

# Analisis Kekuatan Struktur *Bogie Frame* Kereta Ukur pada Kondisi *Exceptional Loads*

Ratriana Lia Monalisa<sup>a</sup>, Indarto Yuwono<sup>a</sup>, Alfi Tranggono Agus Salim<sup>a</sup>, Agung Prasetyo Utomo<sup>b</sup>, Muhammad Zainal Mahfud<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Perkeretaapian, Politeknik Negeri Madiun

e-mail: ratrianalia1002@gmail.com, indarto@pnm.ac.id, alfitranggono@pnm.ac.id

<sup>b</sup> Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

e-mail: agungprasetyo@ppns.ac.id

<sup>c</sup> Divisi Teknologi, Departemen Engineering, PT INKA

e-mail: muhammad.zmahfud@inka.co.id

## Kata kunci:

*Bogie frame*,  
*Exceptional loads*,  
Nilai tegangan,  
Standar EN 13749,  
*Yield Strength*.

## ABSTRAK

*Bogie frame* adalah bagian utama *bogie* yang digunakan untuk menopang seluruh badan kereta api, menghubungkan *bogie* ke *wheel set*, dan menopang komponen *bogie* lainnya. Beban terberat kereta api diterima *bogie frame* sehingga diperlukan analisis kekuatan struktur. Penelitian ini berfokus pada analisis kekuatan desain struktur *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek pada kondisi *exceptional loads*. Tujuan penelitian menganalisis nilai tegangan objek penelitian akibat *exceptional loads* dan memastikan hasil simulasi memenuhi kriteria keberterimaan standar EN 13749. Hasil penelitian adalah nilai tegangan maksimum, nilai defleksi maksimum, dan lokasi tegangan maksimum tiap *load case*. Nilai tegangan maksimum hasil simulasi dibandingkan dengan nilai *yield strength* material sebesar 355 MPa. Dari dua belas *load case exceptional* dihasilkan nilai tegangan maksimum kurang dari nilai *yield strength* material. Nilai tegangan maksimum tertinggi terletak pada *stopper transversal bracket* yaitu sebesar 258 MPa dan defleksi maksimum terjadi ketika kondisi *derailment* (anjlok) yaitu sebesar 12,1 mm. *Bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek memenuhi kriteria keberterimaan standar EN 13749 ketika kondisi *exceptional loads*.

## Keyword:

*Bogie frame*,  
*Exceptional loads*,  
Stress rate,  
EN 13749 Standard,  
*Yield strength*.

## ABSTRACT

*Bogie frame* is the main part of the *bogie* used to support the entire body of the train, connect the *bogie* to the *wheel set*, and support other *bogie* components. The biggest load of the train is received by the *bogie frame*, so an analysis of the strength of the structure is needed. This study focuses on analyzing the strength of the *bogie frame* structure design for the Jabodebek LRT track under *exceptional loads* conditions. The purpose of this research is to analyze the stress value of the research object due to *exceptional loads* and to ensure that the simulation results meet the acceptance criteria of the EN 13749 standard. The results of this study are the maximum stress value, maximum deflection value, and the location of the maximum stress in each *load case*. The maximum stress value of the simulation results is compared with the material yield strength value of 355 MPa. Of the twelve *exceptional load cases*, the maximum stress value is less than the yield strength of the material. The highest maximum stress value is located at the *stopper transverse bracket*, which is 258 MPa and the maximum deflection occurs when the *derailment* condition is 12.1 mm. The *bogie frame* of the Jabodebek LRT track measuring train the acceptance criteria of standard EN 13749 when conditions are *exceptional loads*.

## 1. PENDAHULUAN

*Bogie* adalah konstruksi yang terdiri dari dua set roda atau lebih digabungkan oleh rangka dan dilengkapi dengan sistem pegas, pengereman, dengan atau tanpa peralatan penggerak dan antiselip, serta keseluruhan berfungsi sebagai penyangga rangka dasar badan kereta api. *Bogie* terdiri atas beberapa

bagian utama antara lain: *bogie frame*, *bolster*, perangkat roda (*wheel set*), pegas primer, pegas sekunder, *axle box*, *bearing*, sepatu rem, peralatan pengereman serta peralatan pendukung [1]. *Bogie frame* adalah bagian utama *bogie* untuk menopang seluruh badan kereta (*carbody*), menghubungkan *bogie* ke *wheel set*, dan menopang komponen *bogie* lainnya [2].

Beban terbesar kereta api diterima *bogie frame* sehingga diperlukan analisis kekuatan struktur [3]. Analisis struktur diperlukan untuk mengetahui distribusi dan dampak beban terhadap struktur yang ditinjau. Analisis struktur dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak komputer sehingga memangkas waktu uji coba dan memaksimalkan hasil produksi [4]. Penelitian sebelumnya dilakukan dengan metode eksperimental dan simulasi ANSYS. Hasil yang diperoleh dari simulasi perangkat lunak ANSYS telah mengkonfirmasi hasil eksperimen. Meskipun ada beberapa perbedaan, hasil tersebut tidak melebihi 10 persen kisaran toleransi yang diterima [5].

Analisis dan pengujian mengacu pada standar EN 13749:2011 tentang “*Railway Applications - Wheelsets And Bogies-Method of Specifying The Structural Requirements of Bogie Frames*”. Merujuk standar EN 13749:2011, salah satu jenis pembebanan yang diaplikasikan dalam analisis kekuatan desain *bogie frame* adalah *under exceptional loads*. *Under exceptional loads* adalah nilai beban ekstrem atau luar biasa yang jarang terjadi pada *bogie*. Metode ini digunakan untuk memastikan bahwa *bogie* tidak mengalami deformasi plastis (perubahan bentuk permanen) ketika beban dihilangkan [6]. Penelitian mengenai analisis kekuatan struktur *bogie frame* pada kondisi *exceptional loads* dilakukan dengan menerapkan dua belas kasus beban *exceptional*. Hasil simulasi beban berupa nilai tegangan maksimum yang dibandingkan dengan nilai *yield strength* material. Apabila nilai tegangan maksimum kurang dari nilai *yield strength* maka *bogie frame* dalam keadaan aman [7].

