

# ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR KERETA BARANG "FLAT WAGON" STRENGTH ANALYSIS OF FLAT WAGON STRUCTURES

Anwar<sup>a)</sup>, Ade Ruhimat<sup>b)</sup>

<sup>a),b)</sup>Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur - BPPT  
Kawasan PUSPIPTEK Gd.220 Serpong, Tangerang 15314  
e-mail : [masanwar2001@yahoo.com](mailto:masanwar2001@yahoo.com)

Tanggal masuk naskah : 04/03/2014 ; Tanggal revisi: 01/04/2014 ; Tanggal persetujuan cetak : 30/05/2014

## Abstrak

*Makalah ini membahas analisis kekuatan struktur gerbong kereta barang tipe gerbong datar (flat wagon). Analisis dilakukan dengan menguji prototipe struktur flat wagon secara eksperimental dengan jenis beban statis yang terdiri dari beban vertikal, kompresi, twist, jacking, dan kombinasi.*

*Hasil pengujian berupa besaran tegangan dan camber, dianalisis terhadap persyaratan desain dan peraturan menteri untuk menilai kelayakan dari struktur flat wagon.*

*Dari hasil pengujian diperoleh titik kritis akibat beban kompresi adalah di lokasi "end center sill", sedangkan akibat beban vertikal, adalah di lokasi "central center sill". Tegangan terbesar yang terjadi akibat pengujian yaitu sebesar 271.32 N/mm<sup>2</sup> atau setara dengan 76.4% dari tegangan yield material dasarnya, terjadi pada kondisi beban kombinasi antara beban vertikal dan beban kompresi.*

*Dari analisis dan verifikasi hasil uji terhadap persyaratan desain dan peraturan menteri, disimpulkan bahwa struktur flat wagon mampu dan layak digunakan dengan kapasitas daya angkut maksimum 40 ton.*

**Kata Kunci :** gerbong datar, uji beban statis, beban kompresi, analisis tegangan.

## Abstract

*This paper describes strength analysis for the flat wagon. The analysis is conducted by experiment methods using testing the flat wagon prototype with static loads such as vertical load, compression load, twist load, jacking load, and combination of them.*

*The result of test such as stress and camber is analyzed against the design requirement and national regulation to assess the reliability of the flat wagon structure.*

*The result of test shows that the critical area under compression load and vertical load occurs at the "end center sill" and the "central center sill", respectively. Maximum stress of the flat wagons structure is 271.32 N/mm<sup>2</sup> equal to 76.4% of yield stress of base material. It occurs at combination of vertical and compression loads. It indicates that the flat wagon structure is feasible to be operated with maximum capacity of 40 tons.*

**Keywords :** flat wagon, static load test, compression load, stress analysis.

## 1. PENDAHULUAN

Kereta api merupakan salah satu sarana transportasi massal yang berfungsi untuk transportasi atau pengangkutan manusia maupun barang. Dilihat dari fungsinya tersebut, kereta api dapat dibedakan menjadi 2 (dua), yaitu kereta penumpang dan kereta

barang. Makalah ini menguraikan salah satu jenis kereta api yaitu jenis kereta barang. Terdapat beberapa jenis kereta barang yang umum digunakan sesuai dengan tujuan dan jenis barang yang diangkut seperti ditunjukkan pada Gambar 1, diantaranya yaitu [1] :

- *Flat wagon*, yaitu jenis kereta barang dimana bentuk gerbongnya berupa bidang datar (*flat*). Kereta jenis ini banyak digunakan untuk mengangkut kendaraan (mobil), baja lembaran, baja gulungan, baja profil, kontainer, dan lain-lain.
- *Hopper wagon*, yaitu jenis kereta barang dimana bentuk gerbongnya berupa suatu wadah dengan bagian atasnya terbuka dan bagian sampingnya dapat dibuka. Kereta jenis ini banyak digunakan untuk pengangkutan batu bara, katu, bijih besi, dan lain-lain.
- *Tanker wagon*, yaitu jenis kereta barang dimana bentuk gerbongnya berupa tanki. Kereta ini berfungsi untuk pengangkutan fluida.
- *Well wagon*, yaitu jenis kereta yang hampir sama dengan "*flat wagon*", namun tidak datar (*flat*) disepanjang gerbong tetapi dibagian tengah gerbong dibuat lekukan (cekungan).

