

LS-DYNA Application for Calculation of Energy Absorption Capacity on Bus Rollover Accident

Abdul Hakim Masyhur¹, Ahmad Fauzan Suryono¹, Sandro Mihradi^{1,*}, Indra Nurhadi¹, dan Satrio Wicaksono¹

¹Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung - Bandung

*Korespondensi: sandro@ftmd.itb.ac.id

Abstract. Rollover accidents have become a critical issue in many countries in the world since it is one mode that often causes several fatal and serious injuries to passengers and bus crews. Therefore, a specific test to examine the strength of the bus superstructure prototype before the bus has a road worthy license needs to be carried out. The test is referred to the standards that are already applied at the specific country. One of the standards that are already implemented at several countries is ECE-R66 (Economic Commission for Europe- Regulation 66) which regulates the construction and design of many types of passenger vehicles. In this research, the testing of the strength of the bus structure was performed by simulation of rollover test using a software called LS-Dyna version 971. The purpose of this research is to evaluate the capability of LS-Dyna while calculating the energy absorption capacity and deformation occurred at the bus superstructure due to impact loading. The part of bus superstructure that was analyzed and modeled is the body section at middle part of the bus based on the geometric data owned by one of the bus body manufacturer in Indonesia. The safety criteria based on ECE-R66 is the deformation occurring at the bus superstructure after experiencing an impact loading due to rollover should not interfere the specified residual space. Furthermore, the stress at the bus superstructure should not be over the ultimate stress of the material to prevent failure. Simulation results show that the pillars and the wall-reinforcement frames have a significant effect on the strength of the bus superstructure. From this research, it can be concluded that LS-Dyna does have a compatibility to be utilized for dynamic testing simulation of the bus superstructure. Therefore, simulation result from LS-Dyna may be recommended as consideration for government to formulate the regulation for passenger safety in Indonesia.

Abstrak. Kecelakaan terguling telah menjadi isu penting di berbagai negara karena merupakan salah satu penyebab utama banyaknya jumlah kematian dan luka serius bagi penumpang serta awak bus. Oleh sebab itu, perlu dilakukan pengujian terhadap kekuatan superstruktur prototipe bus sebelum bus tersebut memperoleh izin laik jalan. Pengujian ini berpedoman pada standar dan regulasi yang berlaku pada suatu negara. Salah satu standar yang menjadi referensi adalah *ECE-R66 (Economic Commission or Europe- Regulation 66)*. Dalam penelitian ini, metode pengujian kekuatan struktur bus dilakukan dengan simulasi uji guling (*rollover test*) menggunakan perangkat lunak *LS Dyna* versi 971. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kesesuaian perangkat lunak tersebut saat menghitung kapasitas penyerapan energi dan deformasi yang terjadi pada superstruktur apabila mengalami pembebanan impak. Bagian superstruktur bus yang dimodelkan dan dianalisis adalah *body section* pada bagian tengah bus dengan mengacu pada data geometri dari salah satu perusahaan karoseri bus. Kriteria keselamatan menurut *ECE-R66* adalah deformasi superstruktur bus setelah mengalami beban impak akibat terguling tidak melewati batas *residual space*. Selain itu tegangan yang bekerja pada superstruktur tidak boleh melewati kekuatan tarik (*ultimate strength*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa pilar-pilar dan *frame* penguat dinding samping, depan, dan belakang memiliki pengaruh yang besar terhadap kekuatan superstruktur bus. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa *software LS-Dyna* mempunyai kesesuaian untuk digunakan dalam mensimulasikan pengujian dinamik superstruktur bus. Oleh karena itu, hasil simulasi *LS-Dyna* dapat direkomendasikan sebagai bahan pertimbangan untuk membuat regulasi keselamatan penumpang di Indonesia.

Kata kunci: residual space, uji guling, uji impak, LS-DYNA, karoseri bus

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Bus merupakan salah satu moda transportasi massal yang banyak digunakan di Indonesia. Sebagai kendaraan yang bisa mengangkut banyak

penumpang, aspek keselamatan awak dan penumpang merupakan hal penting yang harus diperhatikan khususnya saat terjadi kecelakaan.

