

# Analisis Kekuatan Desain Struktur *Bogie Frame* Kereta Ukur pada Kondisi Beban *Normal Service* dengan Metode Elemen Hingga

Khairul Anam Basyar<sup>1</sup>, anambasyar@gmail.com

Alfi Tranggono Agus Salim<sup>2\*</sup>, alfitranggono@pnm.ac.id

Indarto Yuwono<sup>3</sup>, indarto@pnm.ac.id

Agung Prasetyo Utomo<sup>4</sup>, agungprasetyo@ppns.ac.id

Muhammad Zainal Mahfud<sup>5</sup>, muhammad.zmahfud@inka.co.id

Program Studi Perkeretaapian<sup>1,2,3</sup>, Politeknik Negeri Madiun<sup>1,2,3</sup>

Program Studi Teknik Perancangan dan Kontruksi Kapal<sup>4</sup>, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya<sup>4</sup>

Divisi Teknologi Departemen Engineering<sup>5</sup>, PT INKA<sup>5</sup>

\*coresspondance author email: alfitranggono@pnm.ac.id

## ABSTRAK

Beban besar diterima *bogie frame* selama beroperasi dan dibutuhkan analisis kekuatan struktur sebagai syarat kelayakan berdasarkan Peraturan Nomor 33 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Bidang Perkeretaapian dan standar *EN 13749*. Fokus penelitian analisis kekuatan desain struktur *bogie frame* kereta ukur jalur *LRT* Jabodebek terhadap kelayakan operasional. Tujuan penelitian menganalisis tegangan objek penelitian akibat pembebanan *normal service* dan memastikan nilai tegangan hasil simulasi memenuhi kriteria keberterimaan standar *EN 13749*. Solusi penelitian pendekatan *endurance limit*. Nilai tegangan hasil simulasi dianalisis dengan *goodman diagram*. Data pendukung dan parameter penelitian hasil survei dan wawancara di PT INKA (Persero). Hasil penelitian yaitu: lokasi *element* kritis objek penelitian, nilai tegangan *element* kritis tiap *load case*, dan plot nilai tegangan *element*. Objek penelitian belum memenuhi kriteria keberterimaan *EN 13749*. Satu *element* kritis pada *bracket gearbox* melebihi batas keberterimaan akibat *load case* longitudinal. Nilai amplitudo tegangan *element* 2,09 MPa diatas batas keberterimaan 155 MPa. Perubahan ketebalan *pipe transform* 12 mm menjadi 20 mm menurunkan nilai tegangan. Nilai amplitudo tegangan *element* hasil perubahan ketebalan *pipe transform* 88,41 MPa.

**Kata Kunci:** *bogie frame, normal service, simulasi, endurance limit, goodman diagram.*

## ABSTRACT

A large load is received by the bogie frame during operation and structure strength analysis is needed as a feasibility requirement based on Peraturan Nomor 33 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Bidang Perkeretaapian and the *EN 13749* standard. The research focuses on analyzing the bogie frame design strength for the Jabodebek *LRT* track on operational loads. The research analyze the stress of the research object due to normal service loads and ensure that the stress values meets the acceptance criteria of the *EN 13749* standard. The research solution is endurance limit approach. The stress values from the simulation results were analyzed using the *goodman diagram*. Supporting data and research parameters from surveys and interviews at PT INKA (Persero). The results of the research are: the location of the critical element of the research object, the value of the critical element stress for each load case, and the plot of the element stress value. The research object has not met the acceptance criteria of *EN 13749* based on the analysis using the *goodman diagram* approach. Some critical element in the gearbox bracket exceeds the acceptable limit due to the longitudinal load case. The value of the element stress amplitude is 2,09 MPa above the acceptable limit 155 MPa. The design strength meets the acceptance criteria after changing the pipe transform thickness from 12 mm to 20 mm. Element stress amplitude value of the transform pipe is 88,41 MPa.

**Keywords:** *bogie frame, normal service, simulation, endurance limit, goodman diagram.*

## 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Bogie frame* berfungsi menopang seluruh beban badan kereta (*carbody*), menghubungkan *bogie* ke *wheelset*, dan bertindak sebagai penopang komponen *bogie* lain. Bagian *bogie frame* dihubungkan dengan pengelasan membentuk *bogie frame* kompleks (PT INKA, 2015). Izin operasi *bogie frame* diperoleh melalui tahap pengujian.

Pemborosan sering terjadi dalam proses uji coba produk karena produk uji belum tentu memenuhi kriteria keberterimaan yang berlaku. Pemborosan mampu diminimalisir dengan simulasi secara perhitungan konvensional (perhitungan manual) maupun *software* untuk simulasi desain. Hasil simulasi menjadi acuan dalam prediksi kekuatan produk uji. Simulasi didefinisikan sebagai cara untuk mereproduksi kondisi situasi dengan menggunakan model, untuk pembelajaran, pengujian, atau pelatihan (Harrell & Price, 2000). Metode simulasi dan validasi data hasil simulasi menjadi poin penting analisis struktur *bogie frame*.

Merujuk EN 13749 tahun 2011, pembebanan *normal service* diaplikasikan dalam analisis kekuatan desain *bogie frame* (EN 13749, 2011). Nilai pembebanan *normal service bogie frame* kereta adalah kondisi operasional dengan kasus beban (*load case*) yang terjadi berulang (EN 13749, 2011). Kekuatan *bogie frame* terhadap pembebanan *normal service* disebut kekuatan batas lelah (*fatigue*)/*endurance limit* (Li et al., 2014). Pendekatan *endurance limit* dilakukan dengan penerapan beban statik mewakili kondisi dinamis *bogie frame* (EN 13749, 2011).

Fokus penelitian analisis kekuatan *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek disimulasikan dengan pembebanan *normal service*. Simulasi dilakukan dengan *software* simulasi FEM (Harrell dan Price, 2000). Pendekatan *endurance limit* dilakukan dengan *goodman diagram* merujuk standar JIS E4207 (JIS E4207, 2004).

Hasil penelitian berupa evaluasi kekuatan batas lelah/*fatigue* (*endurance limit*) struktur dan keberterimaan desain *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek. Simulasi berupa kondisi beban statik mewakili kondisi dinamik dengan parameter mengikuti standar EN 13749 (EN 13749, 2011).

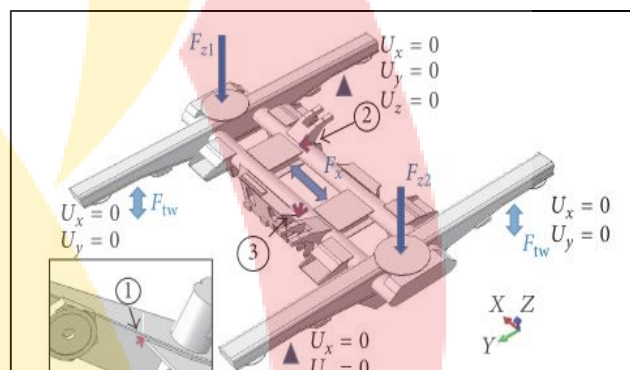
### 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah sebagai berikut.

- Menganalisis metode evaluasi batas lelah/*fatigue* (*endurance limit*) desain struktur *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek dengan *software* simulasi FEM pada beban statik yang mewakili kondisi dinamik.
- Menganalisis tegangan yang terjadi pada struktur *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek akibat pembebanan *normal service* berdasarkan standar EN 13749.
- Menganalisis hasil simulasi berupa nilai tegangan yang terjadi pada *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek terhadap kriteria keberterimaan berdasarkan standar EN 13749.

