

Analisa Anjloknya Kereta Api Bima Rute Surabaya-Malang Pada KM 8+625 Petak Wonokromo-Waru

Nugroho Utomo¹, Dian Purnamawati Solin²

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia
([1nugroho.ts@upnjatim.ac.id](mailto:nugroho.ts@upnjatim.ac.id); [2diansolin04@gmail.com](mailto:diansolin04@gmail.com))

ABSTRAK

Peristiwa anjloknya kereta api pada rel merupakan kondisi dimana kereta api tidak dapat menunjukkan performa perjalanannya dengan aman dan keluar dari jalurnya disebabkan karena gangguan mekanik pada rel seperti rel patah dan komponen pendukung struktur jalan kereta api seperti penambat rel dan bantalan rel yang tidak berfungsi dengan baik. Anjloknya kereta api merupakan hal yang perlu dipertimbangkan dalam keselamatan perjalanan kereta api terlebih lagi jika kereta api tersebut membawa muatan barang berbahaya. Penyebab dari rel patah dapat terjadi karena kelelahan material dari rel yang tidak terpantau ditambah dengan pembebanan berulang dari kereta api. Selain itu kejadian anjloknya kereta api pada rel juga dapat terjadi di area perlintasan sebidang antara jalan kereta api dan jalan raya dengan jarak pandang aman tersedia yang pendek. Dari beberapa peristiwa kereta api anjlok yang pernah terjadi di Indonesia umumnya disebabkan karena patah rel. Seperti peristiwa yang terjadi pada tanggal 26 Juli 2017 di KM 8+625 petak Wonokromo – Waru yakni anjloknya Kereta Api Bima (KA 43) rute Surabaya –Malang disebabkan oleh rel patah. Prosedur analisis anjloknya Kereta Api Bima ini dilakukan dengan perhitungan distribusi pembebanan pada stamformasi kereta api rencana, perhitungan nilai *dumping factor* (λ), perhitungan besar momen maksimum dan tegangan yang terjadi pada rel dan perhitungan besar momen dan tegangan yang terjadi pada bantalan rel. Dari hasil analisis diketahui bahwa penyebab anjloknya Kereta Api Bima adalah karena nilai tegangan hitung pada rel hampir mendekati nilai tegangan ijin rel (kritis), sehingga kondisi rel eksisting rawan terhadap kelelahan material (*fatigue*) lebih awal.

Kata Kunci :kereta api, rel, anjlok, momen pada rel, tegangan pada rel

ABSTRACT

Derailments is a conditions when the train couldn't perform its trip safely by slipped out from their tracks caused of mechanics disruption on rail such as broken rail and railway structure supporting component like rail fastenings and rail sleepers that is not functioning very well. Derailments must involve as a consideration for performing a safety of a train trips moreover if it carrying hazardous material goods. A broken rail that occur a derailments caused by rail materials fatigue which is not properly monitoring and load repetitions of train also added in. Beside that derailments could happened on railway crossing with close available safety sight distance. From a several derailments occurred in Indonesia commonly caused by a broken rail. Like an outrageous event which happen on July 26th, 2017 at KM 8+625 Wonokromo – Waru segment that is derailment of Bima Train (KA 43) servicing on Surabaya – Malang route motived by broken rail. Derailments analysis procedure of Bima Train executing with load distribution calculations on planning train formation, dumping factor (λ) calculations, maximum moment and rail stress also maximum moment and rail sleepers stress calculations. From the result of analysis obtained that Bima Train derailment is causing by rail stress value nearly closed to permitted value of rail stress (critically), for further existing rail conditions disturbed to early fatigue.