Salah satu jenis kecelakaan bus yang banyak terjadi adalah kecelakaan terguling (*rollover*). Berda-

sarkan data kecelakaan bus dari Departemen Transportasi Amerika Serikat tahun 1996-2005 bahwa telah terjadi 48 kasus kecelakaan bus yang berbahaya dengan korban jiwa sebanyak 146. Dari 48 kasus tersebut, 14 diantaranya atau 29 % adalah terguling. Sedangkan jumlah korban yang disebabkan kasus terguling adalah 49 orang dari 146 orang atau 34 % dari data keseluruhan [1]. Sedangkan untuk data kecelakaan di Indonesia yang dialami oleh bus pada periode 2008-2010, kecelakaan bus dengan modus terguling lebih besar lagi yaitu dua puluh kasus dari empat puluh kejadian terguling (50%). Jumlah korbanpun tidak sedikit, yakni 56 korban meninggal serta 215 luka berat dan ringan [2].

Berdasarkan informasi di atas, desain struktur bus harus dirancang sedemikian rupa untuk memberikan keselamatan bagi penumpang dan awaknya pada kondisi terburuk sekalipun. Rancangan rangka superstruktur bus harus bisa meminimalkan tingkat fatalitas bagi para penumpang dan awak jika kecelakaan terjadi.

Beberapa kasus kecelakaan terguling bisa diminimalisir dampaknya kepada para penumpang dengan merancang superstruktur bus yang mempunyai kekuatan tertentu sehingga bisa mengantisipasi terjadinya *collapse* atau deformasi yang berlebihan. Deformasi yang terjadi pada rangka diatur agar tidak melewati daerah aman (*residual space*) sehingga diharapkan tidak menimbulkan cedera serius pada penumpang. Daerah aman (*residual space*) didefinisikan sebagai daerah yang melingkupi ruang penumpang, awak bus, dan ruang sopir yang memungkinkan keselamatan penumpang, awak serta sopir bus apabila terjadi kecelakaan terguling [3]. Dasar pemikiran untuk menyediakan ruang aman inilah yang melahirkan peraturan-peraturan pada suatu negara sehingga bisa meminimalisir jumlah korban yang ditimbulkan.

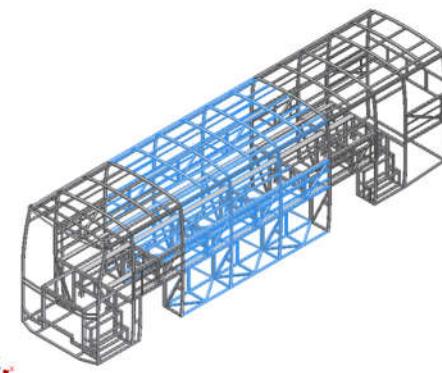
Regulasi yang banyak dipakai saat ini mengenai kekuatan superstruktur adalah UN-ECE R66 (*United Nations – Economic Commission for Europe*). Regulasi ini tidak hanya dipakai untuk kawasan Eropa tetapi juga di negara-negara lain, seperti Afrika Selatan dan Australia, banyak mengadopsinya sebagai standar pengujian kekuatan superstruktur kendaraan bus.

Dalam penelitian ini dilakukan simulasi pengujian terguling berbasis metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak *LS-Dyna*. Penggunaan metode elemen hingga memiliki keuntungan dari segi efisiensi waktu dan penghematan biaya produksi daripada melakukan pengujian terguling yang sebenarnya. Geometri model superstruktur yang diuji dengan metode elemen hingga

dapat disesuaikan dengan dimensi dari bus sebenarnya. Sedangkan gaya-gaya yang bekerja juga dapat disesuaikan dengan standar pengujian yang mengacu kepada ECE-R66. Perangkat lunak *LS-Dyna* dipilih karena cocok untuk kondisi pemberian yang bersifat dinamik. Model yang disimulasikan adalah berdasarkan data geometri dari karoseri bus produksi PT. Rahayu Sentosa dengan mengambil bagian tengah (*body section*) dari struktur bus tersebut. Melalui simulasi ini akan dianalisis tingkat keamanan kendaraan tersebut berdasarkan standar ECE-R66.