Melihat fungsi kereta api yang sangat vital, karena berkaitan dengan keselamatan manusia maupun barang, maka kereta api dituntut memiliki kemampuan yang cukup memadai sehingga tidak mengalami kerusakan yang disebabkan oleh beban operasinya. Untuk memberikan kepastian terhadap kekuatan komponen dan struktur kereta api, maka dalam proses pembuatan kereta api dilakukan melalui beberapa tahapan. Salah satu tahapan tersebut adalah pengujian secara eksperimental terhadap komponen maupun struktur.

Struktur gerbong kereta dalam penggunaannya mengalami beberapa jenis dan arah beban, seperti beban vertikal, beban kompresi, beban twist, dan beban jacking. Beban-beban tersebut terjadi akibat fungsi dari kereta yaitu sebagai sarana pengangkutan barang serta beban akibat proses perbaikan dan perawatan gerbong.



Flat wagon



Hopper wagon



Well wagon



Tanker wagon

## 2. BAHAN DAN METODA

### a. Bahan

Sebagai bahan atau benda uji dalam kegiatan rekayasa ini adalah sebuah struktur gerbong kereta api untuk pengangkutan barang yaitu jenis kereta datar (*flat wagon*) tanpa dilengkapi perangkat roda dan bogie, lihat Gambar 2. Benda uji dibuat oleh industri kereta api PT. INKA Madiun.

Benda uji struktur gerbong *flat wagon*, dirancang dengan spesifikasi sebagai berikut [2], [3] :

- Kapasitas daya angkut : 40 ton
- Beban vertikal desain : 56 ton
- Beban kompresi desain : 150 ton
- Camber : 25.5 mm
- Persyaratan teknis :
  - tegangan pada beban maksimum lebih rendah dari 90%  $\sigma_{0,2}$ .
  - camber tidak boleh bernilai negatif pada beban maksimum

Material struktur gerbong terdiri dari [4], [5] :

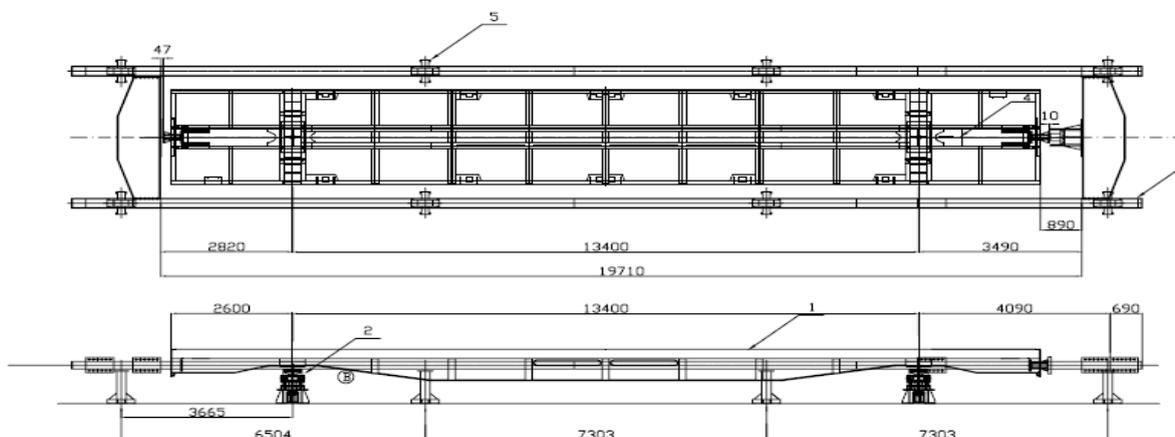
- *End Center Sill* dari bahan S 355 JR dengan tegangan luluh 355 N/mm<sup>2</sup>
- *Bolster* dari bahan S 355 JR dengan tegangan luluh 355 N/mm<sup>2</sup>
- *Central Center Sill* dari bahan S 355 JR dengan tegangan luluh 355 N/mm<sup>2</sup>
- *Cross Beam* dari bahan S 355 JR

- dengan tegangan luluh 355 N/mm<sup>2</sup>
- *Side sill* dari bahan S 355 JR dengan tegangan luluh 355 N/mm<sup>2</sup>
- Lantai dari bahan S 355 JR dengan tegangan luluh 355 N/mm<sup>2</sup>
- *Center Pivot* dari bahan AAR-M201 dengan tegangan luluh 414 N/mm<sup>2</sup>.

