover pada bus besar berlantai rendah yang berjudul "*Rollover and Roof Crush Analysis of Low Floor Mass Transit Bus*". Pada penelitian tersebut, Pankaj menggunakan *software hypermesh* untuk melakukan meshing, lalu untuk menjalankan komputasinya menggunakan ADAMS dan LS Dyna. Pada penelitian ini, penumpang digunakan sebagai beban. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin banyak penumpang, maka deformasi pada superstruktur bus akan meningkat. Pankaj juga meneliti tentang pergerakan tubuh manusia serta kemungkinan cedera akibat pergerakan tersebut ketika bus mengalami *rollover*. Hasilnya membuktikan bahwa leher dan bagian kepala mengalami cedera yang paling serius ketika *rollover* (Deshmukh, 2002).

Pada tahun 2006, Luis Castejon meneliti tentang seberapa kuat bus berbahan komposit ketika mengalami *rollover*. Material komposit yang digunakan adalah *glass*, serat karbon, dan resin *polyester*. Simulasi dijalankan dengan dua metode yaitu menggunakan komputer dan eksperimental. Untuk eksperimental, percobaan

menggunakan *strain gauge* yang dipasang pada 14 titik yaitu pada bagian lantai bus sebanyak 13 titik dan pada 1 titik bagian rangka jendela. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa bus tersebut telah lulus regulasi UN-ECE R66. Hasil validasi perbandingan menunjukkan bahwa hasil komputasi dengan menggunakan komputer dengan metode eksperimental menunjukkan hasil yang sama pada nilai *stress* dan *strainnya* (Castejon,2006).

Pada Tahun 2009, Gursel juga meneliti tentang *rollover* bus dengan menggunakan rangka *monocoque*. *Monocoque* adalah suatu rangka bus yang chassis dan bodinya menjadi satu. Gursel menggunakan *software* ANSYS untuk mengetahui seberapa besar energi yang diserap oleh superstruktur bus dan juga deformasinya. Hasil penelitian Gursel menyatakan energi total yang diserap oleh superstruktur bus milik Gursel sebesar 48.653 kJ dan pada nilai ini masih terbilang aman karena tidak menyentuh ataupun melewati *residual space*. Dari penelitian ini, Gursel menyimpulkan 3 kriteria agar desain kendaraan yang dibuat dapat memenuhi kriteria aman yaitu meliputi karakteristik kendaraan; terutama posisi titik berat keseluruhan bus dan bagian superstrukturnya; *displacement* pada *bearer* pusat (bagian *section* atau pilar bus); dan total energi yang dapat diserap oleh superstruktur bus (Gursel, 2009).

Nurhadi (2011) melakukan uji guling untuk mengetahui kemampuan rangka untuk mengabsorpsi energi. Menggunakan ANSYS untuk memodelkan bus yang ada di Indonesia dengan dua model ruang residual. Hasil yang didapatkan bahwa deformasi terjadi pada bagian atas *waist rail* (pilar kaca bagian bawah bus pada rangka samping). Selain itu hasil ruang residual yang dimodifikasi memiliki penyerapan energi yang lebih rendah daripada yang tidak dimodifikasi. Tahun 2012, Manjinder Singh Sidhu yang merupakan seorang insinyur Isuzu India meneliti tentang bus yang dipasarkan oleh perusahaannya dengan berdasarkan AIS-031 yaitu regulasi yang berlaku di India yang setingkat dengan UN-ECE R66 berisi tentang kekuatan superstruktur untuk kendaraan besar yang mengangkut penumpang (Bus). Selain meneliti tentang bus apakah miliknya sesuai standar, Manjinder juga ingin mengetahui apakah komputasi rollover dengan menggunakan *software* itu efektif dan

menguntungkan. *Software* yang digunakan adalah *software* Altair. Bus yang digunakan adalah bus berukuran besar. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa superstruktur bus tidak mengenai residual *space* yang artinya bahwa bus tersebut aman dan sudah sesuai dengan standar. Disimpulkan juga bahwa komputasi menggunakan *software* itu merupakan metode yang efektif dan menguntungkan. Namun dalam penelitian tersebut masih ada yang perlu dikembangkan yaitu penentuan material yang akan diganti agar bus ringan tetapi kuat. Gepner.B, dkk (2012) meneliti tentang efektifitas regulasi FMVSS dan ECE R66. Komputasi menggunakan *software* LS-DYNA dengan memodelkan bus paratransit. Hasil yang didapatkan adalah bahwa hasil ECE R66 mendekati kenyataan dan lebih efektif tetapi lebih mahal.

Pada tahun 2013, A.H Ishkandar meneliti tentang efek penuaan material terhadap kekuatan strukturnya ketika terjadi *rollover*. Digunakan bus yang beroperasi di Malaysia dalam penelitannya. Sebelum melakukan komputasi, diinvestigasi terlebih dahulu pada bagian rangka mana yang terdampak korosi yang paling parah. Hasilnya menunjukkan bagian atas mengalami korosi yang paling ringan, pada bagian samping mengalami korosi yang agak berat, dan korosi yang paling berat ditemukan pada bagian bawah bus. Bus yang digunakan adalah bus besar. Selanjutnya Ishkandar melakukan komputasi dengan menggunakan 2 model bus, bus yang pertama adalah bus yang kondisinya masih baru dan yang kedua adalah bus yang sudah tua. Hasil yang didapat adalah efek penuaan seperti korosi berpengaruh terhadap kekuatan superstruktur bus. Performa superstruktur bus tua ketika terguling sangatlah buruk. Dari hasil tersebut hal yang masih akan dikembangkan adalah data perkiraan penuaan berdasarkan kondisi lingkungan dan pada saat operasional karena pada penelitian tersebut kondisi lingkungan dan operasionalnya hanya berdasarkan asumsi saja (A, H Ishkandar, 2013).

Kumar, D Senthil (2015) meneliti bus volvo 9800 di India ketika mengalami *rollover*, Kumar menggunakan *software* ADAMS. Semua berat termasuk bagasi, massa mesin, dan AC diperhitungkan. Hasil penelitian ditemukan bahwa bus volvo

9800 memenuhi regulasi AIS 031 yang setara dengan ECE R66 karena struktur rangka tidak mengenai ruang residual.

Patil (2016) melakukan uji pada *sleeper bus* di India, dengan menggunakan LS-Dyna sebagai *softwrenya*, hasil yang didapat adalah bahwa sleeper bus miliknya tidak memenuhi regulasi AIS 031 dan AIS 119 karena deformasi rangka melewati ruang residualnya. Regulasi AIS 119 digunakan di India untuk mengatur tentang *rollover* pada *sleeper bus*.

Pada tahun 2017, Satrio Wicaksono meneliti tentang *Rollover Test* pada bus yang beroperasi di Indonesia. Satrio menggunakan bodi bus berukuran besar buatan salah satu karoseri ternama di Indonesia yang berlokasi di Jawa Barat untuk penelitiannya. Satrio melakukan penelitian tersebut berdasarkan UN-ECE R66 karena di Indonesia tidak ada regulasi yang mengatur tentang kekuatan struktur ketika bus terguling. *Software* yang digunakan adalah LS Dyna. Satrio menggunakan dua kasus yaitu kasus pertama ketika bus kosong dan yang kedua bus ditambahkan beban di dalamnya. Hasil penelitian tersebut menyatakan struktur kedua bus tidak kuat karena superstrukturnya melewati *residual spacenya*. Bagian kritical bus tersebut adalah bagian *cantrail* dan bagian penghubung antara lantai dan rangka samping. Pada kasus kedua, ketika ditambahkan beban hasilnya lebih parah. Kelemahan penelitian ini adalah tidak memodelkan struktur kursi yang menempel struktur bagian samping. Kemudian dibutuhkan penyederhanaan agar waktu komputasi tidak terlalu lama (Wicaksono,2017).

Phadatare (2017) meneliti tentang pengaruh penguat pada rangka bus bagian samping ketika rollover, dengan menggunakan LS-Dyna dan alat bending 3 titik. Hasil penelitian tersebut membuktikan struktur bus yang diberi penguat lebih kuat daripada struktur bus yang tidak ditambahkan penguat pada pilar bagian samping

Pada penelitian ini sesuai dengan roadmap penelitian di bawah (gambar 2.1), peneliti ingin melakukan komputasi terhadap unit bus medium yang digunakan di kawasan perumahan dan perkotaan yang dimodelkan sendiri untuk mengetahui

kekuatan strukturnya Berhubung sebelumnya belum banyak yang menggunakan altair *hyperworks* khususnya *software* RADIOSS yang didesain untuk melakukan penelitian tentang *Crash mechanics*, maka pada penelitian ini akan digunakan Altair *hyperworks* yaitu *software* RADIOSS untuk memodelkan komputasi. Digunakan regulasi UN-ECE R66 sebagai acuan, karena menurut penelitian Gepner, dkk regulasi ini lebih mendekati kejadian aktualnya daripada regulasi Amerika yaitu FMVSS 220 (regulasi tentang *roof crush*, yaitu pengujian atap bus yang diberikan pendulum untuk mengetahui kekuatan atap ketika terguling), selain itu regulasi ini telah banyak diadopsi oleh berbagai negara seperti India dengan regulasi AIS 031, Australia, Jepang, Malaysia, Afrika Selatan, Brazil, dan negara-negara lain, bahkan Amerika yang telah memiliki FMVSS 220 juga mengusulkan untuk membuat regulasi FMVSS 227 berdasarkan UN-ECE R66 untuk harmonisasi regulasi karena ketika pihak Amerika menguji bus yang lolos sesuai regulasi mereka dengan UN-ECE R66 ternyata bus mereka tidak lolos uji.



Gambar 1.1 Roadmap Penelitian

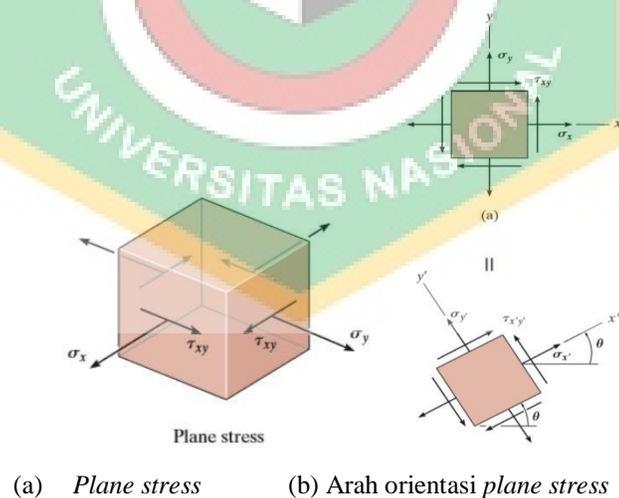
2.2 Studi Literatur

2.2.1 Stress (Tegangan)

Ketika sebuah benda mengalami pembebanan eksternal, maka akan ada distribusi beban pada daerah tertentu dan terjadi secara equilibrium. Intensitas distribusi beban disebut *stress*, yaitu besarnya suatu gaya dibagi dengan luasnya. *Stress* ada dua jenis yaitu *normal stress* dan *shear stress*. Magnitud suatu komponen *stress* tergantung pada tipe beban dan arah orientasi suatu elemen pada suatu titik di benda tersebut (Hibbler,2015). Untuk Penelitian ini, stress yang akan dibahas adalah plane stress dan shear karena merupakan dasar suatu komputasi stress pada suatu elemen.

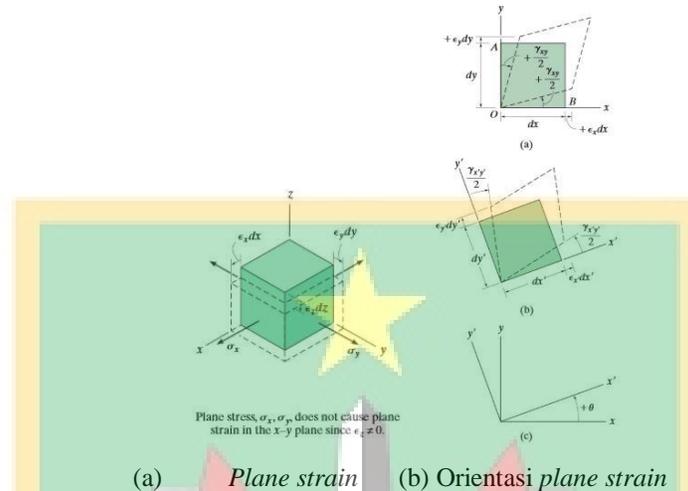
2.2.1.1 Plane Stress dan Plane shear

Plane stress direpresentasikan dengan dua komponen normal *stress* dan satu komponen *shear stress* yang terjadi pada sebuah elemen untuk menjadi ekuivalen, komponen tersebut dapat dilihat pada gambar 2.2. (Hibbler,2015, h.446) Ketiga komponen ini akan berbeda untuk setiap orientasi θ setiap titik elemennya. Nilai *plane stress* akan bernilai positif ketika arah normal *stress* atau *shear stress*nya bernilai positif.



Gambar 2.2 *Plane stress* (Sumber: Hibbler)

Plane strain memiliki prinsip yang sama seperti *plane stress* (Gambar 2.3). *Plane strain* memiliki 3 komponen yaitu dua komponen normal dan satu komponen *shear*. *Plane Strain* akan bernilai positif jika arahnya positif. (Hibbler, 2015)



Gambar 2.3 *Plane strain* (Sumber: Hibbler)

Principal stress adalah sebuah notasi yang merepresentasikan nilai *stress* maksimum dan minimum. Pada *principal plane* tidak ada *shear stress* yang bekerja. Hal ini juga berlaku untuk *principal strain*.

Maximum in Plane shear stress and strain adalah orientasi elemen yang terdampak terhadap *shear stress* dan *shear strain* maksimum. *Shear stress* dan *shear strain* maksimum harus berorientasi 45 derajat dari posisi elemen yang terkena *principle stress* (Hibbler, 2015)

2.2.2 Teori Kegagalan

Teori kegagalan untuk benda dibagi menjadi dua yaitu untuk material yang *ductile* dan *brittle*. Teori kegagalan merupakan teori dasar yang digunakan untuk melakukan komputasi yang dilakukan oleh software untuk memunculkan hasil tegangan.

2.2.2.1. Ductile

2.2.2.1.1 Teori *shear stress maximum*

Yielding suatu material *ductile* menyebabkan peluncuran yang terjadi di antara kontak bidang kristal yang berurutan secara acak. Peluncuran diindikasikan oleh sebuah garis yang muncul pada 45 derajat antara kontak bidang dan kristal. Garis tersebut disebut garis ludder. Garis ludder terjadi karena *shear stress* suatu specimen mengalami *yielding*. *Shear stress* terjadi pada bidang dengan posisi berada pada 45 derajat bidang *principal stress*.

2.2.2.1.2 Kriteria kegagalan Tresca

Kriteria kegagalan Tresca terjadi karena kegagalan material *ductile* gagal yang disebabkan oleh *shear stress*. *Yielding* dimulai ketika absolut *maximum shear stress* mencapai nilai *shear* yang menyebabkan material yang sama akan *yield* ketika mengalami tegangan aksial.

$$\tau_{abs} = \frac{\sigma_1}{2}$$

Persamaan di atas digunakan untuk menghindari kegagalan

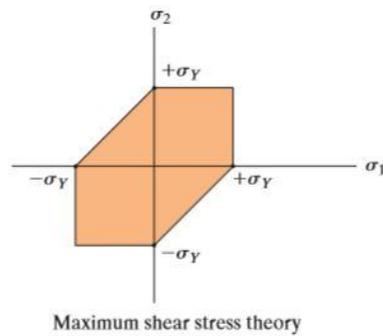
$$\tau_{abs} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

Jika *principal stress*nya berlawanan

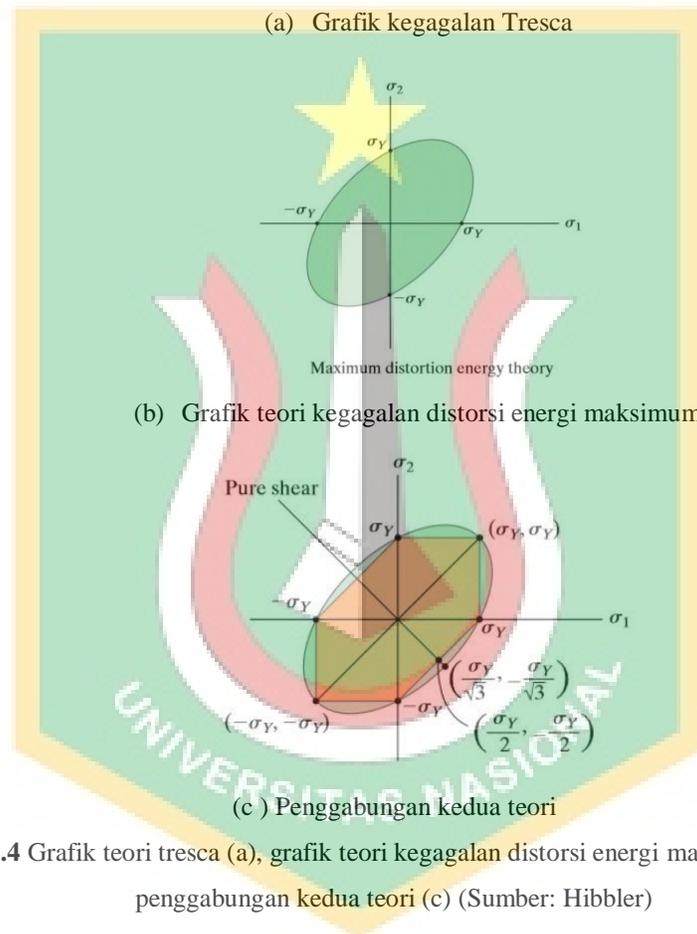
2.2.2.1.3 Teori Distorsi energi maksimum

Beban eksternal menyebabkan beban untuk menyimpan energi di seluruh volumenya. *Yielding* pada material *ductile* terjadi ketika distorsi energi per unit volume material sama atau melebihi distorsi energi per unit volume material benda tersebut ketika mengalami tegangan sederhana.

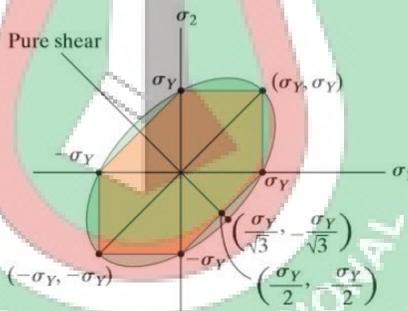
Kedua teori tersebut mempunyai suatu grafik (Gambar 2.4) di mana jika salah satu titik *stress* melewati batas yang diwarnai maka akan mengalami kegagalan. Kemudian jika material mengalami *shear* alami τ maka kedua teori akan memiliki perbedaan dalam memprediksi kegagalan.



(a) Grafik kegagalan Tresca



(b) Grafik teori kegagalan distorsi energi maksimum



(c) Penggabungan kedua teori

Gambar 2.4 Grafik teori tresca (a), grafik teori kegagalan distorsi energi maksimum (b), Grafik penggabungan kedua teori (c) (Sumber: Hibbler)

2.2.2.2. Brittle

Material *brittle* memiliki sifat yaitu dapat gagal secara tiba-tiba tanpa terjadi yielding.

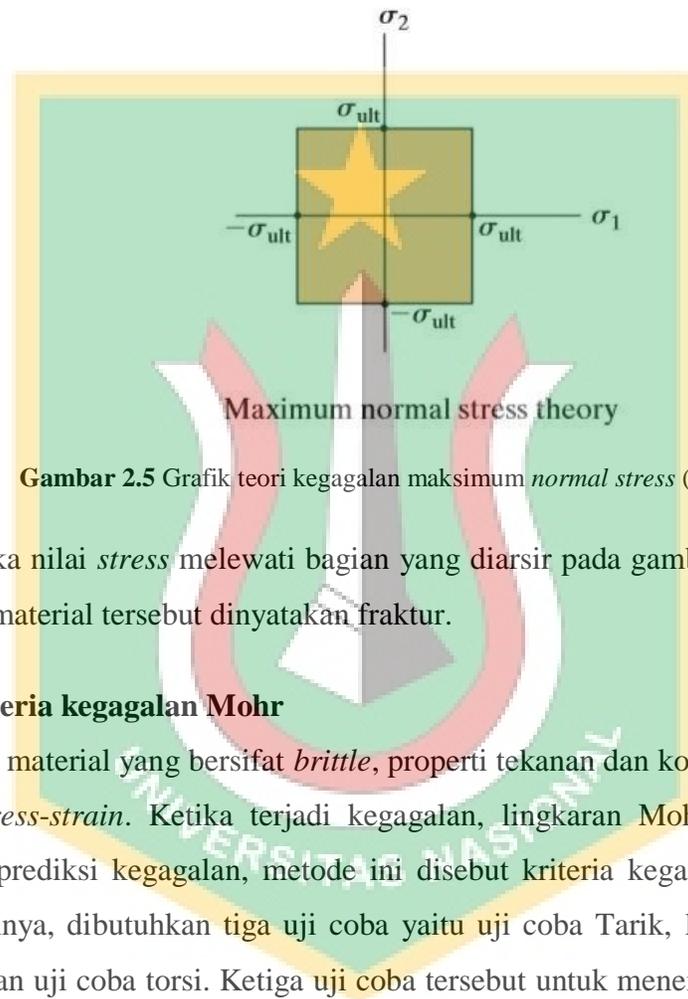
2.2.2.2.1. Teori normal *stress* maksimum

Ketika material yang bersifat *brittle* mengalami tegangan multiaksial maka material akan gagal terutama saat principal tensile *stress* pada material mencapai nilai

yang sama dengan ultimate normal *stress* di mana material dapat bertahan saat mendapat tekanan sederhana.

$$|\sigma_1| = \sigma_{ult}$$

$$|\sigma_2| = \sigma_{ult}$$

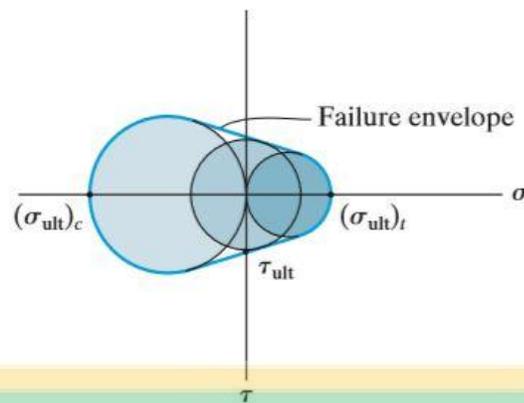


Gambar 2.5 Grafik teori kegagalan maksimum *normal stress* (Sumber: Hibbler)

Ketika nilai *stress* melewati bagian yang diarsir pada gambar di atas (Gambar 2.5), maka material tersebut dinyatakan fraktur.

2.2.2.2 Kriteria kegagalan Mohr

Pada material yang bersifat *brittle*, properti tekanan dan kompresi berbeda dari diagram *stress-strain*. Ketika terjadi kegagalan, lingkaran Mohr dapat digunakan untuk memprediksi kegagalan, metode ini disebut kriteria kegagalan Mohr. Untuk menerapkannya, dibutuhkan tiga uji coba yaitu uji coba Tarik, kompresi pada arah uniaksial, dan uji coba torsi. Ketiga uji coba tersebut untuk menentukan sebuah garis yang bernama "*failure envelope*". Apabila dalam suatu lingkaran terdapat titik yang melebihi garis tersebut maka material akan mengalami kegagalan. Grafik teori kegagalan Mohr ditunjukkan pada gambar di bawah ini (Gambar 2.6):



Gambar 2.6 Grafik teori kegagalan lingkaran Mohr (Sumber: Hibbler)

Grafik kriteria kegagalan Mohr (Gambar 2.7) dapat ditunjukkan dengan grafik *principal stress* σ_c dan σ_t . Kegagalan akan terjadi jika nilai absolut salah satu *principal stress* sama dengan atau melebihi nilai *stress ultimate* (baik tarikan maupun kompresi) atau dapat dikatakan jika kordinat *stress* di alurkan tepat pada batasnya atau melewati batas. (Hibbler, 2015)



Gambar 2.7 Kriteria kegagalan Mohr (Sumber: Hibbler)

2.3. Finite Element Method

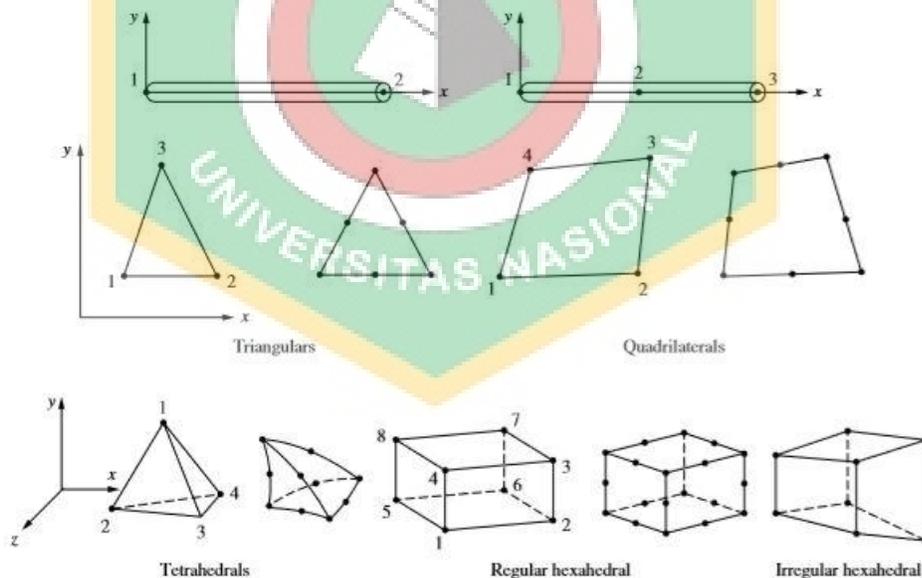
Finite Element Method atau metode elemen hingga adalah suatu metode analisis numerik yang didasarkan pada gagasan dalam membangun suatu obyek yang sangat rumit menjadi beberapa bagian/elemen yang sederhana. Biasanya untuk mendapatkan solusi matematis analisis pada geometri yang rumit, pembebanan, dan sifat material sangatlah rumit karena memerlukan solusi persamaan diferensial biasa atau parsial, yang biasanya tidak dapat diandalkan untuk metode numerik, seperti

kontinum. Oleh karena itu geometri yang rumit tersebut dibagi menjadi suatu sistim yang setara dengan elemen hingga dan interkoneksi pada titik-titik umum nodal atau node. Pembagian ini disebut diskritisasi. (Logan, 2011). Perhitungan Finite elemen method sendiri sekarang dilakukan oleh software.

