

PEMODELAN DAN ANALISA UJI PENDULUM PADA STRUKTUR RANGKA BUS MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Benny Ardhi Subarkah¹, Toni Prahasto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: bennyardhi@rocketmail.com

Abstrak

Bus merupakan salah satu kendaraan bermotor yang dapat membawa banyak penumpang. Oleh sebab itu, bus harus didesain agar dapat memberikan rasa aman bagi penumpang dan pengemudinya. Struktur rangka bus adalah salah satu bagian dari sebuah bus yang berfungsi sebagai rumah-rumah dari kendaraan tersebut. Dalam berbagai kasus kecelakaan, struktur rangka sangat mempengaruhi keselamatan dari pengguna bus. Salah satu diantaranya yaitu kecelakaan bus terguling (*rollover*), dimana kecelakaan tersebut mengakibatkan korban mengalami cedera bahkan menewaskan penumpang di dalam bus. Di Eropa, terdapat standar bus yang mengatur keamanan bus ketika terjadi kecelakaan *rollover*, yaitu *ECE R 66*. Tugas akhir ini membahas tegangan dan *displacement* pada struktur rangka bus ketika terjadi kecelakaan terguling untuk mengukur keamanan bus sesuai dengan standar *ECE R 66*. Penerapan dari *ECE R 66* dilakukan dengan memberikan beban pendulum pada sisi samping bus dengan kecepatan dan sudut pendulum yang ditentukan berdasarkan dimensi bus. Penulis melakukan analisa dengan menggunakan metode elemen hingga dan dengan *software* bantu *ANSYS / LS - Dyna*. Hasil analisa berupa konsentrasi tegangan dan *displacement* pada bagian sisi samping struktur rangka bus. Besarnya *displacement* pada bagian tersebut tidak melebihi ruang batas selamat (*residual space*). Oleh karena itu, struktur rangka bus ini aman jika terkena beban pendulum atau kecelakaan terguling (*rollover*).

Kata kunci: *rollover, displacement, metode elemen hingga, dan residual space.*

Abstract

Bus is one of the motor vehicle that can carry many passengers. Thus, buses should be designed in order to provide security for passengers and driver. Bus frame structure is one part of a bus that serves as the houses of the vehicle. In many cases of accidents, frame structure greatly affects the safety of bus users. One of them is overturned bus accident (rollover), where the accident resulting in the injury even killing passengers on the bus. In Europe, there is a bus standard that governs security buses when rollover accidents occur, the ECE R 66. This final project explores stress and displacement in the structure of the bus when the accident occurred order to measure the safety of the bus rolled over in accordance with ECE R 66 standard. Implementation of ECE R 66 is done by giving the load side of the pendulum on the bus with the speed and angle of the pendulum is determined by the dimensions of the bus. The author analyzes using the finite element method and the auxiliary software ANSYS / LS - Dyna. The results of the analysis in the form of stress concentration and displacement on the side of the bus frame structure. The amount of displacement on the part does not exceed the residual space. Therefore, the bus frame structure is safe if exposed to load or crash rolled pendulum (rollover).

Keywords: *rollover, displacement, finite element method, and residual space*

1. PENDAHULUAN

Kemajuan yang pesat dalam bidang transportasi mengharuskan setiap desain kendaraan memenuhi banyak kriteria, antara lain : aman, ramah lingkungan, dan hemat konsumsi bahan bakar. Dalam hal ini faktor tersebut masih terus dikembangkan di negara-negara produsen kendaraan untuk memenuhi konsumen di pasar dunia. Oleh sebab itulah tercipta perbedaan kelas dan tipe kendaraan. Semakin tinggi kelas dan tipe dari suatu kendaraan akan memerlukan standar kriteria keamanan dan kualifikasi yang sangat tinggi.

Berbagai macam tipe kendaraan telah didesain dan dibuat oleh para *engineer* demi kelancaran transportasi baik manusia maupun barang, misalnya : mobil, pesawat terbang, kereta, truk, bus, kendaraan bermotor, dll. Salah satunya adalah bus yang merupakan alat transportasi massal yang dapat menampung banyak penumpang maupun barang.

