

# DESAIN DAN ANALISA GERBONG KERETA API PENGANGKUT BATU *BALLAST* DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Djoeli Satrijo<sup>1)</sup> Enricko Luthfan Praditha<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dosen Teknik Mesin UNDIP

<sup>2)</sup>Mahasiswa S-1 Teknik Mesin UNDIP

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

## Abstrak

*Dalam dunia pengangkutan massal, kereta api merupakan moda transportasi yang memiliki peranan sangat besar. Gerbong barang adalah alat pengangkut yang ditarik oleh lokomotif sehingga menjadi sebuah rangkaian kereta api. Gerbong barang terdiri dari bermacam rupa dengan fungsi angkut dan kapasitas yang berbeda-beda. Salah satu contoh pengangkutan barang yang cukup penting adalah pengangkutan batu ballast, yang biasanya digunakan dalam pemeliharaan jalan rel. Gerbong pengangkut batu ballast dituntut untuk semakin efisien dan tangguh. Guna mendukung fungsinya, maka diperlukan suatu perancangan sebuah gerbong barang pengangkut batu ballast serta analisa terhadap gerbong barang tersebut. Gerbong barang dirancang mengacu pada standar JIS (Japan Industrial Standart) dan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor : KM 43 Tahun 2010 Tentang Standar Spesifikasi Teknis Gerbong. Gerbong barang dianalisa kekuatannya menggunakan metode elemen hingga (MEH). Beban yang bekerja pada struktur, disimulasikan mendekati pembebanan yang sebenarnya. Beban utama yang dikenakan adalah beban muatan seberat 35 ton. Hasil analisa menggunakan perangkat lunak MEH, menunjukkan bahwa struktur kereta masih aman dalam segi tegangan, defleksi, maupun kegagalan lelah.*

*Kata kunci: metode elemen hingga, gerbong barang, tegangan, kegagalan lelah*

## PENDAHULUAN

Batu *ballast* biasanya digunakan dalam pembangunan jalan rel, jalan raya, jembatan, maupun bangunan lainnya. Penggunaan gerbong pengangkut batu *ballast* dituntut kemudahan dalam *loading* maupun *unloading* muatan agar mempersingkat waktu maupun tenaga. Muatan batu *ballast* pun harus sesuai dengan tekstur yang diijinkan, yaitu berdiameter antara 5 sampai 7 cm.

Desain struktur gerbong barang dituntut untuk mampu menahan beban aksial dari muatan dan beban tarik-tekan di kedua ujungnya. Beban aksial akan diteruskan ke *bogie* dan roda, sedangkan gaya tarik-tekan akan terus berlangsung selama kereta berjalan.

Desain dan analisis kekuatan struktur gerbong barang dapat disimulasikan dengan menggunakan metode elemen hingga. Guna keperluan tersebut, digunakan perangkat lunak berbasis MEH yaitu Ansys APDL 12. Perangkat

lunak ini memiliki kemampuan *pre* dan *post processing*. Dengan demikian hasil simulasi dapat ditampilkan dan memudahkan interpretasi hasilnya.

## DASAR TEORI

Kendaraan untuk angkutan barang disebut gerbong. Persyaratan teknis *gerbong* tidak terlalu menuntut kecepatan dan kenyamanan. Konstruksi yang diperlukan adalah untuk menjaga agar barang yang diangkut utuh dan tidak rusak sampai tujuan. Upaya untuk mendapatkan berat muat yang optimal menjadi ukuran keberhasilan rancang bangun gerbong.

Yang menjadi perhatian dalam membuat gerbong adalah muatan optimal dan bongkar muat dapat dilakukan dengan cepat. Untuk mendapatkan muatan yang optimal konstruksi gerbong harus dibuat seringan mungkin namun tetap harus menggunakan bahan yang tepat agar biaya investasi tidak menjadi terlalu besar.

Komponen struktur gerbong merupakan bagian pada gerbong yang memiliki fungsi masing-masing pada saat beroperasi, komponen utama dalam gerbong antara lain adalah rangka dasar (*underframe*), penguat (*rib*), dan wadah (*body*).

Rangka kereta merupakan satu kesatuan konstruksi baja yang dilas, salah satunya ialah rangka dasar yang terdiri dari bagian penyangga badan kereta (*bolster*), balok ujung (*end sill*), balok samping (*side sill*), balok melintang (*cross beam*) dan penyangga peralatan bawah lantai.