## 2 TINJAUAN PUSTAKA

Standar EN 13798 digunakan menentukan pembebanan uji statik dengan metode *normal service* dan *exceptional*. Pengujian lelah (*fatigue*) mengacu standar EN 13749 (Seo et al., 2017). Gambar 1 menunjukkan ilustrasi arah pembebanan yang berlaku ketika pengujian *fatigue* sesuai standar EN 13749 (Seo et al., 2017).



Gambar 1. Arah pembebanan sesuai EN 13749

\*Seo et al., 2017

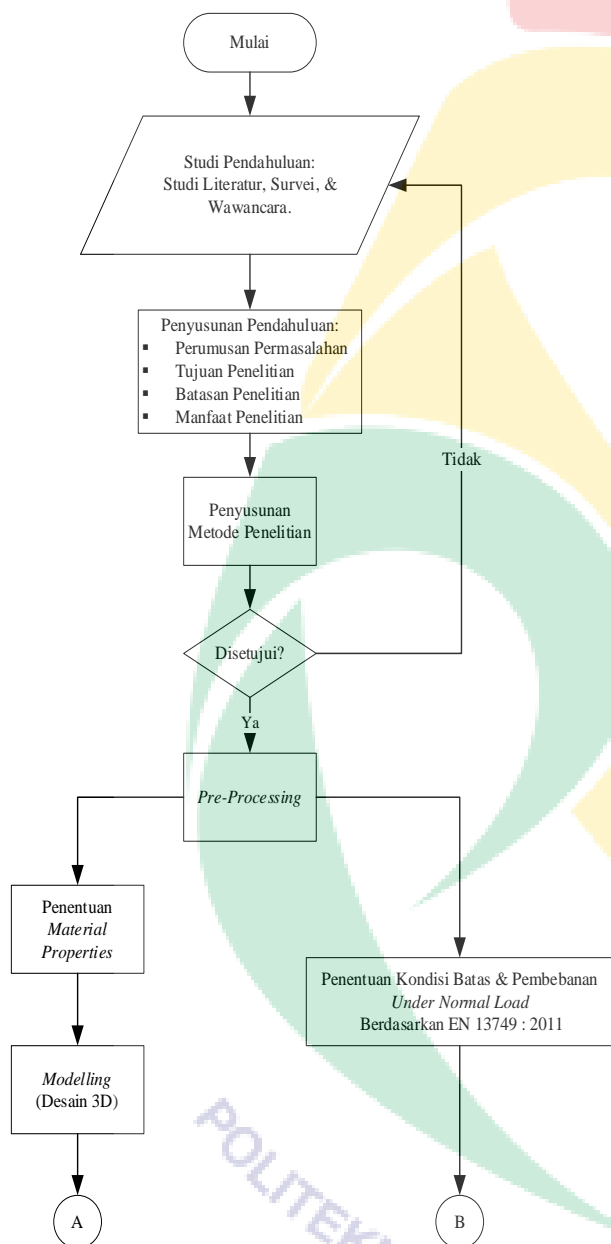
Hasil simulasi memenuhi kriteria keberterimaan dan akurat dibandingkan dengan hasil pengujian lapangan (Seo et al., 2017). Penelitian uji *fatigue* terhadap *bogie frame* dilakukan M. Kassner pada tahun 2012 berdasarkan standar EN 13749. Secara umum, analisis tegangan didasarkan pada pendekatan tegangan normal (Kassner, 2012). Pendekatan FEM efektif diterapkan untuk menganalisis sambungan las (Kassner, 2012).

Analisis kekuatan desain struktur *bogie* efektif dilakukan dengan *software* simulasi FEM dan disetujui PT INKA (Persero) (Mahfud, 2021b). Berdasarkan pengamatan lapangan, pemodelan desain *bogie* dengan penyederhanaan model FEM menurunkan tingkat *error* desain dan membuat kinerja komputer yang digunakan

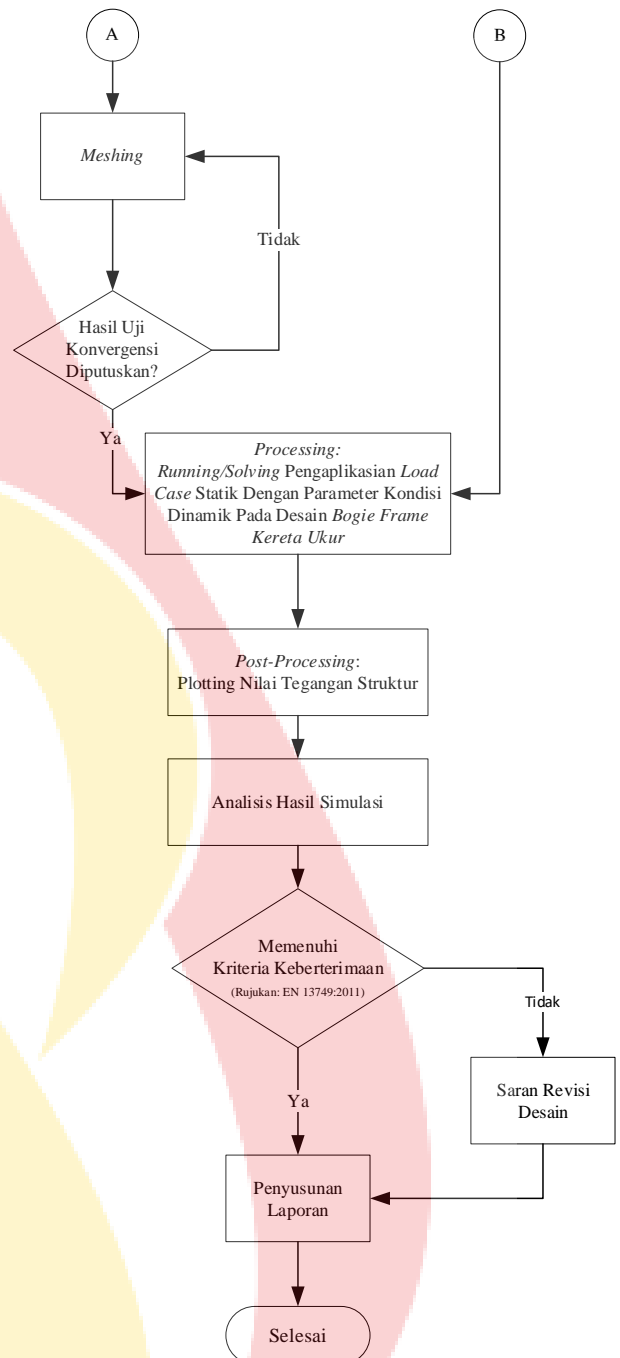
running simulasi lebih ringan (Mahfud, 2021c). Pernyataan ini diperkuat perbandingan hasil uji kekuatan bogie yang pernah dilakukan PT INKA (Persero) terhadap hasil perhitungan software simulasi FEM (Mahfud, 2021b). Perbandingan hasil uji dan hasil simulasi diperoleh nilai yang relevan, sehingga PT INKA (Persero) mengakui keakuratan simulasi kekuatan struktur dengan metode ini (Mahfud, 2021b).

### 3 METODE PENELITIAN

#### 3.1 Tahapan Penelitian (Flowchart)



Gambar 2.a Flowchart penelitian bagian 1



Gambar 2.b Flowchart penelitian bagian 2

Tahapan penelitian berperan sebagai arahan pelaksanaan sehingga penelitian efektif. Berikut tahapan penelitian ini.