Banyak sekali penyebab dari kecelakaan yang terjadi pada kendaraan bus, misalnya: menabrak kendaraan lain, menabrak pohon, bahkan bus terguling karena kurangnya keseimbangan dari *body* bus. Oleh karena itu desain semua bagian pada bus perlu diperhatikan demi keselamatan penumpangnya. Khususnya rangka bus harus memenuhi standar-standar tertentu agar memperoleh hasil yang baik dan memenuhi kriteria - kriteria bagi keselamatan penumpang [1].

Di Eropa terdapat suatu standar yang diterapkan dan digunakan pada kendaraan-kendaraan bukannya, yaitu *ECE* (*Economic Commissions for Europe*). Dalam *ECE* terdapat 324 peraturan (*regulation*), salah satunya peraturan nomor 66 atau *Regulation 66 (R 66)* yang digunakan untuk menguji kekuatan struktur rangka bus ketika terjadi *rollover*. Dalam penelitian ini, dilakukan suatu analisa uji pendulum pada struktur rangka bus pada landasan kendaraan bermotor Mercedes-Benz Tipe OH-1526 sesuai *ECE R 66*. Untuk itu digunakan suatu *software* komputer, yaitu dengan menggunakan *SolidWorks* dan *ANSYS / LS-DYNA*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa tingkat keamanan struktur rangka bus sesuai dengan standar *ECE R 66* dan mengetahui *displacement* dari struktur rangka bus ketika terjadi *rollover*.

2. METODOLOGI PENELITIAN

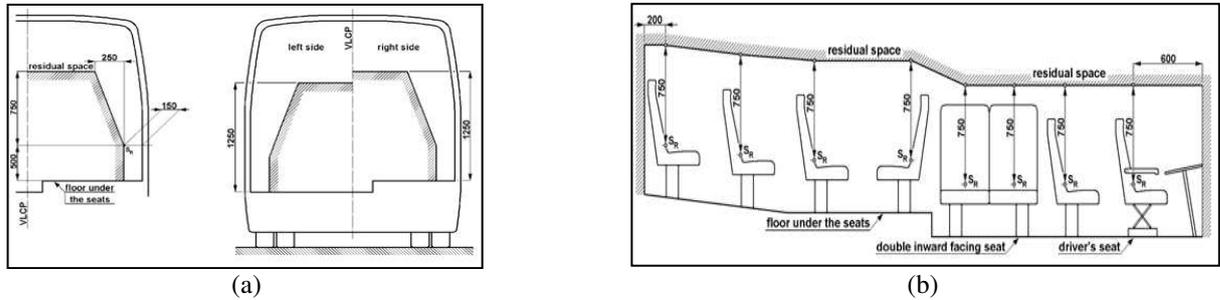
2.1 Rollover Standard ECE R66

a. Tujuan *ECE R66*

Standar *ECE R 66* bertujuan untuk memberikan perlindungan pada penumpang bus ketika bus mengalami beban *rollover* dengan memberikan batas ruang selamat atau *residual space* ditinjau dari besarnya *displacement*. [2]

b. *Residual Space*

Residual space adalah suatu ruang yang digunakan untuk menggantikan posisi dari masing-masing penumpang pada kendaraan yang berguna untuk memberikan batas keselamatan.



Gambar 1 (a) *Residual space* tampak depan, (b) *Residual space* tampak samping

c. Perhitungan Energi

Perhitungan energi total dapat diformulasikan dengan rumus berikut:

$$E^* = 0.75 \times M \times g \times \left[\sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + H_s^2} - \frac{W}{2H} \sqrt{H^2 - 0.8^2} + 0.8 \frac{H_s}{H} \right] \text{ (Nm)} \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

- M = Massa kendaraan/ struktur rangka bus (Kg)
- g = 9.8 m/s²
- W = Lebar kendaraan/ struktur rangka bus (m)
- H_s = Tinggi pusat massa (*center of gravity*) kendaraan / struktur rangka bus (m)
- H = Tinggi kendaraan/ struktur rangka bus (m)

d. Pendulum

Pendulum yang digunakan dalam tes *rollover* terbuat dari baja dengan ketebalan 20 mm ± 5 mm, massa pendulum dari distribusi rata-rata, tingginya tidak kurang dari 800 mm dan panjangnya tidak kurang dari panjang *body section* bus. Kecepatan pendulum antara 3-8 m/s.