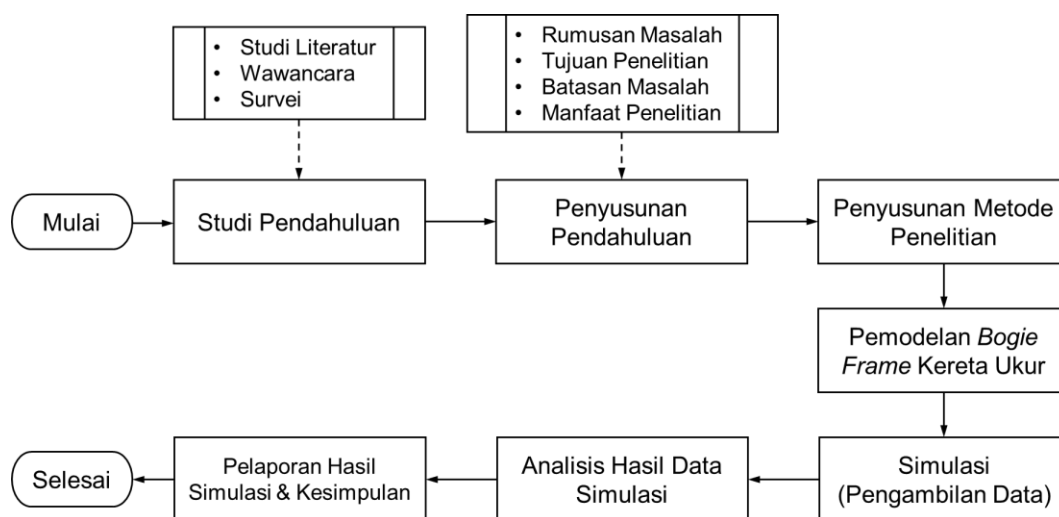
Penelitian ini membahas analisis kekuatan *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek dengan dua belas kasus beban *exceptional loads*. Simulasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan *software Finite Element Method (FEM)* [8].

## 2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dipersiapkan untuk tercapainya penelitian yang *valid*.

### 2.1 Prosedur Penelitian (Flowchart)

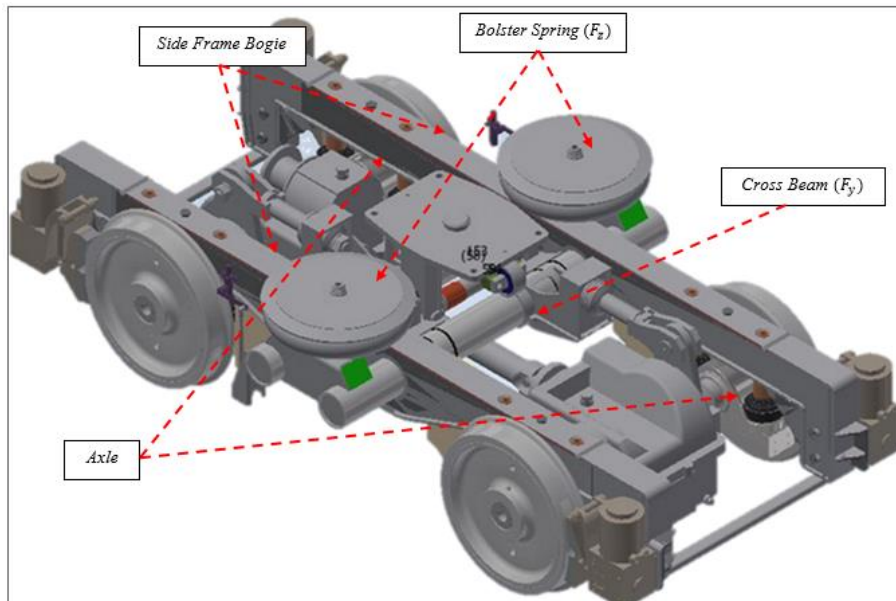
Tahapan proses yang dilakukan dalam penelitian digambarkan dalam diagram alir penelitian pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan alur penelitian

## 2.2 Objek Penelitian

Objek penelitian yaitu desain *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek. Gambar 2 menunjukkan desain 3D *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek.



Gambar 2. Desain 3D bogie kereta ukur jalur LRT Jabodebek [9]

Gambar 2 menunjukkan desain 3D *bogie* kereta ukur jalur LRT Jabodebek. Dari Gambar 2 dilakukan pemodelan sederhana menggunakan *software Finite Element Method (FEM)*. Material yang digunakan dalam manufaktur *bogie frame* adalah S355J2+N [10] dan STKM13C [11]. Tabel 1 menunjukkan *data sheet* material yang digunakan dalam manufaktur *bogie frame*.

Tabel 1. Data sheet material

<i>Mechanical Properties</i>	<b>S355J2+N</b>	<b>STKM13C</b>
<i>Young Modulus</i>	2.10E+05 MPa	2.10E+05 MPa
<i>Shear Modulus</i>	7.7E+0.4 MPa	8.2E+0.4 MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0.3	0.29
<i>Density</i>	7.85E-0.6 kg/mm3	7.85E-0.6 kg/mm3
<i>Yield Strength</i>	355 MPa	380 MPa
<i>Ultimate Strength</i>	470 MPa	510 MPa
	[10]	[11]