Penguat merupakan sebuah balok yang berfungsi menahan plat wadah (*body*). Besar gaya berat yang diterima oleh wadah didistribusikan melalui penguat dan diteruskan ke rangka dasar. Sedangkan wadah merupakan plat yang dibentuk sedemikian rupa agar dapat menampung muatan. Karena berkontak langsung dengan muatan, maka rentan terjadi defleksi dan tegangan yang diakibatkan oleh berat muatan. Maka dari itu ketebalan plat wadah sangat mempengaruhi umur gerbong.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Gerbong

	Spesifikasi Teknis	Besaran
1	Tinggi gerbong	2639.5 mm
2	Lebar gerbong	2605 mm
3	Panjang gerbong	12500 mm
4	Volume	25 m <sup>3</sup>
5	Jarak antar <i>center pivot</i>	8800 mm
6	Berat kosong	18 ton
7	Kapasitas muat	35 ton

Material yang digunakan dalam desain struktur gerbong ini adalah JIS SM 490 dan JIS SS 400 yang merupakan baja roll campuran karbon rendah. JIS SM 490A digunakan pada struktur rangka dasar dan penguat sedangkan JIS SS 400 digunakan pada wadah. JIS SM 490A memiliki kekuatan tarik maksimal sebesar 490 MPa,  $E = 210$  GPa, poisson ratio = 0,3, tegangan luluh = 325 MPa, dan memiliki kandungan karbon sebesar 0,24 %, sedangkan JIS SS 400 memiliki kekuatan tarik maksimal sebesar 400 Mpa dengan  $E = 207$  GPa, poisson ratio = 0,3 tegangan luluh = 245 MPa, dan memiliki kandungan karbon berkisar 0,17-0,2 %. Adapun spesifikasi teknis *struktur gerbong* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Tabel Pembebanan Analisa *Off The Road*

Jenis Analisa	Pembebanan	Besar Pembebanan	Keterangan	DBB
Beban Struktur	Gravitasi			
Beban Muatan	Gravitasi, Gaya Muatan	35 ton		
Beban Tekan	Gravitasi, Gaya Tekan	150 ton	bertahap	
Beban Kombinasi	Gravitasi, Gaya Muatan, Gaya Tekan	35 ton (muatan) 150 ton (tekan)	bertahap	

Tabel 2 Tabel Pembebanan Analisa *On The Road*

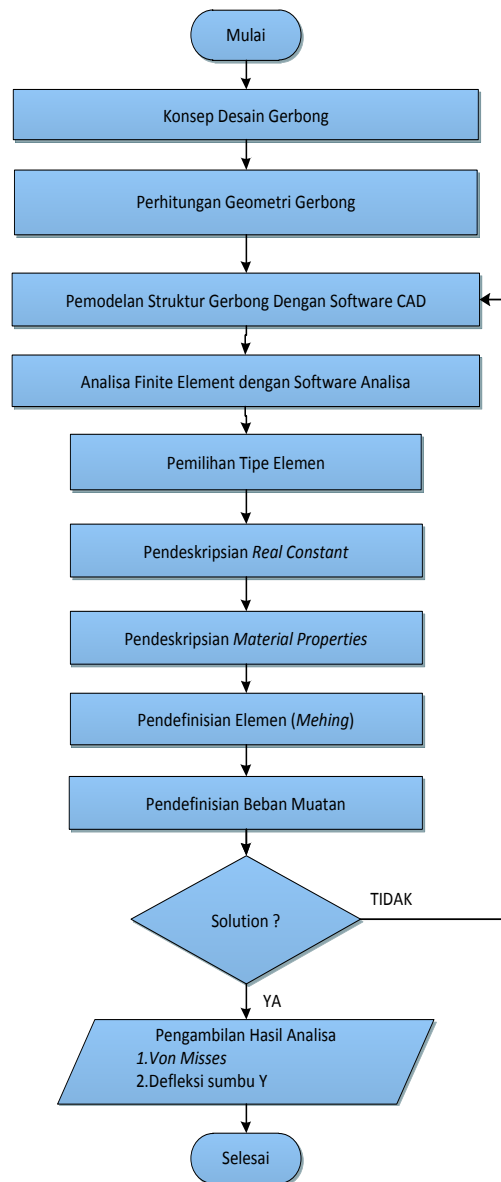
Jenis Analisa	Tahanan	Besar Tahanan (N)	Keterangan	DBB
Lintas Datar	Rolling	14342.220	Konstan, Lurus, datar.	
Lintas Tanjakan	Rolling, Tanjakan	28694.868	40 %	
Lintas Tikungan	Rolling, Tikungan	17208.887	80 meter	
Percepatan	Rolling, Percepatan	19919.292	0.145 m/s <sup>2</sup>	
Kombinasi	Rolling, Tanjakan, Tikungan, Percepatan	37778.226	kombinasi	