2.3.1. Jenis-Jenis Elemen

Elemen-elemen dalam metode hingga dibagi menjadi empat jenis yaitu satu dimensi, dua dimensi, 3 dimensi, dan lain-lain (Gambar 2.8). Setiap jenis elemen memiliki bentuk yang berbeda. Elemen satu dimensi berbentuk garis lurus, biasa digunakan untuk *meshing* pada batang dan pipa. Elemen dua dimensi memiliki banyak bentuk. Namun yang paling sering digunakan adalah segitiga dan kotak, elemen jenis ini biasa digunakan pada pipa berlubang, *plane stress* dan *strain*, dan membrane. Elemen tiga dimensi memiliki bentuk elemen yang lebih banyak yaitu tetra, penta, piramida, dan hexa; Elemen jenis ini biasa digunakan pada beban berjenis *solid* seperti blok mesin.

Jenis elemen lainnya yang biasa digunakan adalah material las yang berbentuk garis, pegas, peredam, dan *rigid* serta titik pusat massa. (Logan, 2011)



Gambar 2.8 Jenis-jenis elemen (Sumber: Logan)

Untuk elemen *shell* sendiri, berada pada antara tiga dimensi dan dua dimensi sehingga disebut elemen dua setengah dimensi. *Shell* adalah sebuah elemen 3 dimensi namun karena memiliki ketebalan yang sangat tipis, maka *shell* elemen terlihat seperti dua dimensi. Ketebalan *shell* didefinisikan melalui properti benda.

2.4 Validasi Software

Metode Validasi untuk uji guling sebenarnya ada 3 yaitu eksperimental, membandingkan dengan jurnal lain dan energi. Pada percobaan ini, validasi yang digunakan adalah validasi energi. Validasi energi sendiri dapat diketahui ketika pada saat pertama dijalankan. Ketika Di jalankan seharusnya error energinya adalah 0%. Apabila energi yang muncul adalah 99.9% dan muncul terus maka dinyatakan divergen dan software akan berhenti dengan sendirinya. Energi error dari software sendiri didapatkan dari perhitungan kesetimbangan energi yang dihitung dengan

$$\%E = \frac{E_k + E_k^r + E_i}{E_{k,1} + E_{k,1}^r + E_{wk} - E_{wk,1}} \quad (2.10)$$

Apabila ketika dijalankan muncul energi error bernilai negative maka energi tersebut telah terdisipasi atau dihilangkan dan apabila energinya bertambah tetapi lama-lama konstan maka terjadi pembentukan energi. Selain itu ada satu energi yang mempengaruhi keakuratannya yaitu energi hourglass. Energi hourglass adalah mode energi yang bernilai 0 ketika terjadinya deformasi sehingga deformasi dan tegangan tidak tercatat dan elemennya akan terdistorsi. Hourglass bersifat lumrah apabila menggunakan elemen *shell* jenis *belytschko* dengan titik integrasi sebesar 1 asalkan hourglassnya masih dibawah 15%. Apabila energi positifnya naik semakin besar, berarti ada yang mempengaruhi yaitu kondisi incompatible kinematics. Kondisi tersebut terjadi akibat pengaturan kontak yang belum tepat dan adanya elemen rigid pada elemen *shell*. Kondisi tersebut dapat diabaikan secara otomatis oleh software dengan cara menghilangkan titik pada elemen rigid. Selain itu validasi software dilakukan dengan melihat waktu prosesnya (*time step*) apabila *time step*nya semakin naik maka dinyatakan tidak akurat, biasanya software akan berhenti dengan sendirinya.

2.4. Uji Guling UN-ECE R 66

UN-ECE R66 adalah standar pengujian yang berlaku untuk negara-negara yang tergabung dalam Masyarakat Ekonomi Eropa dan negara yang tergabung dalam *World Forum for Harmonization of vehicle Regulation UNECE* atau W.P 29 (SNI juga ikut dalam forum ini namun belum mengadopsi UNECE R66). Pengujian ini berlaku untuk bus *single deck* yang mempunyai kapasitas penumpang lebih dari 22 orang ditambah dengan awak bus dan pengemudi. Pengujian ini digunakan untuk mengetahui seberapa kuat superstruktur pada bus ketika terjadi *rollover* (terguling). *Rollover* adalah sebuah kejadian di mana kendaraan berguling dan rangka bagian atas jatuh mengenai tanah. Syarat pengujian uji ECE R66 adalah posisi ketinggian jatuh kendaraan ada 800mm dan ketika superstruktur terdeformasi, tidak mengenai *residual space*. (M. Rizka Faizal,2016; UN-ECE,2006). Uji Guling dapat dilihat pada Gambar 2.9

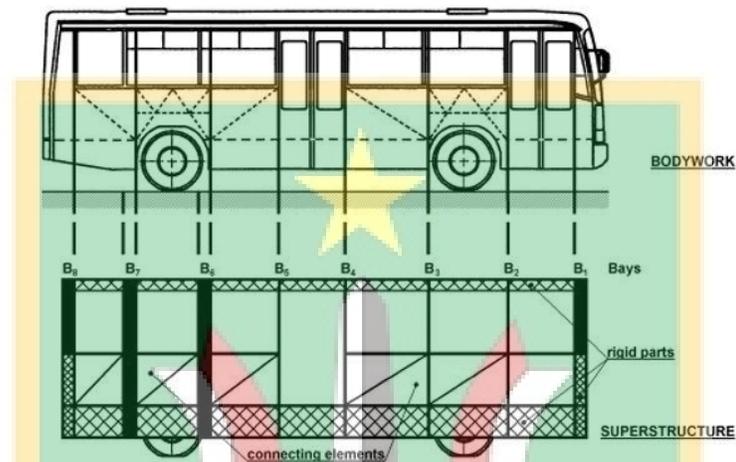


Gambar 2.9 Metode uji guling berdasarkan UNECE R66 (sumber: UNECE)

2.4.1 Superstruktur

Superstruktur adalah bagian pemikul beban yang terdiri atas bagian koheren dan elemen yang berkontribusi terhadap kekuatan, kemampuan menyerap energi *bodywork*, dan melindungi *residual space* ketika terjadinya *rollover*. *Bodywork* adalah sebuah bus yang telah jadi secara utuh dan siap beroperasi yang terdiri dari ruang penumpang dan pengemudi, bagasi, dan lain-lain. *Bodywork* dan superstruktur dapat dilihat pada gambar 2.10. Pada regulasi ECE R66, *bodywork* tidak dianalisa,

melainkan hanya kekuatan superstrukturnya yang dianalisis. Hal ini dikarenakan ketika terjadi *rollover* (terguling), superstrukturnya yang berpengaruh langsung ketika *rollover* terjadi terhadap kekuatan dan kemampuan menyerap energi. Selain *bodywork*, bagian pintu dan kaca jendela juga tidak dinilai. (M. Rizka Faizal, 2014; UN-ECE, 2006).



Gambar 2.10 Superstruktur bus (Sumber: UNECE)

2.4.2. Residual Space

Residual Space adalah ruang kosong yang bersifat imajiner, digunakan untuk menentukan kemampuan struktur dalam memperhitungkan kemungkinan penumpang, pengemudi, dan kru untuk selamat ketika kecelakaan terguling. Menurut standar ECE R 66, superstruktur harus dapat menjamin keselamatan penumpang, pengemudi, dan kru ketika terguling. Persyaratan *residual space* sendiri adalah:

1. Tidak ada bagian-bagian bus (pilar, bagasi) yang berada di luar *residual space* pada awal pengujian. Pada saat pengujian berlangsung atau setelah pengujian, bagian-bagian bus masuk ke dalam *residual space*.
2. Pada saat pengujian berlangsung, tidak ada bagian-bagian bus seperti kursi penumpang yang berada di luar *residual space*.

Residual space merupakan daerah yang dibatasi oleh bidang imajiner. Seperti yang tertera pada Gambar 2.11, *residual space* memiliki ketinggian 1250mm dari lantai, dengan pembagian 500 mm dari lantai ke kursi penumpang dan 750mm dari

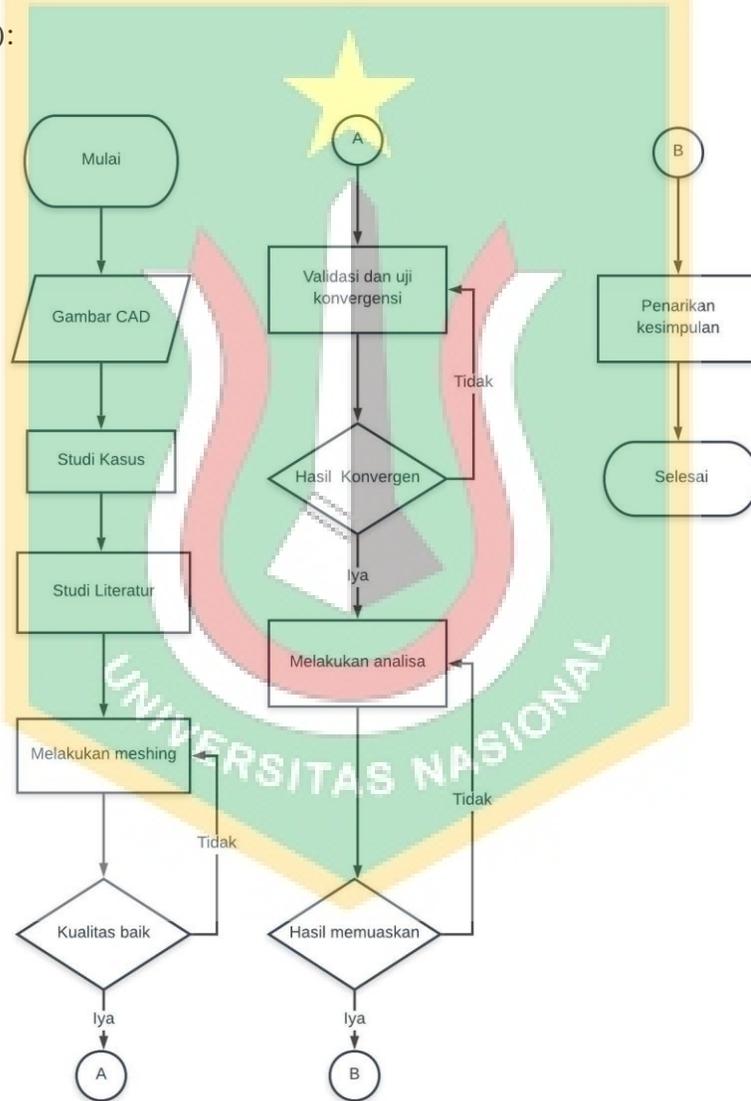


BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Diagram Alir pada penelitian “Komputasi Uji Guling Struktur Rangka pada Unit Bus medium untuk Kawasan perumahan dan perkotaan adalah Sebagai Berikut (Gambar 3.1):



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Keterangan:

1. Gambar CAD digambar sendiri dengan datanya berdasarkan pengukuran. Pengukuran dilakukan pada model bus di perumahan G yang kemudian dimodifikasi pada bagian atapnya. Ketika melakukan pengukuran peneliti mencatat hasil serta membuat gambar teknik secara manual pada kertas untuk melakukan visualisasi pada bentuk rangka bus karena rangka bus telah terbungkus oleh plat
2. Studi Kasus dilakukan untuk mengetahui kebaharuan penelitian yang akan dilakukan pada model bus. Dalam hal ini peneliti harus mengetahui apakah pihak karoseri sudah pernah melakukan uji coba untuk menentukan kekuatan struktur pada model busnya.
3. Studi literatur untuk mempelajari dasar-dasar mekanika struktur, metode elemen hingga, dan cara menggunakan *software* serta regulasi UNECE R66.
4. Melakukan *meshing*. *Meshing* akan menggunakan *software* hypermesh dengan cara memasukkan gambar CAD yang telah didapat.
5. Melakukan pengecekan terhadap kualitas *meshing* seperti ukuran maksimum dan minimum.
6. Uji konvergensi dilakukan dengan cara memvariasi jumlah elemen kemudian melakukan komputasi pembebanan sebanyak minimal 5 kali kemudian data yang terkumpul di plotkan menjadi suatu grafik, jika grafik tersebut menunjukkan garis yang lurus maka pemodelan dinyatakan konvergen
7. Melakukan analisis yaitu melakukan komputasi yang sebenarnya dengan cara melihat besarnya deformasi, energi yang diserap, dan jarak antara rangka yang terdeformasi dengan ruang residual.
8. Hasil Analisis dinyatakan baik jika memenuhi kriteria desain
9. Membuat kesimpulan berdasarkan hasil analisa

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk mendapatkan data dari dimensi rangka bus. Diperlukan metode untuk mendapatkan data dimensi bus. Berikut metode pengambilan data dimensi rangka bus beserta lokasi pengambilan data dimensi bus.

3.2.1 Metode Pengumpulan Data Dimensi Rangka Bus

Pengumpulan data dilakukan dengan cara mengukur dimensi bus dan membuat gambar teknik secara manual di kertas. Kemudian gambar teknik tersebut digambar dengan menggunakan *software* CAD. Untuk rangka samping dan atap, modelnya didapat dari foto-foto yang beredar saja. Sedangkan untuk rangka lantainya dilakukan pengamatan secara langsung. Gambar teknik sebenarnya telah tersedia namun ternyata berbeda dengan desain bus yang dijadikan referensi.

3.2.2 Lokasi Pengambilan Data

Lokasi: *POOL Shuttle Bus* Perumahan G

Alamat: Sentra Gading Serpong, Jl. Boulevard Raya Gading Serpong,
Pakulonan Barat, Kec. Kelapa Dua, Tangerang, Banten 15810

3.3 Ekspektasi Penelitian

Penelitian diharapkan dapat menjadi masukan bagi karoseri agar dapat membuat bus lebih aman lagi. Selain itu penelitian ini dapat mendorong regulator agar membuat regulasi yang setingkat dan berdasarkan standar internasional UN-ECE R 66.

3.4 Prosedur Uji Guling

Sesuai yang tertera pada regulasi UN-ECE R66, ada 4 pilihan metode yang digunakan untuk uji guling yaitu

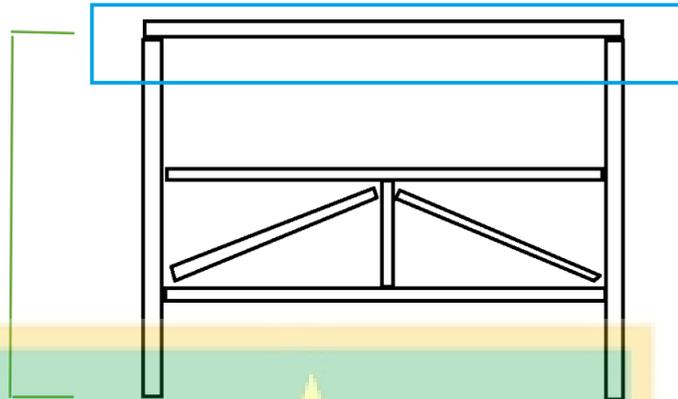
1. Pengujian dinamik dengan menggunakan satu *body* lengkap
2. Pengujian dinamik dengan menggunakan *body section*
3. Pengujian *quasi static* dengan menggunakan *body section*
4. Pengujian dinamik dengan menggunakan simulasi komputer

Pada penelitian ini, dilakukan uji guling dengan metode kuasi statik dengan menggunakan *body section*. Metode ini dipilih karena *running time* untuk simulasinya lebih cepat dan pemodelannya lebih sederhana yaitu hanya bus yang bagian bawahnya dibuat kokoh dengan *constraint fixed* dan pendulum yang bergerak. Kuasi statik adalah kondisi benda ketika diberikan beban, benda tersebut mengalami pergerakan yang sangat kecil sehingga kecepatannya mendekati 0 tetapi tidak sama dengan 0 contohnya ketika diberi beban benda akan bergerak sebesar 0.1 m/s. Namun karena pengujian dilakukan dengan simulasi computer, maka pembebanannya adalah dinamik. Untuk itu, simulasi akan menggunakan metode yang tertera di annex 7 namun pembebanannya akan menggunakan dinamik untuk memenuhi metode keempat. Adapun Tahapan pengujian kuasi statik sesuai yang tertera pada annex 7 di regulasi adalah:

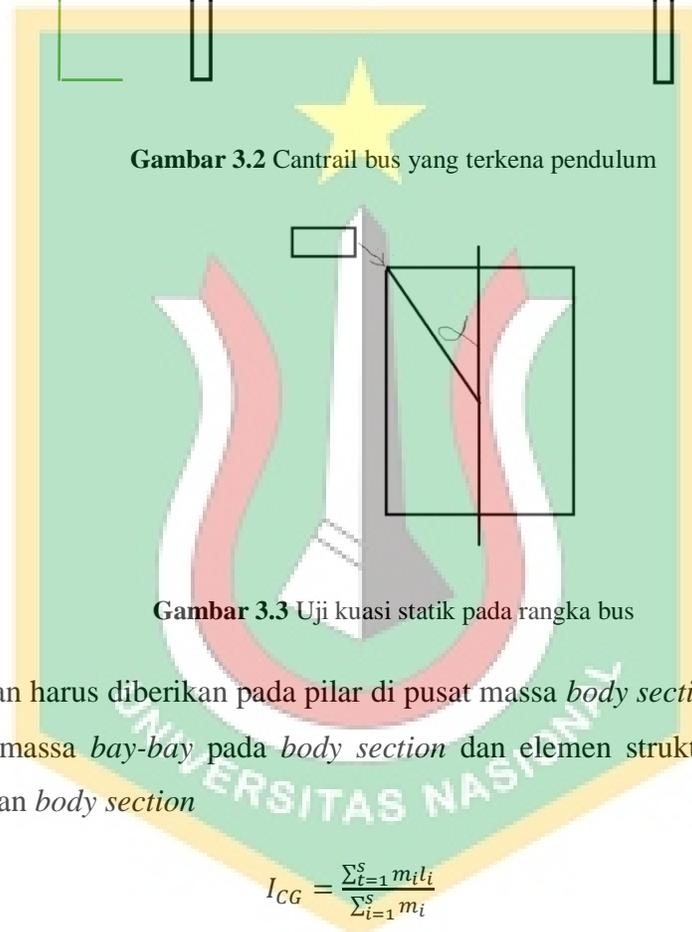
1. *Body* harus terpasang kokoh dan aman pada permukaan uji
2. Deformasi plastis tidak boleh terjadi pada daerah ikatannya
3. Lokasi dan metode pengikatan tidak boleh menghalangi pembentukan zona plastis
4. Beban berupa pendulum diberikan di bagian *cantrail* seperti pada Gambar 3.2, adapun arah beban yang diberikan pada Gambar 3.3 dapat dihitung dengan

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin \frac{800}{H_c} \quad (3.1)$$

H_c adalah tinggi bus dari tanah hingga *cantrail* bus (ditunjukkan pada garis berwarna hijau pada Gambar 3.2). *Cantrail* adalah bagian horiozontal rangka samping yang terletak pada bagian atas rangka samping



Gambar 3.2 Cantrail bus yang terkena pendulum



Gambar 3.3 Uji kuasi statik pada rangka bus

Beban harus diberikan pada pilar di pusat massa *body section* yang diturunkan dari massa *bay-bay* pada *body section* dan elemen struktur yang terhubung dengan *body section*

$$I_{CG} = \frac{\sum_{i=1}^S m_i l_i}{\sum_{i=1}^S m_i} \quad (3.2)$$

S = jumlah *bay* pada *body section*

m_i = massa ke *bay-i*

l_i = Jarak pusat massa *bay* ke I dengan *pivot* yang dipilih

I_{CG} = Jarak pusat massa *body section* dari *pivot point* yang dipilih

5. Beban kemudian dinaikkan secara perlahan hingga menyentuh ruang residualnya. Hasilnya diplotkan ke dalam grafik

6. Energi total, merupakan besarnya energi yang diserap oleh superstruktur dihitung dengan cara:

$$E_t = 0.75 M_k g \Delta H \quad (3.3)$$

Di mana

$$\Delta H = h_2 - h_1 \quad (3.4)$$

7. Model bus dinyatakan lulus uji jika energi yang diserap oleh *body section* lebih besar daripada energi minimumnya. Energi minimum dihitung dengan cara:

$$E_{min} = \sum_{i=1}^s E_i \quad (3.5)$$

Di mana

$$E_i = E_T \frac{m_i}{M} \quad (3.6)$$

Energi yang diserap oleh *body section* merupakan kemampuan *body section* menyerap energi ketika bus terguling, dinotasikan E_{bs} . E_{min} adalah energi minimum yang diperlukan untuk menyerap energi oleh rangka bus.

Kemudian untuk pengujian dengan computer, ada beberapa syarat untuk melakukan pengujian computer yaitu:

1. Kelengkapan data
 - a. Data jenis kendaraan
 - b. Gambar teknik dan tatanan interior
 - c. Dimensi kursi penumpang
 - d. Posisi titik berat
2. Model Matematis

Model matematis harus dapat mendeskripsikan kondisi nyata proses *rollover* sesuai dengan annex 5. Model dan pendekatan matematisnya harus dibuat sedemikian rupa agar hasilnya konservatif. Validasi harus dilakukan dengan cara melakukan pengujian nyata. Posisi titik berat

dan distribusinya harus dibuat sama seperti kondisi kendaraan pada keadaan yang sebenarnya.

3. Syarat Algoritma

- a. Harus didefinisikan posisi kendaraan pada saat kondisi tidak stabil dan saat kontak pertama dengan tanah.
- b. Kondisi awal pada saat bersentuhan dengan tanah harus dikondisikan menggunakan perubahan energi potensial
- c. Simulasi harus dilakukan hingga mencapai deformasi maksimum
- d. Simulasi harus mendapatkan hasil yang stabil dan disertai perhitungan tingkat perubahan energi setiap waktunya
- e. *Hourglass* (kondisi energi nol di mana elemen tidak dapat menggambarkan perubahan energi sehingga menghasilkan nilai *stress* dan *strain* = 0) tidak boleh melebihi 5 persen
- f. Semua kontak fisik antara komponen dan kendaraan harus diperhitungkan dalam model matematis

3.5 Pemodelan

Pemodelan medium bus dilakukan dengan memodelkan bus dengan menggunakan 3D CAD. Semua struktur bus dimodelkan dalam gambar 3D CAD. Berikut pembahasan mengenai 3D CAD dari model bus.

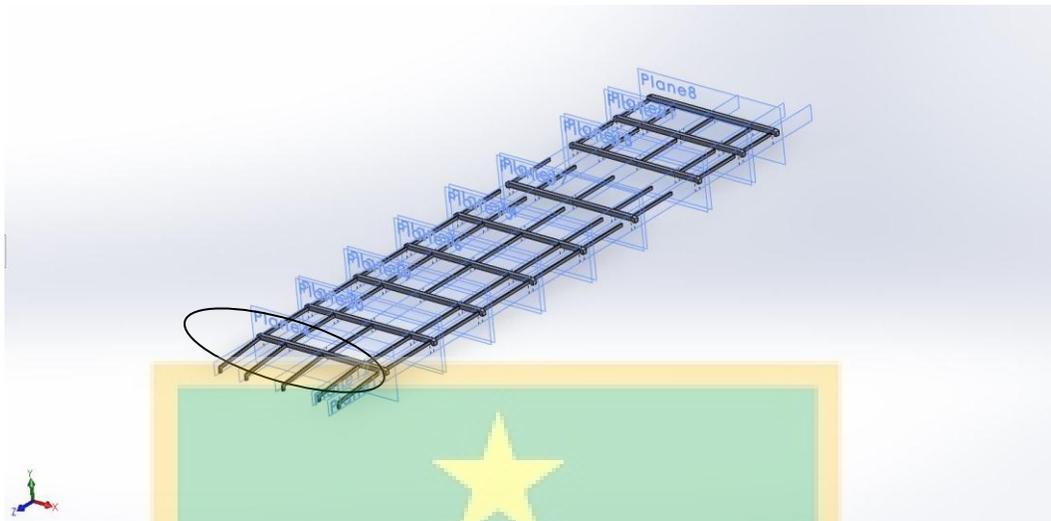
3.5.1 Pemodelan 3D CAD

Pemodelan 3D CAD dilakukan dengan menggunakan *software*. Data dimensi didapatkan dari pengukuran yang dilakukan secara mandiri. *Software* yang digunakan untuk membuat gambar 3D CAD adalah Inventor 2018 dan Solidworks 2018. Inventor 2018 digunakan untuk menggambar rangka samping karena lebih mudah dilakukan dan kebiasaan penulis menggunakan *software* Inventor untuk menggambar rangka samping. Solidworks 2018 digunakan untuk menggambar rangka atap dan lantai karena lebih mudah digunakan untuk menggambar geometri yang rumit, serta digunakan untuk *assembly* keseluruhan rangka bus.

Model bus yang digunakan adalah model *medium bus* yang biasa beroperasi di perumahan G. Penulis memilih model bus untuk Kawasan Perumahan G karena mudah mendapatkan izin untuk melakukan pengukuran. Bagian yang dapat diukur secara manual adalah rangka samping kanan dan kiri (jarak antar pilar), rangka lantai, dan atap karena pada bagian interior yang terdapat jam, jam tersebut telah dilepas sehingga bagian atap yaitu pipa vertikal dapat diukur. Sedangkan pada bagian lainnya seperti *long member* pada bagian atap dapat diketahui lebarnya karena mengikuti lebar pilar rangka samping yaitu sebesar 60 x 40 mm.

Metode konstruksi yang digunakan untuk membuat bus adalah *body and chassis*, di mana bagian *body* bus nantinya akan disambungkan di atas *chassis*. Kemudian metode untuk membuat *body* bus adalah membuatnya secara terpisah. Jadi rangka kanan, rangka samping kiri, rangka atap, dan rangka lantai dibuat secara terpisah kemudian semua rangka disambungkan, terakhir rangka-rangka yang telah disambungkan dipasang di atas sasis dengan menggunakan *bracket L* untuk *bracket* sasis dan pengelasan antara pilar rangka samping dengan *bracket* sasis.

Model *medium bus* yang didesain masih memiliki kekurangan terutama pada bagian sambungan, beberapa ukuran pipa seperti pada pipa di lantai, dan panjang pipa rangka samping pada bagian lambung serta bentuk rangka atap horizontal. Hal ini terjadi karena bagian *body* bus yang telah tertutup oleh panel interior untuk bagian dalam dan plat baja untuk bagian luarnya serta tidak adanya gambar teknik model bus sehingga beberapa bagian bus ini hanya berdasarkan perkiraan saja.