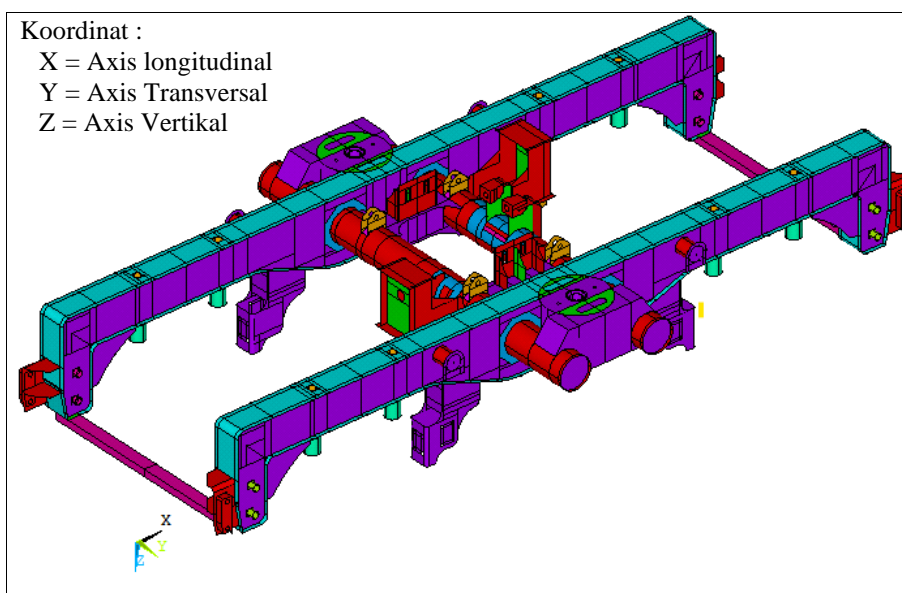
## 2.3 Pengambilan Data Hasil Simulasi

Hasil simulasi kekuatan struktur *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek yaitu nilai tegangan maksimum, nilai defleksi maksimum, dan lokasi tegangan maksimum pada 12 *load case exceptional*. Tegangan yang digunakan pada analisis adalah tegangan *von mises* maksimum. Tegangan maksimum hasil simulasi dibandingkan dengan *yield strength* material [12].

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Model Simulasi *Bogie Frame* Kereta Ukur Jalur LRT Jabodebek

*Bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek dimodelkan dengan tipe elemen 2D yaitu *element shell*. Penggunaan elemen 2D bertujuan meringankan kinerja PC selama proses simulasi [13]. Gambar 3 menunjukkan hasil pembuatan model *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek.

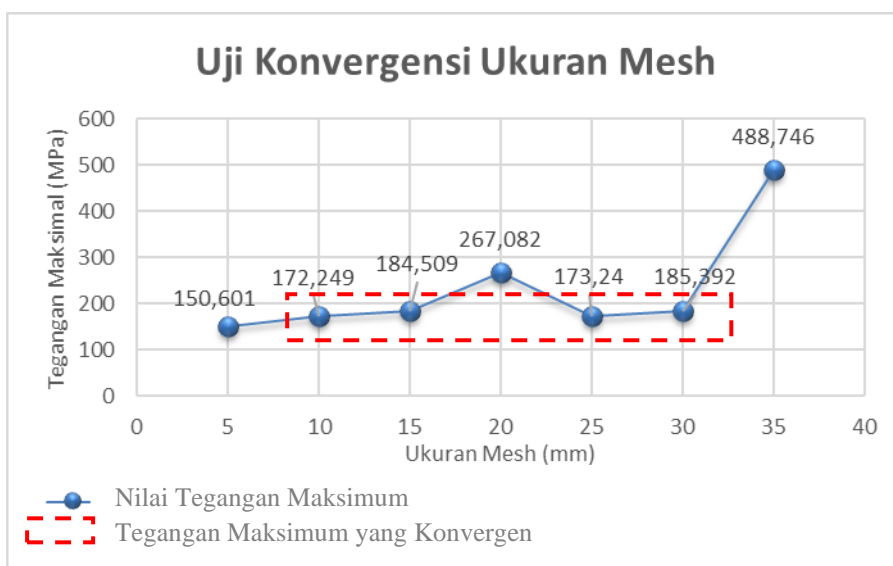


Gambar 3. Model bogie frame kereta ukur jalur LRT Jabodebek

Masing-masing warna mewakili nomor *real constant* yang didefinisikan pada model *bogie frame*. Selain penggunaan tipe elemen *shell*, digunakan tipe elemen *beam* untuk pemodelan *support*. Model *support* pada Gambar 5 digunakan untuk mengondisikan simulasi *bogie frame* sesuai kondisi operasional *bogie frame* [14]. Pemodelan geometri *volume* yang sulit dimodelkan dengan *shell* atau *beam* menggunakan tipe elemen *solid*.

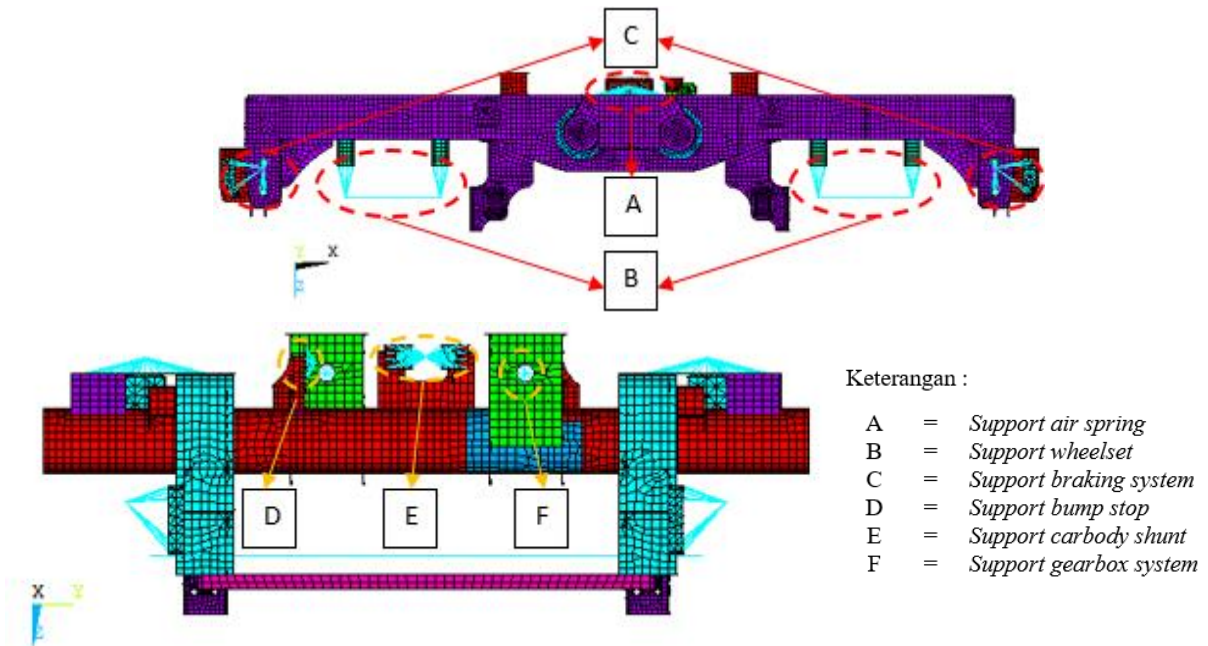
### 3.2 Uji Konvergensi Mesh dan Support Model

Uji konvergensi ukuran *mesh* dilakukan dari rentang ukuran 5 mm hingga 35 mm. Hasil uji konvergensi ukuran *mesh* ditunjukkan pada Gambar 4.