### b. Peralatan

Peralatan yang digunakan untuk pengujian struktur gerbong datar terdiri dari :

- Silinder hidrolik dan pompa pembangkit dengan kapasitas 200 ton, berfungsi sebagai pembangkit beban kompresi.
- *Load cell* 200 ton berfungsi sebagai sensor beban kompresi.
- Beban uji (*dummy load*) berupa pelat baja dengan berat total 56 ton.
- Strain gauge sebanyak 50 buah tipe LY 11, berfungsi sebagai sensor regangan.
- Linear Variable Displacement Transducer (LVDT) sebanyak 6 buah dengan kapasitas 50 mm, berfungsi sebagai sensor defleksi (*camber*).
- Data logger 75 channel, berfungsi untuk merekam data regangan dan defleksi.
- Universal jig dan rig, berfungsi sebagai dudukan benda uji.



Gambar 2 : Benda uji gerbong datar (*flat wagon*).

**c. Metoda**

Gerbong kereta api dalam operasinya mengalami beberapa jenis beban, yaitu [6], [7] :

- Beban vertikal, yaitu beban yang diakibatkan dari berat muatan gerbong berupa penumpang maupun barang.
- Beban kompresi, yaitu beban yang terjadi akibat percepatan dan perlambatan laju kereta serta akibat proses penyambungan atau penggandengan gerbong.
- Beban twist, yaitu beban yang terjadi pada saat kondisi darurat, misalnya terjadi kerusakan pada salah satu sistem roda.
- Beban jacking, yaitu beban akibat proses perawatan dan perbaikan gerbong di lapangan.

**1) Model Tumpuan**

Gerbong kereta api ditumpu oleh roda dengan menggunakan rangkaian bogie, bolster, swing arm, dan roda. Struktur gerbong dihubungkan dengan rangkaian bogie dengan menggunakan bolster. Dengan demikian, maka untuk pengujian beban vertikal titik tumpuan ditetapkan pada titik tumpuan bolster. Sistem tumpuan antara struktur gerbong dengan bolster adalah berupa tumpuan yang memungkinkan adanya pergerakan arah longitudinal dan rolling. Dengan demikian, maka model tumpuan pada uji beban vertikal gerbong ditetapkan model tumpuan rol, yaitu tumpuan yang memungkinkan adanya gerakan arah longitudinal dan rolling atau tidak terjadi momen pada tumpuan.

Sedangkan untuk sistem tumpuan arah longitudinal yaitu tumpuan akibat beban kompresi, ditetapkan lokasi penyambungan antar gerbong yaitu di lokasi knuckle. Satu ujung knuckle

dihubungkan dengan tumpuan tetap dan satu ujung lainnya dihubungkan dengan silinder hidrolik sebagai pembangkit beban kompresi.

**2) Uji Beban Vertikal**

Uji beban vertikal merupakan simulasi uji struktur gerbong akibat fungsinya sebagai sarana transportasi yaitu untuk memindahkan barang maupun manusia. Besar muatan berupa barang atau manusia tersebut merupakan besar beban vertikal yang harus ditahan oleh struktur gerbong.

Struktur gerbong kereta barang, direncanakan menerima beban vertikal dalam dua kondisi, yaitu kondisi beban kosong (*tare load*) dan kondisi beban penuh (*full load*).

Kondisi beban kosong mensimulasikan kondisi dimana kereta dalam keadaan kosong (tanpa muatan), sehingga besar beban kondisi kosong hanya berupa komponen-komponen yang berada diatas struktur rangka bawah gerbong. Besar beban kosong direncanakan sebesar 1.3 ton.

Kondisi kedua yaitu kondisi beban penuh, diartikan struktur gerbong menerima beban maksimum yang direncanakan mampu ditopang oleh struktur gerbong. Besar beban penuh atau beban uji  $P_v$  dihitung dengan persamaan [8] :

$$P_v = k (P_1 + P_2) \dots\dots\dots(1)$$

- k = faktor dinamis = 1.3
- $P_1$  = berat rangka dasar + badan = 1.3 ton
- $P_2$  = kuat muat = berat muat + toleransi
- Toleransi = 5% berat muat

Berdasarkan persamaan di atas, diperoleh nilai beban uji sebesar 56 ton.