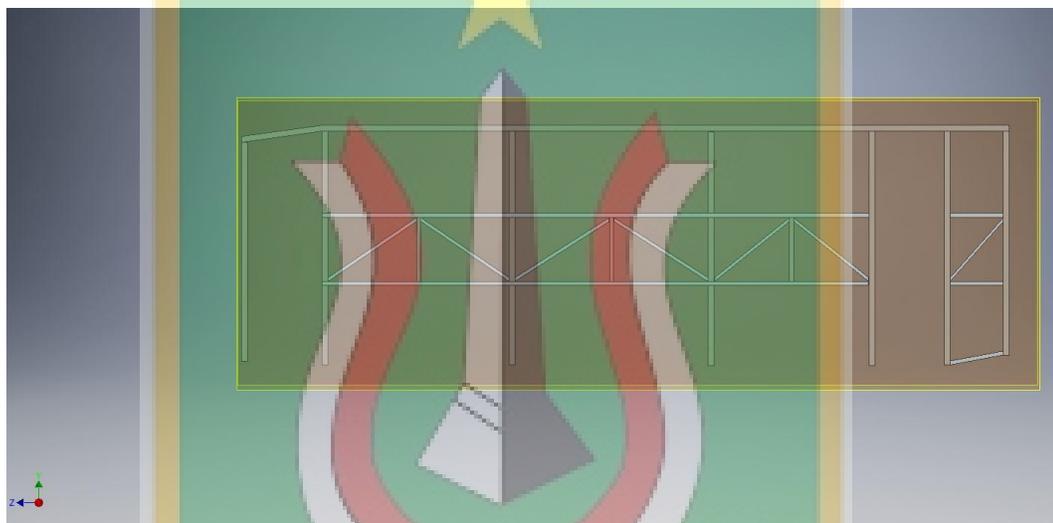
Gambar 3.4 Atap bus

Pada bagian atap (Gambar 3.4), bagian *long member* (yang ditunjukkan dengan lingkaran) seharusnya dibuat membujur, begitu pula dengan rangka samping yang harusnya dibuat membujur. Namun pada pengamatan secara langsung, karena bagian pilar rangka samping telah terbungkus oleh *fiber* maka terlihat lurus sehingga bagian pilar rangka samping digambar lurus otomatis rangka atap pada bagian yang dilingkari mengikuti profil rangka samping karena pada proses pembuatan rangka bus, profil atap bagian yang dilingkari dan pilar rangka samping saling mengikuti.



Gambar 3.5 Rangka lantai bus, bagian yang dilingkari adalah *long member*

Bagian Lantai (Gambar 3.5) merupakan bagian yang tersulit untuk digambar dan diukur karena pada bagian *long member*, penulis hanya bisa mengamati satu bagian saja yaitu bagian tengah yang dapat diakses melalui bagasi samping, sehingga untuk bagian yang lain hanya mengikuti bagian yang diamati. *Long member* yang diamati berbentuk pipa U sehingga pada 4 bagian menggunakan pipa U. *Long member* juga hanya berjumlah 5 buah karena pada rangkaian bus *long member* tersambung pada pilar rangka samping sehingga penulis menentukan banyaknya *long member* melalui banyaknya pilar rangka samping (Gambar 3.6 dan 3.7).



Gambar 3.6 Rangka samping kanan

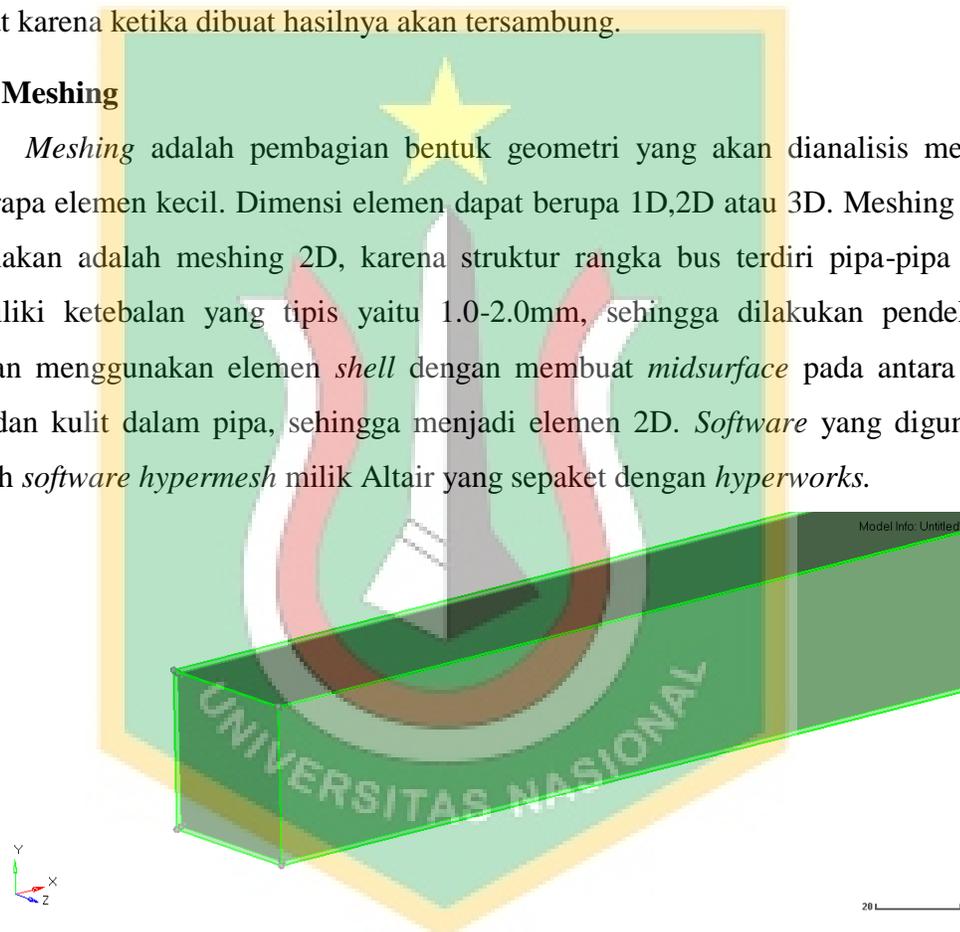


Gambar 3.7 Rangka samping kiri

Pada bagian lantai dan atap dilakukan pemisahan dengan cara menjauhkan jarak antar komponen agar mempermudah penulis untuk membuat *shell*, karena jika jaraknya terlalu berdekatan atau menempel, maka *software* akan mendeteksi kesalahan dan *shell* tidak akan terbuat, kesalahan yang terjadi adalah *adjacent face*. *Adjacent face* terjadi karena pertemuan antara dua bidang sehingga *shell* tidak bisa dibuat karena ketika dibuat hasilnya akan tersambung.

3.5.2 Meshing

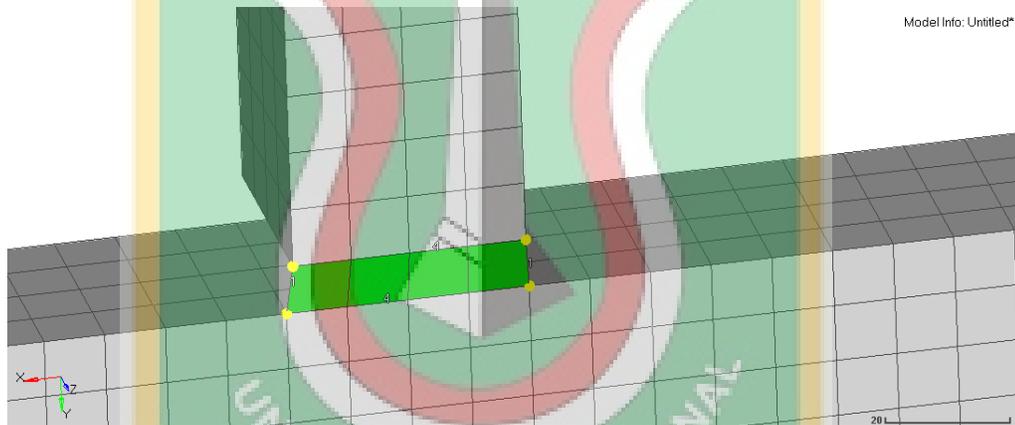
Meshing adalah pembagian bentuk geometri yang akan dianalisis menjadi beberapa elemen kecil. Dimensi elemen dapat berupa 1D, 2D atau 3D. Meshing yang digunakan adalah meshing 2D, karena struktur rangka bus terdiri pipa-pipa yang memiliki ketebalan yang tipis yaitu 1.0-2.0mm, sehingga dilakukan pendekatan dengan menggunakan elemen *shell* dengan membuat *midsurface* pada antara kulit luar dan kulit dalam pipa, sehingga menjadi elemen 2D. *Software* yang digunakan adalah *software hypermesh* milik Altair yang sepaket dengan *hyperworks*.



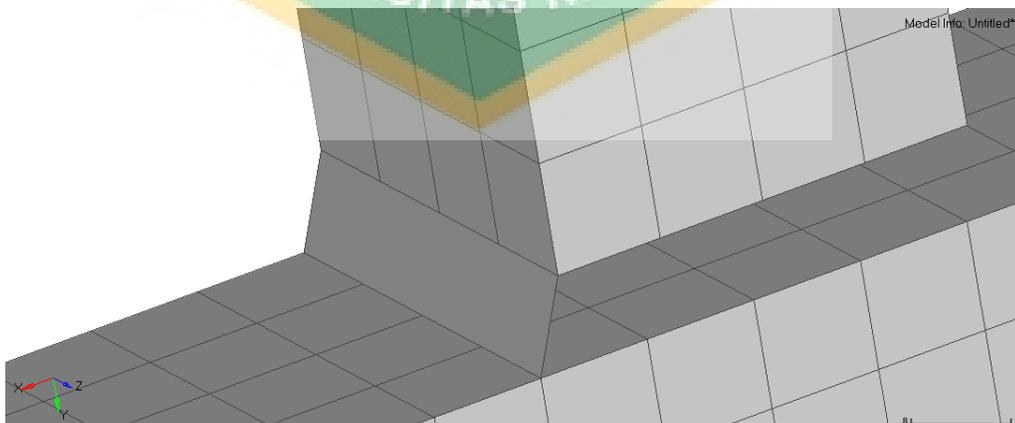
Gambar 3.8 Midsurface

Meshing dilakukan dengan secara terpisah untuk setiap bagian bus. Setelah dilakukan *meshing* secara terpisah, semua *file* model yang telah dilakukan meshing, dilakukan penyatuan semua bagian. *File-file* bagian bus yang terpisah-pisah diimport ke dalam satu model dengan cara membuat model dan *session* baru, hal tersebut dikarenakan ketika pengimporan ada koordinat yang tidak sesuai sehingga

menyebabkan bagian-bagian bus terpasang tidak sesuai dengan tempatnya. Oleh karena itu dilakukan penggeseran dengan menggunakan fitur *translate* sesuai sumbu yaitu x, y, z hingga pas pada tempatnya. Untuk penyambungan sendiri ada 3 cara yaitu membuat elemen baru dengan menggunakan fitur *ruled* pada *2D Meshing* atau dengan menekan F6, kedua cara tersebut memiliki perbedaan yaitu fitur *ruled* dapat membuat 4 elemen sekaligus karena ketika empat titik telah jadi kemudian kita klik *create* maka elemen yang penulis buat akan langsung menyesuaikan dengan elemen induknya yang berjumlah 4 kotak berwarna hijau yang dapat dilihat pada Gambar 3.9. Untuk f6 harus membuat 4 buah titik pada masing-masing kotak pada elemen induk yang penulis akan buat seperti pada Gambar 3.10. Seperti yang tertera pada Gambar 3.10, hasil penyambungan dengan menggunakan f6 tidak mengikuti atasnya sehingga harus dilakukan *remeshing* ulang.

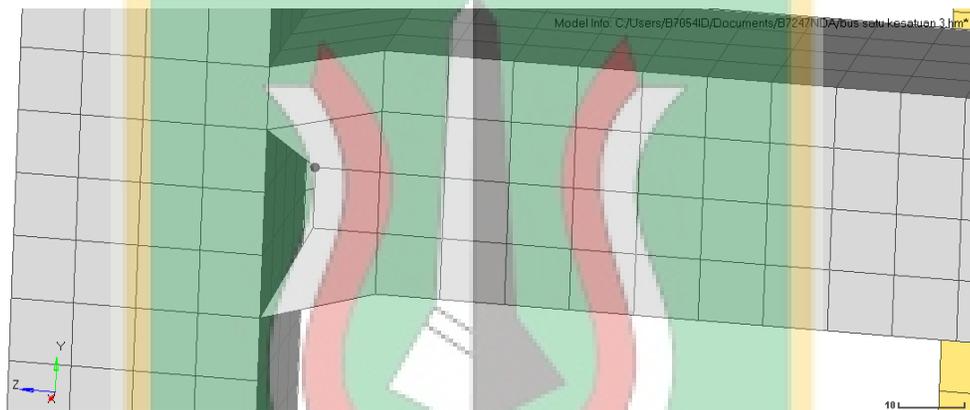


Gambar 3.9 Ruled element



Gambar 3.10 Membuat *element* dengan menggunakan fitur f6 yang hasil *meshing*nya tidak mengikuti atasnya

Cara penyambungan yang kedua adalah dengan menggunakan fitur *replace node* yang dapat dilihat pada gambar 3.11. Fitur *replace node* dilakukan dengan cara menekan tombol f3 pada *keyboard*, kemudian tentukan titik awal yaitu pada bagian ujung pipa yang satu ke titik destinasi yang akan dituju ditetapkan pada bagian ujung kotak, maka akan tersambung secara otomatis. Untuk pembuatan elemen las, dilakukan *remeshing* pada bagian yang telah tersambung secara otomatis, kemudian membuat komponen baru yang diberi nama *welding* (las-lasan) dan memindahkannya seperti pada gambar 3.12 dengan menggunakan fitur *organize*.



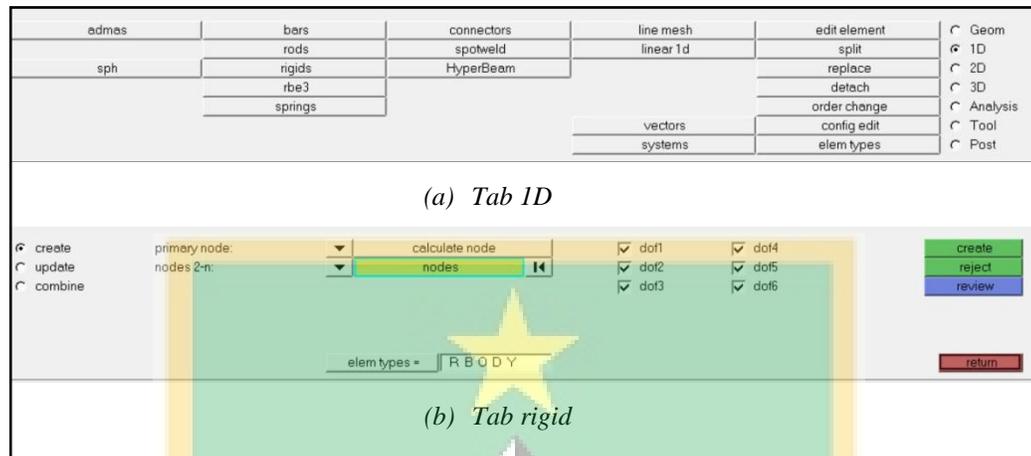
Gambar 3.11 Cara menghubungkan dengan menggunakan *replace node*



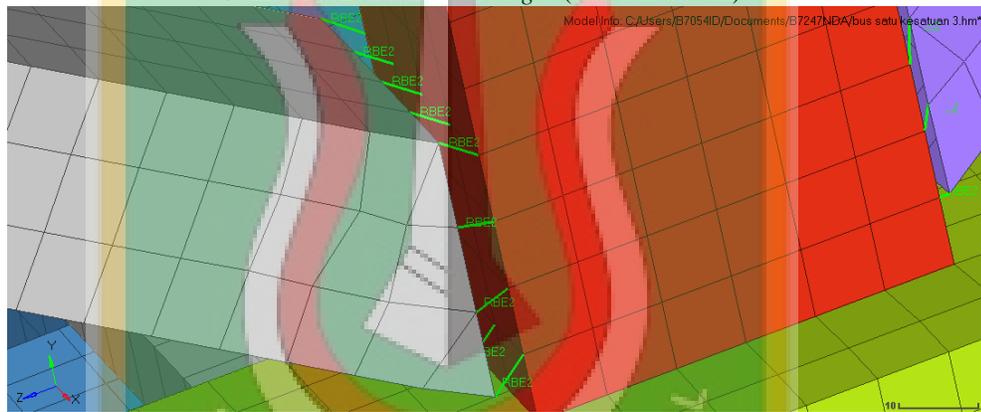
Gambar 3.12 Fitur *organize*

Cara penyambungan yang terakhir adalah menggunakan elemen 1D yaitu *rigid element* seperti garis yang berwarna hijau pada Gambar 3.14. *Rigid element* diterapkan dengan cara mengklik tab 1D kemudian pilih *rigid* seperti yang tertera pada gambar 3.13. Pertama tentukan *independent node* kemudian node 2-n ditentukan setelah itu tombol *create* di tekan atau dengan cara lain yaitu menekan *roller* pada *mouse*. Elemen *rigid* digunakan pada bagian-bagian bus yang jika dilakukan *replace*

node atau *create* elemen akan mengalami cacat elemen ketika bagian-bagian bus bergeser dan digunakan untuk memodelkan baut pada *bracket chassis*.



Gambar 3.13 Fitur *create rigid* (atas dan bawah)



Gambar 3.14 Rigid element

Oleh karena keterbatasan waktu, maka *bracket chassis* tidak digambar dengan menggunakan *software* CAD. Geometri *bracket chassis* dibuat dengan menggunakan fitur *plane* pada *tab 2-D meshing*. *Plane* dibuat dengan cara menetapkan 4 titik dan ukuran kotak pada *master* elemen kemudian *plane* kedua dibuat tegak lurus dengan *plane* pertama sehingga berbentuk “L”. Pada benda aslinya, *bracket* sasis memang berbentuk L dengan dipasangkan baut. Pada pemodelan baut dimodelkan dengan elemen *rigid* karena baut merupakan sambungan yang kaku dan tidak boleh bergerak.

Tahap akhir proses *meshing* adalah pengecekan kualitas *meshing*. Berikut kualitas *meshing* model bus dan parameter *meshingnya*:

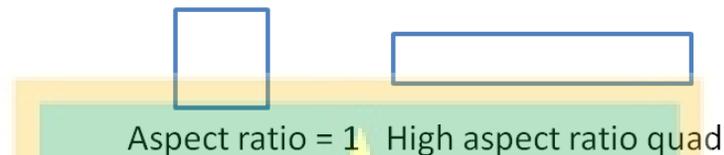
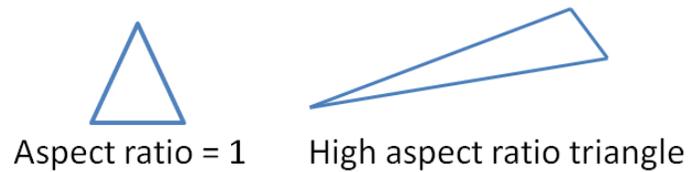
Daftar Kualitas Meshing

1. *Min size*- adalah ukuran elemen terkecil yang telah ditetapkan, elemen akan menjadi buruk ketika nilai *min size* model tersebut kurang dari *min size* yang ditetapkan
2. *Max size*- adalah ukuran terbesar suatu *element*, elemen akan menjadi buruk kualitasnya ketika nilai *max size* pada suatu model melewati nilai *max size* yang telah ditetapkan. Kegagalan pada *max size* dapat dilihat pada gambar di bawah



Gambar 3.15 *Max size*

3. *Aspect ratio*- perbandingan sisi Panjang sebuah elemen dan sisi pendek yang dihitung dari titik yang terletak di pinggir terhadap sisi pinggir yang berlawanan. *Aspect Ratio* tidak boleh bernilai lebih dari 5, karena berpengaruh terhadap tempat di mana nodal awal berada, jika *aspect ratio* lebih dari 5 maka nodal akan bergeser sehingga mempengaruhi keakurasian hasil. Kegagalan *aspect ratio* dapat dilihat pada gambar di bawah



Gambar 3.16 Kualitas *aspect ratio* (sumber: Wikiwand.com)

4. *Skew*- menentukan kemiringan sudut, bentuk fisiknya berupa 2 buah garis yang melengkung di mana yang lainnya lurus. Penentuan untuk elemen kotak adalah mencari nilai sudut minimum antar dua garis yang tersambung yang berlawanan dengan bagian tengah *element*. *Skew* tidak boleh memiliki sudut yang nilainya melebihi 40 derajat karena bisa membuat kualitas elemen buruk. Bentuk fisis *skew* adalah 2 buah garis yang miring sedangkan yang lainnya lurus.
5. *Warpage*-Jumlah elemen atau permukaan elemen yang mengalami deviasi planar juga didefinisikan sebagai sudut yang terbentuk dari 2 bidang yang membagi elemen kotak di sepanjang diagonal. *Warpage* tidak boleh melebihi 15 derajat, karena akan membuat elemen menjadi buruk, bentuk fisisnya adalah elemen yang penyok.
6. *Jacobian*- Ukuran deviasi sebuah elemen pada bentuk elemen yang ideal, mesh akan bernilai baik jika *jacobiannya* bernilai 0.6-1, karena saat mencapai nilai tersebut elemen memiliki bentuk yang ideal. Nilai 1 merupakan elemen berbentuk kotak sempurna untuk elemen kotak.
7. *Max angle quad*- nilai maksimum sudut dalam elemen kotak
8. *Min angle quad*- nilai minimum dalam elemen kotak
9. *Max angle tria*- nilai *maximum* sudut dalam elemen segitiga
10. *Min angle tria*-nilai minimum sudut dalam elemen segitiga

Untuk *Min* dan *max angle* berpengaruh pada bentuk elemen secara individual, sehingga tidak mempengaruhi nilai *skew*. Nilai *skew* dipengaruhi oleh bentuk elemen secara keseluruhan. Nilai yang ditetapkan untuk *min* dan *max angle* adalah:

Kotak= 90 derajat (45 derajat $<\theta<$ 135 derajat)

Segitiga= 60 derajat (20 derajat $<\theta<$ 120 derajat)

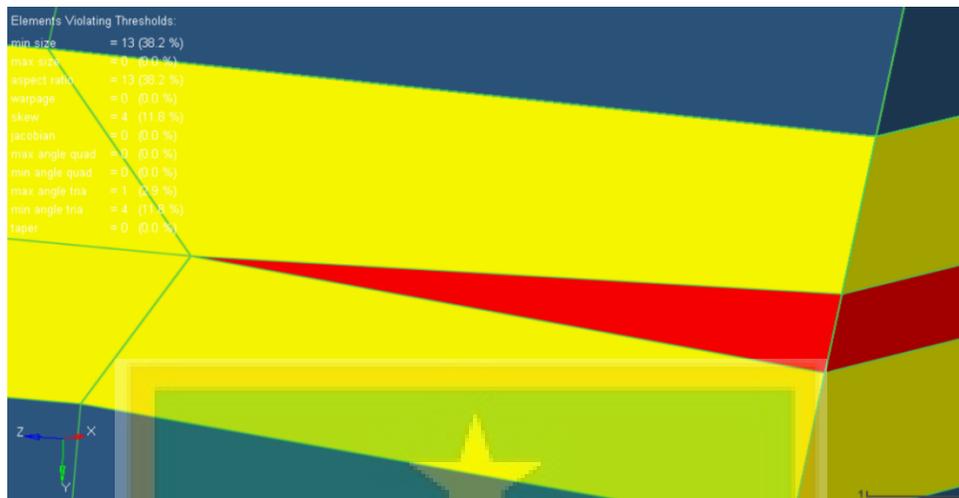
11. *Taper*- sebuah distorsi angular di mana elemen terdistorsi mendekati 180 derajat. Untuk elemen kotak nilai 0-0.5 adalah bernilai baik karena mendekati kotak
12. Berikut kualitas model yang dibuat dan parameter kualitas yang diterapkan oleh Altair.

Tabel 3.1 Kualitas Meshing

	Kualitas Model yang dibuat	Parameter (Berdasarkan <i>software</i>)				
		<i>Ideal</i>	<i>Good</i>	<i>Warn</i>	<i>Fail</i>	<i>Worst</i>
<i>Min size</i>	2	10	9	4	2	1
<i>Max size</i>	20	10	12	15	20	30
<i>Aspect Ratio</i>	5	1	2	4,4	5	10
<i>Warpage</i>	15	0	5	13	15	30
<i>Max interior angle quad</i>	139,5	90	110	134	140	160
<i>Min interior angle quad</i>	40,01	90	70	46	40	20
<i>Max interior angle tria</i>	106,15	60	80	112	120	150
<i>Min interior angle tria</i>	30	60	50	34	30	15
<i>skew</i>	40	0	10	34	40	70
<i>jacobian</i>	0,6	1	0,9	0,7	0,6	0,3
<i>Taper</i>	0,43	0	0,2	0,5	0,6	0,9

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa elemen tidak ada yang melewati nilai gagal, artinya kualitas elemen model bus sudah cukup baik meskipun belum mencapai nilai idealnya. Apabila muncuk kegagalan maka pada elemen akan muncul warna kuning yang menandakan fail dan merah menandakan worst yang dapat dilihat pada Gambar 3.17-3.19

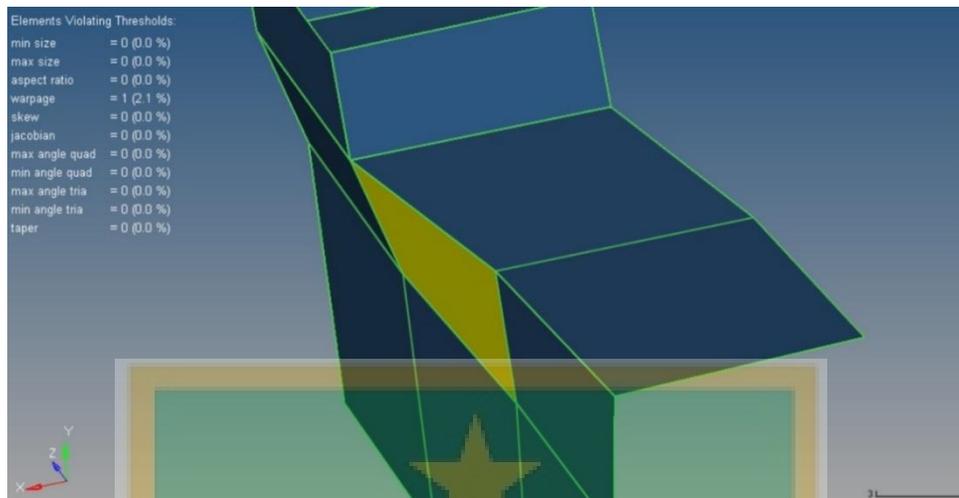
Berikut contoh bentuk fisik kegagalan yang terjadi dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.17 Min size



Gambar 3.18 Jacobian yang terdapat pada bagian yang dilingkari



Gambar 3.19 Warpage pada rangka samping

Sebagai catatan perlu diperhatikan bahwa angka yang tertera di gambar 3.18 dan 3.19 bukanlah kriteria kualitas *meshing*, tetapi banyaknya elemen yang gagal dan presentasi kegagalannya. Untuk mengecek angka kualitas elemen maka dapat membuka *tool > check elemen* dan nantinya akan muncul seperti gambar di bawah ini:

1-d									
2-d	warpage	>	1 5 . 0 0 0	length	<	2 . 0 0 0	min angle	<	2 0 . 0 0 0
3-d	aspect	>	5 . 0 0 0	length	>	2 0 0 . 0 0 0	max angle	>	1 2 0 . 0 0 0
time	skew	>	6 0 . 0 0 0	jacobian	<	0 . 6 0 0	quads:		
user	chord dev	>	0 . 1 0 0	equia skew	<	0 . 6 0 0	min angle	<	4 0 . 0 0 0
group	cell squish	>	0 . 5 0 0	area skew	>	0 . 6 0 0	max angle	>	1 4 0 . 0 0 0
				taper	>	0 . 5 0 0			

Gambar 3.20 Tab Check Elemen

Ketika salah satu tombol hijau di tekan maka akan (contohnya *Warpage*), maka akan muncul nilai yang tertera di pojok kiri bawah (Gambar 3.21), nilai tersebut dicatat ke tabel (bisa excel, bisa word)

0 of 13399 (0%) failed. The maximum warpage is 14.78.