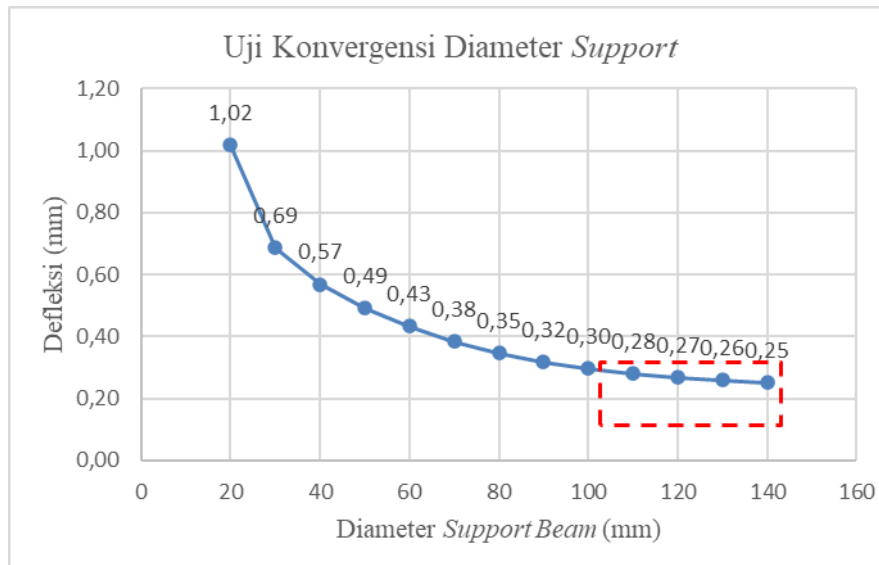
Gambar 4. Grafik hasil uji konvergensi ukuran mesh

Berdasarkan hasil uji konvergensi, tegangan maksimum konvergen pada ukuran *mesh* 10 mm, 15 mm, 25 mm, dan 30 mm. Penelitian ini menggunakan ukuran *mesh* 25 mm karena hasil simulasi pada 12 *load case* diperoleh nilai yang konvergen pada ukuran *mesh* 25 mm. Ukuran *support* dilakukan uji konvergensi untuk mendapatkan hasil simulasi yang *valid*. *Support* model yang digunakan mewakili pusat gravitasi/*Center of Gravity* (CoG) komponen sistem *bogie*. *Support* model objek penelitian ditunjukkan Gambar 5.



Gambar 5. Model support bogie frame kereta ukur jalur LRT Jabodebek

Uji konvergensi *support* dilakukan dengan beban gaya 1000 N pada bagian *support air spring* [15]. Grafik hasil uji konvergen ukuran *support* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik hasil uji konvergensi diameter *support*

Berdasarkan grafik pada Gambar , disimpulkan ukuran diameter *support* konvergen pada diameter 120 mm, 130 mm, dan 140 mm. Diameter *support* 120 mm digunakan dalam simulasi karena nilai defleksi yang konvergen.

### 3.3 Kondisi Batas dan Pembebanan

Gaya-gaya yang bekerja dipengaruhi oleh komponen yang melekat pada *bogie frame*.

#### 3.3.1 Gaya Vertikal

Gaya vertikal diaplikasikan pada tiap rangka samping, untuk menghitung gaya vertikal pada objek penelitian digunakan persamaan 1 [6].

$$F_{z1} = F_{z2} = \frac{1,4}{4} \times (M_{v3} - (m_1^+ + m_2^+)) \times g \tag{1}$$

$$F_{z1} = F_{z2} = \frac{1,4}{4} \times (48.000 \text{ kg} - (6.000 \text{ kg} + 4.700 \text{ kg})) \times 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F_{z1} = F_{z2} = 128.069,55 \approx 128.070 \text{ N}$$

### 3.3.2 Gaya Transversal

Gaya transversal terjadi akibat gerakan berbelok kereta atau ketidakrataan rel. Perhitungan gaya transversal menggunakan persamaan 2 [6].

$$F_y = 2 \times \left( 10^4 + \frac{(M_{v3} \times g)}{12} \right) \quad (2)$$

$$F_y = 2 \times \left( 10^4 + \frac{(48.000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2)}{12} \right)$$

$$F_y = 98.480 \text{ N}$$

Gaya transversal ( $F_y$ ) pada *bogie* didistribusikan di setiap suspensi sekunder dan *bump stop* [6].

- a. Gaya transversal pada suspensi sekunder

$$F_{ys} = \text{Stiffness} \times \text{defleksi maksimum} \quad (3)$$

$$F_{ys} = 146,7 \times 30$$

$$F_{ys} = 4.401 \text{ N}$$

- b. Gaya transversal pada *bump stop*

$$F_{yb} = 2F_{ys} \quad (4)$$

$$F_{yb} = 2(4.401 \text{ N})$$

$$F_{yb} = 8.802 \text{ N}$$

$$F_{yb} = 89.678 \text{ N}$$

### 3.3.3 Gaya Longitudinal

Gaya longitudinal merupakan representasi dari gaya akibat percepatan dan perlambatan dari objek penelitian.