Pemodelan Geometri Superstruktur

Rancangan superstruktur pada bus terdiri dari tiga bagian utama yaitu bagian depan (*front body section*), bagian tengah (*middle body section*) dan bagian belakang (*rear body section*). Pada penelitian ini yang dibahas adalah uji guling (*rollover test*) pada superstruktur bagian tengah seperti yang terlihat pada gambar 1.

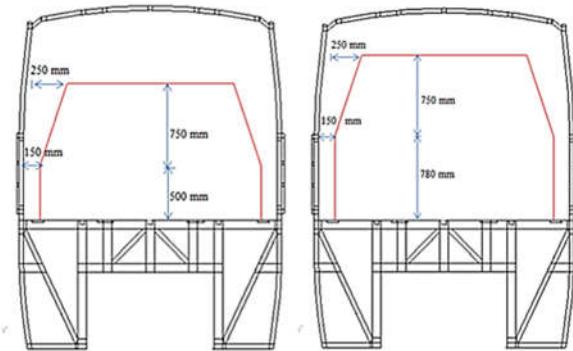


Gambar 1. Bagian Middle Body Section Bus

Untuk kasus ini daerah aman penumpang (*residual space*) mengalami sedikit perbedaan dengan standar *UN ECE-R66*. Pada standar *UN ECE-R66* tinggi *residual space* adalah 1250 mm yang diukur dari lantai. Sedangkan pada penelitian ini tingginya bertambah menjadi 1530 mm [4]. Penambahan ukuran ini berasal dari pertimbangan regulasi *UN ECE-R66* menyatakan bahwa semua kontur dalam bus harus diperhitungkan pengaruhnya terhadap *residual space*. Pada interior desain bus umumnya memiliki bagasi sebagai tempat penyimpanan barang, tetapi pada pemodelan tempat bagasi tersebut tidak digambarkan. Padahal bagasi tersebut berpengaruh pada uji guling karena akan menyebabkan semakin kurangnya ruang bebas antara *residual space* dengan superstruktur. Gambar 2 menunjukkan perbedaan *residual space* sebelum dan sesudah dimodifikasi.

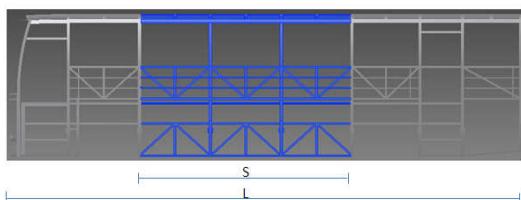
Konsekuensi penambahan *residual space* ini adalah deformasi yang terjadi pada superstruktur kendaraan harus semakin kecil sehingga tidak

menyentuh *residual space*. Untuk mencapai tujuan tersebut maka kekuatan strukturnya harus lebih besar dari kondisi pengujian dengan menggunakan standar baku *ECE-R66*.



Gambar 2. *residual space* sebelum dan sesudah dimodifikasi

Model metode elemen hingga untuk kasus superstruktur bus terguling (*rollover*) terdiri atas beberapa *part* yaitu *Frame* bus depan, *Chasis*, dan *Ground* (lantai uji). Massa *chassis* merupakan massa yang ditambahkan sebagai pengganti massa bagian kendaraan yang tidak merupakan superstruktur, misalnya mesin-mesin kendaraan dan bagian *chassis* sehingga pusat massa model sesuai dengan kondisi sebenarnya. Nilai massa kendaraan ini diperoleh dari selisih massa *body section* kendaraan dengan massa *body section* superstruktur. Besar massa *body section* kendaraan diperoleh dari perbandingan panjang *body section* terhadap panjang kendaraan dikalikan dengan massa total kendaraan seperti diilustrasikan pada gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan panjang *body section* dengan bus keseluruhan