Sudut pendulum pada waktu mengenai struktur rangka bus yaitu:

$$\alpha = 90^\circ - \arcsin \left(\frac{800}{H_c} \right) \dots\dots\dots (2)$$

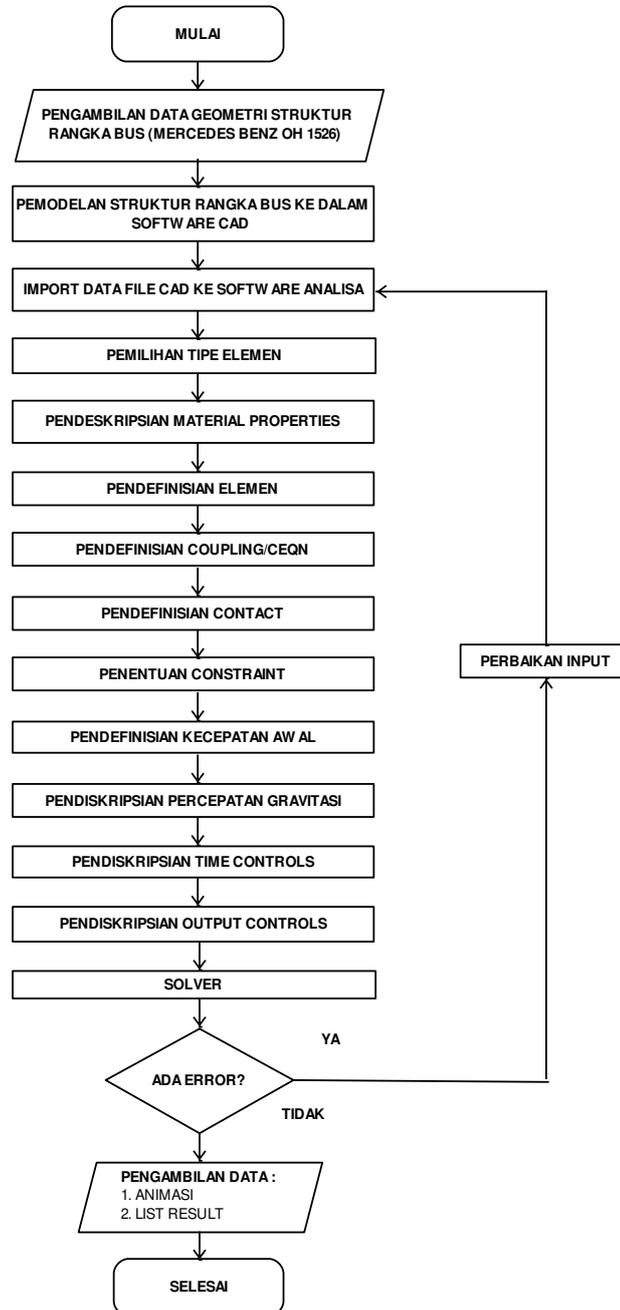
dimana: H_c = Tinggi struktur rangka bus

Berdasarkan perhitungan energi total pada sub bab sebelumnya, maka energi kinetik pada pendulum sama dengan energi total, yaitu:

$$E_k \text{ pendulum} = E^* \\ E^* = \frac{1}{2} m v^2 \dots\dots\dots (3)$$

dimana: m = massa pendulum (kg)
 v = kecepatan pendulum (m)