Gambar 3 : Uji beban vertikal dengan menggunakan pelat baja.

Pembebanan dilakukan dengan membebani struktur gerbong dengan beban mati berupa pelat baja yang telah diukur beratnya. Beban uji diletakkan secara merata di atas permukaan gerbong datar, lihat Gambar 3.

### 3) Uji Beban Kompresi.

Uji beban kompresi merupakan simulasi dari struktur gerbong akibat percepatan, perlambatan, dan proses penggandengan antar gerbong. Sesuai persyaratan desain bahwa struktur gerbong dirancang mampu menahan beban kompresi sebesar 150 ton, dengan tegangan tidak boleh melebihi 90% tegangan yield. Sedangkan peraturan menteri perhubungan menyatakan struktur gerbong harus mampu menahan beban kompresi sebesar 100 ton, dengan tegangan tidak boleh melebihi 75% tegangan yield [8].

Uji beban kompresi struktur gerbong dibedakan menjadi 2 (dua) kondisi, yaitu :

- Beban kompresi dengan beban vertikal dalam kondisi kosong.
- Beban kompresi dengan beban vertikal dalam kondisi penuh.

### 4) Uji Beban Jacking

Uji beban jacking adalah simulasi dari struktur gerbong pada saat dilakukan perbaikan di bengkel maupun pada saat darurat di lapangan. Simulasi

perbaikan di bengkel disimulasikan dengan kondisi beban vertikal dalam keadaan kosong, sedangkan simulasi di lapangan dilakukan dengan kondisi beban vertikal maksimum.

Metoda uji adalah dengan cara mengangkat kedua titik jacking sehingga struktur gerbong terangkat hingga terjadi beban pada lokasi titik tumpuan bolster sebesar 3.65 ton yaitu setara dengan berat struktur bogie.

### 5) Uji beban Twist

Uji beban twist mensimulasikan kondisi struktur gerbong jika mengalami beban puntir yang terjadi pada saat perbaikan maupun kondisi darurat akibat kerusakan dari rel, bogie maupun roda.

Metode uji adalah dengan membebani struktur gerbong dengan beban vertikal keadaan kosong dan sistem tumpuan bekerja hanya dengan 3 titik tumpuan dari 4 lokasi titik jacking, sehingga terjadi beban twist atau puntir pada struktur gerbong.

### 6) Pengukuran Besaran Mekanis

Tujuan utama dari kegiatan pengujian adalah mengukur dan mengamati suatu besaran atau parameter. Dalam pengujian struktur gerbong parameter yang diukur adalah regangan dan defleksi. Parameter regangan dan defleksi diukur pada setiap tahap pengujian yaitu uji beban vertikal, kompresi, twist, dan jacking.

Regangan digunakan untuk menghitung tegangan sebagai bahan dasar evaluasi kekuatan struktur. Regangan diukur dengan menggunakan sensor regangan (strain gauge). Untuk mendapatkan hasil yang optimal, maka pengukuran regangan dilakukan pada semua bagian dari struktur gerbong, terutama pada daerah yang diperkirakan tegangan relatif besar.

Sensor regangan dipasang pada titik yang diukur dengan cara direkatkan, sehingga pergerakan atau regangan yang terjadi pada lokasi tersebut dapat

terukur oleh strain gauge. Keluaran sensor regangan berupa sinyal listrik setara dengan tegangan yang equivalent dengan besaran regangan (perpanjangan) benda uji, dicetak dengan menggunakan data logger. Faktor-faktor yang berhubungan dengan konfigurasi pemasangan strain gauge, faktor kalibrasi strain gauge, temperatur, dll. dimasukkan sebagai faktor koreksi dalam pemrograman data logger.