- a. Gaya longitudinal *shunt*

Gaya longitudinal *shunt* dihitung dengan menggunakan persamaan 5 [6].

$$F_{xb} = m_1^+ \times 3 \times g \quad (5)$$

$$F_{xb} = 6.000 \text{ kg} \times 3 \times 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F_{xb} = 176.580 \text{ N}$$

- b. Gaya longitudinal pada *gearbox*

Besar gaya longitudinal pada *gearbox* dihitung dengan persamaan 6 [6].

$$F_{xg} = 1,3 \times \left( \frac{T}{L} + (m_{gb} \times g) \right) \quad (6)$$

$$F_{xg} = 1,3 \times \left( \frac{12.460}{0,625} + (849 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2) \right)$$

$$F_{xg} = 36.744,097 \approx 36.745 \text{ N}$$

- c. Gaya longitudinal reaksi *carboby*

Besar gaya longitudinal akibat reaksi *carboby* dihitung dengan menggunakan persamaan 7 [6].

$$F_{xc} = 1,3 \times \left( \frac{M_{v2} \times a}{2} \right) \quad (7)$$

$$F_{xc} = 1,3 \times \left( \frac{37.300 \text{ kg} \times 1,36}{2} \right)$$

$$F_{xc} = 32.973 \text{ N}$$

- d. Gaya longitudinal *lozenging*

Untuk menghitung gaya *lozenging* digunakan persamaan 8 [6].

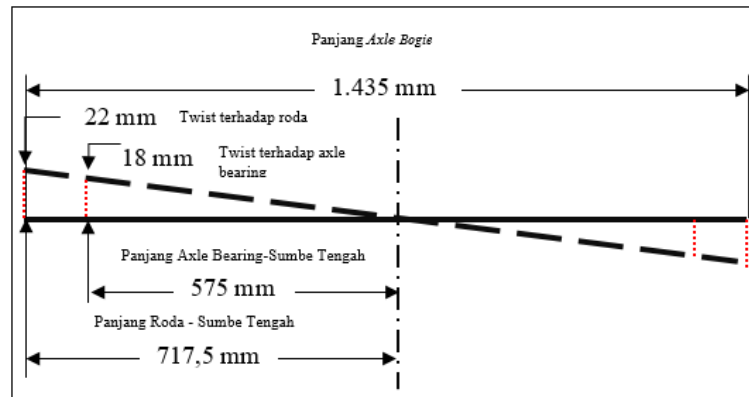
$$F_x = 0,1 \times ((2 \times F_z) + (m_1^+ \times g)) \quad (8)$$

$$F_x = 0,1 \times ((2 \times 128.070 \text{ N}) + (6.000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2))$$

$$F_x = 31.500 \text{ N}$$

### 3.3.4 Twist (Gaya Puntir)

Kondisi *twist* terhadap sistem *bogie* kereta ukur jalur LRT Jabodebek ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kondisi *twist* terhadap *axle bogie*

*Twist* yang terjadi pada *axle bearing* yang dihitung dengan persamaan 9 [6].

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{(tg \times Kg)}{Kb} \\ \delta &= \frac{(18 \text{ mm} \times 117,25 \text{ kg/mm})}{381 \text{ kg/mm}} \\ \delta &= 5,5 \text{ mm} \end{aligned} \tag{9}$$

### 3.3.5 Gaya Reaksi Pengereman

Terdapat dua gaya reaksi proses pengereman yaitu pada *axis-X* dan *axis-Z* akibat gaya gesek rotasi roda dengan blok rem.

a. *Axis-X*

Besar gaya reaksi pengereman arah *axis-X* dihitung dengan persamaan 10 [6].

$$\begin{aligned} F_{bx} &= 1,3 \times \text{gaya per blok rem} \\ F_{bx} &= 1,3 \times 12.000 \\ F_{bx} &= 15.600 \text{ N} \end{aligned} \tag{10}$$

b. *Axis-Z*

Besar gaya reaksi pengereman arah *axis-Z* dihitung dengan persamaan 11 [6].

$$\begin{aligned} F_{bz} &= 1,3 \times \text{gaya pengereman roda (berdasarkan diameter)} \\ F_{bz} &= 1,3 \times \frac{14.000}{2} \\ F_{bz} &= 9.100 \text{ N} \end{aligned} \tag{11}$$

### 3.4 Nilai Gaya Tiap Load Case

Besar gaya pada kondisi *exceptional loads* untuk setiap *load case* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Load case exceptional* berdasarkan EN 13479

Load Case	Vertical [N]	Transversal [N]		Derailment	Twist [mm]	Longitudinal Shunt/Dec./Yaw [N]	Longitudinal Gearbox [N]	Braking [N]
		Bump Stop	Air Spring					
1	128.070	*	*	*	*	*	*	*
2	128.070	89.678	4.401	*	*	*	*	*
3	91.479	*	*	One wheel – off	*	*	*	*
4	128.070	*	*	*	*	176.580	*	*
5	128.070	*	*	*	*	-176.580	*	*

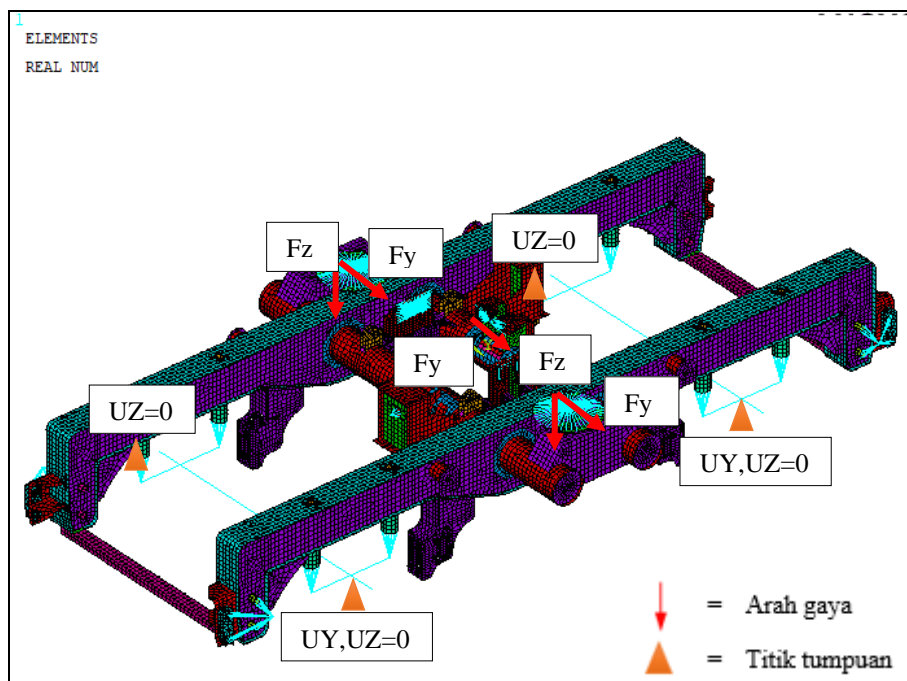
Load Case	Vertical [N]	Transversal [N]		Derailment	Twist [mm]	Longitudinal Shunt/Dec./Yaw [N]	Longitudinal Gearbox [N]	Braking [N]	
		Bump Stop	Air Spring						
6	128.070	*	*	*	-5,5	-	*	*	
7	128.070	89.678	4.401	*	-5,5	*	*	*	
		12.960 (Damper)							
8	128.070	*	*	*	*	32.973	36.745	*	
9	128.070	*	*	*	*	-32.973	-36.745	*	
10	128.070	*	*	*	*	31.500	*	*	
11	128.070	*	*	*	*	32.973	*	41.600	9.100
12	128.070	*	*	*	*	-32.973	*	-41.600	-9.100