Gambar 3.21 Nilai Elemen

3.5.3 Setup Boundary untuk statik

Setup boundary untuk statik dilakukan untuk mengetahui apakah model bus yang dilakukan *meshing* sudah benar melalui uji guling. Adapun material untuk model statik adalah:

Tabel 3.2 Tipe Material

Tipe Material	<i>Steel</i>
Densitas	7,85e-09 ton/mm ³
Modulus Young	210 N/mm ²
Poisson Ratio	0,3

Kemudian untuk property materialnya:

Tabel 3.3 Tipe Properti

Tipe Properti	<i>P1 Shell</i>
Ketebalan	1,5 mm

Sesuai tabel di atas, *shell* dipilih karena elemen yang digunakan merupakan elemen *shell*, karena ketebalan pipa yang sangat tipis, sedangkan ketebalan pipa sebesar 1.5 mm berdasarkan data yang ada.

Penempatan *constrain* (Gambar 3.22) dilakukan pada seluruh bagian *chassis* dan bersifat *fixed*. *Fixed* adalah sifat di mana sebuah benda ditahan dari semua arah (rotasi dan translasi) sehingga benda menjadi diam. *Constrain* adalah pengaturan arah suatu benda ketika beban diberikan beban. *Constrain fixed* dilakukan karena sesuai regulasi bahwa bagian bawah bus harus terpasang kokoh pada meja uji dan suspensinya harus dikunci sehingga bagian *body* bus bagian bawah tidak bergerak ketika terkena beban *impact*.



Gambar 3.22 Penetapan *constrain* yang dapat dilihat pada bagian yang berwarna putih

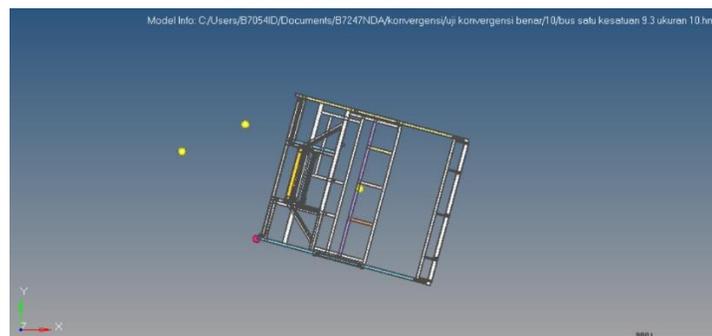
Setelah melakukan penetapan *constrain*, Dilakukan penetapan beban. Beban ditetapkan dengan cara menghitung *impact force* terlebih dahulu

$$E = 0,75mg\Delta H \quad (3.7)$$

ΔH didapatkan dari perhitungan di bawah ini merujuk pada persamaan 3.4 (Gambar 3.23):



(a) Badan bus sesaat sebelum digulingkan



(b) Badan bus setelah digulingkan

Gambar 3.23 Penentuan Δh dengan cara memiringkan bus (atas dan bawah)

Dari perhitungan di atas (Gambar 3.23) didapat bahwa perbedaan ketinggian sebesar 892mm

$$E_T = 0.75 \times 4,64883 \times 9800 \times 892$$

$$E_T = 3.04 \times 10^7 \text{ mJ}$$

Massa total bus:

Lantai = 942,8 kg

Depan = 11,36 kg

Atap = 103,93 kg

Rangka samping kanan = 99,19 kg

Rangka samping kiri = 101,06 kg

Bagasi = 218,49 kg

Chassis = 2180 kg

Tangki (100 L) = 832 kg

Semua massa dari kg diubah menjadi ton karena mengikuti *unit consistency*. *Unit Consistency* adalah sebuah acuan untuk menentukan satuan unit apa yang akan digunakan. Dari tabel *unit consistency* (Tabel 3.4), maka satuan yang digunakan adalah ton untuk massanya dan mm untuk satuan massanya. Untuk penetapan satuan lainnya dapat dilihat pada tabel di bawah ini (tabel 3.4)

Tabel 3.4 Konsistensi Unit

Massa	Pan- jang	Wak- tu	Tegangan	Gaya	Energi	Densitas (ton/mm ³)	Modulus Young (N/mm ²)	Gravitasi (mm/s ²)
Kg	m	s	Pa	N	J	7,85e+03	2,1e+11	9,80
G	mm	s	Pa	mN	nJ	7,85e-03	2,1e+11	9800
Ton	mm	s	MPa	N	mJ	7,85e-09	2,1e+5	9800
Kg	mm	ms	GPa	KN	J	7,8e-06	2,1e+2	9,81e-03
G	cm	Micro sekon	Mbar	10 ⁷ N	10 ⁵ J	7,8e+00	2,1e+00	9,8e-10

Massa struktur bus didapatkan dari pengukuran melalui *software* CAD. Di Solidwoks, pengukuran massa dapat dilakukan dengan cara *evaluate > mass*

properties, sedangkan di Inventor dapat dilakukan dengan cara *file>I properties > physical*. Massa total bus secara keseluruhan sebesar 4,64883 ton.

Setelah energi total didapat, sekarang kecepatan beban dicari dengan menggunakan persamaan energi kinetik

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.8)$$

$$Ek = ET \text{ maka}$$

m adalah massa pendulum yang didapatkan dari

$$m = \rho \times \text{Panjang pendulum} \times \text{Tebal Pendulum} \times \text{Tinggi Pendulum}$$

$$m = 8 \times 10^{-9} \times 7750 \times 800 \times 200$$

$$m = 9,92 \text{ ton}$$

$$v^2 = \frac{12909857.13}{4.96}$$

$$v = 2478 \text{ mm/s}$$

$$P = m \times v$$

$$P = 4,64883 \times 2478$$

$$P = 1,2 \times 10^4 \text{ N}$$

(3.9)

Terakhir persamaan impuls digunakan untuk mengetahui *impact forcenya*

$$\Delta P = I$$

$$P_i - P_0 = F \times t$$

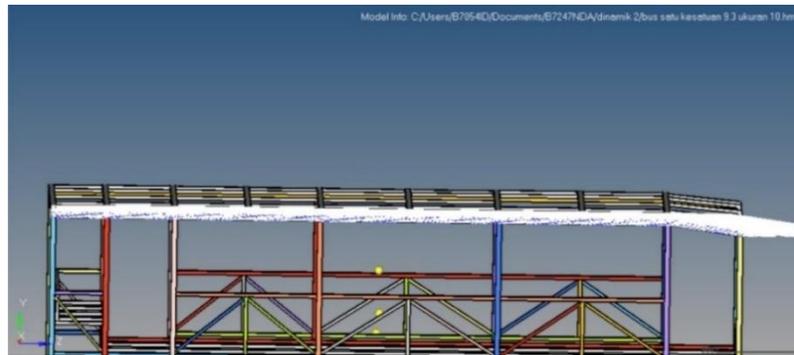
(3.10)

T merupakan waktu kontak ketika bus mengenai tanah yang dilakukan pendekatan dengan $t = 0,2$, pendekatan ini sesuai hasil yang diteliti oleh Fukumachi bahwa waktu kontak antara bus dengan tanah adalah 0,2s, sehingga

$$11519,80 - 0 = F(0.2)$$

$$F = 5.8 \times 10^4 \text{ N}$$

Kemudian beban impact yang didapat yaitu sebesar 57599 N dimasukkan ke dalam model bus yang sifatnya distributif bukan satu gaya saja karena sesuai regulasi yang berbunyi bahwa gaya yang diterapkan harus distribusi di sepanjang *cantrailnya*, maka setiap titik menjadi 10,6 N karena gaya yang didapatkan dibagi dengan jumlah node di sepanjang *cantrail* sebesar 5441. Berikut gambar penetapan gaya (Gambar 3.24).



Gambar 3.24 Penentuan pembebanan yang diaplikasikan di sepanjang *cantrail*

3.5.4 Setup *Boundary* untuk Dinamik

Pada tahap ini, penulis melakukan *setup boundary*, tahap pertama penentuan material yang akan digunakan. Material yang akan digunakan adalah pelat baja tipe st 37. Plat baja ini banyak digunakan oleh karoseri di Indonesia. Berikut Kriteria plat baja st 37

Tabel 3.5 Kriteria Material ST 37

Densitas	7,85e-006
<i>Yield Strength</i>	235MPa
<i>Ultimate Strength</i>	370MPa
<i>Poisson Ratio</i>	0,3
Ketebalan	1,5 mm
Modulus Young	210

Kemudian *card image* ditetapkan. *Card image* pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3.6 Tabel *Card Image* Material

Superstruktur	MAT 2 Johnson Cook
<i>Chassis</i>	MAT 2 Johnson Cook
<i>Rigid Wall</i>	MAT 1 Elast
Lantai	MAT 1 Elast

Seperti pada tabel di atas, bagian superstruktur dan *chassis*, material yang ditetapkan adalah MAT 2, MAT adalah *Johnson Cook*, *Johnson cook* material adalah material yang memiliki sifat linear elastik ketika tegangan ekuivalennya lebih rendah daripada *yield stressnya* dan akan menjadi plastis ketika nilai tegangannya lebih

tinggi daripada *yield stress*nya. Parameter *card image* ini berdasarkan rumus di bawah ini yaitu:

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right) (1 - T^m)$$

(1) (2) (3)

1. *Hardening*

2. *Strain Rate*

3. Temperatur

Temperatur dapat dihilangkan, karena koefisien temperaturnya dianggap konstan. Pada simulasi ini perubahan temperatur tidak dimodelkan dan tidak adanya pengaruh temperatur luar.

Untuk lantai dan *rigid wall* sendiri menggunakan MAT 1, MAT 1 digunakan untuk bagian lantai (lantai yang digunakan sebagai meja uji) dan *rigid wall* karena pada bagian tersebut tidak terjadi deformasi. MAT 1 digunakan untuk material yang ketika diberikan beban, nilai tegangan material tersebut tetap berada pada bagian elastis pada diagram *stress-strain*.

Kemudian setelah menetapkan material, properti benda ditetapkan. Pada bagian superstruktur, properti yang digunakan adalah *shell*. Namun *shell* disini bukanlah *shell* biasa melainkan *shell* QEPH. Pada *software* RADIOSS, ada 3 jenis *shell* yaitu Q4, QEPH, dan QBAT.

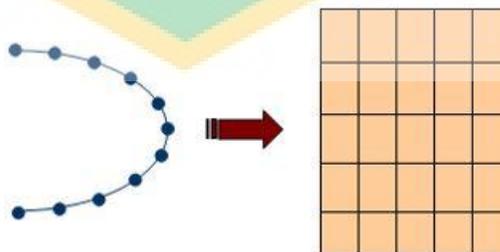
Tabel 3.7 Tabel *Shell Element*

Nodal	Elemen	I shell	Integrasi	Harga dan waktu
4	Q4	1,2,3,4	Tidak penuh	Murah dan cepat
4	QEPH	24	Tidak Penuh	Murah dan Cepat
4	QBAT	12	Penuh	Lama dan Mahal

Dari tabel di atas, Q4 memiliki kelemahan pada akurasinya, sedangkan QBAT memiliki keakurasian yang sangat tinggi. QEPH sendiri banyak digunakan ketika simulasi, karena harganya yang murah, waktu simulasi yang cepat dan memiliki keakurasian yang baik. Dalam menentukan properti, salah satu yang harus diperhitungkan adalah jumlah titik yang terintegrasi. Jumlah antar titik yang saling terintegrasi (*Number of Point integration*). *Number of point integration* adalah jumlah titik yang terintegrasi di sepanjang elemen di mana persamaan (seperti deformasi dan

tegangan) dievaluasi secara numerik. Nilai yang baik untuk simulasi adalah 5, karena momen *bending* juga ikut terintegrasi, sehingga keakuratannya baik dan waktu untuk menjalankan simulasi cepat. Momen *bending* diperhitungkan, karena ketika suatu elemen *shell* diberikan beban dan terjadi deformasi maka momen bending tidak terintegrasi, karena nilai titik integrasinya pada elemen kotak biasanya hanya 4, sehingga titik integrasi tidak mencapai permukaan *shell*, padahal momen bending terjadi pada permukaan dan di sepanjang ketebalan *shell* sedangkan 4 titik hanya terintegrasi di sepanjang ketebalan *shell* saja.

Untuk pendulum sendiri otomatis sudah terdeteksi sebagai *rigid*, karena pendulum dibuat dengan menggunakan fitur *create rigid wall*. Untuk kontak antar permukaan yang digunakan adalah tipe 7. Tipe 7 adalah kontak multi fungsi yang biasa digunakan untuk mendefinisikan kontak yang diam dan bergerak yang dilambangkan oleh titik dan permukaan, dapat dilihat pada gambar 3.25. Titik berperan sebagai objek yang bergerak sedangkan permukaan sebagai objek yang diam. Kontak ini sangat populer digunakan dalam simulasi, karena tidak memiliki limitasi. Meskipun tidak memiliki limitasi, kontak ini masih saja memiliki 2 kelemahan yaitu *deep penetration* dan hasil *impact* yang dihasilkan. Untuk hasil *impact*, jika koefisien gesekan terlalu tinggi maka hasilnya akan terlalu lemah sedangkan jika terlalu rendah maka akan sangat kaku. *Deep penetration* adalah suatu kondisi di mana *slave* menembus *master* yang mengakibatkan nodal yang menembus *master* dinonaktifkan. Pengaruh *deep penetration* adalah stabilitas reaksi gaya impaknya.



Gambar 3.25 Kontak tipe 7, *slave* berupa titik dan *master* berupa bentuk kotak (sumber: SHARCNet.ca)

Pada kasus dinamik, pembebanan memiliki besaran yang berbeda karena hanya menggunakan *body section*. *Body section* yang digunakan seperti yang tertera pada Gambar 3.26.

Body section memiliki jarak antar pilar 1950mm, untuk mengetahui massa superstrukturnya maka

$$M_{bs} = \frac{\text{Panjang bodysection}}{\text{Panjang keseluruhan}} \times \text{massa bus secara keseluruhan} \quad (3.11)$$

$$M_{bs} = \frac{1950}{7750} \times 4,64883$$

$$M_{bs} = 1,169 \text{ ton}$$

8000kg merupakan massa bus secara keseluruhan dan 7330mm merupakan Panjang bus secara keseluruhan. Setelah itu Energi total dicari dengan:

$$E = mg\Delta H$$

$$E_T = 3.969 \times 9800 \times 892 \times 0.75$$

$$E_T = 2.6 \times 10^8 \text{ mJ}$$

Setelah energi total didapat, sekarang kecepatan beban dicari dengan menggunakan persamaan energi kinetik

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2$$

M pendulum yang digunakan adalah *body section*, maka

$M = \rho \times \text{panjang pendulum body section} \times \text{tebal pendulum} \times \text{tinggi pendulum body section}$

$$m = 3969.280 \times 190 \times 198.464 \times 8 \times 10^{-9}$$

$$m = 1.197 \text{ ton}$$

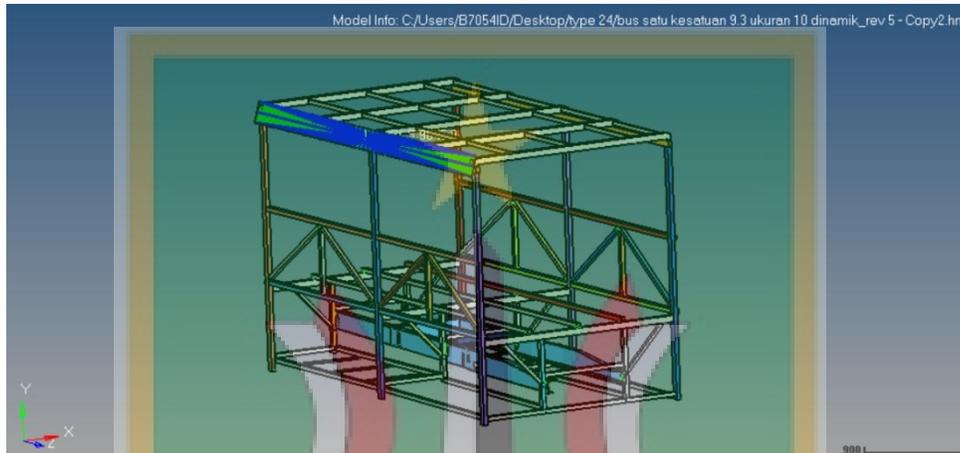
$$Ek = ET \text{ maka}$$

$$v^2 = \frac{2.6 \times 10^8}{0.5985}$$

$$v = 1680 \text{ mm/s}$$

Setelah dilakukan perhitungan kecepatan, dilakukan penetapan batas kondisi. Batas kondisi seperti *constrain* sama penempatannya dengan kondisi batas statis yaitu di bagian *chassis*. Untuk pendulum sendiri *constrain* yang ditetapkan adalah pada sumbu y, z karena pendulum bergerak ke arah sumbu x
Kemudian penentuan kontak, kontak yang ditentukan ada 2 yaitu:

1. Kontak antara pendulum dan rangka bus di mana rangka bus menjadi *slave* karena ketika kontak terjadi, rangka bus bergerak sedangkan pendulum diam. Pendulum bergerak karena diberikan kecepatan
2. Kontak antara rangka bus dan *chassis*, Rangka bus menjadi *slave* karena rangka bus bergerak ketika pendulum menabrak rangka bus sedangkan *chassis* tetap diam dan berperan sebagai *support*



Gambar 3.26 Model bus (*body section*) untuk dinamik

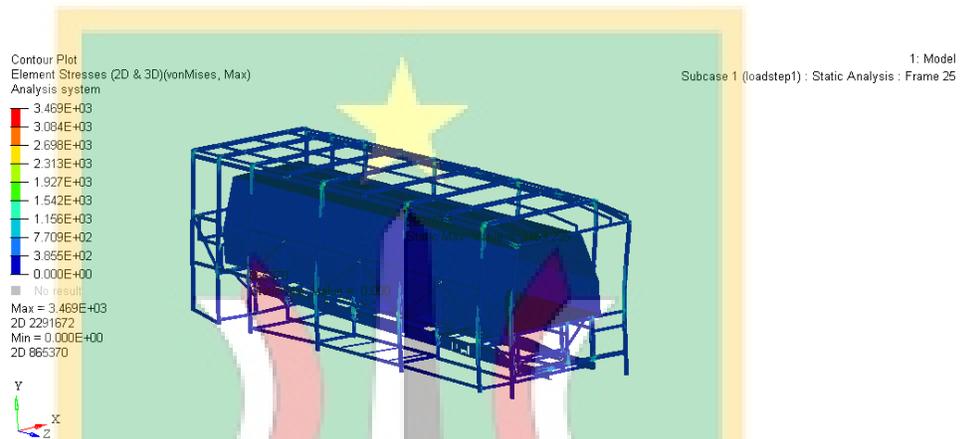


BAB IV

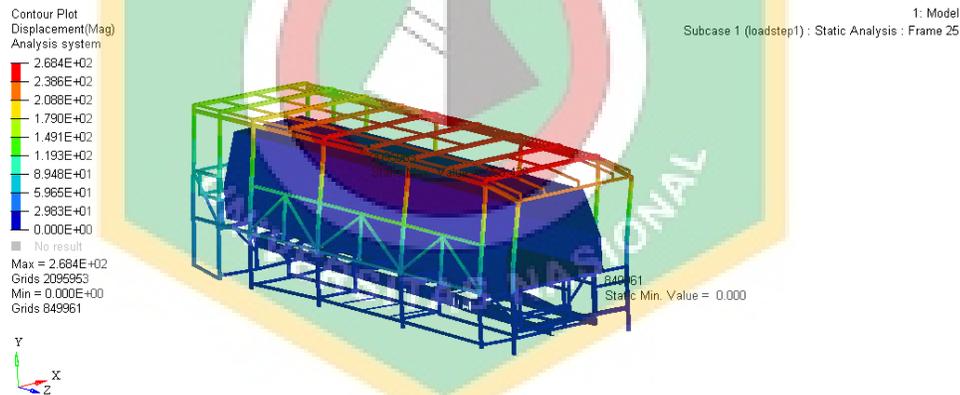
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Statik

Setelah dilakukan komputasi, hasil berupa deformasi dan *stress* didapatkan. berupa gambar dan angka. Berikut gambar uji statik yang tertera pada Gambar 4.1 dan 4.2:



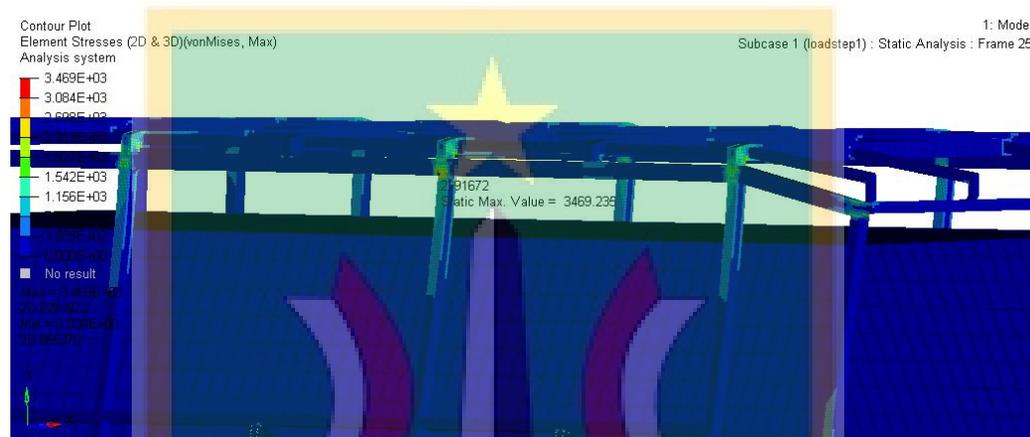
Gambar 4.1 Hasil uji statik untuk tegangan



Gambar 4.2 Hasil uji static untuk deformasi

Pada hasil uji statik, nilai *stress* maksimum terjadi pada sambungan pilar dan rangka atap, sedangkan deformasi maksimumnya terjadi pada bagian atap hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan 4.4. Distribusi tegangan juga banyak terjadi pada bagian *cantrail* dengan atap dan sambungan pilar lantai. Hal ini terjadi karena pada pembebanan statik, bagian yang mengalami *stress* terbesar adalah bagian yang

terdapat kontak antara beban dengan bendanya yaitu pada bagian atap bus. Selain itu bagian lainnya yang paling berpengaruh di bus adalah sambungan di bagian lantai, namun nilai yang dihasilkan tidak begitu besar karena bukan merupakan bagian yang terkena kontak langsung dengan beban. Hasil uji statik yang didapatkan sebesar 3469,24 Pa untuk tegangannya dan 268,4 mm untuk deformasinya (Gambar 4.1 dan 4.2).



Gambar 4.3 Lokasi *stress* maksimum



Gambar 4.4 Lokasi deformasi maksimum

Hasil uji statik menunjukkan bahwa rangka bus tidak melewati ruang residual, maka dapat disimpulkan bahwa rangka bus lulus uji guling.

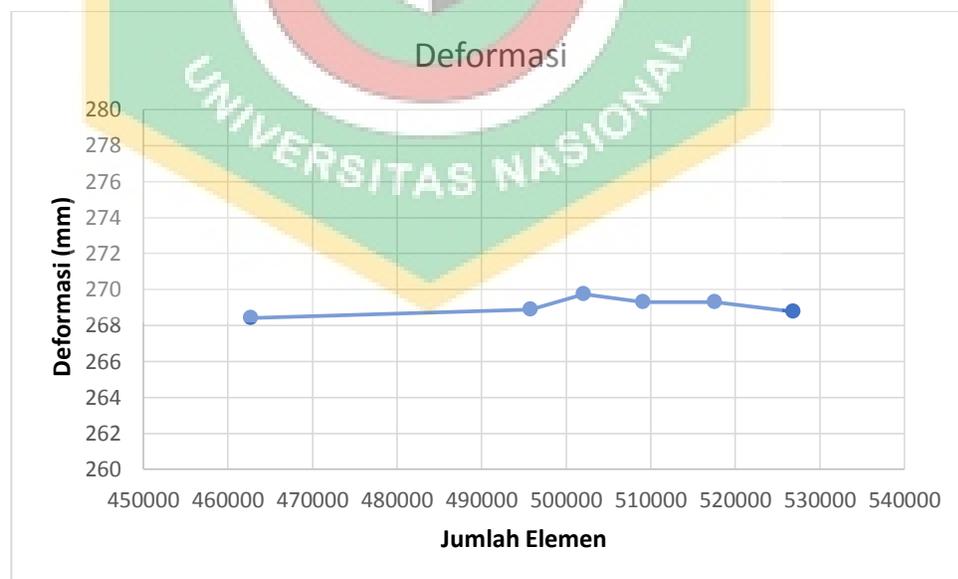
Setelah melakukan uji statik, uji konvergensi dilakukan dengan cara menambah jumlah elemen dengan memperkecil elemennya. Perubahan ukuran

elemen dilakukan dengan cara melakukan *meshing* ulang struktur bus secara keseluruhan tanpa mengubah kualitasnya. *Software* Altair dapat melakukan hal tersebut dengan cara memilih *meshing QI Optimize*. *QI optimize* adalah sebuah metode *meshing* di mana ketika bentuk elemen ukurannya berubah menghasilkan elemen yang buruk, maka akan diperbaiki secara otomatis sesuai parameter yang telah ditetapkan agar kualitas elemen sama seperti kualitas elemen yang ukurannya belum dirubah, meskipun ukuran dan jumlahnya bertambah.