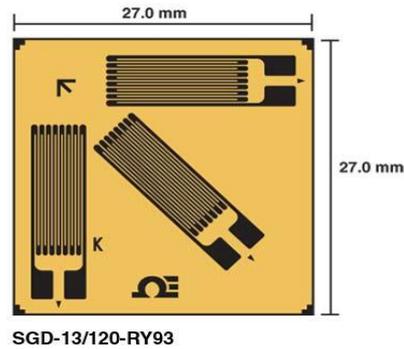
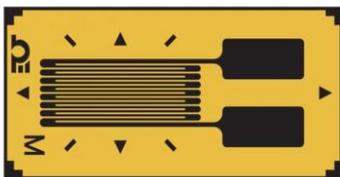
Selain besaran regangan, pengujian struktur gerbong juga bertujuan untuk mengetahui perubahan camber khususnya akibat beban vertikal. Besaran camber diukur dengan menggunakan LVDT (linear variable displacement transducer). Keluaran dari LVDT berupa sinyal listrik diperkuat dengan menggunakan amplifier, sehingga data bisa diukur dengan data logger.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### a. Tegangan

Salah satu parameter yang digunakan untuk menilai karakteristik struktur gerbong adalah dengan mengetahui tegangan yang terjadi pada beberapa titik yang diperkirakan atau menurut data disain dianggap kritis. Besaran tegangan diperoleh berdasarkan data hasil pengukuran berupa regangan.

Terdapat dua jenis sensor regangan (strain gauge) yang digunakan dalam pengukuran regangan, yaitu tipe single dan tipe rosette dengan sudut 45°/90° (lihat Gambar 4) [9].



Gambar 4 : Konfigurasi strain gauge tipe single (atas) dan tipe rosette 45°/90° (bawah).

Hubungan antara regangan dan tegangan untuk tipe strain gauge single, dapat dinyatakan dengan hukum Hooke sebagai berikut :

$$\sigma = \epsilon E \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

- $\sigma$  = tegangan (N/mm<sup>2</sup>)
- $\epsilon$  = regangan (%)
- $E$  = modulus elastisitas (N/mm<sup>2</sup>)

Sedangkan untuk jenis atau konfigurasi strain gauge rosette dengan sudut 45°/90° digunakan persamaan sebagai berikut [9] :

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left[ \left( \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{1-\nu} \right) \pm \frac{\sqrt{2}}{1+\nu} \sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2} \right] \dots\dots\dots (3)$$

Dimana :

- $\sigma_{1,2}$  = tegangan utama dengan arah  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  adalah 90°.
- $\epsilon_a$  = regangan arah 0° (mendatar).
- $\epsilon_b$  = regangan arah 45°
- $\epsilon_c$  = regangan arah 90° (vertikal).
- $E$  = modulus elastisitas
- $\nu$  = Poison's ratio

Sedangkan untuk mendapatkan besaran tegangan ekivalen dihitung berdasarkan kriteria Von Mises sesuai persamaan [9] :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2)} \dots\dots (4)$$

Dimana :

- $\sigma_1$  = tegangan utama 1.
- $\sigma_2$  = tegangan utama 2, dengan arah  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  adalah 90°.

Sebagai contoh hasil uji dengan pembebanan kombinasi vertikal (56 ton) dan beban kompresi 150 ton, diperoleh regangan terbesar untuk tipe strain gauge single yaitu sebesar 1292  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Sedangkan untuk tipe strain gauge rosette diperoleh hasil  $\epsilon_a = 52 \mu\text{m}/\text{m}$ ,  $\epsilon_b = -254 \mu\text{m}/\text{m}$ ,  $\epsilon_c = -401 \mu\text{m}/\text{m}$ .

Dengan menggunakan persamaan (2) diperoleh besar tegangan untuk single strain gauge yaitu :

$$\begin{aligned}\sigma &= \epsilon E \\ &= 1292 (\mu\text{m}/\text{m}) \times 210000 (\text{N}/\text{mm}^2) \\ &= 1292 \times 10^{-6} (\%) \times 210000 (\text{N}/\text{mm}^2) \\ &= 271.32 \text{ N}/\text{mm}^2.\end{aligned}$$

Sedangkan berdasarkan persamaan (3) dan (4), untuk strain gauge rosette, diperoleh nilai tegangan equivalen sebesar 85.05  $\text{N}/\text{mm}^2$ .

Hasil perhitungan tegangan dari berbagai kondisi pembebanan sesuai metode butir 2.3 (b,c,d,e) di atas, disajikan pada tabel 1. Pada tabel tersebut tidak semua data disajikan, namun hanya disajikan data tegangan terbesar saja.

Dari Tabel 1 di atas terlihat bahwa tegangan terbesar terjadi di lokasi *end center sill* pada kondisi beban kombinasi antara beban kompresi dengan beban vertikal penuh, yaitu sebesar  $\sigma = 271.32 \text{ N}/\text{mm}^2$ .