Keywords : train, rail, derailments, rail moment, rail stress

I. PENDAHULUAN

Peristiwa anjloknya kereta api pada rel (*derailment*) merupakan kondisi dimana kereta api tidak dapat menunjukkan performa perjalanannya dengan aman dan

keluar dari jalurnya disebabkan karena gangguan mekanik pada rel seperti rel patah (*broken rail*) dan komponen pendukung struktur jalan kereta api seperti penambat rel (*rail fastenings*) dan bantalan rel (*rail*

sleepers) yang tidak berfungsi dengan baik [1]. Anjloknya kereta api merupakan hal yang perlu dipertimbangkan dalam keselamatan perjalanan kereta api terlebih lagi jika kereta api tersebut membawa muatan barang berbahaya (*dangerous goods*) [2]. Penyebab dari rel patah (*broken rail*) dapat terjadi karena kelelahan material (*fatigue*) dari rel yang tidak terpantau ditambah dengan pembebanan berulang (*load repetition*) dari kereta api. Selain itu kejadian anjloknya kereta api pada rel juga dapat terjadi di area perlintasan sebidang antara jalan kereta api dan jalan raya dengan jarak pandang aman (*safety sight distance*) tersedia yang pendek [3], [4]. Dari beberapa peristiwa kereta api anjlok yang pernah terjadi di Indonesia umumnya disebabkan karena patah rel. Seperti peristiwa yang terjadi pada tanggal 26 Juli 2017 di KM 8+625 petak Wonokromo – Waru yakni anjloknya Kereta Api Bima (KA 43) rute Surabaya – Malang disebabkan oleh rel patah yang ditunjukkan pada gambar 1 berikut:



Gambar 1. Rel patah di KM 8+625

Patahnya rel ini berakibat pada anjloknya satu rangkaian kereta paling belakang dari Kereta Api Bima. Sehingga Kereta Api Bima rute Surabaya – Malang yang dijadwalkan berangkat dari Stasiun Gubeng Surabaya jam 06.30 harus mengalami keterlambatan keberangkatan hingga pukul 10.45. Dari hasil penyelidikan sementara diketahui bahwa penyebab terjadinya anjlok adalah terdapat gangguan fisik pada rel di KM 8+625 petak Wonokromo-Waru yakni sebelumnya berupa keretakan rel dan berlanjut menjadi patah rel akibat lalu lintas kereta api. Lokasi anjloknya KA 43 ditunjukkan pada gambar 2 berikut:



Gambar 2. Lokasi anjlok di KM 8+625

Kondisi ini menyebabkan seluruh jadwal keberangkatan dan kedatangan kereta api di Stasiun Wonokromo menjadi tertunda. Kereta api yang akan masuk ke arah Stasiun Wonokromo tidak dapat meneruskan perjalanan dan harus tertahan di Stasiun Waru, yakni Kereta Api Tumapel 430, Kereta Api Penataran 432 dan Kereta Api Logawa 190. Kereta api yang akan berangkat juga tertahan di Stasiun Wonokromo yakni Kereta Api Penataran 431, Kereta Api Mutiara Selatan 113 dan Kereta Api Mutiara Timur 87. Dalam penelitian ini dijelaskan tentang analisis penyebab terjadinya anjlok pada Kereta Api Bima (KA 43).

II. METODE

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa penyebab terjadinya anjlok dari Kereta Api Bima pada KM. 8+625 petak Wonokromo – Waru adalah rel patah. Untuk mengetahui penyebab terjadinya rel patah dalam penelitian ini dijelaskan mengenai prosedur perhitungan pembebanan pada rel yakni [5] :

- a. Perhitungan distribusi pembebanan pada stamformasi kereta api rencana

Kereta api rencana menggunakan lokomotif rencana (CC 201, CC 203 atau CC 206)

Jumlah rangkaian kereta dan macamnya (kereta penumpang, kereta makan, kereta pembangkit dan kereta bagasi)

Perhitungan distribusi pembebanan dari lokomotif rencana :

$$P_{bogie} = \frac{W_{lokomotif}}{2} \quad (1)$$

$$P_{gandar} = \frac{P_{bogie}}{\text{jumlah gandar}} \quad (2)$$

$$P_{roda} = \frac{P_{gandar}}{\text{jumlah roda}} \quad (3)$$

- b. Perhitungan nilai *dumping factor* (λ), dirumuskan:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (4)$$

Dengan:

k = modulus kekakuan jalan kereta api (kg/cm^2)

E = modulus elastisitas material rel ($2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)

I = momen inersia arah x-x dari rel yang digunakan (cm^4)