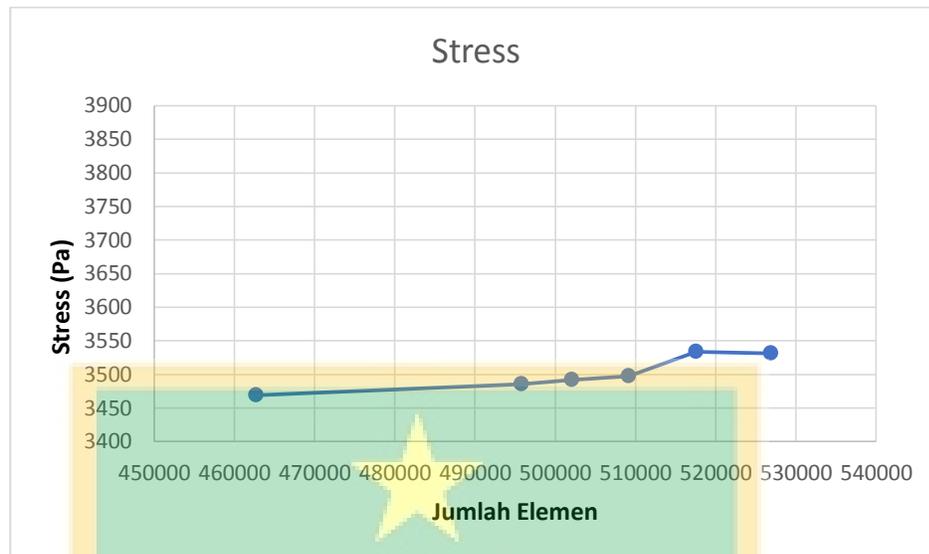
Hasil uji konvergensi jumlah elemen dengan *stress* dan jumlah elemen dengan deformasi adalah (Tabel 4.2, gambar 4.5 dan 4.6):

Tabel 4.2 Hasil Uji Konvergensi

Jumlah Elemen	Deformasi (mm)	Error (%)	Stress (Pa)	Error (%)
4.62×10^5	260,29	0	3469,24	0
4.95×10^5	268,89	3,30	3485,87	0,47
5.02×10^5	269,75	3,63	3492,05	0,65
5.09×10^5	269,30	3,46	3497,58	0,81
5.18×10^5	269,29	3,46	3533,59	1,85
5.27×10^5	268,78	3,23	3531,68	1,79



Gambar 4.5 Hasil uji konvergensi deformasi

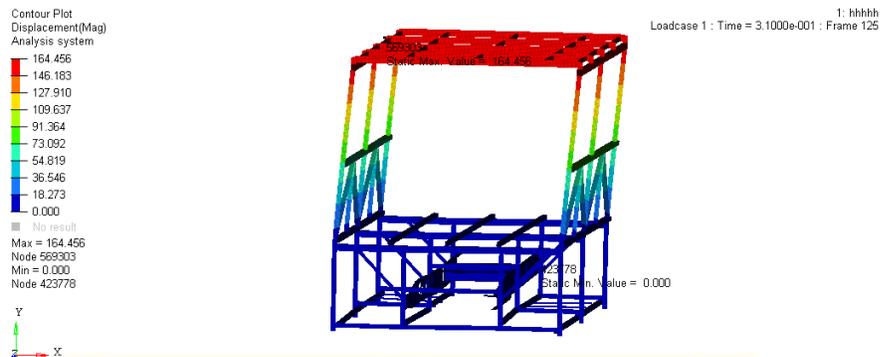


Gambar 4.6 Hasil uji konvergensi *stress*

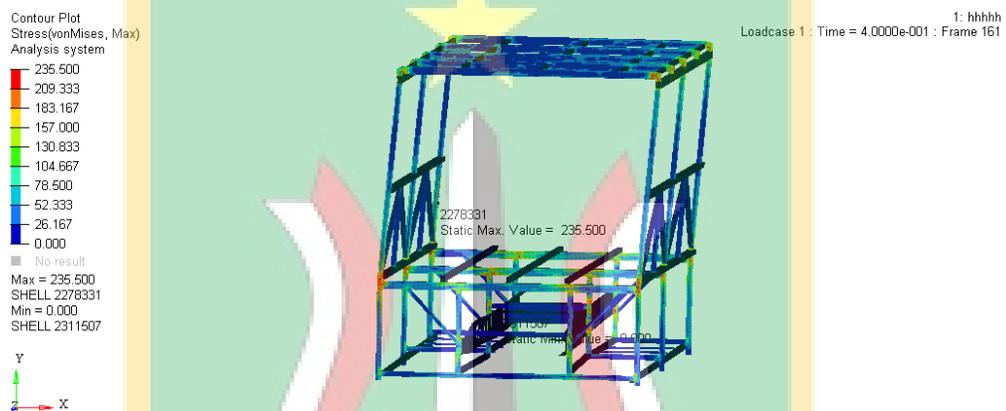
Hasil uji konvergensi antara jumlah elemen terhadap perubahan defomasinya dan terhadap tegangan menunjukkan hasil yang konvergen. Hal ini dapat dilihat dari grafik uji konvergensi (Gambar 4.5 dan 4.6) yang cenderung lurus meskipun pada satu titik nilai akan naik tetapi akan lurus kembali. Karena hasil sudah konvergen, maka model bus yang dimodelkan oleh penulis sudah bisa dikatakan benar. Tetapi pada uji konvergensi ini, hasil yang keluar adalah ribuan sehingga hasil dinyatakan dalam Pa, jika diubah dalam MPa maka akan menjadi 3,47 MPa.

4.2 Hasil Uji Dinamik

Setelah dilakukan simulasi selama 1 jam dan 13 menit, hasil berupa deformasi dan tegangan didapatkan. Gambar di bawah ini merupakan hasil pengamatan selama 0.4 detik (Gambar 4.7 dan 4.8).



Gambar 4.7 Deformasi yang terjadi pada bus

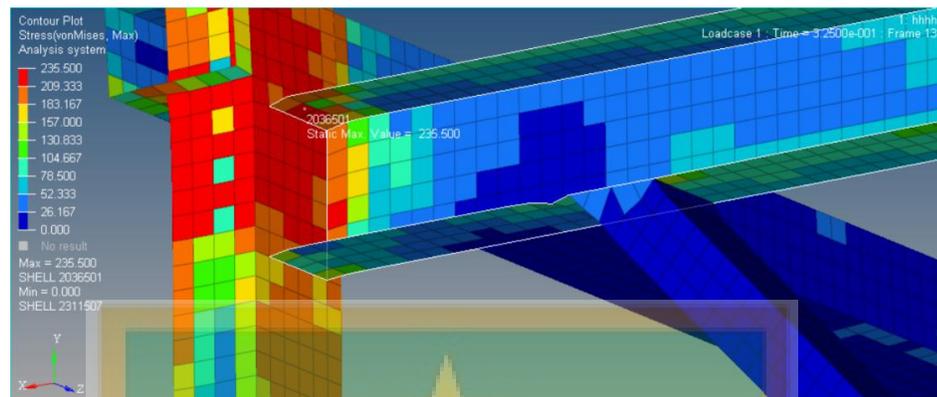


Gambar 4.8 Gambar stress maksimum

Dari gambar di atas deformasi maksimum adalah 164,456 mm dan terjadi pada bagian atap (Gambar 4.9) sedangkan untuk tegangan maksimumnya adalah 235,500 MPa dan terjadi pada bagian *crossmember* yang ditunjukkan pada gambar di bawah (Gambar 4.10).



Gambar 4.9 Deformasi maksimum

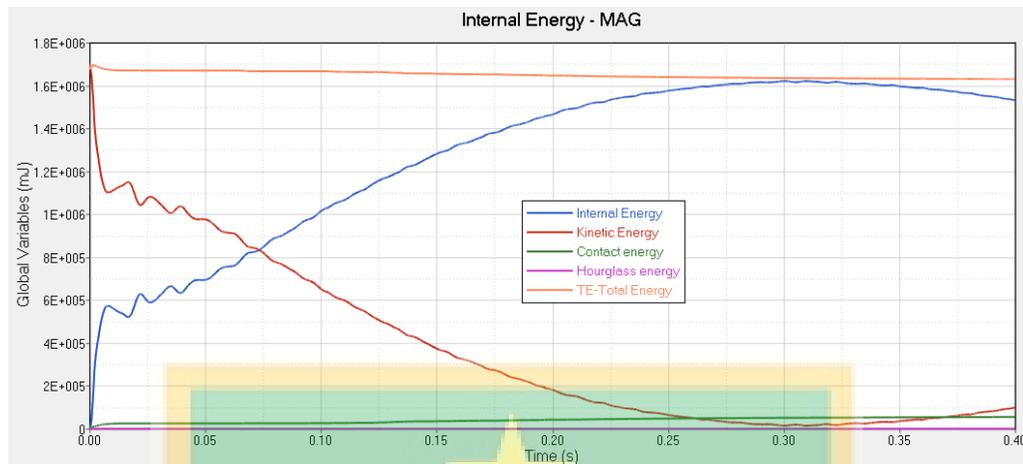


Gambar 4.10 Lokasi *Stress* maksimum

Hal tersebut sudah sesuai dengan penelitian milik bahwa bagian rangka yang paling berpengaruh ketika terguling adalah rangka atap dan rangka lantai (Gambar 4.9 dan 4.10). Penggunaan plat U pada rangka lantai terlebih khusus bagian crossmember juga mempengaruhi nilai tegangan maksimumnya. Bagian crossmember juga merupakan bagian main bearing dan penahan antara rangka samping kanan dan kiri sehingga ketika salah satu rangka bergerak maka rangka yang bergerak tersebut mendorong crossmember. Jika cross member hanya plat U maka akan menyebabkan konsentrasi yang besar pada cross member.

Pada konstruksi bus umumnya, bagian crossmember tidak menggunakan plat U melainkan pipa dengan ketebalan sekitar 2.8mm hingga 3 mm hal ini disebabkan karena crossmember juga merupakan penopang dari kursi dan penumpang.

Kemudian untuk penyerapan energi, energi yang diserap oleh struktur bus sebesar 1.8×10^6 mJ, Nilai tersebut didapat ketika pendulum mengenai struktur bus. Energi yang diserap ini akan mengalami penurunan karena energi kinetik diserap oleh struktur. Berikut adalah grafik energi yang dihasilkan dari simulasi (Gambar 4.11).



Gambar 4.11 Grafik Energi

Energi internal yang dihasilkan sebesar 1.6×10^6 mJ, dari gambar di atas dapat dilihat bahwa energi internal terus mengalami peningkatan hingga 1.8×10^6 mJ, setelah itu internal energi tidak bertambah lagi karena energi kinetik telah mencapai 0 yang artinya energi kinetik telah diserap oleh struktur dan diubah menjadi energi dalam. Energi hourglass adalah energi yang tidak terbaca ketika terjadi deformasi dan stress, hal ini akan menyebabkan elemen terdistorsi yang dapat mempengaruhi keakurasiannya. Berdasarkan tabel di atas, energi hourglass bernilai 0 yang berarti tidak terjadi hourglass. Agar keakuratannya terjamin, hourglass hanya boleh bernilai 5% saja. Karena pada simulasi ini hourglass yang terjadi dibawah 5% maka model masih dinyatakan akurat.

Energi total adalah jumlah energi internal dan energi kinetik. Energi ini akan bernilai sama dengan energi internal ketika energi kinetik telah diserap semuanya oleh struktur. Energi total yang dihasilkan sebesar 1.8×10^6 mJ kemudian turun hingga bernilai sama seperti energi internal, yaitu 1.7×10^6 mJ

Selanjutnya Energi Internal (Ebs) dibandingkan dengan energi minimum nya. Ebs menurut UNECE R66 adalah kemampuan struktur untuk menyerap energi. Dari Hasil Simulasi nilai Ebs yang didapatkan sebesar 1.8×10^6 mJ. Hasil perhitungan energinya (Emin) yang merujuk pada persamaan (3.5) dan (3.6) adalah 15.6×10^6 mJ. Dengan demikian nilai Ebs lebih kecil daripada nilai Emin. Hal ini membuktikan bahwa kemampuan rangka bus menyerap energi lebih kecil daripada energi

minimumnya sehingga rangka bus harus memiliki energi minimal 15.6×10^6 mJ untuk dikategorikan aman. Namun dari hasil simulasi menunjukkan nilai Ebs atau kemampuan menyerap energi sebesar 1.8×10^6 mJ atau $E_{bs} < E_{min}$, dengan demikian rangka bus dinyatakan tidak aman.

Menurut regulasi UN-ECE R66 annex 2 dan annex 5, apabila struktur rangka bus masuk ke dalam ruang residual (150 mm) maka superstruktur bus dianggap tidak lulus uji atau tidak aman. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rangka bus melewati ruang residual karena jarak antara rangka dan ruang residual (deformasi) sebesar 164,456mm, artinya rangka bus tidak aman.

Namun penelitian ini masih memiliki kekurangan karena tidak tersedianya gambar 3D dan spesifikasi detail dari bus sehingga simulasi ini belum dapat dinyatakan benar sepenuhnya. Rangka bus seharusnya dibuat agak sedikit membujur (untuk bus referensi milik bus) hingga membujur namun karena tidak tersedianya gambar dan dimensi asli bus maka dilakukan penyederhanaan.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Simulasi yang telah dilakukan pada penelitian ini telah berhasil dijalankan dan membuahkan hasil. Dari hasil simulasi, rangka bus dinyatakan tidak lulus uji guling karena kemampuan penyerapan energi dari rangka bus memiliki nilai yang lebih kecil daripada energi minimal yang dibutuhkan untuk menyerap oleh rangka bus. Kemampuan penyerapannya didapar sebesar 1.8×10^6 mJ sedangkan energi minimalnya sebesar 15.6×10^6 mJ. Selain itu rangka bus terdeformasi sejauh 164.489 mm sedangkan batas maksimal deformasi rangka bus adalah 150mm. Maka rangka bus dinyatakan tidak lulus karena telah melewati batas deformasinya.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya menggunakan material tipe MAT 36 yang lebih akurat karena berdasarkan grafik *true stress-strain* yang perhitungannya berdasarkan luas penampang dan gaya actual. Penelitian ini masih memiliki kelemahan yaitu kemiripan dengan model aslinya sehingga ketika melakukan pengukuran mandiri dan pemodelan, sangat direkomendasikan untuk menggunakan gambar teknik yang berasal dari karoseri.

Dari latar belakang dapat disimpulkan bahwa kecelakaan terguling merupakan kecelakaan yang memakan korban, sehingga sebaiknya pemerintah segera melakukan harmonisasi terhadap UNECE R 66. Karena dengan diberlakukannya standar ini maka tidak ada lagi penggunaan material yang tidak aman serta rancang bangun rangka bus yang tidak aman. Apabila pemerintah belum memberlakukan uji kekuatan struktur atau membuat regulasi uji kekuatan struktur, sebaiknya karoseri melakukan uji kekuatan struktur terlebih khusus uji guling secara mandiri karena dapat mendorong pemerintah untuk membuat regulasi tentang kekuatan struktur rangka bus dan ujinya.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi pengambilan data bus Referensi



Bagian belakang bus



Rangka lantai model bus



Bagian bawah bus, diambil dari belakang



Bagasi Bus



Tempat penyimpanan ban cadangan, merupakan bagian tambahan



Lampiran 2. Tabel daftar istilah

Istilah Serapan/ Bahasa Inggris	Arti/definisi
<i>Absolute shear stress</i>	Nilai absolut tegangan geser
<i>Absolute shear strain</i>	Nilai absolut regangan geser
<i>Adjadent face</i>	<i>Error</i> pada solidworks yang terjadi karena dua bidang yang saling bersinggungan sehingga ketebalan tidak dapat dibuat
Altair Hyperworks	Software yang digunakan untuk simulasi
<i>Arbitrarily oriented in space</i>	Orientasi vektor yang berubah-ubah pada ruang
<i>Bay</i>	Jumlah jarak antar jendela rangka samping bus
<i>Bending</i>	Pembengkokan
<i>Bracket Chassis</i>	Alat penyangga antara rangka lantai bus dengan sasis
<i>Brittle</i>	Rapuh
<i>Card Image</i>	Suatu daftar yang berisi properti material
<i>Cantrail</i>	Bagian rangka samping yang bentuknya pipa horizontal. Terletak pada bagian atas rangka samping bus yang tersambung dengan rangka atap
<i>Constraint</i>	Pengaturan arah suatu bidang ketika diberikan beban
<i>Chassis (sasis)</i>	Bagian rangka kendaraan yang berfungsi sebagai penyokong bagian penggerak kendaraan
<i>Crash Mechanic</i>	Mekanika tabrak
<i>Displacement</i>	Perpindahan
<i>Ductile</i>	Elastis
<i>European Safety Commision</i>	Komisi keselamatan Eropa
<i>Factor of safety</i>	Ukuran seberapa kuat suatu material ketika diberikan beban terhadap beban maksimum yang telah ditentukan
Grafik <i>True Stress-strain</i>	Grafik stress-strain berdasarkan pengukuran actual
<i>Hardening</i>	Pengerasan/ penguatan
<i>Impact Force</i>	Gaya impact
<i>Long member</i>	Bagian rangka lantai bus yang menyambungkan antara rangka samping kanan dan kiri
<i>Maximum in plane shear stress</i>	Nilai maksimum <i>plane shear stress</i>
<i>Maximum in plane shear strain</i>	Nilai maksimum <i>plane shear strain</i>
<i>Master (kontak)</i>	Kontak tipe 7 yang didefinisikan sebagai permukaan yang tidak bergerak
<i>Meshing</i>	Proses pembagian suatu geometri rumit menjadi elemen dan titik yang di dalamnya terdapat persamaan-persamaan simulasi yang akan diselesaikan, disebut juga diskritisasi
<i>Monocoque</i>	Rangka badan bus yang menyatu dengan <i>chassis</i> , sehingga seolah-olah bus tersebut tidak memiliki <i>chassis</i> .
<i>Normal stress</i>	Tegangan normal

<i>Replace node</i>	Metode penyambungan suatu elemen dengan mengubah posisi titik ke bagian yang akan disambung
<i>Residual space</i>	Ruang Residual
<i>Rigid</i>	Kaku
<i>Rigid Element</i>	Elemen yang menggambarkan sambungan yang kaku
<i>Rollover</i>	Terguling
<i>Ruled</i>	Sebuah fitur software altair yang berfungsi untuk membuat suatu elemen yang dimensi elemennya mengikuti elemen yang sudah ada sebelumnya
<i>Section</i>	Jumlah pilar antar jendela pada rangka samping bus
<i>Setup Boundary</i>	Penetapan kondisi batas
<i>Shell element</i>	Suatu elemen yang memiliki ketebalan yang sangat kecil sehingga dapat diabaikan
<i>Shear stress</i>	Tegangan geser
<i>Shear strain</i>	Regangan geser
<i>Slave (kontak)</i>	Bagian kontak tipe 7 yang didefinisikan sebagai titik yang bergerak menumbuk permukaan (master)
<i>Sleeper bus</i>	Bus yang memiliki fitur di mana kursi penumpang berupa Kasur, sehingga penumpang dapat tidur di dalam bus
<i>Stress</i>	Tegangan
<i>Strain</i>	Regangan
<i>Strain rate</i>	Laju regangan
<i>Organize</i>	Suatu fitur di software Altair yang berfungsi untuk mengelompokkan suatu elemen ke dalam suatu komponen yang ditentukan oleh pengguna
<i>Plane stress</i>	Bidang tegangan yang memiliki ketebalan (sumbu z) yang sangat kecil sehingga dapat diabaikan
<i>Plane strain</i>	Bidang regangan yang memiliki ketebalan (sumbu z) yang sangat kecil sehingga dapat diabaikan
<i>Principal Stress</i>	Tegangan yang bekerja tegak lurus dengan bidang
<i>Principal strain</i>	Regangan yang bekerja tegak lurus dengan bidang

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Bus yang terguling (sumber: tribunnews.com)	4
Gambar 2.1	<i>Roadmap</i> Penelitian	11
Gambar 2.2	<i>Plane stress</i> (Sumber: Hibbler)	12
Gambar 2.3	<i>Plane strain</i> (Sumber: Hibbler).....	12
Gambar 2.4	Grafik teori tresca (a), grafik teori kegagalan distorsi energi maksimum (b), Grafik penggabungan kedua teori (c) (Sumber: Hibbler).....	14
Gambar 2.5	Grafik teori kegagalan maksimum <i>normal stress</i> (Sumber: Hibbler).....	15
Gambar 2.6	Grafik teori kegagalan lingkaran Mohr (Sumber: Hibbler)	16
Gambar 2.7	Kriteria kegagalan Mohr.....	16
Gambar 2.8	Jenis-jenis elemen (Sumber: Logan).....	17
Gambar 2.9	Metode uji guling berdasarkan UN-ECE R66 (sumber:UNECE) ..	18
Gambar 2.10	Superstruktur bus (Sumber: UNECE)	19
Gambar 2.11	<i>Residual Space</i> (Sumber: UNECE)	21
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	23
Gambar 3.2	<i>Cantrail</i> bus yang terkena pendulum.....	27
Gambar 3.3	Uji kuasi statik pada rangka bus	27
Gambar 3.4	Atap bus	31
Gambar 3.5	Rangka lantai bus, bagian yang dilingkari adalah <i>long member</i> ...	31
Gambar 3.6	Rangka samping kanan	32
Gambar 3.7	Rangka samping kiri	32
Gambar 3.8	<i>Midsurface</i>	33
Gambar 3.9	<i>Ruled element</i>	34
Gambar 3.10	Membuat <i>element</i> dengan menggunakan fitur f6 yang hasil <i>meshingnya</i> tidak mengikuti atasnya	34
Gambar 3.11	Cara menghubungkan dengan menggunakan <i>replace node</i>	35
Gambar 3.12	Fitur <i>organize</i>	35
Gambar 3.13	Fitur <i>create rigid</i> (atas dan bawah)	36
Gambar 3.14	<i>Rigid element</i>	36
Gambar 3.15	<i>Max size</i>	37
Gambar 3.16	Kualitas <i>aspect ratio</i> (sumber: Wikiwand.com)	38
Gambar 3.17	<i>Min size</i>	40
Gambar 3.18	<i>Jacobian</i> yang terdapat pada bagian yang dilingkari	40
Gambar 3.19	<i>Warpage</i> pada rangka samping	41
Gambar 3.20	<i>Tab Check Elemen</i>	41
Gambar 3.21	Nilai Elemen.....	41
Gambar 3.22	Penetapan <i>constrain</i> yang dapat dilihat pada bagian yang Berwarna putih.....	43
Gambar 3.23	Penentuan Δh dengan cara memiringkan bus (atas dan bawah) ...	43
Gambar 3.24	Penentuan pembebanan yang diaplikasikan di sepanjang <i>cantrail</i>	46
Gambar 3.25	Kontak tipe 7, <i>slave</i> berupa titik dan <i>master</i> berupa bentuk kotak (sumber: SHARCNet.ca)	49

Gambar 3.26	Model bus (<i>body section</i>) untuk dinamik.....	50
Gambar 4.1	Hasil uji statik untuk tegangan	51
Gambar 4.2	Hasil uji statik untuk deformasi	51
Gambar 4.3	Lokasi <i>stress</i> maksimum	52
Gambar 4.4	Lokasi deformasi maksimum.....	52
Gambar 4.5	Hasil uji konvergensi deformasi	53
Gambar 4.6	Hasil uji konvergensi <i>stress</i>	54
Gambar 4.7	Deformasi yang terjadi pada bus.....	55
Gambar 4.8	Gambar <i>stress</i> maksimum.....	55
Gambar 4.9	Deformasi maksimum.....	55
Gambar 4.10	Lokasi <i>Stress</i> maksimum	56
Gambar 4.11	Grafik Energi.....	57



Rollover Test Computation on Medium Bus Unit for Housing and Cities

Sylvia Carina Nugroho

Physics Engineering, National University

Erinnugroho57@gmail.com

Submitted: 18th February 2020, Revised: Accepted: ,

ABSTRACT

Bus rollover crash is the accident that caused many fatalities. This accident caused by the strength of superstructure when it's rolled. This research done by using UNECE R66 regulation for determine the strength of the superstructure when the bus rolled. Rollover test computation using computer has been done. Computation obtained by two methods, static test, which is used for validating the accuracy of the model and dynamic tests. Static Test Results found that the location of the maximum stress and deformation found on the roof and cantrail. The result is 34692,4 Pa and 268,428 mm. The convergence test results show that the bus model has converged with an error value below 5 percent and the dynamic results show that the bus model has a very small deformation of 164.456mm and the maximum stress is 235,500 MPa, also the bus frame does pass through the residual space according to UNECE R 66 regulation is 150mm.

Keyword: Computation, Rollover Test, UN-ECE R66

1. Introduction

Bus accident always occurred in Indonesia. Accident that always occurred in Indonesia are front, side, and rear impact but accident with the highest fatalities are rollover accident. The factor that cause accident is the human factor, however beside human factor, there is another factor that contribute to the fatalities, that is the bus body structure strength. The following table are the accident that occurred in Indonesia

Table 1 Bus Accident Data that Occured in Indonesia During 2015-2019 (source: KNKT and Metro Jaya Regional Police)

Year	Impact (Front, side, and rear impact)	Death	injured	Rollover	Death	Injured
2015	11	17	31	6	33	107
2016	20	32	161	26	33	216
2017	14	14	12	18	23	123
2018	31	25	17	24	64	53
2019	36	8	13	23 (Until June 2019)	20	59

In order to decrease the fatalities caused by bus rollover accident, a test is carried out namely rollover test. Rollover test done by corresponding standard, UNECE R66 that carried out by many countries. In Indonesia, the research about rollover test still too little because there isn't any standard that set about bus structure strength. The Government regulation no 55 Year 2012 only cited "the structure must strong enough to hold all of the load". Strong in here is relative and have a different quantity for different bus

manufacture. UNECE R66 is done by dropped the bus structure from the 800 mm tilting table then identify the deformation. Residual space is the imaginary trapezium shaped that dimension are 1250 mm for height, 150mm for space between residual space and the bus structure. If the bus structure passed 150mm, it means the structure passed the residual space so it didn't pass the rollover test. Another type of UNECE R66 are quasi static test that carried out by pressing the bus structure cantrail (Upper side frame) with square shaped pendulum. In this test, no need to draw residual space but by knowing the dimension between residual space and the bus structure because the quasi static test mainly focused on the absorbing energy capabilities.