Pembebanan dilakukan pada dua model yaitu wadah dan struktur keseluruhan gerbong. Pada analisa pembebanan pada wadah dilakukan untuk mengetahui kekuatan wadah terhadap beban muatan, beban muatan yang dikenakan dikalikan 5 kali lipat secara bertahap terhadap gaya gravitasi untuk mewakili analisa getaran yang tidak dibahas dalam karya ilmiah ini. Beban utama yang diterima pada struktur gerbong tersebut dapat dibagi menjadi 2 kondisi yaitu *off the road* dan *on the road*. Pada analisa *off the road* dilakukan melalui pengujian statis terhadap model dengan standart JIS (Japan Industrial Standart) yaitu beban struktur, beban tekan, beban muatan, dan beban kombinasi

antara tekan dan muatan. Sedangkan untuk pembebanan *on the road* dilakukan dengan memperhitungkan gaya yang terjadi pada gerbong paling depan (dibelakang lokomotif). Saat kereta api berjalan terdapat tahanan-tahanan yang terjadi. Ada 3 jenis lintasan yang diperhitungkan disini yaitu datar, tikungan dan tanjakan. Selain itu juga terdapat tahanan saat gerbong diberi percepatan dan kombinasi dari keseluruhan tahanan. Untuk kasus ini diasumsikan terdapat 10 gerbong dengan ditarik lokomotif jenis CC 201. Tabel 2 dan 3 memperlihatkan spesifikasi pembebanan pada model CAD.

Pada analisa on the road, beban muatan dikalikan sampai 5 kali secara bertahap guna mengasumsikan gerbong saat melintas di daerah dengan lintasan yang tidak rata, seperti halnya pada analisa wadah.

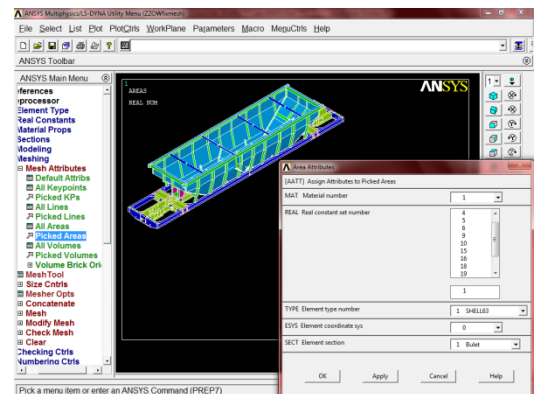
#### METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alir Pemodelan dan Analisa

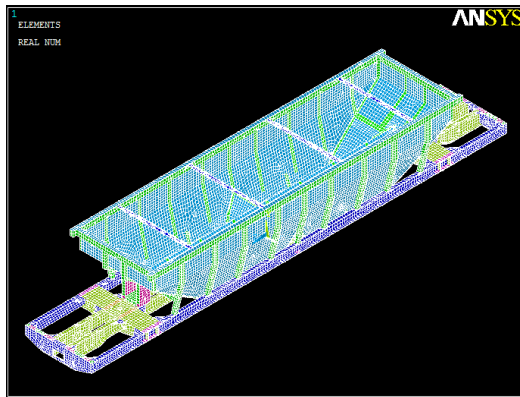
Pemodelan gerbong dimulai dari penentuan geometri. Perhitungan geometri meliputi: dimensi wadah, tebal plat wadah, dimensi dan jenis batang penguat, serta dimensi dan jenis batang rangka dasar. Penentuan geometri juga mengacu pada referensi gerbong ZZOW buatan PT.INKA.

Pada pemodelan gerbong, dilakukan pada software Ansys APDL 12 dengan tipe elemen *Shell 63*, karena cocok untuk pemodelan dengan plat. Model gerbong terlebih dahulu dibuat dalam 2 dimensi namun berebentuk 3 dimensi, artinya ketebalan plat dan *beam* ditentukan setelah geometri model jadi seluruhnya. Keuntungan memakai elemen *shell* adalah ketika akan dilakukan reinforcement berupa penebalan struktur dapat dilakukan dengan mudah tanpa merubah geometri model.