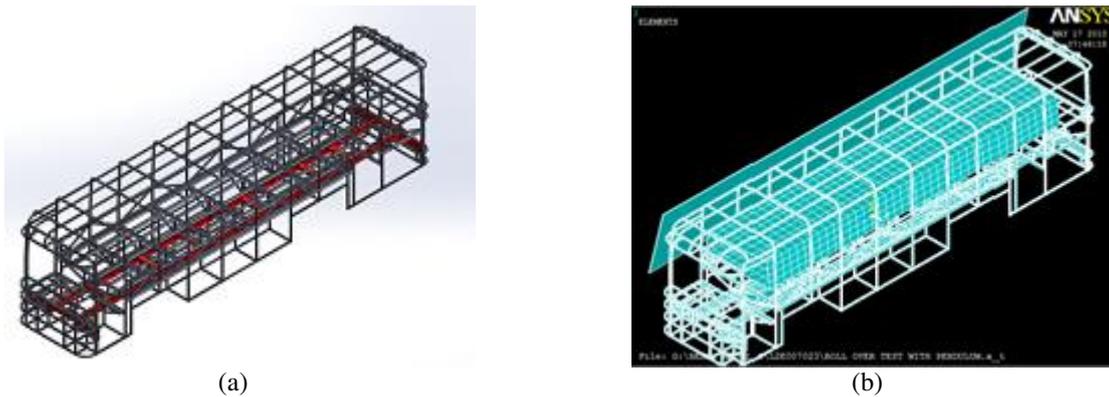
2.2 Bagan Pemodelan dan Analisa



Gambar 2. Bagan pemodelan dan analisa struktur rangka bus

2.3 Pemodelan ke dalam CAD dan FEM

Dalam menganalisa struktur rangka bus ini, penulis menggunakan *software* bantu yaitu "SolidWorks" untuk memodelkan struktur rangka bus secara utuh, kemudian untuk analisisnya menggunakan *software* "ANSYS / LS-DYNA". Adapun ANSYS / LS-DYNA secara umum dapat digunakan untuk analisa berbagai studi kasus seperti : *structure, ANSYS fluid, frequency, thermal, optimation, nonlinear, drop test, dan fatigue*.



Gambar 3. (a) Pemodelan struktur rangka bus ke software CAD, (b) Pemodelan uji pendulum pada software FEM

Adapun material properties dari struktur rangka bus beserta pendulum dan residual space nya adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Material Properties Struktur Rangka Bus

Material Properties	Nilai
Density	7.7 - 8.03 gr/cm ³
Poisson Ratio	0.27-0.30
Tensile Strength (σ_u)	365 MPa
Yield Strength (σ_y)	305 MPa
Modulus Elastisitas (E)	190 -210 GPa
Modulus Tangent	1.45 Gpa

Tabel 2. Material Properties Pendulum dan Residual Space

Material Properties	Nilai
Modulus Elastisitas	207x10 ⁹ Pa
Poisson Ratio	0.30
Densitas	7580 kg/m ³

2.3 Solution

Dalam analisa eksplisit dinamis perlu dilakukan langkah awal yaitu pemberian kecepatan awal yang disesuaikan dengan nilai dan arah pada masing-masing pemodelan. Arah dari gerakan pendulum menuju *COG (Central of Gravity)* dari model struktur rangka bus tersebut. Adapun perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$a = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{800}{H_c}\right)$$

H_c = Tinggi *body section* bus = 3.4 meter

$$A = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{800}{H_c}\right)$$

$$= 90^\circ - \arcsin\left(\frac{800}{3400}\right)$$

$$= 90^\circ - 13.6^\circ$$

$$= 76.4^\circ \approx 76^\circ$$

pendefinisian element: untuk menandai tiap-tiap *part* pada masing-masing element.

pendefinisian contact: pendulum ke struktur rangka bus (ASTS)

Pendeskrripsian constraints: Kondisi batas ini adalah struktur bus berada pada *chassis/ landasan*, oleh karena itu letak *constraint* berada pada bagian bawah lantai struktur rangka bus.