- a. Studi Pendahuluan: Penelitian dimulai dengan studi pendahuluan yang dilaksanakan melalui literatur penelitian terdahulu, survei lapangan, wawancara, dan sumber lain yang valid (Okamoto, 2001). Survei dan wawancara dilakukan untuk memperoleh informasi yang detail mengenai kondisi objek penelitian. Wawancara dilakukan

- pada pihak yang bersangkutan dengan topik penelitian (Mahfud, 2021a).
- b. Perumusan Pendahuluan: Tahap awal perumusan pendahuluan dimulai dengan rumusan masalah. Rumusan masalah untuk menentukan fokus analisis penelitian (UIC615-4, 2001). Selain rumusan masalah dirumuskan tujuan penelitian dan batasan penelitian.
  - c. Penyusunan Metode Penelitian: Penyusunan metode penelitian dilakukan secara runtut dan sistematis (EN 13749, 2011). Metode penelitian berisikan alat dan bahan yang digunakan, tahapan penelitian secara umum, diagram alir penelitian, tempat dan waktu penelitian, teknik pengumpulan, dan jadwal pelaksanaan penelitian.
  - d. Pengumpulan Data dan Simulasi: Setelah rancangan penelitian disetujui tahap selanjutnya merupakan pengumpulan data penelitian (Mahfud, 2022c). Pada penelitian ini data yang dibutuhkan merupakan desain objek penelitian dan data pembebanan berupa *normal service*. Setelah data lengkap penelitian masuk ke tahap simulasi *FEM* dengan bantuan *software* untuk mengetahui nilai kekuatan desain objek penelitian terhadap penerapan pembebanan *normal service*. *Pre-processing* simulasi terdiri atas penentuan material model, desain 3D, meshing, dan penentuan kondisi batas berupa nilai gaya dan tumpuan objek penelitian. *Processing* merupakan tahap perhitungan pembebanan oleh *software* simulasi *FEM* dengan basis perhitungan matriks. *Tahap post-processing* simulasi terdiri atas plotting sebaran tegangan dan pencatatan data nilai tegangan berdasarkan standar EN 13749 (EN 13749, 2011).
  - e. Evaluasi dan Analisis Hasil Penelitian: Hasil *running/solving* model pada tahap simulasi dievaluasi dan dilakukan analisis menggunakan metode *goodman diagram* (JIS E4207, 2004). Pada penelitian ini digunakan pendekatan kuantitatif karena hasil simulasi berupa data kuantitatif. Acuan yang digunakan pada tahap ini adalah standar EN 13749.
  - f. Kesimpulan: Hasil penelitian disimpulkan berdasarkan rumusan masalah yang telah disusun di awal (EN 13749, 2011). Kesimpulan penelitian, peneliti mampu memberikan saran/masukan mengenai hasil analisis kekuatan desain struktur objek penelitian pada kondisi pembebanan *normal service* dengan metode elemen hingga pada PT INKA (Persero).

Pembahasan penelitian terfokus pada parameter berikut.

- a. Objek penelitian merupakan desain *bogie frame* kereta ukur jalur *LRT* Jabodebek.

- b. Kondisi batas (*boundary condition*) merujuk standar EN 13749 (EN 13749, 2011).
- c. Validasi metode simulasi dan pengolahan data nilai tegangan merujuk standar EN 13749 (EN 13749, 2011).
- d. Metode pembebanan yang diterapkan merujuk standar EN 13749 dan terfokus pada metode pembebanan *normal service* (EN 13749, 2011).
- e. Evaluasi kekuatan batas lelah/*fatigue (endurance limit)* menggunakan simulasi pembebanan statik dengan metode pendekatan *goodman diagram* merujuk standar JIS E4207 (JIS E4207, 2004).
- f. Nilai *load case* yang diterapkan pada struktur *bogie frame* kereta ukur jalur *LRT* Jabodebek adalah data PT INKA (Persero) (Mahfud, 2021b).
- g. Simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)* (Harrell dan Price, 2000).

### 3.2 Nilai Pembebanan *Normal Service*

Material yang digunakan dalam manufaktur *bogie frame* adalah dua jenis material seperti ditunjukkan Tabel 1 (Fahrizal, 2016).

Tabel 1. *Material properties* objek penelitian

<i>Material Properties</i>	<i>Tippe Material</i>	
	S355J2+N	STKM13C
<i>Modulus Young</i>	2.10E+05 MPa	2.10E+05 MPa
<i>Modulus Shear</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/mm <sup>3</sup>	7.85E-0,6 kg/mm <sup>3</sup>
<i>Yield Strength</i>	355 MPa	380 MPa
<i>Allowable Stress to Yield of Material</i>	305 MPa	305 MPa
<i>Ultimate Strength</i>	470 MPa	510 MPa
<i>Fatigue Allowable Stress</i>	155 MPa	155 MPa

\*Mahfud, 2022c

*Material properties* Tabel 1 digunakan sebagai parameter simulasi dan analisis objek penelitian (Udeyo, 2008). Sementara untuk gaya *normal service* yang diterapkan pada penelitian ini dijabarkan sebagai berikut.

Gaya vertikal, diterapkan pada masing-masing *sideframe* dengan Persamaan (1) berikut.

$$F_{z1} = F_{z2} \tag{1.a}$$

$$F_{z2} = \frac{F_z}{2} \tag{1.b}$$

$$\frac{F_z}{2} = \frac{(M_v + 1,2P_2 - 2m^+)g}{4} \tag{1.c}$$

\*EN 13749, 2011

Keterangan :

- $F_z$  = Gaya vertikal (N)
- $M_v$  = Massa kereta ketika beroperasi (kg)
- $P_2$  = Muatan desain normal (kg)
- $m^+$  = Massa kereta ketika beroperasi (kg)

Gaya transversal, diterapkan pada setiap *axle* dengan Persamaan (2).

$$F_{y2} = \frac{F_y}{2} \quad (2.a)$$

$$\frac{F_y}{2} = \frac{F_z + m^+ \cdot g}{8} \quad (2.b)$$

\*EN 13749, 2011

Keterangan:

- $F_z$  = Gaya vertikal (N)
- $F_y$  = Gaya transversal (N)
- $g$  = Percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $m^+$  = Massa kereta ketika beroperasi (kg)

Gaya transversal pada suspensi sekunder diterapkan dengan Persamaan (3).

$$F_{ys} = \text{stiffness} \times \text{displacement maksimum} \quad (3)$$

Gaya transversal pada *stopper* transversal diterapkan dengan Persamaan (4).

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

Keterangan:

- $F_{yb}$  = Gaya transversal pada *stopper* transversal (N)
- $F_y$  = Gaya transversal (N)
- $F_{ys}$  = Gaya transversal pada suspensi sekunder (N)

Gaya longitudinal, diterapkan pada *bracket gearbox* dan *bracket carbody* (EN 13749, 2011).

Gaya longitudinal pada *gearbox* diterapkan dengan Persamaan (5).

$$F_{xg} = 1,1 \times \left( \frac{T}{L} + (m_{gb} \times g) \right) \quad (5)$$

Keterangan:

- $F_{xg}$  = Gaya longitudinal pada *gearbox* (N)
- $m_{gb}$  = Massa *gearbox* (kg)
- $F_{ys}$  = Gaya transversal pada suspensi sekunder (N)
- $T$  = Torsi awal (N.m)
- $L$  = Panjang lengan traksi ke *bracket* (m)

Gaya longitudinal akibat reaksi *carbody* diterapkan dengan Persamaan (6).

$$F_x = 0,05 \times \{F_z + (m_1^+ + m_2^+)g\} \quad (6)$$

Keterangan:

- $F_x$  = Gaya longitudinal pada *support carbody* (N)
- $F_z$  = Gaya vertikal (N)
- $m_1^+$  = Massa motor *bogie* (kg)
- $m_2^+$  = Massa trailer *bogie* (kg)
- $g$  = Percepatan gravitasi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Gaya reaksi pengereman, menggunakan beban *service braking rate* dengan koefisien 1,1 (EN 13749, 2011).