Gambar 2. Pemberian tebal plat

Untuk penentuan metode elemen hingga atau dalam pemodelan CAD sering disebut *mesh*, dipakai bentuk *quad* (persegi) dengan ukuran 50 mm karena elemen *shell 63* lebih cocok menggunakan bentuk ini (ketelitian lebih tinggi). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 1 tentang diagram alir pemodelan dan analisa.



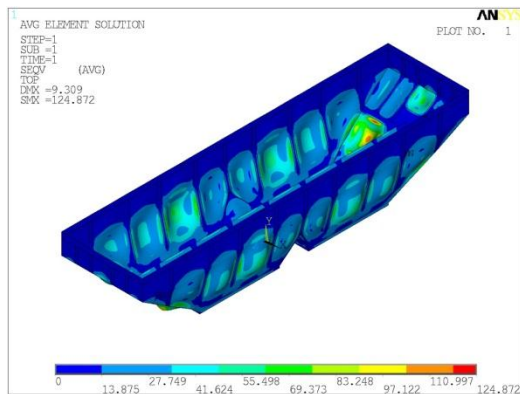
Gambar 3. Hasil Pemodelan Setelah Di-Mesh Sebesar 50 mm

#### DATA DAN ANALISA HASIL PENGUJIAN

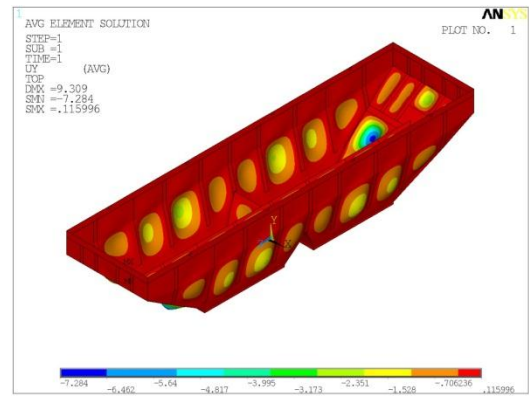
Setelah diberi pembebanan sesuai dengan hasil pembahasan diatas, maka didapatkan hasil sebagai berikut:

##### 1. Analisa wadah

Sesuai perhitungan tebal plat terhadap beban muatan yang diterima, didapat tebal plat sebesar 3 mm. saat disimulasikan didapat hasil sebagai berikut:



Gambar 4. Plot Tegangan Von Mises pada Pengujian Wadah

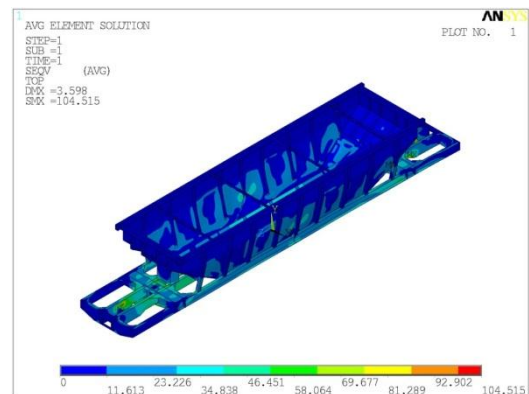


Gambar 5. Plot Defleksi pada Pengujian Wadah

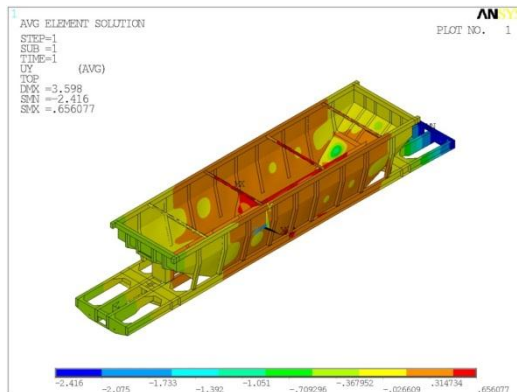
Dari hasil tersebut didapat tegangan maksimum sebesar 124.872 MPa pada kondisi 5 kali beban muatan, masih dibawah tegangan luluh wadah yaitu sebesar 245 MPa, sehingga masih dinyatakan aman.

##### 2. Analisa Struktur Off The Road

Pada analisa struktur *off the road* dibagi menjadi 4 analisa yaitu beban struktur, beban muatan, beban tekan dan beban kombinasi. Saat analisa beban muatan dan beban tekan dilakukan re-inforcement berupa penambahan geometri dan penebalan plat pada bolster dan center sill, sehingga didapatkan model yang memiliki tegangan maksimal dibawah tegangan luluh. Pada analisa kombinasi didapatkan hasil sebagai berikut.