- c. Perhitungan besar momen maksimum yang terjadi pada rel, dirumuskan :

$$\text{Momen maksimum pada rel} = \frac{Pd}{4\lambda} \quad (5)$$

Dengan:

P_d = beban dinamis dari kereta api (kg)

$$P_d = I_p \times P_s \quad (6)$$

I_p = faktor perhitungan beban dinamis

$$I_p = 1 + (0,01 \left(\frac{V}{1,609} - 5 \right)) \quad (7)$$

V = kecepatan rata-rata kereta api di lintasan lurus (km/jam)

- d. Perhitungan besar tegangan yang terjadi pada rel, dirumuskan:

$$\sigma = \frac{Ma \times y}{I_x} \quad (8)$$

Dengan:

$$M_a = 0,85 \times \frac{Pd}{4\lambda} \quad (9)$$

y = jarak tepi bawah rel ke garis netral (cm)

I_x = momen inersia rel arah x - x (cm^4)

Nilai σ harus lebih kecil dari besar tegangan ijin pada rel yang disyaratkan yakni untuk kelas jalan rel I atau lintas utama adalah 1325 kg/cm^2

- e. Perhitungan besar defleksi yang terjadi pada rel, dirumuskan:

$$y(x) = \frac{Pd \cdot \lambda}{2k} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) \quad (10)$$

Dengan:

x = jarak tinjauan (cm)

P_d = beban dinamis (kg)

k = modulus kekakuan jalan kereta api (kg/cm^2)

- f. Perhitungan gaya momen dan tegangan yang terjadi di bawah kaki rel dan di tengah bantalan rel, dirumuskan dengan:

- i). Besar gaya momen di bawah kaki rel:

$$M_1 = \frac{Q}{4\lambda} \times \frac{1}{\sinh \lambda L + \sin \lambda L} [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda L) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda L) - \sinh 2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda L) - \sin 2\lambda a (\sinh 2\lambda c + \sin \lambda L)] \quad (11)$$

- ii). Besar tegangan yang terjadi di bawah kaki rel:

$$\sigma_1 = \frac{Pd}{2b} \times \frac{1}{\sinh \lambda L + \sin \lambda L} [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cos \lambda L) + 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda L) + \sin 2\lambda a (\sin 2\lambda c - \sinh \lambda L) - \sin 2\lambda a (\sinh 2\lambda c - \sin \lambda L)] \quad (12)$$

- iii). Besar gaya momen di tengah bantalan rel:

$$M_2 = \frac{-Q}{2\lambda} \times \frac{1}{\sinh \lambda L + \sin \lambda L} [\sinh \lambda c (\sin \lambda c + \sin \lambda (L - c)) + \sin \lambda c (\sinh \lambda c + \sinh \lambda (L - c)) + \cosh \lambda c \cdot \cos \lambda (L - c) - \cos \lambda c \cdot \cosh \lambda (L - c)] \quad (13)$$

- iv). Besar tegangan yang terjadi di tengah bantalan:

$$\sigma_1 = \frac{Pd}{2b} \times \frac{1}{\sinh \lambda L + \sin \lambda L} [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2\lambda c + \cos \lambda L) + 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda L) + \sin 2\lambda a (\sin 2\lambda c - \sinh \lambda L) - \sin 2\lambda a (\sinh 2\lambda c - \sin \lambda L)] \quad (14)$$

Dengan:

Q = distribusi beban yang diterima oleh bantalan rel sebesar 60% dari P_d

a = jarak antara bagian dudukan rel dengan sisi terluar pada bantalan rel tipe N-67 (40 cm)

c = separuh jarak di antara dudukan rel pada bantalan rel tipe N-67 (60 cm)

b = lebar bantalan rel, pada bagian bawah kaki rel (22,6 cm), pada bagian tengah bantalan rel tipe N-67 (25 cm)

L = panjang bantalan rel tipe N-67 (200 cm)

Untuk perhitungan gaya momen dan tegangan yang terjadi di bagian bawah kaki rel dan di bagian tengah bantalan rel harus membuat tabel fungsi hiperbolik sebagai parameter perhitungan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan distribusi pembebanan pada stamformasi kereta api rencana