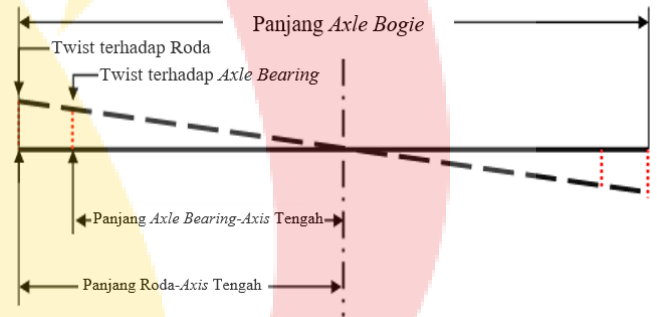
*Axis-X*, diterapkan dengan Persamaan (7).

$$F_{bx} = 1,1 \times \text{total gaya per blok rem} \quad (7)$$

*Axis-Z*, diterapkan dengan Persamaan (8).

$$F_{bz} = 1,1 \times \text{gaya per roda (berdasarkan diameter)} \quad (8)$$

*Displacement* kondisi *twist*, sebagai faktor dinamis analisis kekuatan *fatigue bogie frame* (Mahfud, 2021b). Nilai *twist* terhadap roda pada kondisi beban *normal service* sebesar 0,5% (EN 13749, 2011). *Displacement twist* pada sistem *bogie* ditunjukkan Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi *displacement twist* sistem *bogie* pada *axle*

Gambar 3 menunjukkan *displacement twist* dapat diterapkan pada *center of gravity (CoG)* roda atau *axle bearing*. Nilai *twist* 0,5% panjang *axle bogie (wheelbase)* (EN 13749, 2011). Kalkulasi *twist* diterapkan dengan Persamaan (9).

$$\delta = (tg \times Kg) / Kb \quad (9)$$

Keterangan:

- $\delta$  = *Displacement twist* pada *axle bearing* (mm)

tg = Pergeseran *center of gravity axle*  
 aring (mm)  
 Kg = *Stiffness bogie frame* (kg/mm)  
 Kb = *Stiffness sistem bogie* (kg/mm)

Tabel 2. *Load case normal service bogie frame*

Load Case	F <sub>z1</sub>	F <sub>z2</sub>	F <sub>y</sub>
1	F <sub>z</sub> /2	F <sub>z</sub> /2	0
2	(1+α-β) F <sub>z</sub> /2	(1-α-β) F <sub>z</sub> /2	0
3	(1+α-β) F <sub>z</sub> /2	(1-α-β) F <sub>z</sub> /2	+ F <sub>y</sub>
4	(1+α+β) F <sub>z</sub> /2	(1-α+β) F <sub>z</sub> /2	-
5	(1+α+β) F <sub>z</sub> /2	(1-α+β) F <sub>z</sub> /2	+ F <sub>y</sub>
6	(1-α-β) F <sub>z</sub> /2	(1+α-β) F <sub>z</sub> /2	-
7	(1-α-β) F <sub>z</sub> /2	(1+α-β) F <sub>z</sub> /2	- F <sub>y</sub>
8	(1-α+β) F <sub>z</sub> /2	(1+α+β) F <sub>z</sub> /2	-
9	(1-α+β) F <sub>z</sub> /2	(1+α+β) F <sub>z</sub> /2	- F <sub>y</sub>

\*EN 13749, 2011

Keterangan:

α = Koefisien puntir  
 β = Koefisien pantul  
 F<sub>z</sub> = Gaya vertikal (N)  
 F<sub>y</sub> = Gaya transversal (N)

Masing-masing *load case* yang ditunjukkan Tabel 2 mewakili kondisi vertikal dan transversal yang terjadi ketika *bogie frame* beroperasi dengan pembebanan *normal service* (EN 13749, 2011). *Load case* longitudinal pembebanan *normal service* ditunjukkan Tabel 3.

Tabel 3. *Load Case Normal Service Longitudinal Bogie Frame*

Load Case	F <sub>z1</sub>	F <sub>z2</sub>	F <sub>x</sub>
1	F <sub>z</sub> /2	F <sub>z</sub> /2	0
2	F <sub>z</sub> /2	F <sub>z</sub> /2	+ F <sub>x</sub>
3	F <sub>z</sub> /2	F <sub>z</sub> /2	- F <sub>x</sub>

Keterangan:

F<sub>x</sub> = Gaya longitudinal (N)  
 F<sub>z</sub> = Gaya vertikal (N)

Tabel 3 menunjukkan tiga *load case* kondisi pembebanan longitudinal. *Load case* 1 longitudinal memiliki kondisi sama dengan *load case* 1 kondisi vertikal dan transversal. Dalam penelitian kedua *load case* cukup digunakan salah satu. *Load case* lain adalah kondisi longitudinal *Lozenging* dan kondisi akibat reaksi pengereman yang ditunjukkan Tabel 4 (Harrell dan Price, 2000).

Tabel 4. *Load case longitudinal lozenging dan braking bogie frame*

Load Case	F <sub>z1</sub>	F <sub>z2</sub>	F <sub>xc</sub>	F <sub>x</sub>	F <sub>bz</sub>	F <sub>bx</sub>
1	+ F <sub>z1</sub>	+ F <sub>z2</sub>	0	F <sub>x</sub>	0	0
2	+ F <sub>z1</sub>	+ F <sub>z2</sub>	+ F <sub>xc</sub>	0	+ F <sub>bz</sub>	+ F <sub>bx</sub>
3	+ F <sub>z1</sub>	+ F <sub>z2</sub>	- F <sub>xc</sub>	0	- F <sub>bz</sub>	- F <sub>bx</sub>

Keterangan:

F<sub>x</sub> = Gaya longitudinal (N)

F<sub>z</sub> = Gaya vertikal (N)

F<sub>b</sub> = Gaya reaksi pengereman (N)

Tabel 4 menunjukkan *load case* 1 kondisi longitudinal *Lozenging*. *Load case* 2 dan *load case* 3 merupakan kondisi *braking*. Hasil simulasi berupa nilai tegangan maksimum tiap element kritis diolah untuk memperoleh rata-rata tegangan dan amplitudo tegangan berdasarkan standar UIC 615-4 (UIC615-4, 2001). Rata-rata tegangan diperoleh dengan Persamaan (10) dan amplitudo tegangan diperoleh dengan Persamaan (11) (UIC615-4, 2001).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{minimum} + \sigma_{maximum}}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{maximum} - \sigma_{minimum}}{2} \quad (11)$$

Keterangan :

σ<sub>m</sub> = Rata-rata tegangan

σ<sub>a</sub> = Amplitudo tegangan

Berdasarkan rata-rata tegangan dan amplitudo tegangan disusun *goodman diagram* untuk mengetahui kekuatan batas lelah (*endurance limit*) objek penelitian (Berkovits dan Fang, 1993).

### 3.3 Alat dan Bahan

Dalam analisis kekuatan desain struktur objek penelitian diperlukan alat dan bahan penunjang analisis sebagai berikut.

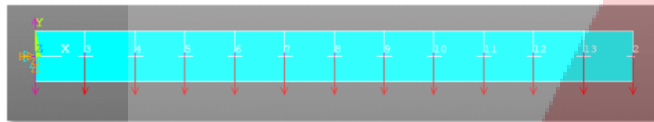
- Software simulasi FEM.
- Software Inventor 2020 Student Version (Autodesk, 2019).
- Desain *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek (Mahfud, 2022c).
- Data *normal service load case* kereta ukur jalur LRT Jabodebek (Mahfud, 2021a).