Gambar 6. Plot Tegangan Von Mises pada Pengujian Kombinasi ff The Road



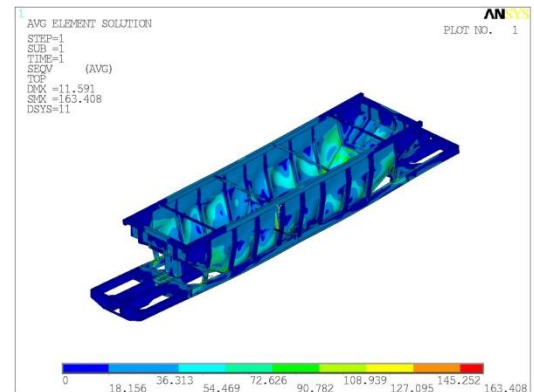
Gambar 7. Plot Defleksi pada Pengujian Kombinasi ff The Road

Dari hasil tersebut didapat tegangan maksimum sebesar 104.515 MPa pada kondisi beban kombinasi, masih dibawah tegangan luluh wadah yaitu sebesar 325 MPa, sehingga masih dinyatakan aman.

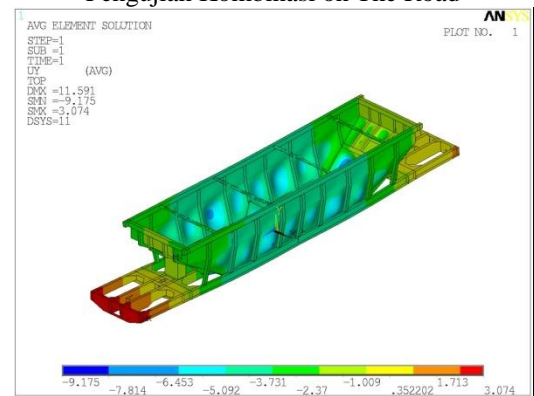
### 3. Analisa Struktur *OnThe Road*

Pada analisa *on the road* disimulasikan gerbong yang sedang berjalan di beberapa kondisi lintasan yaitu datar, tanjakan, dan tikungan, serta saat dipercepat pada kondisi datar. Pada analisa ini model sebisa mungkin tidak dilakukan reinforcement karena diasumsikan gerbong sudah dalam bentuk jadi. Untuk analisa kombinasi dari lintasan dan dipercepat oleh lokomotif dapat dilihat pada gambar 8 dan 10.

Dari hasil tersebut didapat tegangan maksimum sebesar 163.408 MPa pada kondisi 5 kali beban muatan, masih dibawah tegangan luluh wadah yaitu sebesar 325 MPa, sehingga masih dinyatakan aman.



Gambar 8. Plot Tegangan *Von Mises* pada Pengujian Kombinasi on The Road



Gambar 9. Plot Defleksi pada Pengujian Kombinasi on The Road

### 4. Analisa Kegagalan Lelah (*Fatigue*)

Pada analisa ini bertujuan menghitung umur struktur akibat beban siklik selama pemakaian, untuk itu diambil tegangan terendah tertinggi pada analisa diatas. Siklus tegangan pada struktur ini diasumsikan siklus pembebanan jenis pembalikan sempurna, artinya tegangan maksimum dan minimum konstan den tegangan rata-ratanya tidak sama dengfan nol. Tegangan maksimum terendah terjadi pada saat analisa beban struktur (*off the road*) sedangkan tegangan maksimum tertinggi terjadi pada analisa kombinasi on the road. Plot tegangan maksimum dan minimum dapat dilihat pada tabel 3. Setelah diambil 10 tegangan tertinggi pada titik yang sama pada 2 analisa tersebut lalu

dihitung tegangan amplitude ( $\sigma_a$ ) dan tegangan rata-rata ( $\sigma_m$ ) dengan rumus;

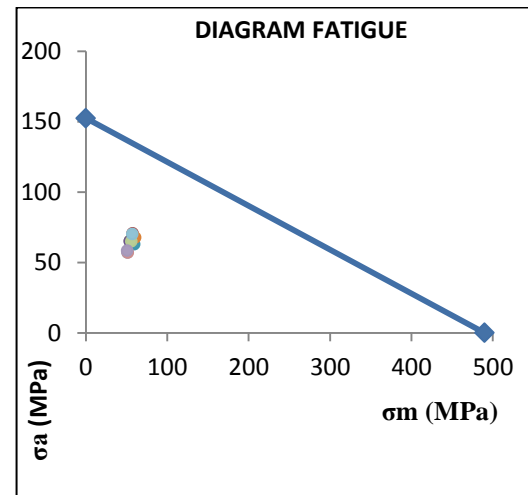
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2}$$