Kereta Api Bima rute Surabaya – Malang (KA 43) merupakan kereta api ekstensi dari rute eksisting Surabaya – Jakarta PP yang diadakan untuk memanfaatkan rangkaian *idle* Kereta Api Bima dan memenuhi kebutuhan transportasi bagi masyarakat yang ingin melakukan perjalanan ke Malang dengan aman dan nyaman. Stamformasi kereta api adalah susunan rangkaian dari kereta api dimulai dari lokomotif penarik rencana dan urutan jumlah kereta penumpang atau kereta utilitas lain (kereta makan, kereta pembangkit dan kereta bagasi) yang digabungkan. Stamformasi Kereta Api Bima terdiri atas 1 Lokomotif penarik rencana (CC 206), 1 bagasi kargo (B), 8 kereta eksekutif (K1 2016), 1 kereta makan (KM1 2016) dan 1 kereta pembangkit (KP 2016). Untuk menghitung distribusi pembebanan digunakan beban rencana dari lokomotif penarik yaitu CC 206. Berat lokomotif CC 206 adalah 90 ton, sehingga besar beban statis pada roda dapat dihitung:

$$P_{\text{bogief}} = \frac{W_{\text{lokomotif}}}{2}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{90}{2} \\
&= 45 \text{ ton} \\
P_{\text{gandar}} &= \frac{P_{\text{bogier}}}{\text{jumlah gandar}} \\
&= \frac{45}{3} \\
&= 15 \text{ ton} \\
P_{\text{roda}} &= \frac{P_{\text{gandar}}}{\text{jumlah roda}} \\
&= \frac{15}{2} \\
&= 7,5 \text{ ton}
\end{aligned}$$

Jadi dari hasil perhitungan distribusi pembebanan pada lokomotif rencana diketahui bahwa P_{roda} adalah 7,5 ton atau 7500 kg.

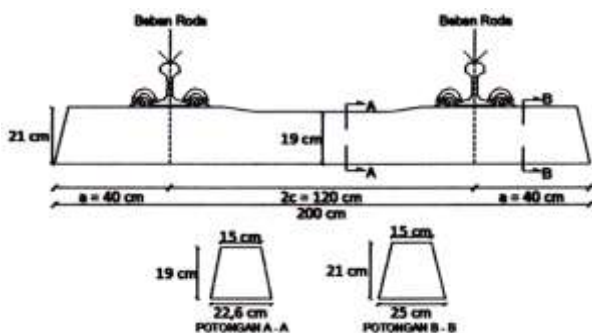
Perhitungan nilai *dumping factor* (λ)

Perhitungan *dumping factor* (λ) merupakan prosedur yang harus dilakukan dalam perhitungan pembebanan pada rel, karena terdapat salah satu variabel perhitungan yang membutuhkan nilai dari *dumping factor* (λ). Modulus kekakuan jalan kereta api (k) diperoleh dari perhitungan [6]:
 $k = b \times k_e$

dengan:

b = lebar bawah bantalan rel (cm)
 k_e = modulus reaksi lapisan *ballast* (kg/cm^3)

Struktur jalan kereta api menggunakan bantalan rel dari beton tipe N-67 dengan spesifikasi seperti ditunjukkan pada gambar 3 berikut :



Gambar 3. Spesifikasi Bantalan Beton Tipe N-67

Dari spesifikasi bantalan beton tipe N-67 diketahui bahwa lebar bawah bantalan beton (b) adalah 25 cm, dan besar modulus reaksi lapisan *ballast* (k_e) pada kondisi

struktur jalan kereta api eksisting adalah $7,16 \text{ kg/cm}^3$. Maka besar modulus kekakuan jalan kereta api adalah:

$$\begin{aligned}
k &= b \times k_e \\
k &= 25 \times 7,16 \\
k &= 179 \text{ kg/cm}^2
\end{aligned}$$

Besar modulus elastisitas material rel (E) adalah $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ dan momen inersia dari rel eksisting (tipe R42) adalah 1369 cm^4 , sehingga nilai *dumping factor* (λ):

$$\begin{aligned}
\lambda &= \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \\
\lambda &= \sqrt[4]{\frac{179}{4 \times 2,1 \times 10^6 \times 1369}} \\
\lambda &= 0,011
\end{aligned}$$