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi penelitian berupa lokasi *element* kritis objek penelitian, nilai tegangan *element* kritis tiap *load case*, dan plot nilai tegangan *element* kritis dengan *goodman diagram* (UIC615-4, 2001). Kriteria keberterimaan desain objek penelitian merujuk standar EN 13749 dan JIS E4207 (EN 13749, 2011).

#### 4.1 Validasi Simulasi FEM

Validasi dilakukan dengan subjek sederhana berupa *beam* tumpuan jepit. Data simulasi model *element beam* yang digunakan untuk pengujian nilai *error software*. Pada pengujian ini model dipartisi dalam 12 bagian seperti ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Meshing Beam

Gambar 4 menunjukkan partisi model, penempatan titik *node*, dan sebaran gaya yang diterapkan. Partisi 12 bagian *element* dalam simulasi *FEM* menghasilkan 13 *node*. Pada perhitungan manual gaya tetap dipartisi menjadi 12. Sehingga didapatkan nilai sebagai berikut berdasarkan Persamaan (12).

$$\omega_p = \frac{F}{\text{jumlah partisi}} \quad (12)$$

$$\omega_p = \frac{2000}{12}$$

$$\omega_p = 166,67 \text{ N/m}$$

Keterangan:

$\omega_n$  = Nilai gaya tiap partisi (N/m)

$F$  = Nilai gaya total (N)

Berdasarkan perhitungan tersebut didapat gaya tiap partisi 166,67 N/m atau 1,6667 N/mm pada perhitungan manual. Berikut ditunjukkan hasil perhitungan manual untuk defleksi maksimum berdasarkan Persamaan (13).

$$y = \frac{-\omega_p \cdot x^2}{24EI} (x^2 + 6L^2 - 4L \cdot x) \quad (13)$$

$$y = \frac{(1,6667)(1.200)^2}{24(200.000)(33.333.333,33)} \{ (1.200)^2 + 6(1.200)^2 - 4(1.200)(1.200) \}$$

$$y = 0,064801296 \text{ mm}$$

Keterangan:

$y$  = Defleksi titik tertentu (mm)

$\omega_p$  = Nilai gaya tiap partisi (N/mm), notasi (-) menunjukkan arah gaya

$E$  = Modulus young (MPa)

$x$  = Panjang tumpuan ke *node* (mm)

$L$  = Panjang *beam* (mm)

$I$  = Momen inersia *beam* (mm<sup>4</sup>)

Nilai defleksi pada partisi lain ditunjukkan pada tabel 5. Hal ini dilakukan dengan menyesuaikan titik partisi dengan titik *node*.

Tabel 5. Nilai Defleksi Perhitungan Manual Tiap *Node*

Node	$\omega$ (N/mm)	$\ell$ (mm)	$x$ (mm)	$E$ (MPa)	$I$ (mm <sup>4</sup> )	$y$ (mm)
1	0,00	1.200	0	200.000	11.091.666,67	0,00
3	1,67	1.200	100	200.000	11.091.666,67	0,00
4	1,67	1.200	200	200.000	11.091.666,67	0,01
5	1,67	1.200	300	200.000	11.091.666,67	0,02
6	1,67	1.200	400	200.000	11.091.666,67	0,03
7	1,67	1.200	500	200.000	11.091.666,67	0,05
8	1,67	1.200	600	200.000	11.091.666,67	0,07
9	1,67	1.200	700	200.000	11.091.666,67	0,09
10	1,67	1.200	800	200.000	11.091.666,67	0,11
11	1,67	1.200	900	200.000	11.091.666,67	0,13
12	1,67	1.200	1.000	200.000	11.091.666,67	0,15
13	1,67	1.200	1.100	200.000	11.091.666,67	0,17
2	1,67	1.200	1.200	200.000	11.091.666,67	0,19

Tabel 5 menunjukkan *node* satu (1) tidak menerima distribusi gaya karena menjadi tumpuan *cantilever beam*. Pada simulasi *software* simulasi *FEM* gaya didistribusikan di setiap *node* dengan nilai sebagai berikut. Perhitungan menggunakan Persamaan (14).

$$\omega_n = \frac{F}{\text{jumlah node}} \quad (14)$$

$$\omega_n = \frac{2000}{13}$$

$$\omega = 153,846 \text{ N/m}$$

Keterangan:

$\omega_n$  = Nilai gaya tiap *node* (N/m)

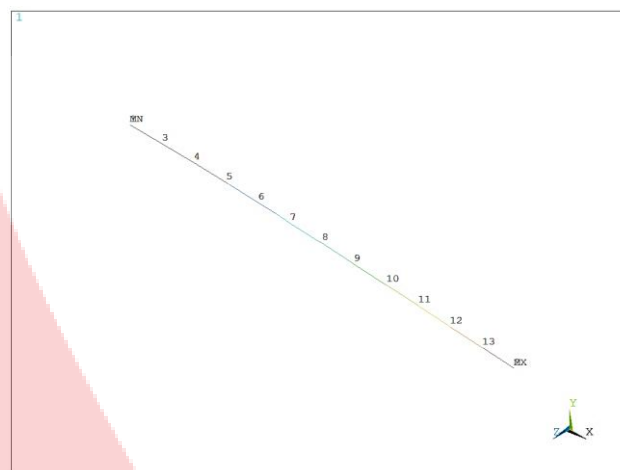
$F$  = Nilai gaya total (N)

Nilai gaya 153,846 N/m diaplikasikan pada setiap *node*. Berikut merupakan hasil simulasi *software* simulasi *FEM* yang ditunjukkan Gambar 5. Dalam simulasi *FEM* notasi (.) berarti *separator/pemisah* nilai pecahan desimal. Nilai hasil perhitungan *software* simulasi *FEM* menggunakan satuan (N/mm) ditunjukkan Gambar 5.

```

PRINT U      NODAL SOLUTION PER NODE
***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE
GLOBAL COORDINATE SYSTEM
NODE      UY
1         0.0000
2      -0.66942E-001
3      -0.90647E-003
4      -0.33355E-002
5      -0.70332E-002
6      -0.11769E-001
7      -0.17335E-001
8      -0.23546E-001
9      -0.30242E-001
10     -0.37283E-001
11     -0.44554E-001
12     -0.51964E-001
13     -0.59442E-001
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE      2
VALUE    -0.66942E-001
    
```

Gambar 5. Nilai Defleksi Tiap Node dengan Simulasi FEM



Gambar 7. Tampilan Defleksi Element Beam Tiap Node dalam Simulasi FEM

Perhitungan nilai *error* dilakukan dengan sampel defleksi maksimum kedua perhitungan. *Error* antara hasil perhitungan manual dengan hasil perhitungan *software* simulasi FEM ditunjukkan perhitungan berikut.