Pendeskrripsian percepatan gravitasi: percepatan 9.8 m/s² pada arah -Y

Pendeskrripsian kecepatan pendulum = 5.5 m/s yang diperoleh dari perhitungan sebagai berikut:

$$E^* = 0.75 \times M \times g \left[\sqrt{\left(\frac{W}{2}\right)^2 + H_s^2} - \frac{W}{2H} \sqrt{H^2 - 0.8^2} + 0.8 \frac{H_s}{H} \right] \text{ (Nm)}$$

$$= 0.75 \times 9976 \times 9.8 \left[\sqrt{\left(\frac{2.5}{2}\right)^2 + 1.45^2} - \frac{2.5}{2 \times 3.4} \sqrt{3.4^2 - 0.8^2} + 0.8 \frac{1.45}{3.4} \right]$$

$$= 73550.9031 \text{ Nm} \approx 73551 \text{ Nm}$$

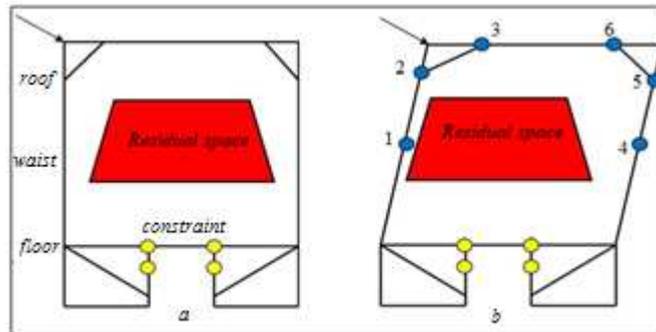
$$E_k \text{ pendulum} = \frac{1}{2} m v^2$$

$$73551 \text{ Nm} = \frac{1}{2} 4768.875 \text{ kg} \cdot v^2$$

$$v = 5.55 \approx 5.5 \text{ m/s}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur rangka bus yang telah dimodelkan ke dalam *software* CAD kemudian dianalisa (uji pendulum) dan disimulasikan dengan *software* bantu yaitu *ANSYS/LS-DYNA* yang dikondisikan sesuai dalam keadaan yang sebenarnya, sehingga data hasil analisa akan sesuai dengan kondisi nyata atau paling tidak mendekati. Data yang dianalisa yaitu diambil pada beberapa titik (*nodal*) pada struktur rangka bus yang mempengaruhi *residual space* atau dekat dengan batas aman yang disarankan. Pada Gambar 8 di bawah ini, diperlihatkan struktur rangka bus sebelum dan sesudah dilakukan uji pendulum. Ada 6 *nodal* pokok yang akan diambil datanya. Dari 6 *nodal* tersebut, masing-masing mempunyai beberapa *nodal* yang letaknya berhimpit dengan pilar-pilar yang ada pada struktur rangka bus yang dianalisa.

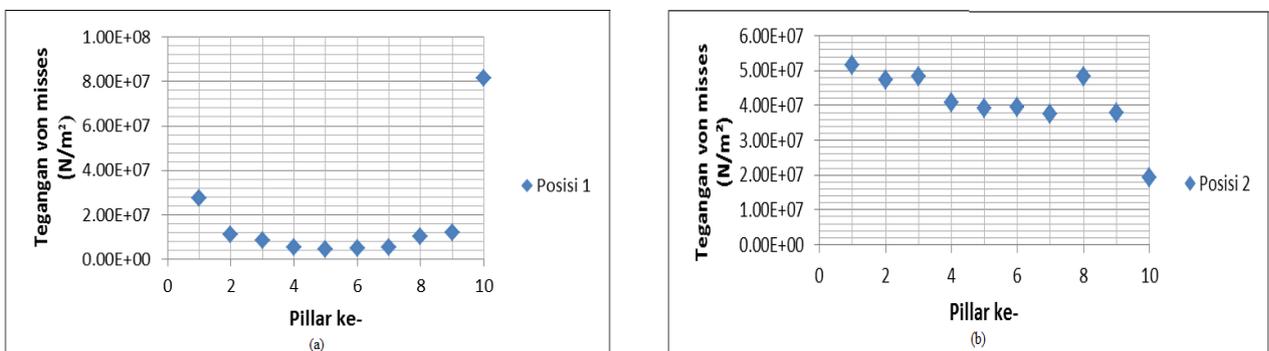


Gambar 4. (a) Struktur rangka sebelum dilakukan uji pendulum, (b) Struktur rangka sesudah dilakukan uji pendulum