Tabel 3. Tegangan Maksimum dan Minimum Analisa *Fatigue*

No	Tegangan Amplitudo	Tegangan Rata-rata
1	57.829	70.58
2	60.871	67.478
3	57.35	69.98
4	59.922	62.9
5	56.007	64.892
6	54.47	65.27
7	54.057	64.772
8	50.91	58.23
9	51.686	56.984
10	51.551	56.78

Metode yang dipakai dalam analisa ini adalah metode Modifikasi Goodman yaitu garis batas yang dipakai adalah endurance limit dan ultimate stress material yang dipakai. Endurance limit disini ditentukan melalui perkalian 4 faktor yaitu *surface factor* (proses pembentukan bahan), *size factor* (ukuran bahan), *load factor* (tipe pembebanan), dan *specimen endurance limit* yang nilainya setengah dari *ultimate stress* material, dalam hal ini material yang dipakai adalah SM 490A yang memiliki *ultimate stress* sebesar 490 MPa, sehingga didapat *endurance limit* sebesar 152.415 Mpa. Dari grafik *fatigue* pada gambar 10 terlihat bahwa tegangan amplitude dan rata-rata masih dibawah garis batas Modifikasi Goodman, sehingga struktur ini dapat dikatakan *infinite life* atau tak terbatas umurnya



Gambar 10. Grafik Modifikasi Goodman

#### KESIMPULAN

1. Material yang digunakan adalah jenis SS400 dan SM 490A dengan *Yield's Strength* maksimum 245 Mpa dan 325 MPA. SS 400 untuk konstruksi wadah dan SM 490A untuk konstruksi penguat dan rangka dasar.
2. Dari hasil analisa beban disimpulkan wadah dan struktur gerbong sudah layak karena tegangan dan defleksi yang dihasilkan masih dalam batas aman.
3. Dari hasil analisa kegagalan lelah, diagram *fatigue* menunjukkan tegangan siklik yang terjadi masih dibawah batas garis *fatigue* sehingga memiliki umur tak terbatas (*infinite life*) untuk ruang lingkup struktur.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Budynas, Richard. G. dan J.Keith Nisbeth. *Shigley's Mechanical Engineering Design Ninth Edition*. Mc. Graw Hill:New York.2011.
- [2] Darmawan. *Teknologi Jalan Rel*. Bandung. 2001.

- [3] Dietmar, Gross. Werner, Hauger. Jorg, Schroder. Wolfgang, A. Wall. Javier, Bonet. *Engineering Mechanics 2, Mechanics of Materials*, New York: Springer. 2011.
- [4] Griffel, William. *Handbook of Formulas for Stress and Strain*. New York: Frederick Ungar Publishing Co., inc. 1966.
- [5] Guoxing, Lu. Tongxi, Yu. *Energy absorption of structures and materials*, New York: CRC Press LLC. 2003.
- [6] Harsokoesoemo, H. Darmawan. *Pengantar Perancangan Teknik*. Bandung :ITB. 2004
- [7] Juvinall, R. C. Marshek, K. M. *Fundamentals of Machine Component Design*. New York: John Willey & Sons. 1991.
- [8] Lecture 3 Engineering 473. *Stress at a Point*, Machine Design. University Of Tennessee. Martin.
- [9] Lorenzo, Morello. Lorenzo, Rosti Rossini. Giuseppe, Pia. Andrea, Tonoli. *The Automotive Body, Volume 1, Components Design*. Springer. 2011.
- [10] Onate, Eugenio. *Structural Analysis with the Finite Element Method Linear Static*. Barcelona: Springer. 2009.
- [11] Patel, R. C. Pandya, A. D. *Machine Design*. Vandodara: Acharya Book Depot. 1980.
- [12] Popov, E. P. *Mechanics of Material 2<sup>nd</sup> Edition*. New Jersey: Prentice-Hall, inc. 1978.
- [13] Popov, E. P. Zaenal Astamar. *Mekanika Teknik*, Edisi Kedua. Jakarta: Erlangga: 1996.
- [14] Shigley, J. E. Mitchell, L. D. Harahap, Gandhi. *Perancangan Teknik Mesin Edisi Keempat Jilid 1*. Jakarta: Erlangga. 1986.
- [15] Subyanto, M. *Dinamika Kendaraan Rel*. Bandung. 1977.