Maka massa ekivalen *body section* (M_{bs}) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$M_{bs} = \frac{S}{L} \cdot M_T \quad (1)$$

$$M_{bs} = \frac{4.593 \text{ mm}}{10.710,92 \text{ mm}} \cdot 10.250 \text{ kg}$$

$$M_{bs} = 4.395,4 \text{ kg}$$

Kemudian massa tambahan (M_a) dapat dihitung sebagai berikut:

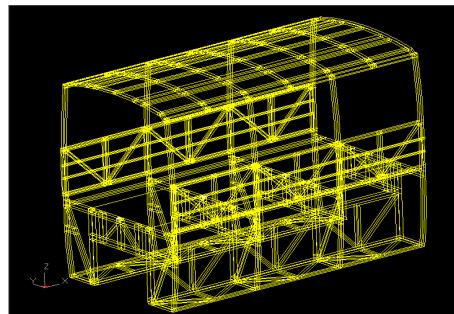
$$M_a = M_{bs} - M_s \quad (2)$$

$$M_a = 4.395,4 \text{ kg} - 964,34 \text{ kg}$$

$$M_a = 3.431,02 \text{ kg}$$

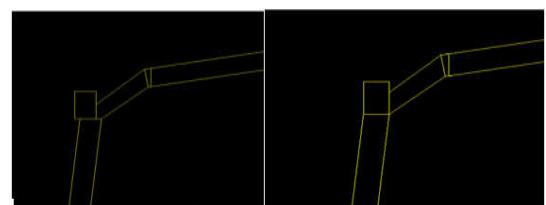
dimana M_{bs} adalah massa ekivalen *body section* bus, M_a adalah massa tambahan, M_T adalah massa total bus, M_s adalah massa *body section* superstruktur, S adalah panjang *body section* dan L adalah panjang kendaraan.

Superstruktur bus yang akan dimodelkan adalah bagian tengah yang terdiri dari tiga *bay*. Gambar 4 menunjukkan hasil akhir pemodelan geometri superstruktur bus.



Gambar 4. Model *Body section* bus

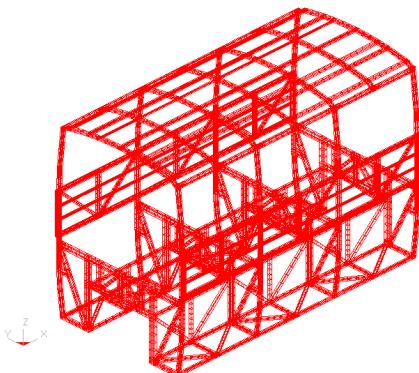
Untuk memudahkan dalam analisis elemen hingga, ada beberapa penyederhanaan model superstruktur bus. Diantaranya adalah dengan menghilangkan bagian-bagian *fillet* pada pipa (*tube*) profil seperti ditunjukkan gambar 5. Penyederhanaan ini bisa dilakukan karena penghilangan *fillet* pada pipa-pipa *frame* kenaikan harga momen inersianya kurang dari 5 % [4]. Posisi *cantrail* juga mengalami sedikit perubahan untuk memudahkan dalam melakukan *meshing*.



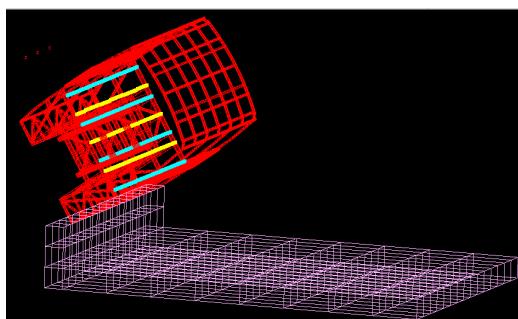
Gambar 5. (a) struktur cantrail sebenarnya (b) *cantrail* yang dimodifikasi