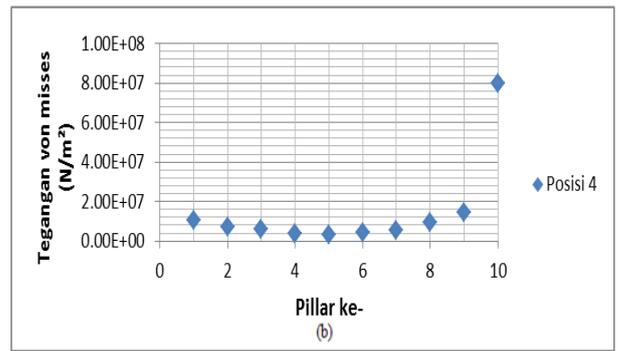
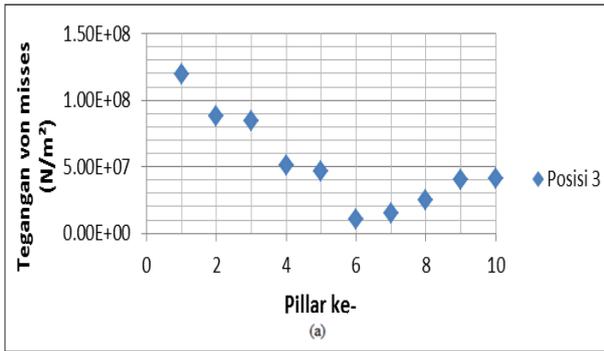
3.1 Pembebanan Pendulum ECE R66

Pembebanan pendulum yang dilakukan pada struktur rangka bus dilakukan sesuai standar *ECE R 66*. Pada bab sebelumnya sudah dibahas mengenai perhitungan energi total yang diserap. Energi totalnya yaitu: 73351 Nm, kemudian perhitungan kecepatan energi kinetik pada pendulum menjadi 5.5 m/s. Untuk tegangan maksimum terjadi pada waktu 0.15 detik dan deformasi terbesar didapat pada waktu 0.27 detik.

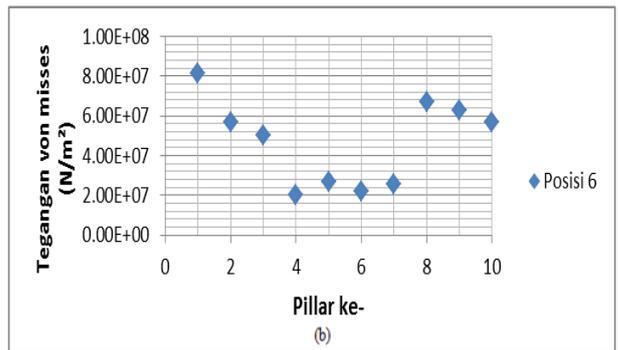
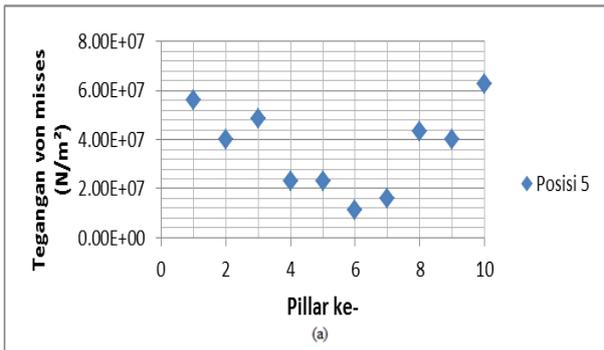
a. Stress result