The rollover test study based on UNECE R66 standard has been carried out by many researchers, but many studies have been carried out by foreign researchers, call it in 2009 [1] which examined the 9 meter bus when it rolled, the result was that the bus passed the rollover test and from that research The three things were conclude, that are the characteristics of the vehicle; especially the position of the overall center of gravity of the bus and its superstructure; displacement in the central bearer (sections or pillar of the bus); and the total energy that can be absorbed by the bus superstructure. Then in 2011 [2], a study was conducted using large (12 meter) buses in Indonesia. The result is the bus did not pass the rollover test. In 2012, a study of buses designed by one of the bus engineers in India [3], the results of the bus passed the rollover test. In 2013 Ishkandar made a comparison of the strength of the bus structure between the aged and the new one when it rolled. The results of the study are that older buses are more risky than new ones. research on the 9800 volvo bus [4] when it was rolled which showed that the structure of the bus passed the rollover test. Research on sleeper buses based on Indian regulations which is equivalent to UNECE R66 namely AIS-119 that used for sleeper bus rolling tests [5]. The result is that the bus does not pass because it passes through the residual space. Finally, in 2017, came from Indonesia namely Wicaksono [6] who examined the large buses in Indonesia using 2 methods, those that were given passenger loads and with empty ones. The result is that the bus did not pass the rollover test for both methods and even with passenger load, the deformation results were more severe.

The purpose of this study is to identify the strength of medium buses (7-8 meters sized bus) was designed by researchers. The researcher wants to know whether the bus that the researcher designed passed or not. The medium bus strength test is done using Altair Hyperworks software, the author also wants to know the location of the maximum deformation and stress from the bus frame. This research is expected to be used by bus body manufacturer in Indonesia as a reference in order to make a safer bus, to be used as a reference and development of research on rollover test and to increase awareness that rollover is very fatal so that a bus with good structural strength is needed. It also encourages governments to be able to apply more quantitative standards for the strength of bus structures.

2. Research Methodology

The bus frame is drawn and made by author. The bus reference used the housing G owned bus and several other references obtained from the Internet. The bus was drawn by author because did not get technical drawings from the bus manufacture that made the housing G's bus. Technical drawings obtained from the Internet were only for guides and appendages for some parts that could not be measured because they had a different structure and method of installation. The bus that was designed by the researchers also had some modifications because there were some parts that could not be measured, namely the roof, because it was wrapped in a plate. 3D Bus Drawn using Autodesk Inventor and Solidwork software. The following figure is 3D CAD of the bus models.

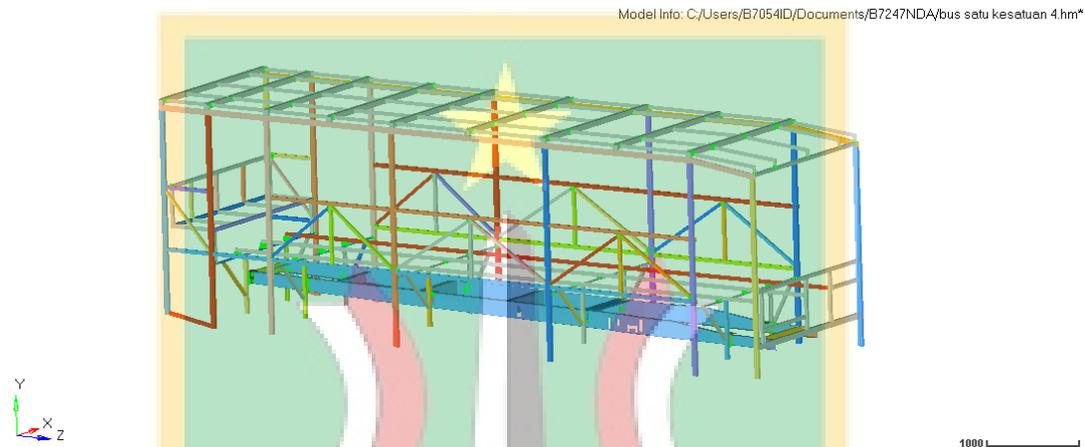


Figure 1 3D CAD of the bus model that has been imported to simulation software

Then each drawings are imported into simulation software. The simulation software used is Altair Hyperworks. The image is then made into a midsurface so that it turns into a shell element. The shell element is a 2.5D element where the element actually has a thickness but the thickness is very small. After the midsurface is done, the pipes are joined together to form a single bus frame. After that, meshing is done by changing 3D into elements in the form of squares or triangles where each element has a box containing deformation formulas. Finally, the simulation setup is done. Simulations were performed in two methods, that are static and dynamic. Static is done for convergence test to know that the results of the simulation are accurate. Convergence test is done by applying a load of different magnitude 5 times then the results are plotted into the graph. If the graph is straight and the error is small then it is accurate. The following Setup material and loading:

Table 2 Static Material Properties

Material Type	<i>Steel</i>
Density	$7,85e-09 \text{ ton/mm}^3$
Young Modulus	210 N/mm^2
Poisson Ratio	0,3

Table 3 Setup element for static

Property Type	<i>P1 Shell</i>
Thickness	1,5 mm

The applied loading for static, was calculate by:

$$E_T = mg\Delta H \quad (2.1)$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

$$E_T = E_k$$

$$P = mv \quad (2.3)$$

$$P = Fxt \quad (2.4)$$

The obtained load was 57599N, because the load must be distributed to all cantrail, so the load become 10.6 N.

The dynamic test is the actual test. This test based on UNECE R66 annex 7, which is cantrail (the top side of the bus) given a pendulum. The procedure for conducting a rollover test based on annex 7 is as follows. The application of a load in the form of a pendulum must be carried out along the cantrail with a tilt angle

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin \frac{800}{Hc} \quad (2.5)$$

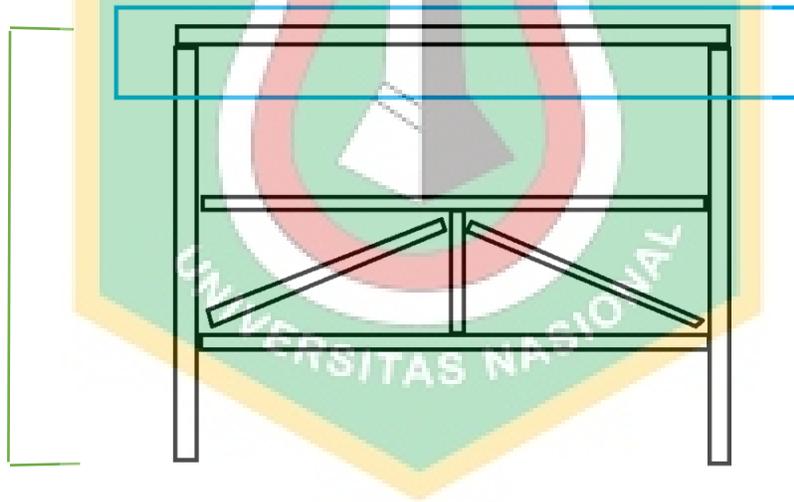


Figure 2 HC (green color) is height from the ground to cantrail, blue is the pendulum

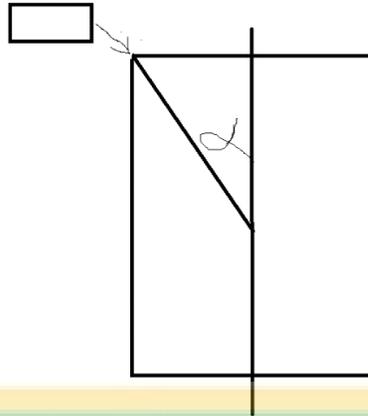


Figure 3 Pendulum Slope

After that the results of the energy comparison are calculated by looking at the simulation results, internal energy or total energy. The internal energy that is called Ebs, means the energy that indicates the ability of the bus frame when it rolls over specifically when cantrail touches the ground. As per Annex 7, the bus passes the bolt test when $E_{bs} > E_{min}$ and will not pass the test when $E_{bs} < E_{min}$. E_{min} is the minimum energy of a bus when it rolls over. E_{min} obtained from

$$E_{min} = \sum_{i=1}^s E_i \quad (2.6)$$

where

$$E_i = ET \frac{m_i}{M} \quad (2.7)$$

The following table are the material and loading setup:

Table 4 Material Specification

Density	7,85e-006
Yield Strength	235MPa
Ultimate Strength	370MPa
Poisson Ratio	0,3
Thickness	1,5 mm
Young Modulus	210

The material follows the technical drawing from the Internet, specifically St. 37. Then the card image of the material is determined. Card images are used to formulate deformations and stresses. Johnson cook on superstructure was chosen because it is more accurate.

Table 5 Card Images Material Setup

Superstructure	MAT 2 Johnson Cook
Chassis	MAT 2 Johnson Cook
Rigid Wall	MAT 1 Elast
floor	MAT 1 Elast

After selecting the shell element, the contact type is selected. The type of contact will also affect its accuracy. The selected contact type is type 7 (general purpose contact). Type 7 consists of two elements, that is slave in the form of dots that moved and hits the master and a master in the form of a surface that idle and pounded.

After that the pendulum velocity determined by manual calculation, as for the manual calculation:

$$E_T = 0.75mg\Delta H \quad (2.8)$$

$$E_k = E_T, \text{ so}$$

$$v^2 = \frac{ET}{\frac{1}{2}m} \quad (2.9)$$

The calculated pendulum velocity is 1680 mm/s

Software validation can be done in 3 ways: experimental, energy level and convergence test. Validation that carried out in this study are using convergence test method, a test used to determine the accuracy of the results by varying the number of elements with the results of stresses and deformations which are then plotted into Microsoft Excel. If the plot of the results between the number of elements and the results of the static simulation already shows straight then the results are convergent. This method is used for a beginner in running simulations. The drawback of this method is that it takes a long time because it has to run a simulation when the number of elements is varied. The second method is a method applied by software, the energy error method. Here the software will automatically calculate the energy error when the simulation is run. If in an iteration an error energy of 99.9% appears, the software will automatically give a simulation because the results are inaccurate and tend to be divergent. The energy error calculation performed by the software is:

$$\%E = \frac{E_k + E_k^r + E_i}{E_{k,1} + E_{k,1}^r + E_{wk} - E_{wk,1}} \quad (2.10)$$

If the error shows a negative sign, then the energy is dissipated and if there is no negative sign but rises then there is energy formed. The formed energy should not be more than 20%. Besides validation can also be seen from the hourglass energy as well. Hourglass energy is energy that is not recorded when an element is deformed and stressed so that the element is distorted. Hourglass energy is allowed as long as it does not exceed 15% if it follows the direction of the software and no more than 5% if it follows UNECE R66.

3. Results and Discussion

3.1 Static Test Result

After static test runs, the results in the form of deformation and stress are obtained. in the form of pictures and numbers. The following are static test images (Figure 3 and 4):

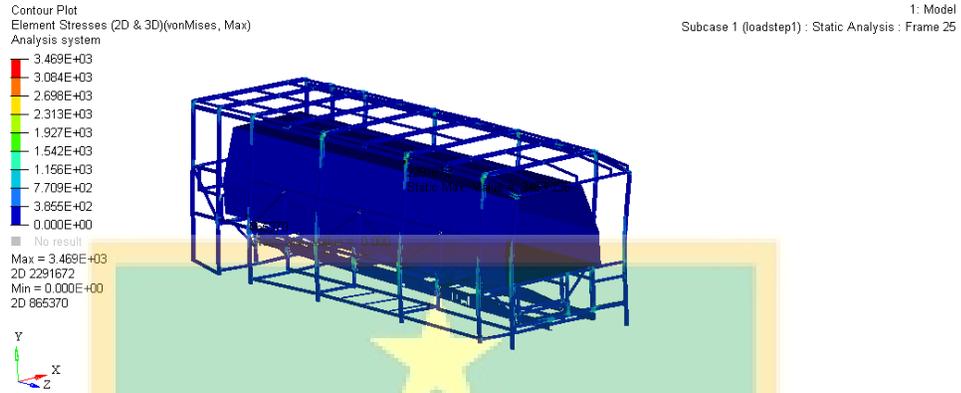


Figure 4 Static Test Result of Stress

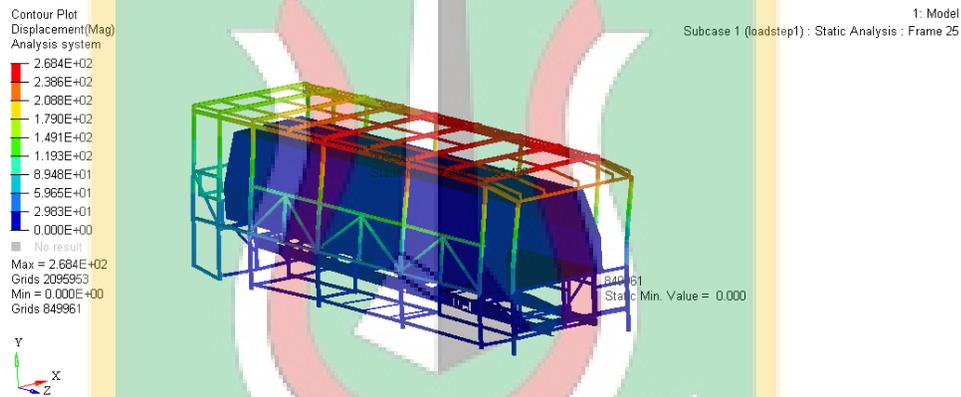


Figure 5 Static Test Result of Deformation

In the static test results, the maximum stress value occurs in the pillar joint and roof truss, while the maximum deformation occurs in the roof. Stress distribution is also common in the cantrail with roof and floor pillar joints. This happened because in static loading, the part that suffers the most stress is the part that there is contact between the load and the object that is on the roof of the bus. In addition, the other most influential part on the bus is the connection on the floor, but the resulting value is not so large because it is not a part that is directly in contact with the load.

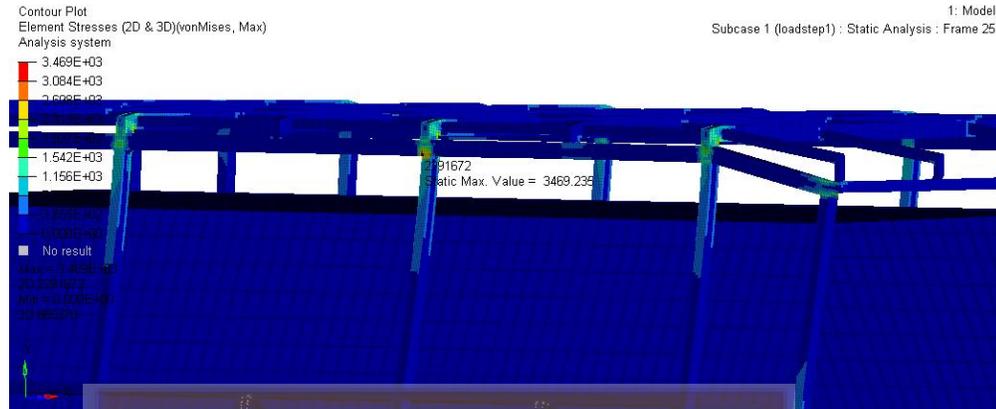


Figure 6 The Location of Maximum Stress

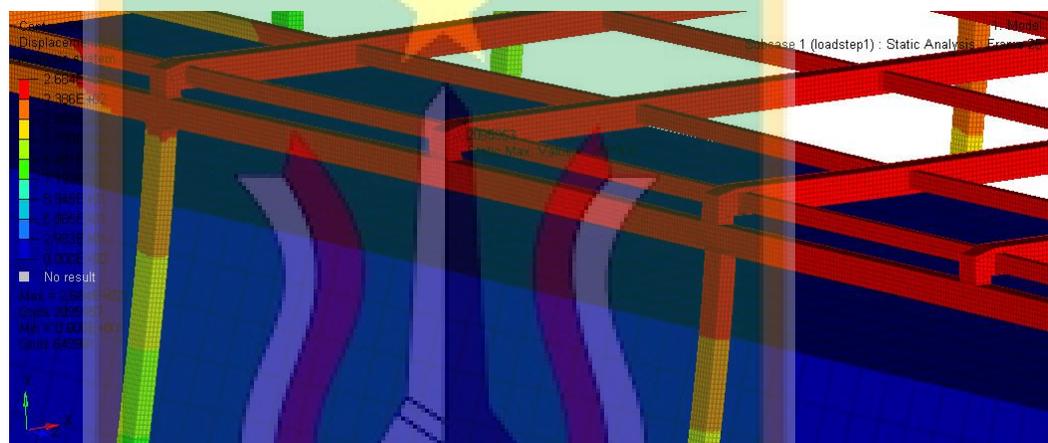


Figure 7 The Location of Maximum Deformation

Static test results show that the bus frame does not pass through the residual space, it can be concluded that the bus frame passes the rollover test. After conducting static tests, the convergence test is done by increasing the number of elements by reducing the elements size. Changes in the size of the elements are done by re-meshing the overall bus structure without changing its quality. Altair software can do this by selecting QI Optimize meshing. QI optimize is a meshing method when the shape of the size of the element changes and there is bad element, it will be corrected automatically according to predetermined parameters so that the quality of the elements is the same as the quality of the elements whose size has not been changed, even though the size and amount increases. The convergence test results for the number of elements with stress and the number of elements with deformation are:

Number of	Deformation	Error	Stress	Error
-----------	-------------	-------	--------	-------

Table 6
Convergence
Test Results

Elements	(mm)	(%)	(Pa)	(%)
4.62×10^5	260,29	0	3469,24	0
4.95×10^5	268,89	3,30	3485,87	0,47
5.02×10^5	269,75	3,63	3492,05	0,65
5.09×10^5	269,30	3,46	3497,58	0,81
5.18×10^5	269,29	3,46	3533,59	1,85
5.27×10^5	268,78	3,23	3531,68	1,79

Figure 8 Convergence Test Results between Number of Elements and Deformation

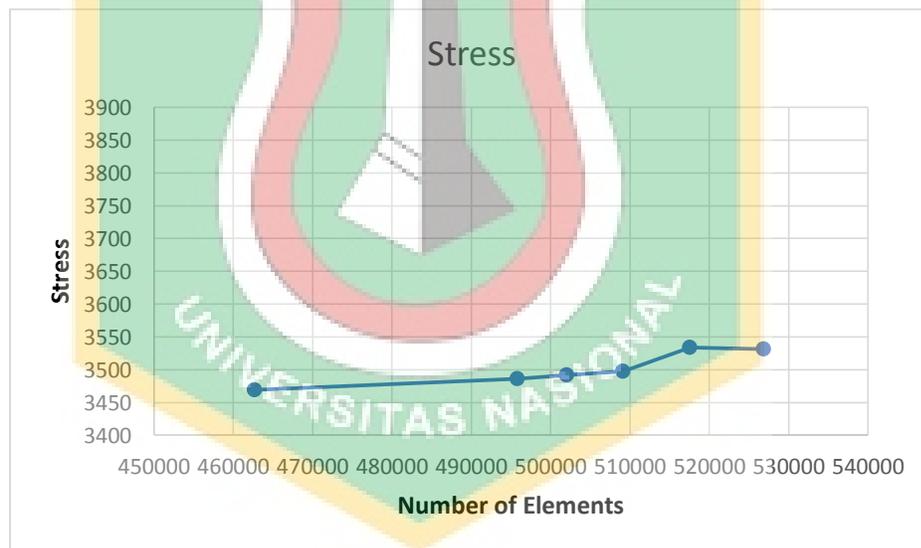


Figure 9 Convergence test result between Number of Elements and Stress

The convergence test results between the number of elements with respect to the change in deformation and with stress show convergent results. This can be seen from the convergence test chart which tends to be straight. Because the results are converging, the bus model modeled by the author is correct. However, the final result unit is Pa because the number that appears is 3469 Pa, if used as MPa is 3.47 MPa.

3.2 Dynamic Test Results

After a simulation of 1 hour and 13 minutes, the results in the form of deformation and stress are obtained. The picture below is the result of observation for 0.4 seconds (Figures 9 and 10).

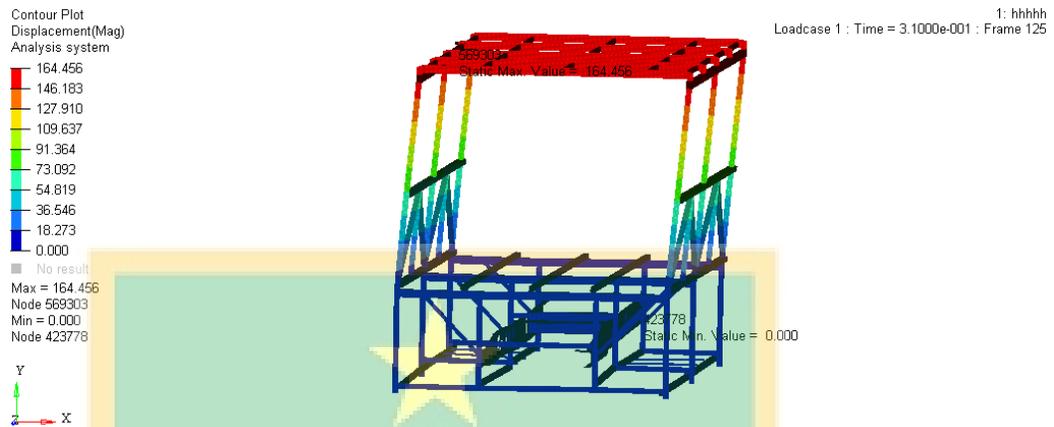


Figure 10 The Result of Defromation



Figure 11 The Result of Stress

From the picture above, the maximum deformation is 164,456 mm and occurs in the roof while the maximum stress is 235,500 MPa and occurs in the crossmember section shown in the figure below

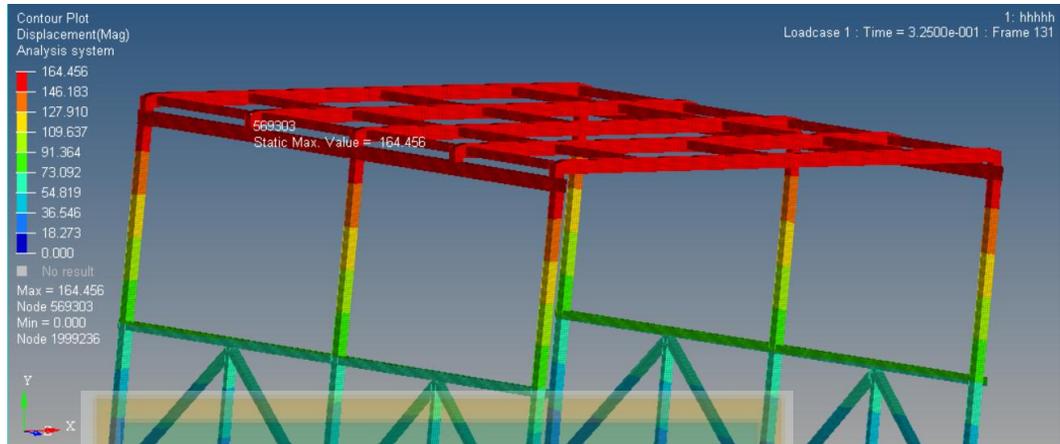


Figure 12 The Location of Maximum Deformation

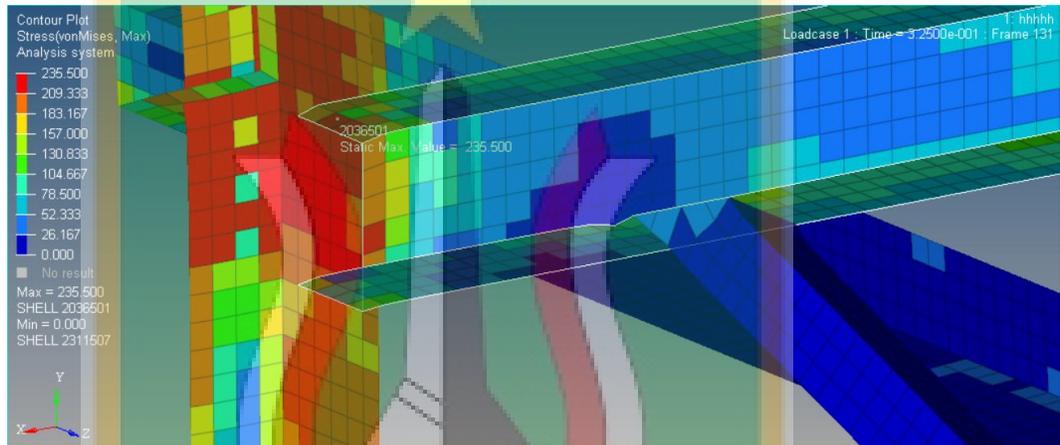


Figure 13 The Location of Maximum stress

Then for energy absorption, the energy absorbed by the bus structure is $1.8 \times 10^6 \text{ mJ}$, the value is obtained when the pendulum hits the bus structure. The energy absorbed will decrease because the kinetic energy is absorbed by the structure. Here is a graph of the energy generated from the simulation

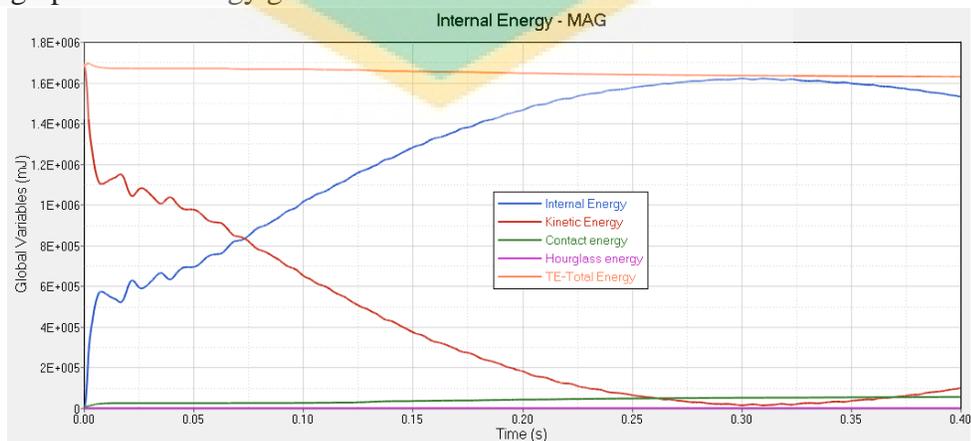


Figure 14 Energy Graph

The generated internal energy is 1.6×10^6 mJ, from the table above it can be seen that the internal energy continues to increase until 1.6×10^6 mJ, after that the internal energy does not increase again because the kinetic energy has reached 0 which means that energy kinetic has been absorbed by the structure and converted into internal energy.