Untuk pemodelan *body section* superstruktur, jenis elemen yang digunakan untuk ini adalah elemen dua dimensi (*shell*) yang berbentuk segitiga (*triangular*) dan segiempat (*quadrilateral*). Jenis elemen ini biasa digunakan untuk pembebanan yang terjadi pada bidang seperti pada benda berbentuk plat. Pada bagian-bagian yang kritis, seperti sambungan atau bagian yang melengkung, ukuran elemennya dibuat lebih kecil dibandingkan dengan bagian-bagian yang tidak mengalami perubahan bentuk. Hal ini bertujuan untuk mempermudah melihat fenomena yang terjadi pada bagian tersebut. Sedangkan untuk bagian yang kaku seperti *chassis* dan lantai jenis elemen yang digunakan adalah

solid. Alasan pemilihan elemen *solid* ini adalah karena selama terjadi pembebanan dianggap deformasi yang terjadi pada bagian tersebut dapat diabaikan. Hasil proses *meshing* pada *body section* dapat dilihat pada gambar 6, sedangkan gambar 7 menggambarkan hasil *meshing* untuk pengujian terguling secara keseluruhan.



Gambar 6. Hasil meshing pada struktur *body section*



Gambar 7. Hasil meshing pada pengujian terguling

Material yang digunakan untuk membuat superstruktur bus adalah baja struktur *SAPH 41*(JIS G3113) yang sering digunakan untuk material *frame* bus. Nilai-nilai harga sifat material yang digunakan dalam simulasinya tertera pada tabel 1.

Tabel 1. Sifat Material SAPH 41

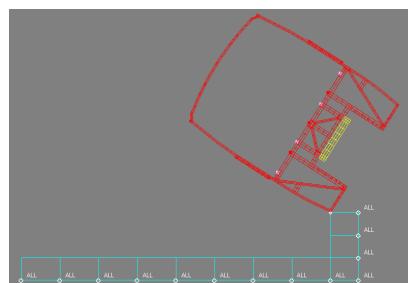
Sifat Material	Nilai
Yield stress	255 MPa
Yield strain	0,125%
Ultimate stress	402 MPa
Poisson ratio	0,3
Ultimate strain	20%
Modulus Young	200 GPa
Tangent Modulus	740 MPa

Pada perangkat lunak *LS-Dyna*, jenis material yang digunakan untuk rangka adalah *MAT_024 Piecewise Linear Plasticity*. Sedangkan untuk material *chassis* dan lantai yang dimodelkan sebagai benda kaku digunakan *MAT_020 Rigid Material* karena diasumsikan ketika terjadi kontak dengan material lain, material tersebut tidak mengalami

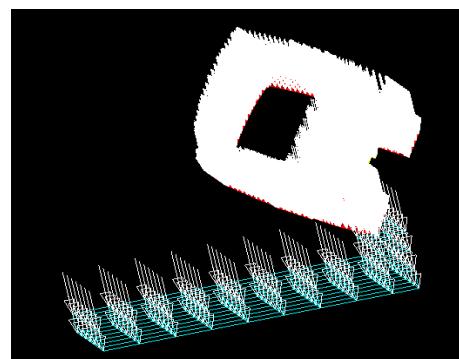
deformasi. Sedangkan untuk daerah aman (*residual space*) jenis material yang digunakan adalah *MAT_009 Nul Material*.

Pada simulasi ini bagian semua rangka bus yang terbuat dari plat baja mengalami kontak jenis *Automatic Single Surface*. Hal ini disebabkan ketika rangka bus berbenturan dengan lantai maka sesama elemen plat yang terdeformasi tersebut saling bersentuhan. Sedangkan kontak yang terjadi pada bagian seluruh permukaan bus dengan permukaan lantai disimulasikan dengan jenis kontak *Automatic Surface to Surface* dan *Automatic Node to Surface*.

Untuk mengkondisikan simulasi pengujian terguling menyerupai keadaan sebenarnya, beberapa kondisi batas ditentukan. Untuk bagian bawah lantai dan dinding diberikan kondisi batas berupa tumpuan jepit seperti terlihat pada Gambar 8. Kondisi batas berupa percepatan arah vertikal ke bawah sebesar $9,81 \text{ m/s}^2$ juga diberikan untuk seluruh bagian termasuk *body section* agar memastikan efek guling akibat gravitasi bisa dimodelkan seperti terlihat pada gambar 9.