Note :Tanda " - " menunjukkan arah gaya.

Tanda " \* " menunjukkan tidak ada gaya yang berlaku pada kondisi tersebut.

### 3.5 Kondisi Batas dan Tumpuan

Tumpuan tiap *load case* ditentukan berdasarkan kondisi operasional objek penelitian. Tumpuan pada *support wheelset* menggunakan tumpuan *roll*. Gambar 8 menunjukkan kondisi batas untuk *load case* vertikal dan transversal.



Gambar 8. Kondisi batas *load case* vertikal dan transversal

### 3.6 Hasil Simulasi

Hasil simulasi struktur *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek yaitu nilai tegangan maksimum, nilai defleksi maksimum, dan lokasi tegangan maksimum tiap *load case*.

#### 3.6.1 Nilai Tegangan Maksimum

Tegangan maksimum hasil simulasi dibandingkan dengan *yield strength* material. Nilai *yield strength* material pada objek penelitian sebesar 355 MPa. Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi objek penelitian pada kondisi *exceptional loads*.



Tabel 3. Hasil simulasi kasus *exceptional loads*

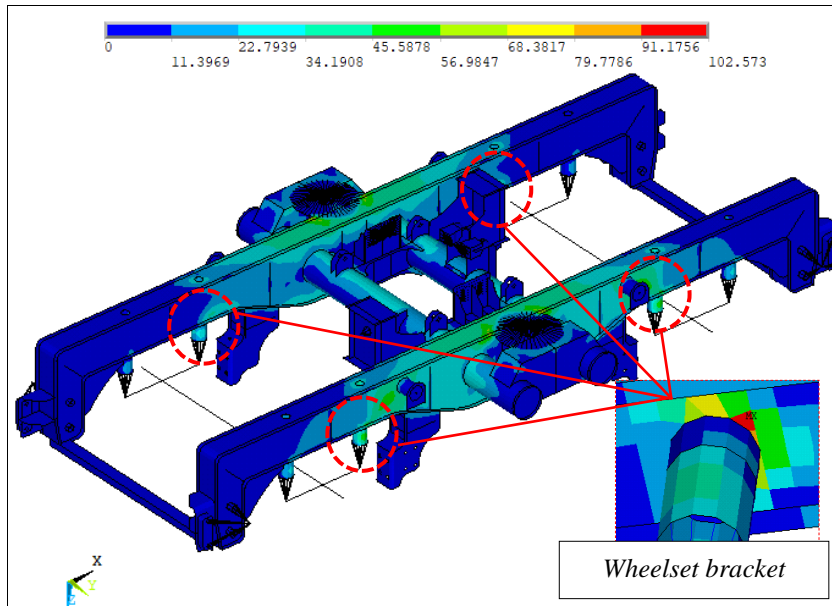
Load case	Deflection [mm]			Tegangan Maks [MPa]	Lokasi Tegangan Maks	Kriteria [MPa]	Note
	UZ	UX	UY				
1	1,1	-	-	103	Side frame	355	OK
2	2	-	1,9	250	Stopper bracket	355	OK
3	12	-	-	182	Side frame	355	OK
4	1,1	1,1	-	206	Traction bracket	355	OK
5	1,1	0,1	-	219	Traction bracket	355	OK
6	6,5	-	-	100	Side frame	355	OK
7	2,6	-	3,2	258	Stopper bracket	355	OK
8	1,3	0,3	-	103	Side frame	355	OK
9	1,3	0,7	-	103	Side frame	355	OK
10	1,5	0,2	-	79	Side frame	355	OK
11	1,5	1,2	-	170	Side frame	355	OK
12	1,5	0,9	-	170	Side frame	355	OK

Note : "OK" berarti masih sesuai dengan kriteria keberterimaan standar EN 13749

Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi struktur *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek pada kasus beban luar biasa (*exceptional load*). Berdasarkan hasil simulasi diperoleh nilai tegangan maksimum pada setiap *load case* kurang dari 355 MPa sehingga disimpulkan bahwa *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek dalam kondisi aman dan tidak mengalami deformasi plastis ketika menerima beban luar biasa (*exceptional loads*).