*End center sill* terbuat dari bahan S 355 R dengan tegangan yield sebesar  $\sigma_{0.2} = 355 \text{ N}/\text{mm}^2$  [4]. Persyaratan yang ditetapkan oleh disainer adalah tegangan maksimum akibat beban kerja, harus lebih rendah dari 90% tegangan yield.

Hasil uji yaitu sebesar  $\sigma = 271.32 \text{ N}/\text{mm}^2$ , adalah setara dengan 76.43% dari tegangan yield. Dengan demikian, maka struktur flat wagon memenuhi

persyaratan yang ditetapkan oleh disainer. Hasil perhitungan prosentase pada berbagai kondisi pembebanan, dapat dilihat pada Tabel 1.

Selain persyaratan desain, terdapat persyaratan lain yang harus dipenuhi oleh struktur gerbong, yaitu peraturan menteri perhubungan no. KM 43 tahun 2010 [8]. Dalam peraturan tersebut disyaratkan bahwa struktur gerbong harus mampu menahan beban kompresi sebesar 100 ton dengan dan tanpa beban vertikal. Tegangan yang terjadi pada konstruksi rangka bawah akibat beban tersebut, tidak boleh lebih dari 75 % dari tegangan yield.

Data hasil uji pada beban kompresi sebesar 100 ton diperoleh hasil berupa tegangan maksimum seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tegangan maksimum akibat beban kompresi 100 ton terjadi pada saat kondisi beban vertikal penuh yaitu sebesar 174.93  $\text{N}/\text{mm}^2$ , dengan lokasi di *end center sill*. Tegangan tersebut jika dibandingkan dengan tegangan yield diperoleh nilai sebesar 49.28 %. Dengan demikian maka struktur flat wagon memenuhi persyaratan peraturan menteri perhubungan, karena tegangan akibat beban kompresi 100 ton masih lebih kecil dari 75% tegangan yield.

Selain lokasi titik kritis akibat beban kompresi di *end center sill* seperti diuraikan di atas, juga terjadi titik kritis di *central center sill* yang diakibatkan oleh beban vertikal, jacking, dan twist, lihat Tabel 1. Namun tegangan pada lokasi *central center sill* akibat beban-beban tersebut, masih lebih kecil dari 75% tegangan yield seperti disyaratkan dalam peraturan menteri perhubungan. Dengan demikian struktur gerbong flat wagon, memenuhi persyaratan desain maupun persyaratan yang ditetapkan oleh menteri perhubungan.

Tabel 1. Tegangan pada berbagai jenis beban uji.

No	Jenis Beban	Regangan ( $\mu\text{m/m}$ )	Tegangan ( $\text{N/mm}^2$ )	Prosentase terhadap Teg yield (%)	Lokasi
1	Vertikal kosong	86	18.06	5.09	Central center sill
2	Vertikal penuh	546	114.66	32.30	Central center sill
3	Kompresi, vertikal kosong	1184	248.64	70.04	End center sill
4	Kompresi, vertikal penuh	1292	271.32	76.43	End center sill
5	Jacking, vertikal kosong	98	20.58	5.80	Bolster
6	Jacking, vertikal penuh	567	119.07	33.54	Central center sill
7	Twist	576	120.96	34.07	Central center sill

Tabel 2. Tegangan akibat beban kompresi 100 ton.

No	Kondisi	Regangan ( $\mu\text{m/m}$ )	Tegangan ( $\text{N/mm}^2$ )
1	Beban vertikal kosong	696	146.16
2	Beban vertikal penuh	833	174.93

## b. Camber

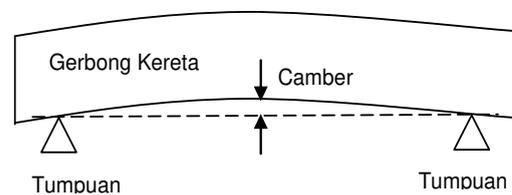
Setiap struktur yang mengalami beban bending, selalu dirancang dengan besaran *camber* tertentu, demikian juga dengan struktur gerbong kereta api. *Camber* didefinisikan sebagai jarak terendah antara titik tengah bentangan struktur gerbong terhadap titik tumpuan, lihat gambar 5.

Persyaratan disain struktur kereta api, mengharuskan *camber* selalu bernilai positif walaupun dibebani dengan beban maksimum. *Camber* positif diartikan bahwa nilai *camber* harus di atas garis lurus antara tumpuan.