Gambar 8. Posisi tumpuan jepit pada lantai uji dan dinding

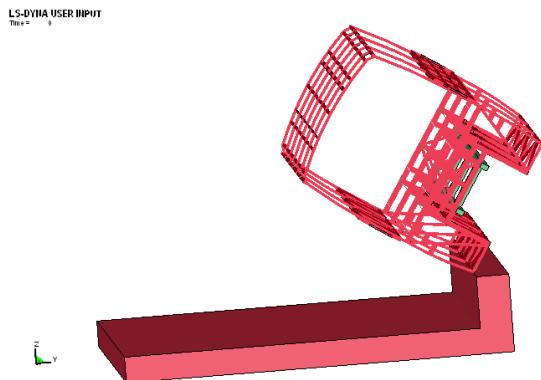


Gambar 9. Arah percepatan gravitasi pada *body section* dan *ground*

Hasil dan Analisis

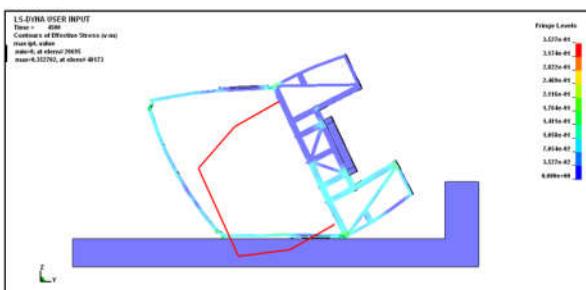
Pada kasus terguling ini, *body section* digulingkan dari ketinggian 800 m di atas meja uji ke permukaan lantai uji (*ground*) sesuai dengan standar *ECE-R6*. Saat membuat model elemen hingga, superstruktur sudah dalam keadaan diputar sejauh 53 derajat dari kondisi tegak lurus terhadap *ground* sehingga struktur akan terguling akibat bebananya

sendiri seperti terlihat pada gambar 10. Hal ini dilakukan untuk mempercepat waktu komputasi analisis elemen hingga oleh *solver*.



Gambar 10. Posisi superstruktur sebelum terguling

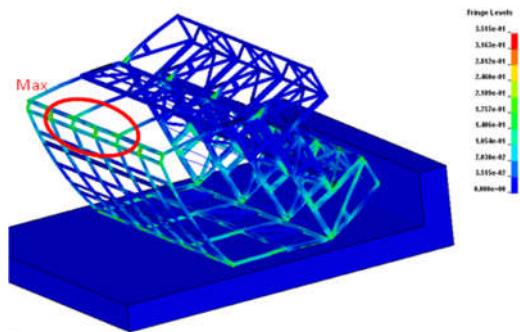
Body section yang jatuh bebas akan menyentuh *ground* setelah melewati waktu 1,540 detik. Ketika menyentuh *ground*, *body section* akan mengalami beban impak sehingga mengakibatkan terjadinya deformasi pada superstruktur. Dari gambar 11 terlihat bahwa deformasi yang terjadi pada superstruktur telah melewati batas aman kendaraan sehingga menurut standar ECE R66 strukturnya dinyatakan tidak aman.



Gambar 11. Deformasi pada *body section*

Dari respon tegangan terlihat bahwa tegangan maksimum yang terjadi adalah sebesar 0,35149 GPa atau 351,49 MPa. Nilai tegangan maksimum yang terjadi masih dibawah kekuatan tarik material yaitu 402 MPa. Walaupun telah terjadi deformasi plastis tetapi materialnya belum mengalami kegagalan. Tegangan maksimum yang terjadi terletak pada daerah *cantrail* seperti terlihat pada gambar 12. Daerah *cantrail* menghubungkan antara pilar dengan bagian atap superstruktur dengan menggunakan sambungan las. Pada daerah tersebut terjadi perubahan bentuk geometri dengan sambungan yang memiliki kemiringan sudut sehingga konsentrasi tegangan menjadi lebih tinggi. Selain daerah sambungan antara pilar dan struktur atap, bagian lain yang harus mendapat perhatian adalah daerah antara pilar bagian tengah dengan struktur lantai bus. Akibat menahan beban berat bus

konsentrasi tegangan di daerah tersebut menjadi tinggi. Walaupun dari segi material struktur bus ini masih aman, tetapi karena deformasi pada struktur bus telah memasuki *residual space*-nya maka *body section* ini dinyatakan tidak lulus uji atau tidak bisa menjamin keselamatan penumpang apabila terjadi kecelakaan terguling.