Total energy is the amount of internal energy and kinetic energy. This energy will be equal to internal energy when kinetic energy has been absorbed by the structure. The total energy produced is 1.8×10^6 mJ and then drops to the same value as internal energy, which is 1.7×10^6 mJ.

Furthermore, Internal Energy is compared with its minimum energy. In accordance with UNECE R66 Regulation, Internal Energy is energy absorbed by the superstructure. Internal energy is symbolized by Ebs. Ebs according to UNECE R66 is the ability of structures to absorb energy. The results of the energy calculation (Emin) which refers to equations 2.6 and 2.7 are 1.56×10^7 mJ where the Ebs obtained from the simulation results are smaller than Emin. This means that the ability of the bus frame absorbs less energy than the minimum energy, then the bus is declared not passed the rolling test according to UNECE R66 annex 7. The Hourglass energy in the simulation results shows a value of 0 so that the simulation does not occur distortion in the elements and the energy error that appears is 14%.

According to UN-ECE R66 annex 2 and annex 5 regulations, if the bus frame structure enters the residual space then the bus superstructure is deemed not to have passed the test or is not safe. The simulation results show that the bus frame passes through the residual space because the distance between the frame and the residual space is 150mm while the simulation results above show that the frame deformation is 164,456mm, meaning the bus frame is not safe.

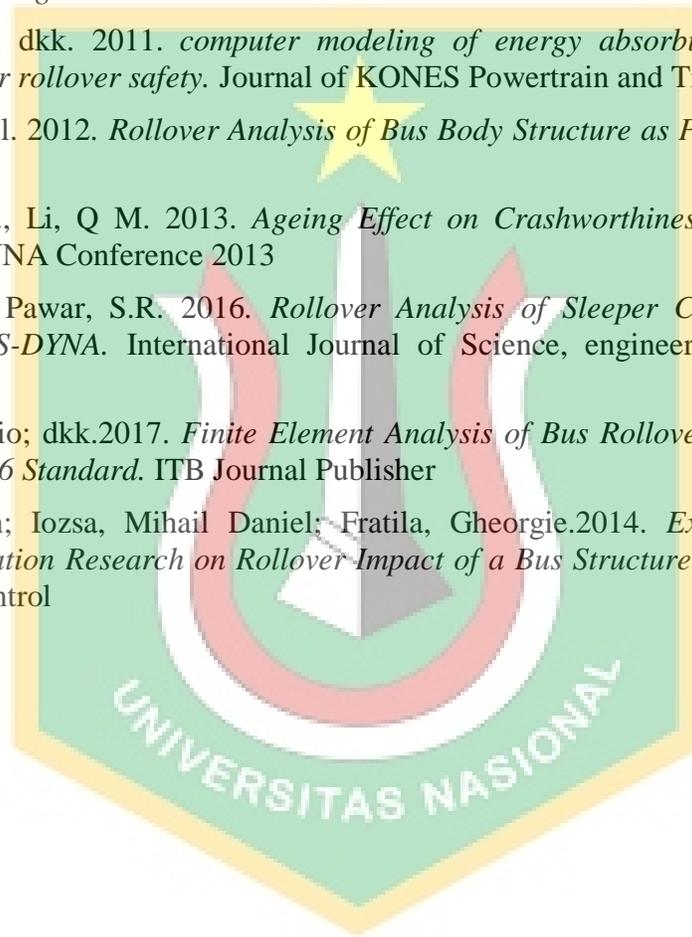
4. Conclusion

The conclusions that can be drawn in this study are the bus body did not pass the test because the bus frame passed through the residual space when tested which was 164,456mm. Because according to UNECE R66 standard, the distance between the frame and the residual space is 150mm, if it has passed that number then the frame has entered into the residual space and the maximum deformation of the bus frame when given a pendulum occurs at the roof of 164.456 mm, while the maximum stress occurs at the crossmember section of 235,500 MPa. The capabilities of the energy absorption from the bus structure when rollover is smaller than the minimum energy that required to be absorbed by the structure, so according to annex 7 of UNECE R66 the structure didn't pass the quasi static test. Because rollover is the most fatal accident, so the government must start to think and applied the harmonization of UNECE R66, so there isn't any usage of unsafe material and unsafe specification of bus structure by the effectuation of this regulation. For the bus manufacture, in order to make safer bus we recommend that bus manufacture must started the test independently, if there isn't any regulation that organize the strength of bus structure especially the strength of the structure when the bus

rolled. In this research, the drawback is still found so in the next research we recommend that for card material supposed to use MAT 36 for better calculation and accuracy because MAT 36 based from true stress-strain graph that obtained from real experiment of the material that being used for the bus structure. Also, for the better validity and reality, it's recommended to measure and draw the 3D CAD of the bus design based on the manufacturer data or engineering draw.

REFERENCES

- [1] Gursel, K.T. & Gursesli, S.2009. *Analysis of the Superstructure of a Designed Bus in Accordance with Regulations ECE R 66*. Journal of Science
- [2] Nurhadi, Indra., dkk. 2011. *computer modeling of energy absorbing capability of bus superstructure for rollover safety*. Journal of KONES Powertrain and Transport
- [3] Kumar, D Senthil. 2012. *Rollover Analysis of Bus Body Structure as Per AIS 031/ECE R66*. HTC 2012
- [4] A, H Ishkandar., Li, Q M. 2013. *Ageing Effect on Crashworthiness of Bus Rollover*.9th European LS-DYNA Conference 2013
- [5] Patil, Ajinkya., Pawar, S.R. 2016. *Rollover Analysis of Sleeper Coach Bus by Virtual Simulation in LS-DYNA*. International Journal of Science, engineering, and Technology Research
- [6] Wicaksono, Satrio; dkk.2017. *Finite Element Analysis of Bus Rollover Test in Accordance with UN ECE R66 Standard*. ITB Journal Publisher
- [7] Alexandru, Dan; Iozsa, Mihail Daniel; Fratila, Gheorgie.2014. *Experimental Test and Computer Simulation Research on Rollover Impact of a Bus Structure*. Journal of Advances in Automatic Control



Komputasi Rollover Test Pada Unit Medium Bus Untuk Kawasan Perumahan Dan Kota

Sylvia Carina Nugroho

Program Studi Teknik Fisika, Universitas Nasional

Erinnugroho57@gmail.com

Submitted:, Revised: , Accepted: ,

ABSTRAK

Kecelakaan bus terguling merupakan kecelakaan yang paling memakan banyak korban. Kecelakaan ini dipengaruhi oleh faktor kekuatan struktur bus. Pada penelitian ini dilakukan uji guling berdasarkan regulasi UNECE R66 untuk mengetahui kekuatan struktur bus ketika terguling. Telah dilakukan komputasi uji guling dengan menggunakan komputer. Komputasi dijalankan dengan dua metode yaitu statik yang digunakan untuk memvalidasi keakuratan model dan dinamik. Hasil uji statik ditemukan bahwa lokasi tegangan dan deformasi yang besar terdapat di bagian atap dan *cantrail* sebesar 3469,24 Pa mm dan 268,428. Hasil uji konvergensi menunjukkan bahwa model bus sudah konvergen dengan nilai error di bawah 5 persen dan hasil dinamik menunjukkan bahwa model bus mengalami deformasi sebesar 164.456mm, tegangan maksimum sebesar 235,500 MPa dan rangka bus melewati ruang residual dimana ruang residual yang diperbolehkan menurut regulasi UNECE R66 adalah 150mm
Kata kunci: Komputasi, UN-ECE R66, Uji Guling

ABSTRACT

Bus rollover crash is the accident that caused many fatalities. This accident caused by the strength of superstructure when it's rolled. This research done by using UNECE R66 regulation for determine the strength of the superstructure when the bus rolled. Rollover test computation using computer has been done. Computation obtained by two methods, static test, which is used for validating the accuracy of the model and dynamic tests. Static Test Results found that the location of the maximum stress and deformation found on the roof and cantrail. The result is 34692,4 Pa and 268,428 mm. The convergence test results show that the bus model has converged with an error value below 5 percent and the dynamic results show that the bus model has a very small deformation of 164.456mm and the maximum stress is 235,500 MPa, also the bus frame does pass through the residual space according to UNECE R 66 regulation is 150mm.

Keyword: *Computation, Rollover Test, UN-ECE R66*

1. Latar Belakang

Kecelakaan bus sering terjadi di Indonesia. Kecelakaan yang sering terjadi di Indonesia adalah tabrakan (samping, depan, belakang, maupun dengan kendaraan lain). Namun kecelakaan yang paling banyak memakan korban adalah terguling. Faktor yang mempengaruhi kecelakaan bus adalah faktor manusia. Selain manusia, ada faktor lain yang mempengaruhi banyaknya korban yaitu kekuatan struktur saat bus terguling. Berikut adalah tabel dari kecelakaan bus yang terjadi di Indonesia.

Tabel 1. Data Kecelakaan Bus yang Terjadi di Indonesia Selama 2015-2019 (sumber: KNKT dan Polda Metro Jaya)

Tahun	Tabrakan (Impact depan, belakang, dan samping)	Meninggal	Luka-luka	Terguling	Meninggal	Luka-luka
2015	11	17	31	6	33	107

2016	20	32	161	26	33	216
2017	14	14	12	18	23	123
2018	31	25	17	24	64	53
2019	36	8	13	23 (hingga Juni 2019)	20	59

Untuk mengurangi banyaknya korban yang berjatuh akibat bus terguling, dilakukan suatu uji yaitu uji guling. Uji guling dilakukan sesuai dengan standard internasional UNECE R66 yang banyak digunakan di berbagai negara. Di Indonesia sendiri masih sedikit yang melakukannya karena tidak adanya standar yang mengatur kekuatan struktur bus. Standar yaitu PP 55 Tahun 2012 hanya menuliskan struktur bus harus “kuat” menahan segala beban. Kuat disini bersifat sangat relatif dan berbeda-beda untuk setiap karoseri. Pengujian dilakukan dengan cara menggulingkan bus dari ketinggian 800mm, kemudian deformasi rangka dilihat, jika deformasi rangka melewati residual space. Residual space adalah ruang imajiner yang berbentuk trapezium dengan ketinggian 1250mm dan jarak antara rangka dan ruang residual adalah 150mm. Apabila rangka melewati 150mm, maka rangka dinyatakan masuk ruang residual yang artinya tidak lulus. Ada lagi yang menggunakan pendulum yang diberikan pada sepanjang bagian cantrail (bagian rangka samping atas). Jika menggunakan Teknik ini, residual space tidak perlu digambarkan, tetapi hanya mengerti acuannya saja yaitu 150mm, karena Teknik ini menggunakan perbandingan energi.

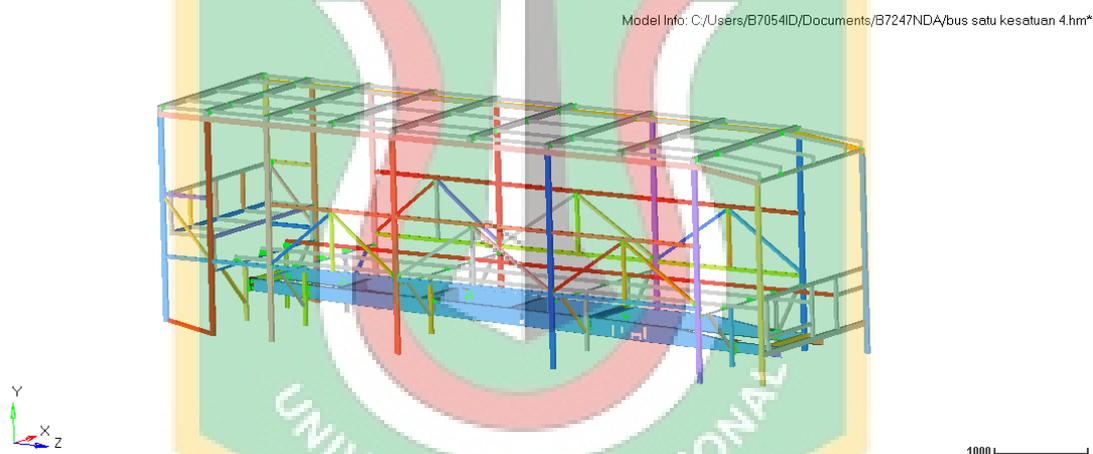
Penelitian uji guling berdasarkan standar ini (UNECE R66) telah dilakukan oleh banyak peneliti namun penelitian banyak dilakukan oleh peneliti luar negeri sebut saja pada tahun 2009[1] yang meneliti tentang bus berukuran 9 meter ketika terguling, hasilnya bus miliknya lolos uji guling dan dari penelitian tersebut dipetik tiga hal yaitu karakteristik kendaraan; terutama posisi titik berat keseluruhan bus dan bagian superstrukturnya; *displacement* pada *bearer* pusat (bagian *section* atau pilar bus); dan total energi yang dapat diserap oleh superstruktur bus. Kemudian pada tahun 2011[2], penelitian dilakukan dengan menggunakan bus berukuran besar (12 meter) yang ada di Indonesia. Hasilnya bus tersebut tidak lulus uji guling. Pada tahun 2012, Penelitian tentang bus yang didesain oleh salah satu engineer bus di India [3], hasilnya bus lulus uji guling. Tahun 2013 Ishkandar melakukan perbandingan kekuatan struktur bus antara yang berumur dengan yang baru ketika terguling. Hasil penelitian tersebut adalah bahwa bus yang telah berumur lebih riskan daripada yang masih baru. penelitian tentang bus volvo 9800 [4] ketika terguling yang menunjukkan bahwa struktur bus lolos uji guling. Penelitian tentang sleeper bus berdasarkan regulasi India yang setara dengan UNECE R66 yaitu AIS-119 yang digunakan untuk uji guling sleeper bus [5]. Hasilnya bahwa bus tidak lulus karena melewati ruang residual. Terakhir pada tahun 2017, datang dari Indonesia yaitu Wicaksono [6] yang meneliti tentang bus besar di Indonesia dengan menggunakan 2 metode yaitu yang diberikan beban penumpang dan dengan yang kosong. Hasilnya bus tidak lulus uji guling untuk kedua metode bahkan dengan diberikan beban penumpang, hasil deformasinya lebih parah.

Pada penelitian ini, dilakukan penelitian tentang kekuatan bus medium (berukuran 7-8 meter) yang didesain oleh peneliti. Peneliti ingin mengetahui apakah bus yang di desain peneliti lulus atau tidak Pengujian kekuatan bus medium dilakukan dengan menggunakan software *Altair Hyperworks*, Peneleti juga ingin mengetahui lokasi deformasi dan stress

maksimum dari rangka bus. Penelitian ini diharapkan dapat digunakan oleh karoseri di Indonesia sebagai acuan agar dapat membuat bus yang lebih aman lagi, digunakan sebagai referensi dan pengembangan tentang penelitian uji guling dan meningkatkan kesadaran bahwa terguling itu sangat fatal sehingga diperlukan bus yang memiliki kekuatan struktur yang baik. Selain itu juga mendorong pemerintahan agar dapat menerapkan standar untuk kekuatan struktur bus yang lebih kuantitatif lagi.

2. Metode Penelitian

Rangka bus Digambar dan dibuat sendiri. Referensi bus menggunakan bus milik perumahan G dan beberapa referensi lainnya yang didapat dari Internet. Bus Digambar sendiri karena peneliti tidak mendapat gambar Teknik dari karoseri yang membuat bus milik perumahan G. Gambar Teknik yang didapat dari Internet hanya berupa panduan saja dan pelengkap untuk beberapa bagian yang tidak dapat terukur karena memiliki struktur dan cara pemasangan yang berbeda dengan bus milik perumahan G. Bus yang didesain oleh peneliti juga memiliki beberapa modifikasi karena ada beberapa bagian yang tidak dapat diukur yaitu bagian atap, karena sudah terbungkus oleh plat. Gambar 3D Bus Digambar dengan menggunakan software Autodesk Inventor dan Solidwork. Berikut Gambar 3D Bus



Gambar 1 Gambar 3D CAD bus yang telah dimasukkan ke software simulasi

Kemudian masing-masing gambar diimpor ke software simulasi. Software simulasi yang digunakan adalah Altair Hyperworks. Gambar kemudian dibuat menjadi midsurface agar berubah menjadi elemen *shell*. Elemen *shell* adalah elemen 2.5D dimana sebenarnya elemen tersebut memiliki ketebalan namun ketebalannya sangatlah kecil. Setelah dilakukan midsurface, pipa-pipa digabungkan hingga menjadi satu kesatuan rangka bus. Setelah itu dilakukan *meshing* yaitu mengubah 3D menjadi elemen yang berupa kotak atau segitiga dimana masing-masing elemen terdapat kotak yang berisi rumus-rumus deformasi. Terakhir Setup simulasi dilakukan. Simulasi dilakukan dua metode yaitu statik dan dinamik. Statik dilakukan untuk uji konvergensi yaitu mengetahui bahwa hasil simulasinya akurat. Uji konvergensi dilakukan dengan menerapkan beban yang besarnya berbeda sebanyak 5 kali kemudian hasilnya diplotkan ke dalam grafik. Jika grafiknya lurus dan errornya kecil maka sudah akurat. Berikut Setup material dan pembebanannya:

Tabel 2. *Setup Material* untuk statik

Tipe Material	Steel
Densitas	7,85e-09 ton/mm ³
Modulus Young	210 N/mm ²
Poisson Ratio	0,3

Tabel 3. *Setup element* untuk statik

Tipe Properti	P1 Shell
Ketebalan	1,5 mm

Setup pembebanan dihitung dengan cara:

$$E_T = mg\Delta H \quad (2.1)$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

$$E_T = E_k \quad (2.3)$$

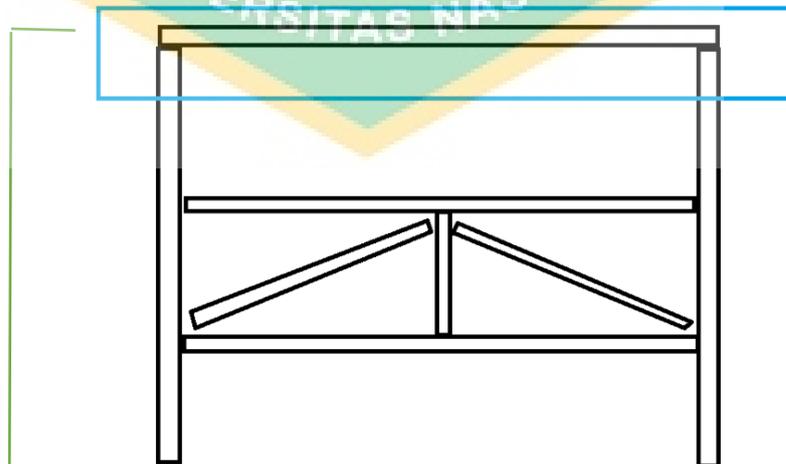
$$P = mv$$

$$P = Fxt \quad (2.4)$$

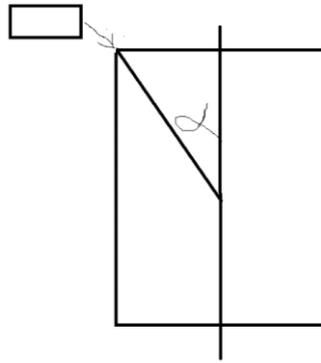
Pembebanan yang didapat sebesar 57599N, karena beban harus didistribusikan pada semua cantrail maka, besar pembebanannya adalah 10.6 N.

Untuk uji dinamik adalah uji yang sebenarnya. Uji ini dilakukan berdasarkan UNECE R66 annex 7 yaitu cantrail (sisi samping atas bus) diberikan pendulum. Prosedur untuk melakukan uji guling berdasarkan annex 7 sebagai berikut. Penerapan beban berupa pendulum harus dilakukan di sepanjang cantrail dengan sudut kemiringan

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin \frac{800}{Hc} \quad (2.5)$$



Gambar 2. HC (warna hijau) adalah tinggi dari tanah ke *cantrail*, biru adalah pendulum



Gambar 3. Kemiringan pendulum

Setelah itu hasil perbandingan energinya dihitungkan dengan cara melihat hasil simulasi yaitu energi internal atau energi totalnya. Energi internal yang terbaca adalah Ebs, artinya adalah energi yang mengindikasikan kemampuan rangka bus ketika terguling terlebih khusus ketika cantrail menyentuh tanah. Sesuai Annex 7, bus lulus uji guling ketika $E_{bs} > E_{min}$ dan tidak akan lulus uji ketika $E_{bs} < E_{min}$. Emin adalah energi minimum bus ketika terguling. Emin didapatkan dari

$$E_{min} = \sum_{i=1}^s E_i \quad (2.6)$$

Di mana

$$E_i = ET \frac{m_i}{M} \quad (2.7)$$

Berikut setup material dan pembebanannya:

Tabel 4. Setup material dinamik

Densitas	7,85e-006
Yield Strength	235MPa
Ultimate Strength	370MPa
Poisson Ratio	0,3
Ketebalan	1,5 mm
Modulus Young	210

Material yang digunakan mengikuti gambar Teknik yang beredar di Internet yaitu St 37. Kemudian *card image* material ditentukan. *Card image* digunakan untuk merumuskan deformasi dan tegangan. Johnson cook pada superstruktur dipilih karena lebih akurat.

Tabel 5. Setup card image

Superstruktur	MAT 2 Johnson Cook
Chassis	MAT 2 Johnson Cook
Rigid Wall	MAT 1 Elast
Lantai	MAT 1 Elast

Selanjutnya elemen *shell* dipilih, elemen yang dipilih adalah QEPH karena murah dan cepat

Tabel 6. Setup element

Nodal	Elemen	I shell	Integrasi	Harga dan waktu
4	Q4	1,2,3,4	Tidak penuh	Murah dan cepat

4	QEPH	24	Tidak Penuh	Murah dan Cepat
4	QBAT	12	Penuh	Lama dan Mahal

Setelah pemilihan elemen *shell*, pemilihan tipe kontak dipilih. Tipe kontak juga akan mempengaruhi keakuratannya. Tipe kontak yang dipilih adalah tipe 7 (*general puporse contact*). Tipe 7 terdiri dari dua elemen yaitu *slave* berupa titik yang sifatnya bergerak menumbuk dan *master* yang berupa permukaan yang sifatnya diam dan ditumbuk.

Setelah itu kecepatan pendulum ditentukan dengan perhitungan manual, adapun perhitungan manualnya:

$$E_T = 0.75mg\Delta H \quad (2.8)$$

$$E_k = E_T \text{ maka}$$

$$v^2 = \frac{ET}{\frac{1}{2}m} \quad (2.9)$$

Kecepatan pendulum yang didapat dari perhitungan adalah 1680 mm/s

Validasi software dapat dilakukan dengan 3 cara yaitu eksperimental, tingkat energi dan uji konvergensi. Validasi dilakukan pada penelitian ini dengan menggunakan cara uji konvergensi yaitu uji yang digunakan untuk mengetahui keakuratan hasil dengan cara memvariasikan jumlah elemen dengan hasil tegangan dan deformasinya yang kemudian diplotkan ke dalam Microsoft excel. Apabila plot hasil antara jumlah elemen dan hasil simulasi statiknya sudah menunjukkan lurus maka hasilnya sudah konvergen. Cara ini digunakan untuk seseorang yang pemula dalam menjalankan simulasi. Kekurangan dari cara ini adalah memakan waktu yang lama karena harus menjalankan simulasi ketika jumlah elemennya divariasikan. Metode kedua merupakan metode yang diterapkan oleh pembuat software yaitu metode error energi. Di sini software akan menghitung secara otomatis error energinya ketika simulasi dijalankan. Apabila dalam iterasi muncul energi error sebesar 99.9% maka software akan otomatis memberhentikan simulasinya karena hasilnya sudah tidak akurat dan cenderung divergen. Perhitungan error energi yang dilakukan software adalah:

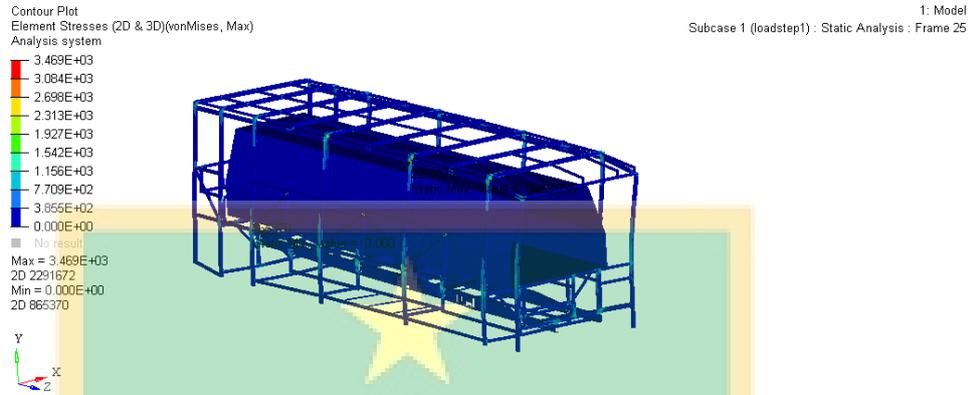
$$\%E = \frac{E_k + E_k^T + E_i}{E_{k,1} + E_{k,1}^T + E_{wk} - E_{wk,1}} \quad (2.10)$$

Apabila error yang terjadi menunjukkan tanda negatif, maka energinya terdisipasi dan jika tidak ada tanda negatif tetapi naik maka ada energi yang terbentuk. Energi yang terbentuk disarankan tidak boleh lebih dari 20%. Selain itu validasi juga dapat dilihat dari energi hourglassnya juga. Energi hourglass adalah energi yang tidak terekam (tercatat) ketika elemen mengalami deformasi dan tegangan sehingga elemen tersebut terdistorsi. Energi hourglass diperbolehkan asalkan tidak melewati 15% jika mengikuti arahan software dan tidak lebih dari 5% jika mengikuti UNECE R66.