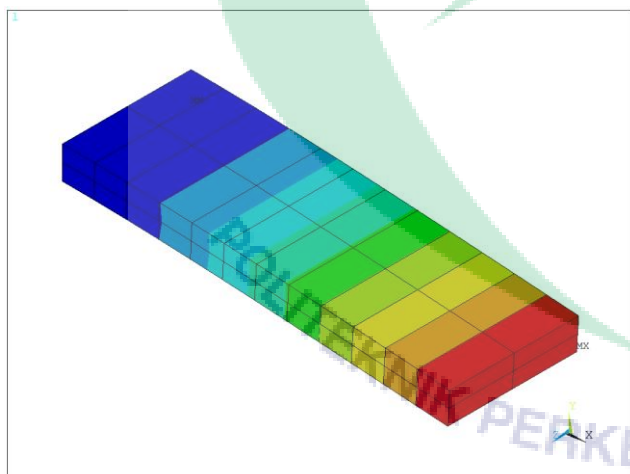
$$error = \frac{|\sigma_{max\ software} - \sigma_{max\ manual}|}{\sigma_{max\ manual}} \times 100 \quad (15)$$

$$error = \frac{|0,066942 - 0,064801296|}{0,064801296} \times 100\%$$

$$error = 0,03303489486 \times 100\%$$

$$error = 3,303489486\%$$

Berdasarkan perhitungan *error* dengan merujuk Persamaan (15) diperoleh *error* sebesar 3,3 %. Nilai *error* 3,3 % berada di batas aman berdasarkan buku “*International Conference on Intelligent Manufacturing and Automation, ICIMA 2020*” dan kriteria PT INKA (Persero). Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan defleksi dari *element beam* yang diuji.

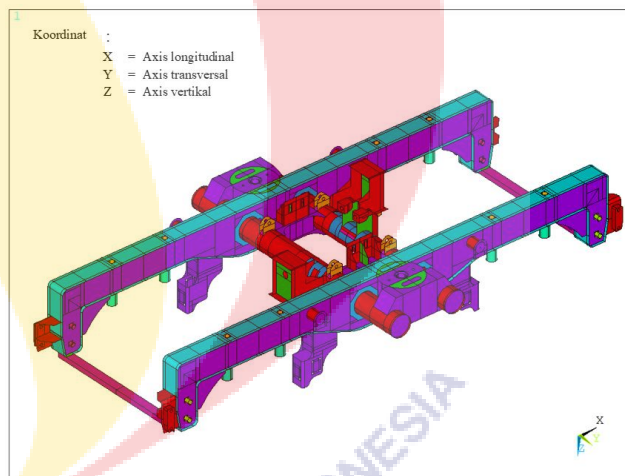


Gambar 6. Tampilan Defleksi Element Beam dalam Simulasi FEM

Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan daerah berwarna merah mengalami defleksi terbesar dan daerah berwarna biru mengalami defleksi terkecil. Daerah biru mengalami defleksi kecil karena berada dekat dengan tumpuan.

#### 4.2 Model FEM

*Bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek dimodelkan dengan basis *element shell* berupa tipe *element 2D*. Penggunaan *element 2D* untuk pemodelan pelat membuat kinerja PC lebih ringan selama proses simulasi dan pengaturan *mesh* lebih mudah, sehingga hasil yang diperoleh akurat (ANSYS Help Viewer, 2017). Masing-masing warna mewakili ketebalan pelat yang berbeda pada model *bogie frame* yang ditunjukkan Gambar 8.



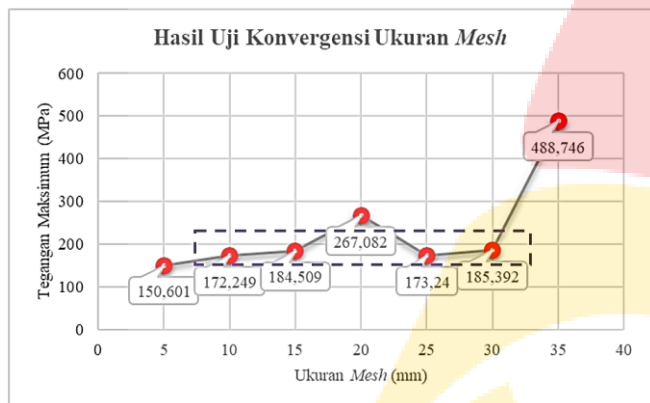
Gambar 8. Model bogie frame kereta ukur jalur LRT jabodebek

#### 4.3 Uji Konvergensi

FEM menggunakan perpindahan fungsi linier dalam setiap elemen, sedangkan perhitungan manual

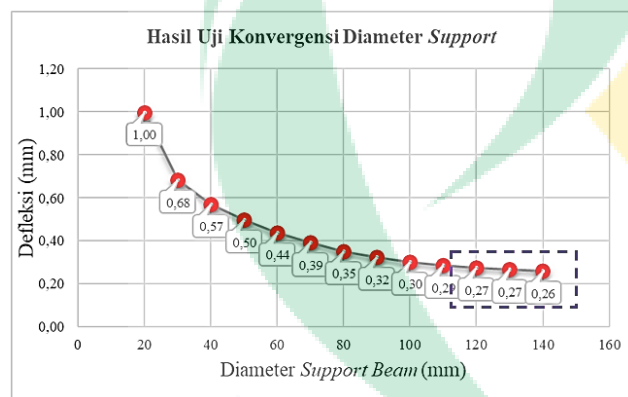


menggunakan fungsi kuadrat (Logan, 2016). Diketahui semakin banyak *mesh*, hasil simulasi lebih akurat. Namun, semakin banyak jumlah *mesh* atau semakin kecil ukuran *mesh* membuat waktu komputasi bertambah (Akin, 2005). Ukuran *mesh* ideal ditentukan berdasarkan uji konvergensi dengan pertimbangan kemampuan komputer. Uji konvergensi ukuran *mesh* penelitian ini ditunjukkan Gambar 9.



Gambar 9. Grafik uji konvergensi ukuran *mesh*

Grafik hasil uji konvergensi Gambar 9 menunjukkan tegangan hasil simulasi konvergen pada ukuran *mesh* 10 mm, 15 mm, 25 mm, dan 30 mm. Pada penelitian ini ukuran *mesh* 10 mm dipilih dengan pertimbangan kualitas permukaan *mesh* yang lebih baik dibandingkan ukuran *mesh* lain (Akin, 2005). Ukuran *mesh* 10 mm merupakan ukuran *element* dominan (terbanyak). Dalam penentuan ukuran diameter *support* dilakukan uji konvergensi yang ditunjukkan Gambar 10.

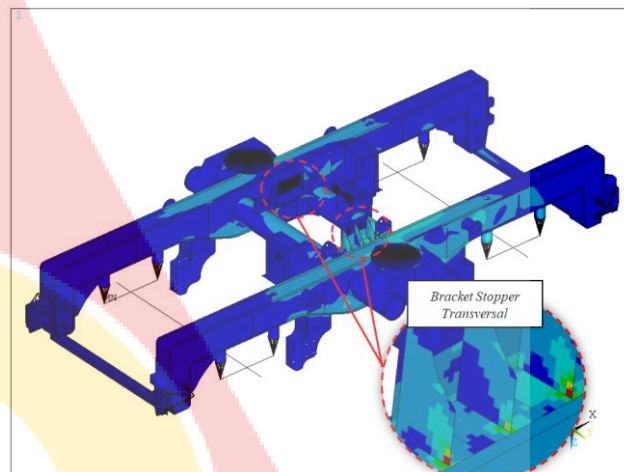


Gambar 10. Grafik uji konvergensi diameter *support*

Berdasarkan grafik pada Gambar 10 disimpulkan ukuran *support* konvergen pada diameter 120 mm, 130 mm, dan 140 mm. Diameter *support* 120 mm digunakan dalam simulasi karena nilai defleksi yang konvergen (Chen, 2019). Berdasarkan perhitungan nilai gaya dengan defleksi yang terjadi, struktur objek penelitian memiliki kekakuan (*stiffness*) sebesar 372 kg/mm.