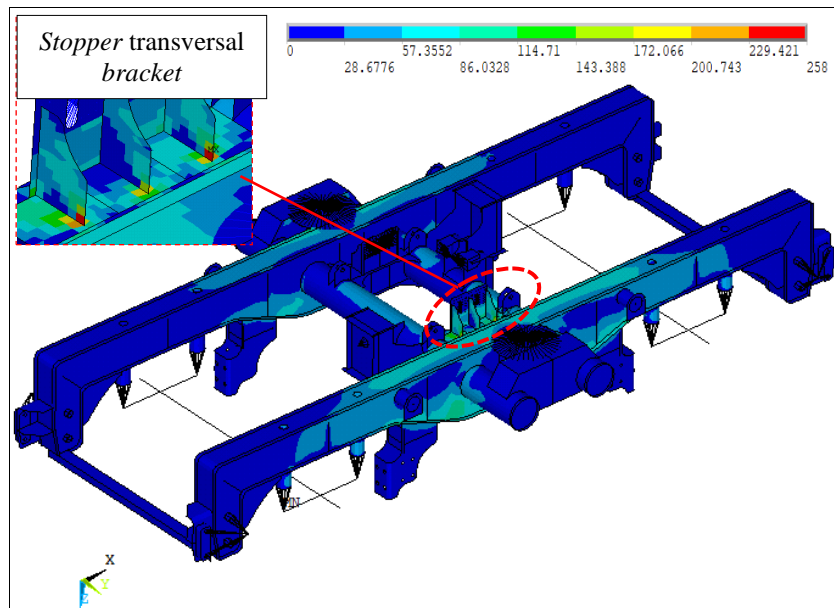
### 3.6.2 Lokasi Tegangan Maksimum

Berdasarkan hasil simulasi diperoleh lokasi tegangan maksimum tiap *load case*. Gambar 9 menunjukkan lokasi tegangan maksimum akibat gaya vertikal.



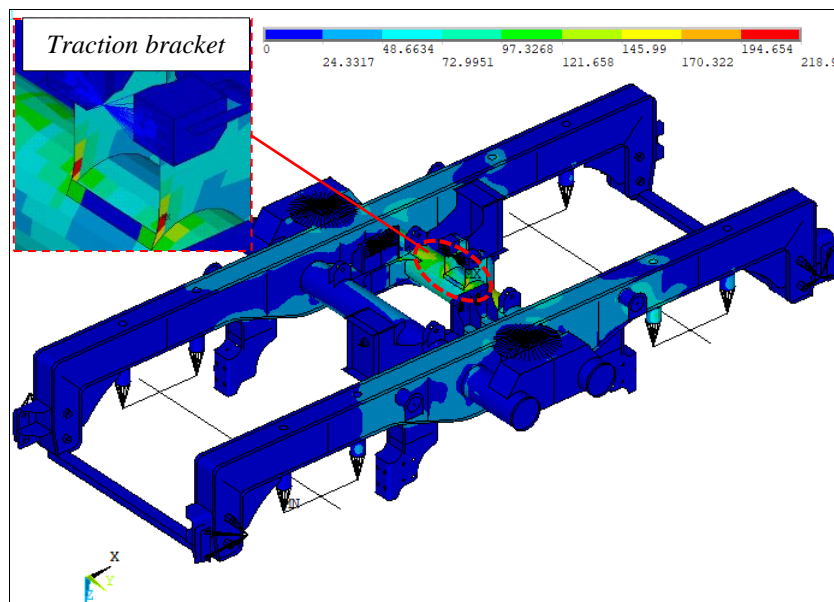
Gambar 9. Titik kritis *load case* vertikal

Lokasi tegangan maksimum sebesar 103 MPa berada di *side frame* sekitar *bracket wheelset* karena sebaran gaya akibat gaya vertikal berada di sekitar *bracket wheelset*. Gambar 10 menunjukkan lokasi tegangan maksimum akibat gaya transversal.



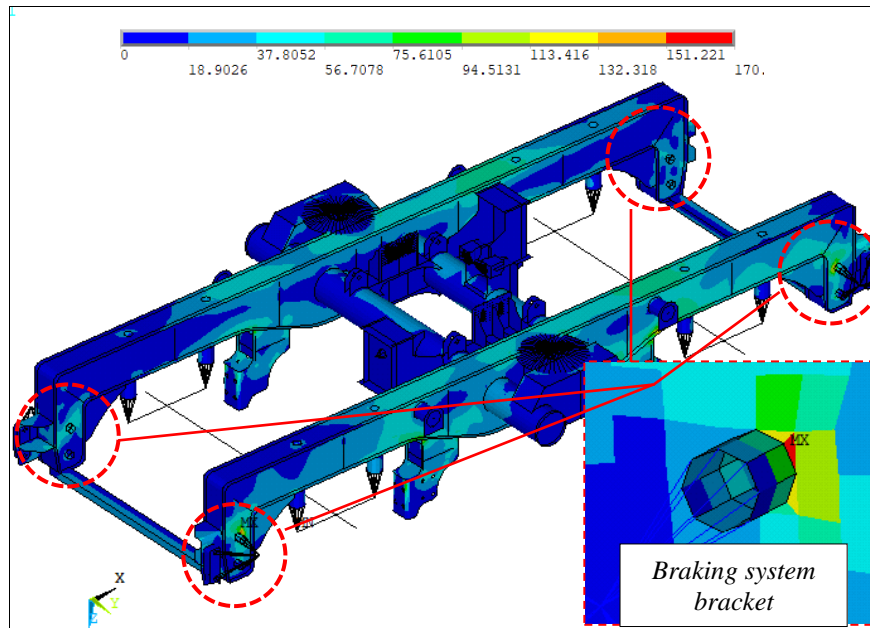
Gambar 10. Titik kritis *load case* transversal

Lokasi tegangan maksimum berada di *stopper transversal bracket* sebesar 258 MPa karena menahan gaya besar akibat gerakan transversal *carbody*. Gambar 11 menunjukkan lokasi tegangan maksimum akibat gaya longitudinal.



Gambar 11. Titik kritis *load case* longitudinal

Lokasi tegangan maksimum berada di *traction bracket* sebesar 219 MPa karena *part* tersebut menerima gaya dorong atau gaya tarik ketika kereta api menggabungkan gerbong menjadi kereta lengkap atau sebaliknya. Gambar 12 menunjukkan lokasi tegangan maksimum akibat reaksi pengereman.