Perhitungan besar momen maksimum yang terjadi pada rel

Untuk menghitung momen maksimum yang terjadi pada rel dengan besar kecepatan rata-rata Kereta Api Bima pada jalur lintas adalah 90 km/jam terlebih dulu dicari besar beban dinamis (P_d) yaitu:

Mencari koefisien perhitungan beban dinamis (I_p) :

$$I_p = 1 + \left(0,01 \left(\frac{V}{1,609} - 5 \right) \right)$$

$$I_p = 1 + \left(0,01 \left(\frac{95}{1,609} - 5 \right) \right)$$

$$I_p = 1,54$$

Sehingga besar beban dinamis (P_d) :

$$\begin{aligned}
P_d &= P_s \times I_p \\
P_d &= 7,5 \times 1,54 \\
P_d &= 11,55 \text{ ton} \\
P_d &= 11550 \text{ kg}
\end{aligned}$$

Besar momen maksimum pada rel:

$$\text{Momen maksimum pada rel} = \frac{P_d}{4\lambda}$$

$$\text{Momen maksimum pada rel} = \frac{11550}{4 \times 0,011}$$

$$\text{Momen maksimum pada rel} = 262500 \text{ kg.cm}$$

Perhitungan besar tegangan yang terjadi pada rel

Rel eksisting menggunakan tipe R42, dengan nilai momen inersia 1369 cm^4 dan nilai y adalah 68,50 mm, maka besar tegangan yang terjadi pada rel adalah:

$$\sigma = \frac{M a x y}{I_x}$$

$$\sigma = \frac{0,85 \times M_{maks} \times y}{I_x}$$

$$\sigma = \frac{0,85 \times 262500 \times 6,85}{1369}$$

$$\sigma = 1116,44 \text{ kg/cm}^2$$

Nilai tegangan yang terjadi pada rel adalah $1116,44 \text{ kg/cm}^2 < \text{tegangan ijin pada rel (kelas jalan rel I) } 1325 \text{ kg/cm}^2$.

Nilai tegangan hitung yang terjadi pada rel sudah aman atau di bawah dari tegangan ijin, tetapi pada kondisi kritis. Artinya besar tegangan hitung pada rel hampir mendekati nilai tegangan ijin rel sehingga kondisi rel eksisting rawan terhadap kelelahan material (*fatigue*) lebih awal. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya rel patah pada KM 8+625 petak Wonokromo – Waru dan anjaknya satu rangkaian kereta paling belakang dari Kereta Api Bima.

Untuk itu rel eksisting yang menggunakan tipe R42 harus diganti dengan tipe R54, sehingga perlu dilakukan perhitungan besar tegangan yang terjadi terhadap rel baru tipe R54:

Rel tipe R54:

Momen inersia arah sumbu x-x (I_x) = 2346 cm^4

$y = 76,20 \text{ mm}$

Sehingga:

$$\sigma = \frac{M a \times y}{I_x}$$

$$\sigma = \frac{0,85 \times M_{maks} \times y}{I_x}$$

$$\sigma = \frac{0,85 \times 262500 \times 7,62}{2346}$$

$$\sigma = 724,73 \text{ kg/cm}^2$$

Nilai tegangan yang terjadi pada rel adalah $724,73 \text{ kg/cm}^2 < \text{tegangan ijin pada rel (kelas jalan rel I) } 1325 \text{ kg/cm}^2$.

Jadi nilai tegangan hitung yang terjadi pada rel sudah cukup aman.