Gambar 5. Nilai tegangan von Mises pada posisi 1 dan 2

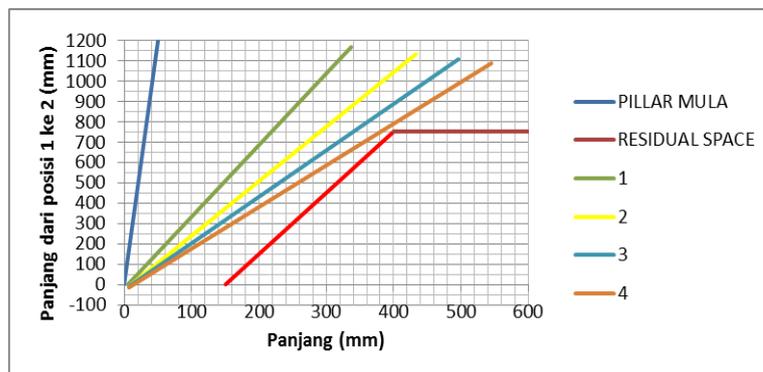


Gambar 6. Nilai tegangan von Mises pada posisi 3 dan 4

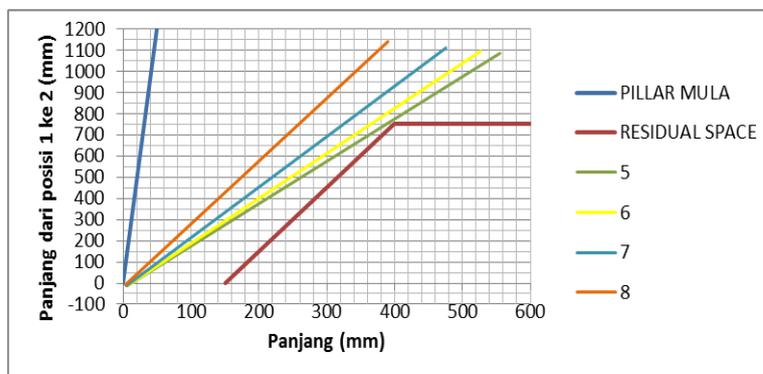


Gambar 7. Nilai tegangan von Mises pada posisi 5 dan 6

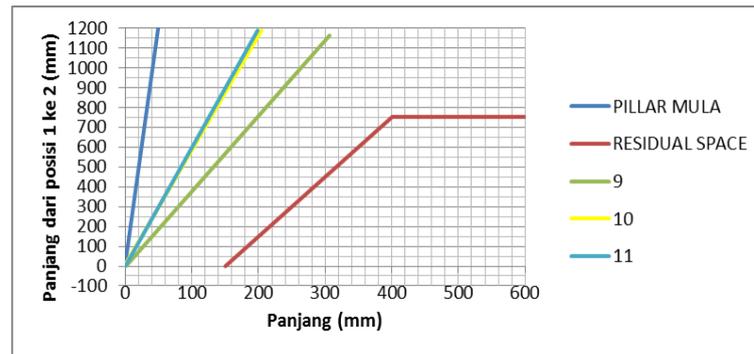
b. Displacement result



Gambar 8. Besarnya displacement pada posisi 1 dan 2 pada pillar 1 sampai 4



Gambar 9. Besarnya displacement pada posisi 1 dan 2 pada pillar 5 sampai 8



Gambar 10. Besarnya *displacement* pada posisi 1 dan 2 pada pillar 9 sampai 11

Pada Gambar 5 menunjukkan grafik nilai tegangan von Mises yang diambil pada posisi 1 dan 2 yang terletak pada sisi struktur rangka bus yang terkena beban pendulum atau *rollover*. Pada posisi 1 terdapat 10 nodal yang diambil data tegangannya dengan nilai maksimum mencapai 81.3 MPa, sedangkan nilai minimum dan rata-ratanya masing-masing adalah 4.38 MPa dan 17 Mpa. Sedangkan pada posisi 2 diperoleh nilai maksimum 51.7 MPa, nilai minimum 19.2 MPa, dan nilai rata-rata 52.1 MPa.

Pada Gambar 6 menunjukkan grafik nilai tegangan von Mises yang diambil pada posisi 3 dan 4. Posisi 3 terletak pada pojok atap sisi yang terkena beban pendulum, sedangkan posisi 4 terletak di sisi bus yang tidak terkena beban pendulum, sejajar dengan posisi 1. Pada posisi 3 terlihat bahwa tegangan lebih besar jika dibandingkan dengan posisi 1 maupun 2. Nilai tegangan maksimumnya 119 MPa, dengan nilai tegangan minimum 10.8 MPa dan rata-ratanya 52.1 MPa. Pada posisi 4 diperoleh nilai maksimum 79.7 MPa, nilai minimum 3 MPa, dan nilai rata-rata 14.4 MPa.