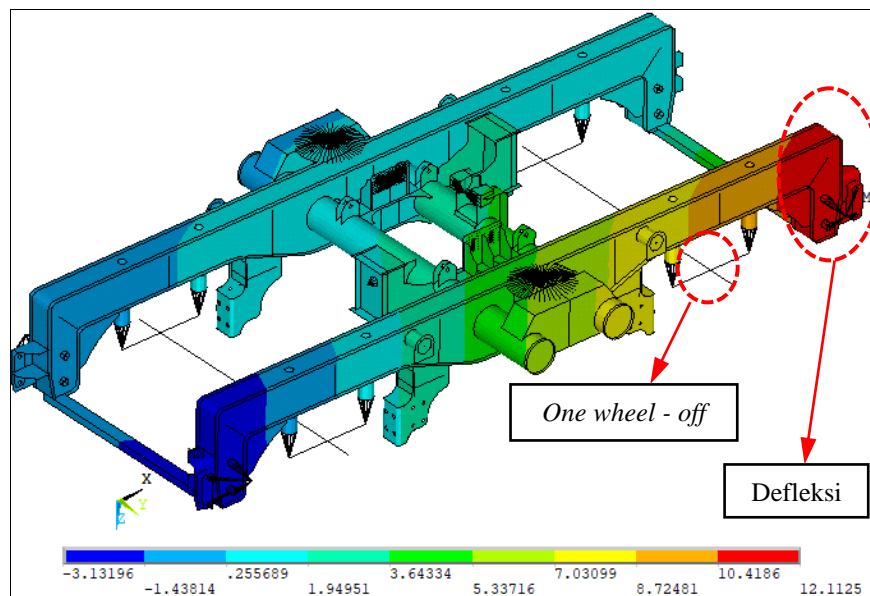


Gambar 12. Titik kritis *load case* reaksi pengereman

Lokasi tegangan maksimum berada di *braking system bracket* sebesar 170 MPa karena menerima gaya reaksi pengereman akibat gerakan rotasi roda.

### 3.6.3 Nilai Defleksi Maksimum

Nilai defleksi berfungsi sebagai visualisasi pola struktur akibat pembebanan. Nilai defleksi menjadi acuan ketika struktur menerima beban maksimum, struktur dapat menjaga bentuknya dan tidak mempengaruhi komponen lain atau tidak [16]. Defleksi maksimum terjadi ketika objek penelitian dalam kondisi *derailment* (anjlok) pada *load case* 3. Gambar 13 menunjukkan defleksi yang terjadi akibat kondisi *derailment*.



Gambar 13. Nilai defleksi maksimum

Pada simulasi ini kondisi *derailment* diasumsikan dengan salah satu roda tidak berfungsi (*one wheel - off*). Defleksi sebesar 12 mm terjadi pada *braking system bracket* karena adanya salah satu roda yang tidak berfungsi.

#### 4. KESIMPULAN

Dari analisis hasil simulasi dapat disimpulkan:

- a. Metode evaluasi desain struktur *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek pada kondisi *exceptional loads* dilakukan dengan pembebanan statik. Mengacu pada standar EN 13749 terdapat 12 *load case* yang mewakili kondisi operasional objek penelitian. Hasil simulasi yaitu nilai tegangan maksimal, nilai defleksi maksimum dan lokasi tegangan maksimal tiap *load case*.
- b. Lokasi tegangan maksimum *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek akibat *exceptional loads* terletak pada *side frame*, *traction braket*, dan *stopper transversal braket*. Tegangan maksimum tertinggi terjadi ketika objek penelitian menerima *load case* transversal yang ditunjukkan pada *load case* 2 dan *load case* 7. Tegangan maksimum *load case* 2 sebesar 250 MPa dan *load case* 7 sebesar 258 MPa. Tegangan maksimum terletak pada bagian *stopper transversal bracket* karena menahan gaya besar akibat gerakan transversal *carbody*.
- c. Berdasarkan hasil simulasi desain *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek sudah memenuhi kriteria keberterimaan standar EN 13749. Nilai tegangan maksimum pada setiap *load case* kurang dari 355 MPa dan nilai *safety factor* lebih dari 1 sehingga *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek dalam kondisi aman dan tidak mengalami deformasi plastis ketika menerima beban luar biasa (*exceptional loads*).

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT INKA, "Mengenal Istilah Bogie Pada Kereta Api (Bag.1)," 10 Maret 2015. <https://www.inka.co.id/berita/58> (diakses 4 Oktober 2021).
- [2] PT INKA, "Mengenal Istilah Bogie Pada Kereta Api (Bag.2)," 17 Maret 2015. <https://www.inka.co.id/berita/533> (diakses 7 Januari 2022).
- [3] M. M. Fandos, "Investigation and Classification of Bogie Designs and their Potential to Adopt Lightweight Structures by Means of a Database," 2018.
- [4] PT HESA LARAS, "Analisis Struktur," 2017. <https://hesa.co.id/analisis-struktur/> (diakses 26 Oktober 2021).
- [5] Y. Zakaria, "Analyzing a Bogie Frame Behavior By Using The Experimental Method And Ansys Simulations," *UPB Sci Bull Ser. D*, vol. 76, 2014.
- [6] EN 13749:2011, "Railway applications – Wheelsets and bogies – Method of specifying the structural requirements of bogie frames," hlm. 57, 2011.
- [7] A. M. Koniago, "Analisa Ketahanan Fatik Sambungan Las pada Rangka Bogi Light Rapid Transit (LRT) Menggunakan Metode Elemen Hingga," 2018.
- [8] M. Z. Mahfud, "Desain Kereta Ukur Jalur LRT Jabodebek," 2022.
- [9] M. Z. Mahfud, "Analisis kekuatan struktur bogie frame PPCW," 22 September 2021.
- [10] EN 10025-2, "Hot Rolled Products of Structural Steels - Part 2: Technical Delivery Conditions For Non-Alloy Structural Steel," 2019.
- [11] JIS G3445, "STKM13C Carbon Steel Tubes Inspection," 2020.
- [12] Z. Arif, *Mekanika Kekuatan Material*. Langsa, 2014.
- [13] D. L. Logan, *A First Course in The Element Method*, Fourth. Thomson Canada Limited, 2007.
- [14] I. Okamoto, "How Bogies Work," *Railw. Technol. Today* 5, 2001, [Daring]. Tersedia pada: [http://www.ejrcef.or.jp/jrtr/technology/index\\_technology.html](http://www.ejrcef.or.jp/jrtr/technology/index_technology.html)
- [15] M. Z. Mahfud, "Tujuan Simulasi Desain Struktur."
- [16] E. P. Popov, *Engineering Mechanics of Solids*. Amerika Serikat: Prentice Hall, 1990.