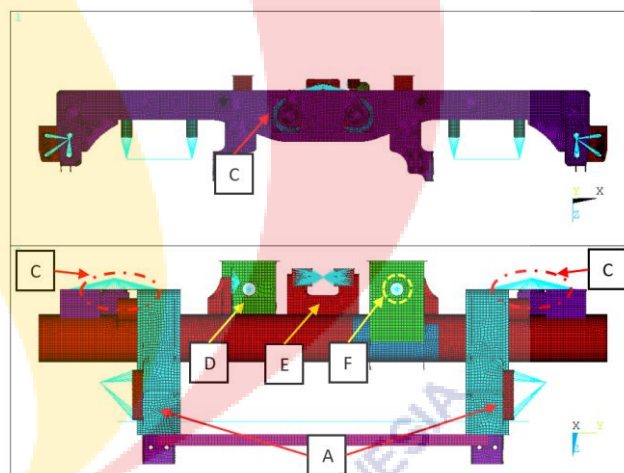
#### 4.4 Lokasi *Element* Kritis

Berdasarkan hasil simulasi diketahui lokasi *element* kritis tiap *load case*. Lokasi *element* kritis dapat dikelompokkan berdasarkan vektor gaya yang diterapkan. Gambar 11 menunjukkan lokasi titik kritis yang terjadi karena vektor gaya transversal.



Gambar 11. Element kritis *load case* transversal

*Element* dengan nilai tegangan besar ditunjukkan dengan *element* berwarna merah. Berdasarkan data hasil penelitian diketahui *element* kritis yang terjadi pada seluruh *load case normal service* terjadi pada daerah *bracket braking system*, *bracket transversal stopper*, *bracket wheelset*, *bracket air spring*, dan *bracket gearbox system*. Nilai tegangan objek simulasi ditunjukkan **Error! Reference source not found.** Lokasi *element* kritis ditunjukkan Gambar 12.



Gambar 12. Lokasi *element* kritis objek penelitian

- Keterangan :
- A = *Bracket braking system*
  - B = *Bracket wheelset*
  - C = *Bracket air spring*
  - D = *Bracket transversal stopper*
  - E = *Bracket carbody shunt*
  - F = *Bracket gearbox system*

#### 4.5 Nilai Tegangan *Element*

Plot seluruh *element* kritis dan catat nilai tegangan tertinggi terhadap seluruh *load case*. Nilai tegangan tertinggi diambil berdasarkan tegangan *S1*, *S2*, dan *S3 principle* (Patel et al., 2020). Rekapitulasi nilai tegangan yang terjadi tiap *load case* untuk mempermudah analisis seperti ditunjukkan Tabel 6 (Liang-Chuan dan Sen-Loong, 2010).

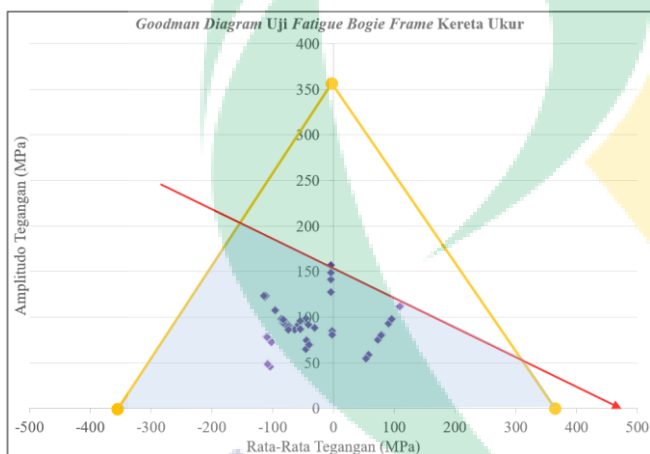
Tabel 6. Sampel rekapitulasi nilai tegangan objek penelitian

Nomer <i>Element</i>	Nilai Tegangan (Mpa)									
	Load Case 1	Load Case 2	...	Load Case 21	Load Case 22	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Amplitudo	
18154	-97.869	-92.266	...	-81.116	-63.298	-162.62	17.653	-72.4835	90.1365	
18155	-122.67	-115.19	...	-84.628	-62.766	-176.02	16.18	-79.92	96.1	
18158	-123.44	-115.7	...	-74.919	-53.912	-165.08	16.955	-74.0625	91.0175	
18164	-81.491	-76.153	...	-42.922	-29.423	-108.75	30.251	-39.2495	69.5005	
18166	-105.61	-98.766	...	-46.855	-30.98	-141.01	32.802	-54.104	86.906	
18167	-112.3	-104.98	...	-37.846	28.568	-149.9	41.432	-54.234	95.666	

Keterangan :

.... = Berisi nilai tegangan *load case* 3 sampai dengan *load case* 20

Tabel 6 menunjukkan contoh penggunaan tabel rekapitulasi nilai tegangan berisi sampel nilai tegangan hasil simulasi. Nilai rata-rata tegangan diperoleh dengan Persamaan (10). Nilai amplitudo tegangan diperoleh dengan Persamaan (11). Plot rata-rata dan amplitudo tegangan pada dalam grafik *goodman diagram*. Grafik *goodman diagram* disusun dengan merujuk standar *JIS E4207* dan parameter berdasarkan *material properties* Tabel 1. Tegangan yang diizinkan berada pada area grafik berwarna biru.



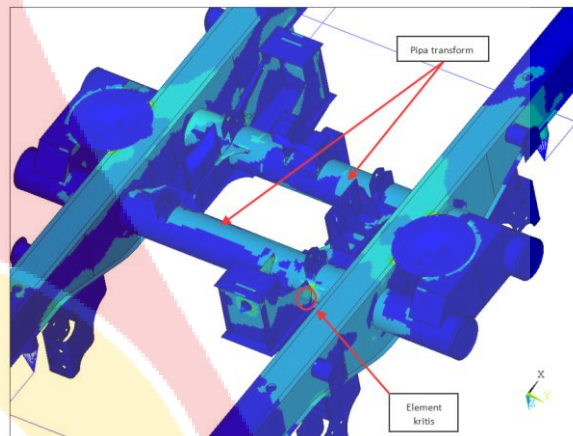
Gambar 13. *Goodman diagram* uji kekuatan *fatigue* objek penelitian

Keterangan :

- = Batas kekuatan luluh material
- = Batas kekuatan *fatigue* material
- ◆ = Plot *element* kritis

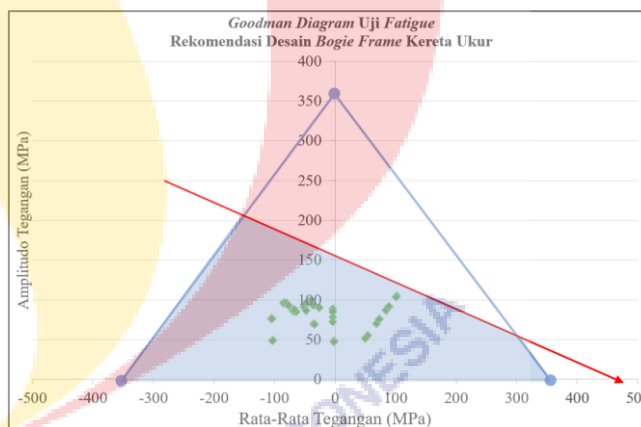
Berdasarkan analisa dengan *goodman diagram* Gambar 13 terdapat satu *element* dengan nilai

tegangan melebihi kriteria keberterimaan *endurance limit material* dengan nilai 157,09 MPa (*JIS E4207*, 2004). Kondisi tersebut terjadi pada kasus beban longitudinal dan terjadi pada *bracket gearbox*. Gambar 14 menunjukkan lokasi *element* kritis didaerah *bracket gearbox* dan lokasi *pipe transform*.