Pada Gambar 7 menunjukkan grafik nilai tegangan von Mises yang diambil pada posisi 5 dan 6. Pada posisi 5 yang diambil data tegangannya nilai maksimum mencapai 62.5 MPa, sedangkan nilai minimum dan rata-ratanya masing-masing adalah 11.1 MPa dan 36.4 Mpa. Sedangkan pada posisi 6 diperoleh nilai maksimum 81.4 MPa, nilai minimum 20.5 MPa, dan nilai rata-rata 47 MPa.

Dari Gambar 5, 6, dan 7 dimana gambar tersebut menunjukkan konsentrasi tegangan diperoleh besarnya tegangan maksimum pada posisi 3 dengan nilai sebesar 119 MPa. Oleh karena itu semua nodal pada ke enam posisi ini masih aman menurut teori kegagalan statis yang menyatakan bahwa kegagalan akan terjadi jika tegangan von Mises $\sigma' \geq S_y$, sedangkan $S_y = 305 \text{ MPa} = 305 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ dan $\sigma' = 119 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Namun jika dilihat secara keseluruhan terdapat nodal yang sudah mengalami kegagalan. Dalam hal ini pada nodal 73795 mempunyai tegangan von Mises maksimum sebesar 329 MPa dimana nilai tersebut sudah melampaui kekuatan luluhnya.

Pada Gambar 8 menunjukkan besarnya *displacement* pada pillar 1 sampai 4 terhadap *residual space* dimana data yang diambil pada saat terjadi pembebanan maksimum. Data yang diambil hanya pada posisi 1 dan 2 karena 2 posisi tersebut yang sangat penting. Pada gambar tersebut jelas bahwa dari pillar 1 sampai 4 belum ada pillar yang memasuki atau melebihi *residual space*. Begitu juga dengan Gambar 9, dan 10 yang mana pillar-pillar dari pillar nomor 5 sampai nomor 11 belum ada yang memasuki *residual space*. Maka ditinjau dari *displacement*nya struktur rangka bus dinyatakan aman jika terkena beban pendulum atau *rollover*.

4. KESIMPULAN

- 1) Konsentrasi tegangan von mises maksimum pada posisi 1, 2 dan 3 (bagian samping atas struktur rangka bus yang terkena beban pendulum) yaitu 81.3 MPa, 51.7 MPa, dan 119 MPa. Sedangkan pada posisi 4, 5, dan 6 (bagian samping atas struktur rangka bus yang tidak terkena beban pendulum) yaitu 79.7 MPa, 62.5 MPa, dan 81.4 MPa.
- 2) Konsentrasi tegangan *von Mises* maksimum pada ke enam posisi (bagian samping kanan dan kiri) tidak terjadi kegagalan material karena nilainya kurang dari *yield strength*nya ($S_y = 305 \text{ MPa}$).
- 3) Konsentrasi tegangan *von Mises* maksimum pada semua nodal struktur rangka bus yaitu 329 MPa dengan faktor keamanan 0.92.
- 4) Besarnya *displacement* maksimum masih belum melebihi batas selamat (*residual space*) sesuai *ECE R 66*, oleh karena itu, struktur rangka bus aman jika terkena beban pendulum atau beban *rollover*.

5. REFERENSI

- [1] Matolcsy, M., 2007, "The Severity of Bus Rollover Accidents", ESV Paper 989, 20th ESV Conference, Lyon, France.
- [2] Lloyd, J.E., 2007, "Vehicle Standard (Australian Design Rule 59/00-Standard For Omnibus Rollover Strength)", (ECE R 66).
- [3] Direktorat Jenderal Perhubungan Darat, 2012, "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 55 Tahun 2012 Tentang Kendaraan", diakses pada 12 November, 2012 dari <http://hubdat.dephub.go.id/peraturan-pemerintah/1421-peraturan-pemerintah-republik-indonesia-nomor-55-tahun-2012-tentang-kendaraan>