Untuk mengukur *camber* tersebut digunakan linier displacement transducer (LVDT) yang dipasang pada beberapa tempat, yaitu tengah bentangan, tumpuan, dan ujung gerbong.

Hasil pengukuran defleksi pada posisi tengah bentangan pada kondisi beban vertikal maksimum (full load) diperoleh hasil yaitu sebagai berikut :

- Defleksi sisi kiri : 18.8 mm
- Defleksi sisi kanan : 19.3 mm
- Defleksi rata-rata : 19.05 mm.



Gambar 5 : Camber dari struktur kereta.

Struktur gerbong datar (*flat wagon*) dirancang dengan *camber*  $c = 25.5$  mm. Dengan terjadi defleksi pada saat beban maksimum sebesar 19.05 mm, maka *camber* pada kondisi beban vertikal penuh adalah sebesar :

$$\begin{aligned} C_{min} &= \text{camber} - \text{defleksi} \\ &= 25.5 - 19.05 \\ &= 6.45 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Dengan demikian, nilai *camber* pada kondisi beban vertikal maksimum bernilai positif, sesuai dengan persyaratan perencanaan struktur gerbong datar (*flat wagon*).

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil uji dan pembahasan di atas, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu titik kritis struktur *flat wagon* akibat beban vertikal, jacking, dan twist adalah di lokasi *central center sill*, sedangkan akibat beban kompresi di lokasi *end center sill*, tegangan maksimum pada struktur gerbong terjadi akibat kombinasi beban vertikal penuh (56 ton) dengan beban kompresi (150 ton), yaitu sebesar

271.32 N/mm<sup>2</sup> atau setara dengan 76.43% tegangan yield. Sedangkan tegangan maksimum akibat beban kombinasi beban vertikal penuh dan beban kompresi 100 ton, adalah sebesar 174.93 N/mm<sup>2</sup> atau setara dengan 49.28 % tegangan yield, sedangkan defleksi maksimum atau camber terkecil terjadi pada kondisi beban vertikal penuh. Besar camber pada kondisi tersebut adalah 6.45 mm. Dari kedua butir parameter yang dievaluasi yaitu tegangan dan camber seperti di atas, maka struktur gerbong *flat wagon* memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh desainer maupun persyaratan menteri perhubungan RI sehingga layak digunakan untuk keperluan pengangkutan barang dengan kapasitas maksimum yang direncanakan yaitu 40 ton.

Kekuatan struktur gerbong kereta api sangat berpengaruh terhadap keselamatan jiwa manusia maupun barang. Dalam pengoperasiannya struktur gerbong selalu mengalami pembebanan dinamis. Dengan demikian sudah selayaknya struktur gerbong selain dinilai kelayakannya terhadap pembebanan statis, juga perlu dilakukan evaluasi kekuatan akibat beban dinamis.

## DAFTAR PUSTAKA

1. *Belinterlogistic International Transportation, Types of Railways and Container*, 2009.
2. *Testing Procedure of Vertical Load Test*, Doc.Nr. 005/P.MK/G.028/ 2010, PT. INKA Madiun, 2010.
3. *Testing Procedure of Compression Load Test*, Doc.Nr. 003/P.MK/G.028/ 2010, PT. INKA Madiun, 2010.
4. *European Structural Steel Standard EN 10025 : 2004*
5. AAR M-201, *Casting Steel Specification, AAR Manual of Standard and Recommended Practices Casting Details*, October 2010.
6. JIS E 7105:2006/ AMENDMENT 1:2011, *Rolling stock - Test methods of static load for body structures*, 2011.
7. Peraturan Menteri Perhubungan RI No. PM.17 tahun 2011 tentang Standar, Tata Cara Pengujian dan Sertifikasi Kelaikan Gerbong, 2011.
8. Peraturan Menteri Perhubungan RI No. KM.43 tahun 2010 tentang Standar Spesifikasi Teknik Gerbong, 2010.
9. Daily, J.W, *"Experimental Stress Analysis"* second edition, Mc Graw Hill, 1978.
10. Kucora istvan, Rovanovic Ljljana, *"Phyrolisis Furnace tube damaging and inspection"*. ACTA Technica corviniensis- Bulletine of Engineering Fascicule 3, Tome VII.2014.