Perhitungan besar defleksi yang terjadi pada rel

Untuk mengetahui besarnya defleksi yang terjadi pada rel eksisting (rel tipe R42) tinjauan dilakukan pada jarak (x) sejauh 0,3 m atau 30 cm dari kedudukannya pada bantalan rel. Sehingga:

$$\lambda = 0,011$$

$$x = 30 \text{ cm}$$

maka:

$$\lambda \cdot x = 0,011 \times 30$$

$$= 0,33$$

$$y(x) = \frac{Pd \cdot \lambda}{2k} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x)$$

$$y(30) = \frac{11550,0,011}{2,179} e^{-0,33} (\cos 0,33 + \sin 0,33)$$

$$y(30) = 0,324 \text{ cm}$$

Selanjutnya untuk mengetahui besarnya defleksi yang terjadi pada rel rencana (rel tipe R54) tinjauan dilakukan pada jarak (x) sejauh 0,3 m atau 30 cm dari kedudukannya pada bantalan rel. Sehingga: nilai *dumping factor* (λ):

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{179}{4 \times 2,1 \times 10^6 \times 2346}}$$

$$\lambda = 9,76 \times 10^{-3}$$

$$\lambda = 9,76 \times 10^{-3}$$

$$x = 30 \text{ cm}$$

maka:

$$\lambda \cdot x = 9,76 \times 10^{-3} \times 30$$

$$= 0,2928$$

$$y(x) = \frac{Pd \cdot \lambda}{2k} e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x)$$

$$y(30) = \frac{11550,9,76 \times 10^{-3}}{2,179} e^{-0,2928} (\cos 0,2928 + \sin 0,2928)$$

$$y(30) = 0,29 \text{ cm}$$

Perhitungan gaya momen dan tegangan yang terjadi di bawah kaki rel dan di tengah bantalan rel

Komponen perhitungan pada bantalan rel eksisting seperti ditunjukkan pada gambar 3 tentang spesifikasi bantalan beton tipe N-67, yakni:

a = jarak antara bagian dudukan rel dengan sisi terluar pada bantalan rel tipe N-67 (40 cm)

c = separuh jarak di antara dudukan rel pada bantalan rel tipe N-67 (60 cm)

b = lebar bantalan rel, pada bagian bawah kaki rel (22,6 cm), pada bagian tengah bantalan rel tipe N-67 (25 cm)

L = panjang bantalan rel tipe N-67 (200 cm)

Q = distribusi beban yang diterima oleh bantalan rel sebesar 60% dari P_d

$$Q = 60\% \times 11550$$

$$Q = 6930 \text{ kg}$$

Besar momen lentur ijin di bantalan bagian bawah rel yang disyaratkan adalah [7]: 1500 kg.m atau 150.000 kg.cm. Sedangkan besar momen lentur ijin di bagian tengah bantalan rel yang disyaratkan adalah: 930 kg.m atau 93000 kg.cm. Bantalan beton eksisting menggunakan mutu beton K-500 dan momen inersia (I) di bagian bawah kaki rel 15113,437 cm⁴, sehingga nilai modulus elastisitas material bantalan (E):

$$E = 6400 \times \sqrt{f_{cu}}$$

$$E = 6400 \times \sqrt{500}$$

$$E = 119733,036 \text{ kg/cm}^2$$

Nilai *dumping factor* (λ):

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{179}{4 \times 143108,35 \times 15113,437}}$$

$$\lambda = 0,012$$

Selanjutnya mencari besar nilai fungsi hiperbolik trigonometri dalam radian yang ditunjukkan pada tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Tabel fungsi hiperbolik trigonometri

Fungsi hiperbolik trigonometri	Nilai
Sinh λ L	5,4662
Sin λ L	0,675
Cosh λ a	1,1174
Cosh ² λ a	1,2486
Cos2 λ c	0,13
Cosh λ L	5,5569
Cos ² λ a	0,78676
Cosh2 λ c	2,2288
Cos λ L	-0,7374
Sinh2 λ a	1,1144
Sin2 λ c	0,9914
Sin2 λ a	0,81919
Sinh2 λ c	1,99188