Gambar 12. Respon tegangan pada *body section*

Dari hasil pengolahan data dengan *LS-Dyna* juga diperoleh grafik keseimbangan energinya. Keseimbangan energi merupakan salah satu cara untuk memverifikasi hasil simulasi [5]. Awal jatuh bebas energi kinetik *body section* adalah nol dan nilainya akan maksimum saat menyentuh lantai karena kecepatannya menjadi maksimum. Energi total (*total energy*) sebelum menyentuh *ground* nilainya sama dengan energi kinetik. Energi kinetik maksimum terjadi setelah waktu 1,54 detik atau pas sesaat menyentuh lantai sebesar 21.808 Joule. Setelah 2,5 detik hampir tidak ada lagi penyerapan energi oleh lantai. Hampir semua energi diserap oleh lantai yaitu sebesar 21.577,89 Joule atau 98,94 %.

Ketika struktur berkontak dengan lantai, energi kinetiknya mengecil dan mencapai kondisi mendekati nol tetapi energi dalamnya (*internal energy*) mengalami kenaikan. Energi dalam terjadi setelah struktur bus menyentuh *ground* sehingga pada struktur kendaraan muncul energi regangan karena terjadinya deformasi. Makin lama energi dalam ini akan semakin naik dan pada saat tidak ada lagi energi kinetik yang bekerja maka energi dalampun kondisinya akan stabil. Energi dalam adalah penjumlahan antara energi regangan plastis dan energi regangan elastis pada struktur yang mengalami deformasi [5]. Jadi pada saat kondisi energi kinetiknya nol maka energi total sama dengan energi dalam. Kondisi seperti ini mengindikasikan bahwa hasil analisis sudah benar.

Kesimpulan

1. Simulasi komputer dengan menggunakan perangkat lunak *LS-Dyna* dapat dijadikan sebagai

- salah satu alternatif pengujian kekuatan struktur secara virtual.
2. Bagian yang paling berpengaruh terhadap kekuatan struktur bus adalah portal (pilar) serta *frame* yang terdapat pada dinding depan dan belakang yang menghubungkan pilar pada kedua sisi bus. Tegangan maksimum terjadi pada daerah sambungan antara *cantrail* dengan struktur atap untuk pengujian terguling sebesar 351,49 MPa.
 3. Dari analisis simulasi pengujian ini benda uji dinyatakan tidak lulus pengujian karena deformasi yang terjadi pada superstruktur telah mengintrusi *residual space* setelah superstruktur digulingkan. Walupun tegangan yang bekerja masih dibawah tegangan *ultimate* material.
 4. Simulasi pengujian terguling dengan standar *ECE-R66* pada struktur bus menggunakan perangkat lunak *LS-Dyna* bisa dijadikan pertimbangan untuk menganalisis kapasitas penyerapan energi pada struktur bus karena lebih mudah dan biaya lebih murah.

Referensi

- [1] National Highway Transportation Safety Administration, 2006. NHTA's as Approach to Motorcoach Safety.
- [2] Informasi <http://knkt.dephub.go.id/knkt/> diakses 28 April 2010
- [3] UNECE-R66., 2006. *Uniform Technical Prescriptions Concerning The Approval of Large Passenger Vehicles With Regard to The Strength of their Superstructure*, United Nations Economic Comission for Europe.
- [4] Prabowo, Heri. (2010), *Analisis Kapasitas Penyerapan Energi Superstruktur Bus Berbasis Metode Elemen Hingga Sebagai Alternatif Uji Guling*, Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.
- [5] Liang, C.C. dan G.N. Le., 2010. Analysis of Bus Rollover Protection Under legislated Standards using LS-Dyna Software Simulation Techniques. *International Journal of Automotive Technology*, **11**(4): p. 11