Gambar 14. Lokasi *element* kritis daerah *gearbox* dan *pipe transform*

Dilakukan penebalan *pipe transform* 12 mm menjadi 20 mm. Tabel 7 menunjukkan nilai tegangan *element* 104221 yang tidak memenuhi kriteria keberterimaan dengan keberterimaan rata-rata tegangan di rentang  $\pm 355$  MPa dan amplitudo tegangan lebih kecil dari 155 MPa (Li et al., 2014). Hasil perubahan ketebalan mengalami penurunan nilai dibandingkan desain awal (objek penelitian). Hasil Perubahan ketebalan *pipe transform* menunjukkan rekomendasi desain memenuhi kriteria keberterimaan dengan nilai tegangan ditunjukkan **Error! Reference source not found.**



Gambar 15. *Goodman diagram* uji kekuatan *fatigue* rekomendasi desain objek penelitian

Keterangan :

- = Batas kekuatan luluh material
- = Batas kekuatan *fatigue* material

◆ = Plot *element* kritis

Tabel 7. Perbandingan nilai tegangan objek penelitian dengan rekomendasi desain

	Desain Awal (Objek Penelitian)	Rekomendasi Desain
Tebal <i>Pipe Transform</i> (mm)	12	20
$\sigma_m$ <i>Element</i> 104221 (MPa)	-4,27	-3,74
$\sigma_a$ <i>Element</i> 104221 (MPa)	157,09	88,41
Kriteria $\sigma_m$ (MPa)	355	355
Kriteria $\sigma_a$ (MPa)	155	155
Keterangan	Tidak Aman	Aman

Keterangan :

$\sigma_m$  = Rata-rata tegangan

$\sigma_a$  = Amplitudo tegangan

Amplitudo tegangan *element* 104221 objek penelitian bernilai 157,09 MPa, sementara amplitudo tegangan yang diterima sebesar 155 MPa berdasarkan parameter *fatigue allowable stress material*. Seluruh rata-rata tegangan objek penelitian memenuhi kriteria keberterimaan, yaitu bernilai  $\leq 355$  MPa berdasarkan parameter *yield point material*.

Nilai tegangan rekomendasi desain aman berdasarkan analisis *endurance limit* dengan pendekatan *goodman diagram*. Perubahan ketebalan *pipe transform* 12 mm menjadi 20 mm menurunkan amplitudo tegangan *element* 104221 menjadi 88,41 MPa. Pada pengujian *prototype* dapat dilakukan pemasangan sensor tegangan pada lokasi *element* kritis untuk memastikan kekuatan struktur *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek.

## 5 KESIMPULAN

Analisis hasil simulasi menunjukkan metode evaluasi *endurance limit* dan tegangan yang terjadi pada objek penelitian. Tegangan kritis hasil pembebanan under normal berada di daerah *bracket wheelset*, *air spring*, *bracket transversal stopper*, *bracket gerabox*, dan *bracket brake system*. Nilai tegangan hasil simulasi digunakan untuk menentukan keberterimaan desain objek penelitian.

a. Metode evaluasi *endurance limit* desain struktur *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek dilakukan dengan pembebanan statik. Pembebanan statik terdiri 22 *load case* yang mewakili kondisi operasional objek penelitian. Hasil simulasi berupa lokasi *element* kritis struktur objek penelitian, nilai tegangan *element* kritis tiap *load case*, dan plot nilai tegangan *element* kritis dengan *goodman diagram*. Hasil penelitian diketahui penentuan ukuran *mesh*

dan diameter *support* perlu dilakukan uji konvergensi.

b. Desain *bogie frame* kereta ukur jalur LRT Jabodebek belum memenuhi kriteria keberterimaan EN 13749 dan JIS E4207 berdasarkan analisis dengan pendekatan *goodman diagram*. Terdapat satu *element* kritis pada daerah *bracket gearbox* melebihi batas keberterimaan akibat *load case* longitudinal. Amplitudo tegangan *element* tersebut bernilai 157,09 MPa dengan batas keberterimaan 155 MPa. Desain objek penelitian memenuhi kriteria keberterimaan dengan perubahan ketebalan *transform pipe* 12 mm menjadi 20 mm. Nilai tegangan *element* turun menjadi 88,41 MPa. Seluruh rata-rata tegangan objek penelitian memenuhi kriteria keberterimaan, yaitu  $\leq 355$  MPa.

## REFERENSI

- Akin, J.E. (2005) *Finite Element Analysis with Error Estimators*. doi:10.1016/B978-0-7506-6722-7.X5030-9.
- ANSYS Help Viewer (2017) *SHELL63 Element Description*.
- Autodesk (2019) *Inventor 2020 Student Version*.
- Berkovits, A. dan Fang, D. (1993) An analytical master curve for Goodman diagram data. *International Journal of Fatigue*, 15 (3): 173–180. doi:10.1016/0142-1123(93)90174-O.
- Chen, D. (2019) Strength Evaluation of a Bogie Frame by Different Methods. *Mechanical Engineering Science*, 1 (1). doi:10.33142/me.v1i1.662.
- EN 13749 (2011) *EN 13749:2011: Railway applications - Wheelsets and bogies - Method of specifying the structural requirements of bogie frames [Required by Directive 2008/57/EC]*.
- Fahrizal, M. (2016) *Analisa Hasil Sambungan Las Metode Pengelasan SMAW Menggunakan Material SA 36 Yang Sebelumnya Terbakar Dengan Suhu 700oC Dan 900oC Selama 4 Jam*.
- Harrell, C.R. dan Price, R.N. (2000) Simulation modeling and optimization using ProModel. *Winter Simulation Conference Proceedings*. doi:10.1109/WSC.2000.899717.
- JIS E4207 (2004) *JIS E4207-2004 Truck frames for railway rolling stock - General rules for design*.
- Kassner, M. (2012) Fatigue strength analysis of a welded railway vehicle structure by different methods. *International Journal of Fatigue*, 34 (1): 103–111.

doi:10.1016/j.ijfatigue.2011.01.020.

Li, F., Wu, P., Nie, Y., et al. (2014) *Fatigue Evaluation of Railway Vehicle Bogie Frame by Different Methods.*, (111): 844–852.

Liang-Chuan, P. dan Sen-Loong, P. (2010) *Pipe Stress Engineering. Pipe Stress Engineering.* doi:10.1115/1.802854.

Logan, D.L. (2016) *A first course in the finite element method.* Cengage Learning.

Mahfud, M.Z. (2021a) *Alasan Pembagian Gaya perhitungan Manual Berbeda dengan Metode Elemen Hingga.*

Mahfud, M.Z. (2021b) *Tujuan Simulasi Desain Struktur.*

Mahfud, M.Z. (2022) *Material produksi Bogie Frame Kereta Ukur.*

Okamoto, I. (2001) *How Bogies Work. Japanese Railway Technology Today*, 5 (December): 52. Available at: [http://www.ejrcf.or.jp/jrtr/technology/index\\_technology.html](http://www.ejrcf.or.jp/jrtr/technology/index_technology.html).

Patel, J.H., Khatawate, V.H., Jain, G., et al. (2020) *Static Analysis of Tripod Housing Using FEA and Its Validation.* Springer, Singapore. doi:[https://doi.org/10.1007/978-981-15-4485-9\\_75](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4485-9_75).

Seo, J.-W., Hur, H.-M., Jun, H.-K., et al. (2017) *Fatigue Design Evaluation of Railway Bogie with Full-Scale Fatigue Test* Ferro, P. (ed.). *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017: 5656497. doi:10.1155/2017/5656497.

Udeyo, F. (2008) *Structural Analysis.* Temple University. doi:10.1002/9781405164535.ch35.

UIC615-4 (2001) *UIC 615-4. Analysis*, (July): hal. 2–5.