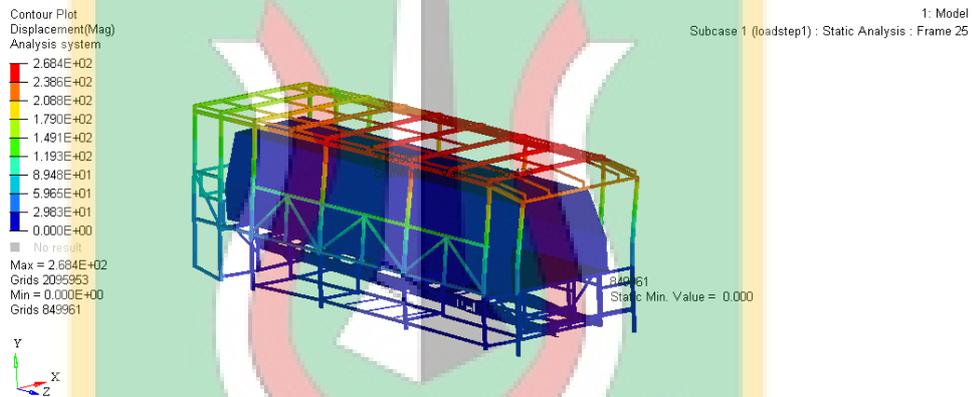
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Uji statik

Setelah dilakukan komputasi, hasil berupa deformasi dan *stress* didapatkan. berupa gambar dan angka. Berikut gambar uji statik (Gambar 3 dan 4):

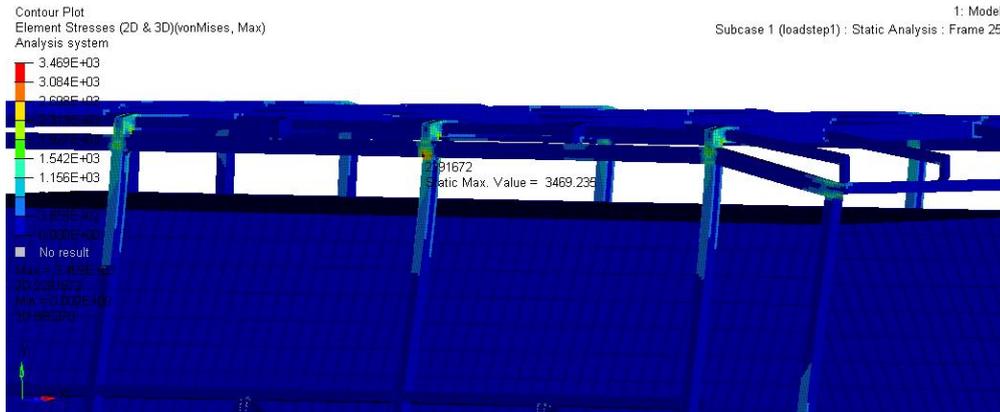


Gambar 4. Hasil Tegangan statik

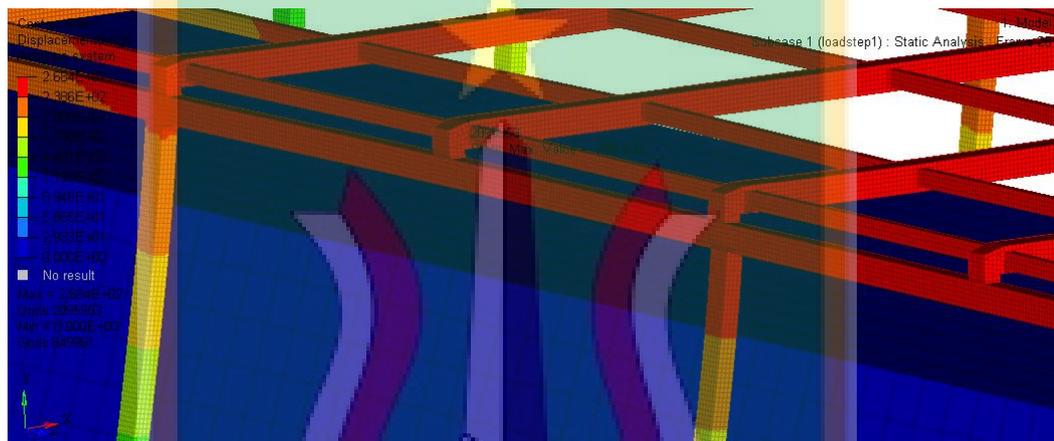


Gambar 5. Hasil Deformasi statik

Pada hasil uji statik, nilai *stress* maksimum terjadi pada sambungan pillar dan rangka atap, sedangkan deformasi maksimumnya terjadi pada bagian atap. Distribusi tegangan juga banyak terjadi pada bagian *cantrail* dengan atap dan sambungan pillar lantai. Hal ini terjadi karena pada pembebanan statik, bagian yang mengalami *stress* terbesar adalah bagian yang terdapat kontak antara beban dengan bendanya yaitu pada bagian atap bus. Selain itu bagian lainnya yang paling berpengaruh di bus adalah sambungan di bagian lantai, namun nilai yang dihasilkan tidak begitu besar karena bukan merupakan bagian yang terkena kontak langsung dengan beban.



Gambar 6. Lokasi tegangan maksimum



Gambar 7. Lokasi deformasi maksimum yang bewarna merah

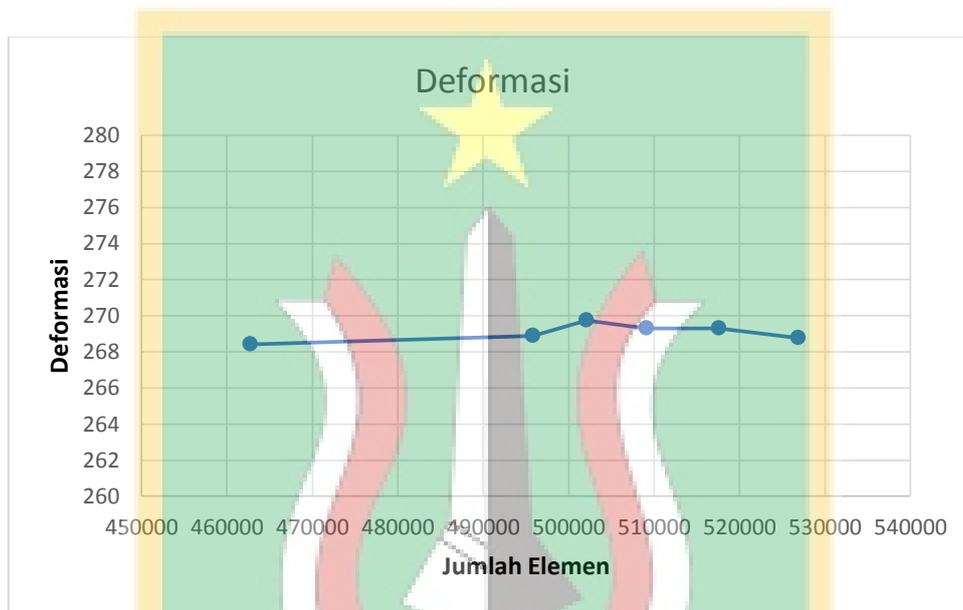
Hasil uji statik menunjukkan bahwa rangka bus tidak melewati ruang residual, maka dapat disimpulkan bahwa rangka bus lulus uji guling.

Setelah melakukan uji statik, uji konvergensi dilakukan dengan cara menambah jumlah elemen dengan memperkecil elemennya. Perubahan ukuran elemen dilakukan dengan cara melakukan *meshing* ulang struktur bus secara keseluruhan tanpa mengubah kualitasnya. *Software* Altair dapat melakukan hal tersebut dengan cara memilih *meshing QI Optimize*. *QI optimize* adalah sebuah metode *meshing* di mana ketika bentuk elemen ukurannya berubah menghasilkan elemen yang buruk, maka akan diperbaiki secara otomatis sesuai parameter yang telah ditetapkan agar kualitas elemen sama seperti kualitas elemen yang ukurannya belum dirubah, meskipun ukuran dan jumlahnya bertambah.

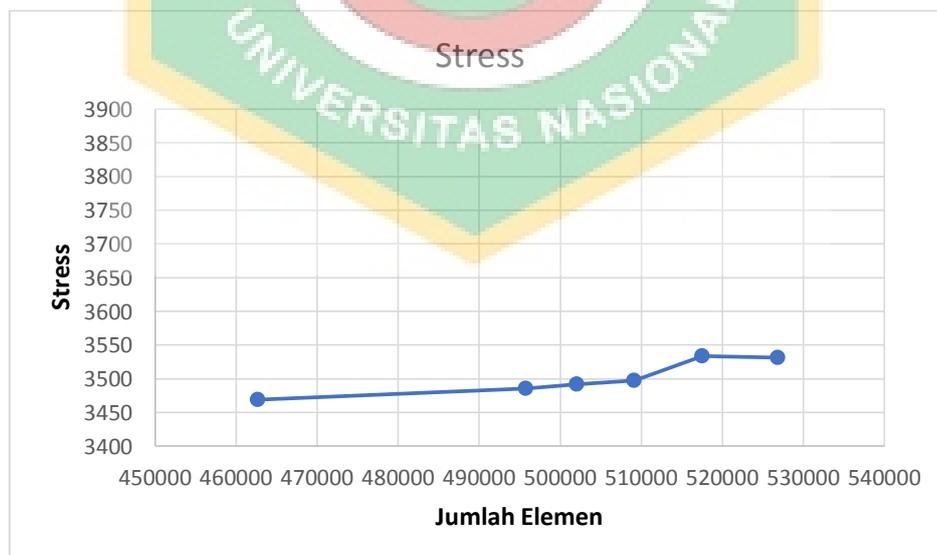
Hasil uji konvergensi jumlah elemen dengan *stress* dan jumlah elemen dengan deformasi adalah:

Tabel 7. Hasil uji konvergensi

Jumlah Elemen	Deformasi (mm)	Error (%)	Stress (Pa)	Error (%)
4.62×10^5	260,29	0	3469,24	0
4.95×10^5	268,89	3,30	3485,87	0,47
5.02×10^5	269,75	3,63	3492,05	0,65
5.09×10^5	269,30	3,46	3497,58	0,81
5.18×10^5	269,29	3,46	3533,59	1,85
5.27×10^5	268,78	3,23	3531,68	1,79



Gambar 8. hasil uji konvergensi jumlah elemen terhadap deformasi



Gambar 9. Hasil uji konvergensi jumlah elemen terhadap tegangan

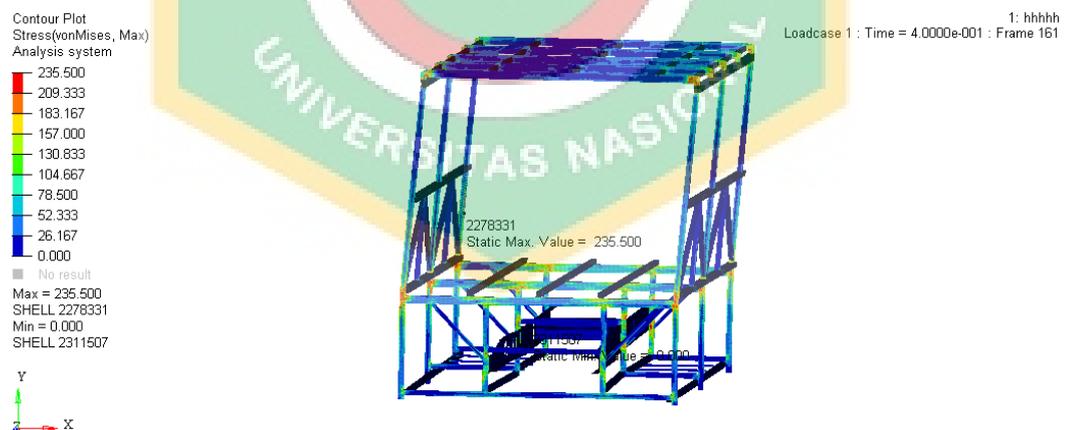
Hasil uji konvergensi antara jumlah elemen terhadap perubahan defromasinya dan terhadap tegangan menunjukkan hasil yang konvergen. Hal ini dapat dilihat dari grafik uji konvergensi yang cenderung lurus. Karena hasil sudah konvergen, maka model bus yang dimodelkan oleh penulis sudah bisa dikatakan benar. Namun satuan hasil akhirnya adalah Pa karena angka yang muncul adalah 3469 Pa, jika dijadikan MPa adalah 3.47 MPa.

3.2. Hasil Uji Dinamik

Setelah dilakukan simulasi selama 1 jam dan 13 menit, hasil berupa deformasi dan tegangan didapatkan. Gambar di bawah ini merupakan hasil pengamatan selama 0.4 detik (Gambar 9 dan 10).

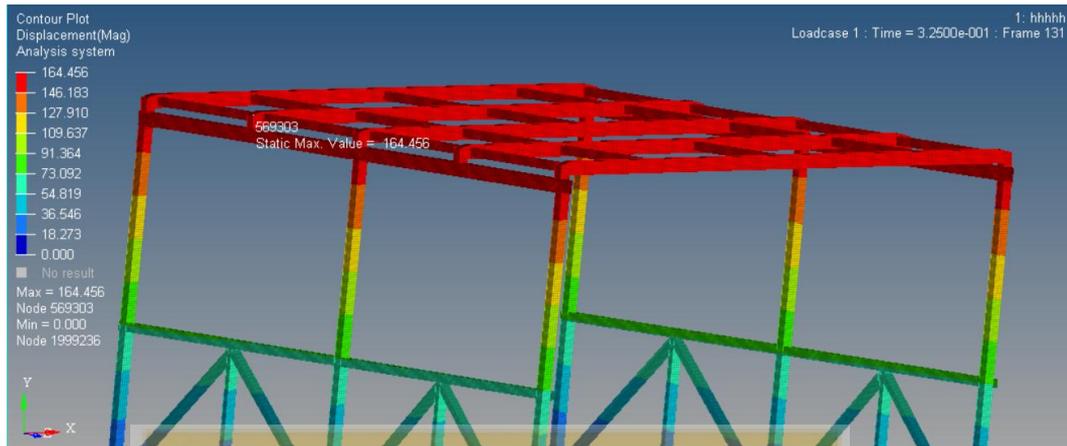


Gambar 10. Hasil deformasi uji dinamik

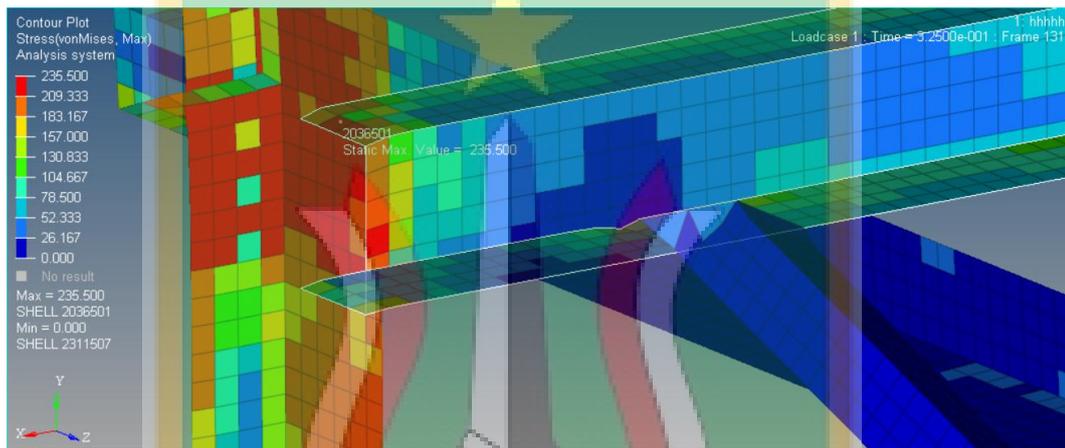


Gambar 11. Hasil tegangan uji dinamik

Dari gambar di atas deformasi maksimum adalah 164,456 mm dan terjadi pada bagian atap sedangkan untuk tegangan maksimumnya adalah 235,500 MPa dan terjadi pada bagian *crossmember* yang ditunjukkan pada gambar di bawah.

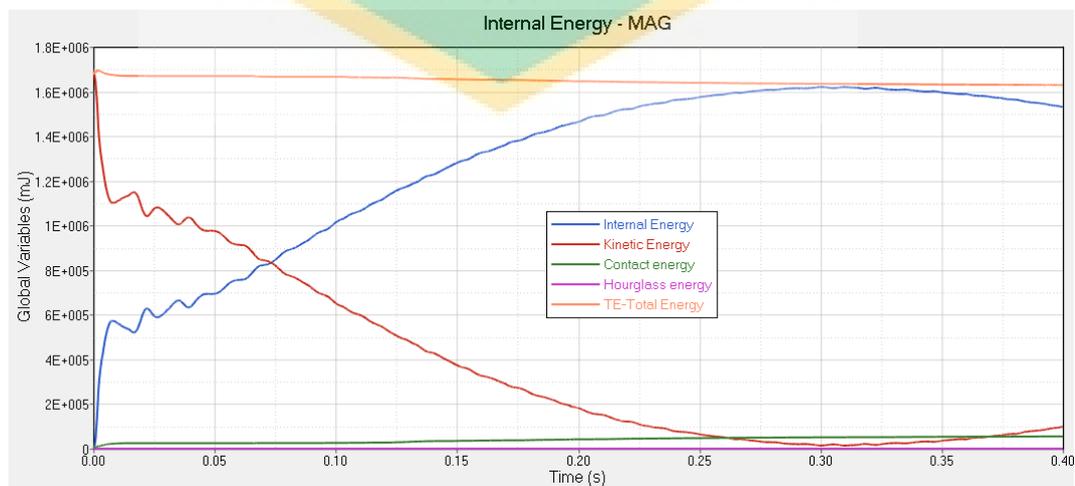


Gambar 12. Lokasi deformasi maksimum



Gambar 13. Lokasi tegangan maksimum, terjadi pada bagian crossmember.

Kemudian untuk penyerapan energi, energi yang diserap oleh struktur bus sebesar 1.8×10^6 mJ, Nilai tersebut didapat ketika pendulum mengenai struktur bus. Energi yang diserap ini akan mengalami penurunan karena energi kinetik diserap oleh struktur. Berikut adalah grafik energi yang dihasilkan dari simulasi



Gambar 14. Tabel energi

Energi internal yang dihasilkan sebesar 1.6×10^6 mJ, dari tabel di atas dapat dilihat bahwa energi internal terus mengalami peningkatan hingga 1.6×10^6 mJ, setelah itu internal energi tidak bertambah lagi karena energi kinetik telah mencapai 0 yang artinya energi kinetik telah diserap oleh struktur dan diubah menjadi energi dalam.

Energi total adalah jumlah energi internal dan energi kinetik. Energi ini akan bernilai sama dengan energi internal ketika energi kinetik telah diserap semuanya oleh struktur. Energi total yang dihasilkan sebesar 1.8×10^6 mJ kemudian turun hingga bernilai sama seperti energi internal, yaitu 1.7×10^6 mJ.

Selanjutnya Energi Internal dibandingkan dengan energi minimum nya. Sesuai Regulasi UNECE R66, Energi Internal adalah energi yang diserap oleh superstruktur. Energi internal dilambangkan dengan Ebs. Ebs menurut UNECE R66 adalah kemampuan struktur untuk menyerap energi. Hasil perhitungan energinya (E_{min}) yang merujuk pada persamaan 2.6 dan 2.7 adalah 1.56×10^7 mJ dimana Ebs yang didapatkan dari hasil simulasi lebih kecil daripada E_{min} . Berarti kemampuan rangka bus menyerap energi lebih kecil daripada energi minimumnya, maka bus dinyatakan tidak lulus uji guling menurut UNECE R66 annex 7. Energi Hourglass pada hasil simulasi menunjukkan nilai 0 sehingga simulasi tidak terjadi distorsi pada elemen dan error energi yang muncul adalah sebesar 14%.

Menurut regulasi UN-ECE R66 annex 2 dan annex 5, apabila struktur rangka bus masuk ke dalam ruang residual maka superstruktur bus dianggap tidak lulus uji atau tidak aman. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rangka bus melewati ruang residual karena jarak antara rangka dan ruang residual adalah 150mm sedangkan hasil simulasi di atas, menunjukkan bahwa deformasi rangka sebesar 164,456mm, artinya rangka bus tidak aman.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik pada penelitian ini adalah:

1. *Body* bus tidak lulus uji karena rangka bus melewati ruang residual ketika diuji yaitu 164,456mm. Karena menurut standar UNECE R66, jarak antar rangka dan ruang residual adalah 150mm, jika sudah melewati angka tersebut maka rangka sudah masuk ke dalam ruang residual.
2. Deformasi maksimum rangka bus ketika diberi pendulum terjadi pada bagian atap sebesar 164,456 mm, sedangkan tegangan maksimum terjadi pada bagian *crossmember* sebesar 235,500 MPa

4.2 Saran

4.2.1 Saran Untuk Penelitian selanjutnya

1. Untuk penelitian selanjutnya sebaiknya menggunakan material tipe MAT 36 yang lebih akurat karena berdasarkan grafik *true stress-strain* yang perhitungannya berdasarkan luas penampang dan gaya aktual
2. Melakukan pengukuran secara mandiri berdasarkan gambar teknik, usahakan untuk meminta gambar teknik pada pabrik karoseri yang mau memberikan data gambar Teknik

4.2.2 Saran untuk Pemerintah

1. Sebaiknya pemerintah mulai memberlakukan harmonisasi terhadap UNECE R66. Karena dengan diberlakukannya standar ini maka, tidak ada lagi penggunaan material dan konstruksi untuk rangka yang tidak aman.

4.2.3 Saran untuk Karoseri

1. Sebaiknya melakukan uji kekuatan struktur secara mandiri apabila belum ada regulasi yang mengatur

REFERENSI

- [1] Gursel, K.T. & Gursesli, S.2009. *Analysis of the Superstructure of a Designed Bus in Accordance with Regulations ECE R 66*. Journal of Science
- [2] Nurhadi, Indra., dkk. 2011. *computer modeling of energy absorbing capability of bus superstructure for rollover safety*. Journal of KONES Powertrain and Transport
- [3] Kumar, D Senthil. 2012. *Rollover Analysis of Bus Body Structure as Per AIS 031/ECE R66*. HTC 2012
- [4] A, H Ishkandar., Li, Q M. 2013. *Ageing Effect on Crashworthiness of Bus Rollover*.9th European LS-DYNA Conference 2013
- [5] Patil, Ajinkya., Pawar, S.R. 2016. *Rollover Analysis of Sleeper Coach Bus by Virtual Simulation in LS-DYNA*. International Journal of Science, engineering, and Technology Research
- [6] Wicaksono, Satrio; dkk.2017. *Finite Element Analysis of Bus Rollover Test in Accordance with UN ECE R66 Standard*. ITB Journal Publisher
- [7] Alexandru, Dan; Iozsa, Mihail Daniel; Fratila, Gheorgie.2014. *Experimental Test and Computer Simulation Research on Rollover Impact of a Bus Structure*. Journal of Advances in Automatic Control



Kata Pengantar

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan pertolongan kepada penulis agar penulis dapat menyelesaikan tugas akhir. Tanpa Pertolongannya, penulis tentunya tidak akan sanggup menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Komputasi *Rollover Test* pada Unit Medium Bus untuk Perumahan dan Perkotaan”.

Penulis tentu menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna dan masih banyak kesalahan serta kekurangan di dalam penyusunannya. Maka, penulis mengharapkan kritik dan saran pembaca tugas akhir ini, agar dalam penyusunan tugas akhir ini kedepannya dapat lebih baik lagi. Apabila Penulis memiliki kesalahan pada tugas akhir ini, penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya.

Penulis juga mengucapkan Terima Kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini, pihak-pihak tersebut adalah:

1. Orang tua penulis terutama Ibu penulis yang telah meluangkan waktu untuk membimbing penulis dalam pengerjaan laporan tugas akhir
2. Para Dosen pembimbing yang telah membimbing penulis hingga menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak Martogi Sitanggang dari pihak perumahan G yang telah memberikan izin agar penulis dapat memakai bus milik perumahan G sebagai referensi model dalam tugas akhir ini.
4. Para Supir (*Driver*) dan *Helper* (Petugas Layanan Bus) *shuttle bus* perumahan G yang memberikan penulis semangat untuk mengerjakan tugas akhir.

Jakarta, 3 Februari 2020

Sylvia Carina Nugroho
197005426017

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I LATAR BELAKANG	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan.....	4
1.4. Batasan Masalah	5
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB II DASAR TEORI	7
2.1. Kebaruan Penelitian (<i>State of the art</i>).....	7
2.2. Studi Literatur	11
2.2.1. <i>Stress</i> (Tegangan).....	11
2.2.2. <i>Plane Stress</i> dan <i>Plane Shear</i>	11
2.2.3. Teori Kegagalan	13
2.3. <i>Finite Element Method</i>	16
2.3.1. Jenis-Jenis Elemen.....	16
2.4. Validasi Software	18
2.5. Uji Guling UN-ECE R 66	20
2.5.1. Superstruktur	20
2.5.2. <i>Residual Space</i>	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1. Metodologi Penelitian	23
3.2. Pengumpulan Data	25
3.2.1. Metode Pengumpulan Data Dimensi Rangka Bus	25
3.3. Ekspektasi Penelitian	25
3.4. Prosedur Uji Guling.....	25
3.5. Pemodelan	29
3.5.1. Pemodelan 3D CAD	29
3.5.2. Meshing	33
3.5.3. <i>Setup Boundary</i> untuk Statik	42
3.5.4. <i>Setup Boundary</i> untuk Dinamik.....	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	51
4.1. Hasil Simulasi Statik	51

4.2 Hasil Uji Dinamik.....	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	59
5.1 Kesimpulan.....	59
5.2 Saran	59
REFERENSI	60
LAMPIRAN	62



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi pengambilan data bus Referensi	62
Lampiran 2. Tabel daftar istilah	66



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Data Kecelakaan Bus yang Terjadi di Indonesia Selama 2015-2019 (sumber: KNKT dan Polda Metro Jaya)	1
Tabel 3.1	Kualitas <i>Meshing</i>	39
Tabel 3.2	Tipe Material.....	42
Tabel 3.3	Tipe Properti	42
Tabel 3.4	Konsistensi Unit.....	44
Tabel 3.5	Kriteria Material ST 37.....	46
Tabel 3.6	Tabel <i>Card Image Material</i>	46
Tabel 3.7	Tabel <i>shell element</i>	47
Tabel 4.1	Hasil Uji Konvergensi	53