Sumber: hasil analisa data

a. Besar gaya momen yang terjadi di bawah kaki rel, dapat dihitung:

$$M_1 = \frac{Q}{4\lambda} \times \frac{1}{\sinh\lambda L + \sin\lambda L} [2\cosh^2\lambda a(\cos 2\lambda c + \cosh\lambda L) - 2\cos^2\lambda a(\cosh 2\lambda c + \cos\lambda L) - \sinh 2\lambda a(\sin 2\lambda c + \sinh\lambda L) - \sin 2\lambda a(\sinh 2\lambda c + \sin\lambda L)]$$

$$M_1 = \frac{6930}{4 \cdot 0,012} \times \frac{1}{5,4662 + 0,675} [2,1,2486(0,13 + 5,5569) - 2,0,78676(2,2288 - 0,7374) - 1,1144(0,9914 + 5,4662) - 0,81919(1,99188 + 0,675)]$$

$$M_1 = 144375 \times (0,1628 \times [14,2 - 2,3467 - 7,1916 - 2,1846])$$

$$M_1 = 58222,37 \text{ kg.cm}$$

Jadi besar momen yang terjadi pada bantalan di bawah rel < besar momen ijin (150.000 kg.cm)

b. Besar tegangan yang terjadi di bawah kaki rel, dapat dihitung:

$$\sigma_1 = \frac{Pd}{2b} \times \frac{1}{\sinh\lambda L + \sin\lambda L} [2\cosh^2\lambda a(\cos 2\lambda c + \cos\lambda L) + 2\cos^2\lambda a(\cosh 2\lambda c + \cos\lambda L) + \sin 2\lambda a(\sin 2\lambda c - \sinh\lambda L) - \sin 2\lambda a(\sinh 2\lambda c - \sin\lambda L)]$$

$$\sigma_1 = \frac{11550}{2,25} \times \frac{1}{5,4662 + 0,675} [2,1,2486(0,13 - 0,7374) + 2,0,78676(2,2288 - 0,7374) + 0,81919(0,9914 - 5,4662) - 0,81919(1,99188 - 5,4662)]$$

$$\sigma_1 = 231 \times (0,1628 \times [-1,5168 + 2,346 - 3,6657 + 2,846])$$

$$\sigma_1 = 0,357 \text{ kg/cm}^2$$

c. Besar gaya momen yang terjadi di tengah bantalan rel, dapat dihitung:

Bantalan beton eksisting menggunakan mutu beton K-500 dan momen inersia (I) di bagian tengah bantalan rel adalah 10599,425 cm⁴

Nilai *dumping factor* (λ):

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{179}{4 \times 143108,35 \times 10599,425}}$$

$$\lambda = 0,013$$

Tabel 2. Tabel fungsi hiperbolik trigonometri

Fungsi hiperbolik trigonometri	Nilai
Sinh λ L	6,6947
Sin λ L	0,5155
Sinh λ c	0,8615
Sin λ c	0,7
Sin λ (L-c)	0,9691
Sinh λ (L-c)	3,00
Cosh λ c	1,3199
Cosh λ (L-c)	3,1669
Cos λ c	0,71
Cos λ (L-c)	-0,2466

Sumber: hasil analisa data

Sehingga besar gaya momen yang terjadi di tengah bantalan rel:

$$M_2 = -\frac{Q}{2\lambda} \times \frac{1}{\sinh\lambda L + \sin\lambda L} [\sinh\lambda c(\sin\lambda c + \sin\lambda(L - c)) + \sin\lambda c(\sinh\lambda c + \sinh\lambda(L - c)) + \cosh\lambda c \cdot \cos\lambda(L - c) - \cos\lambda c \cdot \cosh\lambda(L - c)]$$

$$M_2 = -\frac{6930}{2.0,013} \times \frac{1}{6,6947+0,5155} [0,8615(0,7 + 0,9691) + 0,7(0,8615 + 3,00) + (1,3199 \cdot (-0,2466)) - (0,71.3,1669)]$$

$$M_2 = -266538,46 \times (0,13869 \times [1,4379 + 2,7 + (-0,3255 - 2,2485)])$$

$$M_2 = 57061,16 \text{ kg.cm}$$

Jadi besar momen yang terjadi pada tengah bantalan < besar momen ijin (93000 kg.cm)

d. Menghitung besar tegangan yang terjadi di tengah bantalan rel:

Tabel 3. Tabel fungsi hiperbolik trigonometri

Fungsi hiperbolik trigonometri	Nilai
$\sinh\lambda L$	6,6947
$\sin\lambda L$	0,5155
$\cosh\lambda a$	1,1382
$\cosh^2\lambda a$	1,2956
$\cos 2\lambda c$	0,01
$\cos^2\lambda a$	0,7531
$\cosh 2\lambda c$	2,4845
$\cos\lambda L$	-0,85688
$\sinh 2\lambda a$	1,23788
$\sin 2\lambda c$	0,9999
$\sin 2\lambda a$	0,8624
$\sinh 2\lambda c$	2,2743

Sumber: hasil analisa data

Besar tegangan yang terjadi di tengah bantalan rel:

$$\sigma_2 = \frac{Pd}{2b} \times \frac{1}{\sinh\lambda L + \sin\lambda L} [2\cosh^2\lambda a(\cos 2\lambda c + \cos\lambda L) + 2\cos^2\lambda a(\cosh 2\lambda c + \cos\lambda L) + \sin 2\lambda a(\sin 2\lambda c - \sinh\lambda L) - \sin 2\lambda a(\sinh 2\lambda c - \sinh\lambda L)]$$

$$\sigma_2 = \frac{11550}{2.22,6} \times \frac{1}{6,6947+0,5155} [2 \cdot 1,2956(0,01 - 0,85688) + 2 \cdot 0,7531(2,485 - 0,85688) + 0,8624(0,9999 - 6,6947) - 0,8624(2,2743 - 6,6947)]$$

$$\sigma_2 = 255,53 \times 0,1386 \times [-2,1944 + 2,4522 - 4,91 + 3,812]$$

$$\sigma_2 = 29,75 \text{ kg/cm}^2$$

e. Periksa terhadap guling

Untuk mengetahui apakah KA Bima mengalami guling saat melintasi rel yang patah tersebut maka harus dianalisis dengan rumus sebagai berikut [8]:

$$C = \frac{m \cdot V}{R}$$

Dengan:

C = besar gaya sentrifugal yang terjadi (kg)

m = massa kereta (kg)

V = kecepatan kereta api saat melewati tikungan (km/jam)

R = jari-jari lengkung horisontal (m)

Seperti diketahui bahwa lokasi KM 8+625 petak Wonokromo – Waru berada pada jalur lintasan (*track*) lurus sehingga R (jari-jari lengkung horisontal) adalah 0 m. Maka :

$$C = \frac{m \cdot V}{R}$$

$$C = \frac{m \cdot V}{0}$$

$$C = 0$$

Jadi, besar gaya sentrifugal yang terjadi sama dengan 0 artinya KA Bima saat melewati rel dengan kondisi patah tidak terjadi guling.

Berat dari kereta juga berpengaruh terhadap kestabilan dalam pergerakan, artinya bahwa bahwa kereta/gerbong yang kosong adalah lebih rawan terhadap bahaya keluar rel dan juga lebih peka terhadap getaran-getaran dari roda kereta, bila dibandingkan dengan kereta/gerbong yang bermuatan sesuai kapasitasnya [9].

Terdapat beberapa parameter dari struktur jalan kereta api yang mempunyai potensi menimbulkan kerawanan terhadap terjadinya anjloknya kereta api dari rel antara lain [10]:

- Usia pemakaian rel (*rail age and usages*)
- Tipe dari rel (*rail type*)
- Sudut dari tikungan (*degree of curve*)
- Kecepatan rencana dari kereta api (*design speed*)
- Berat statis rata-rata dari tiap kereta
- Berat dinamis rata-rata dari tiap kereta
- Besar gaya lateral yang terjadi (*lateral force*)
- Ada atau tidaknya kemiringan arah memanjang (*longitudinal slopes*)
- Sambungan pada rel yang rawan terhadap putus akibat kelelahan material (*rail joints*).

Parameter yang berguna secara langsung untuk membantu mengidentifikasi struktur atas jalan kereta api (rel) dari resiko anjlok adalah karakteristik rel (usia pemakaian rel dan tipe rel) serta sambungan pada rel yang rawan terhadap patah akibat kelelahan material. Parameter ini biasa digunakan sebagai standar operasional prosedur bagi setiap Petugas Penilik Jalan Kereta Api (PPJ) untuk melakukan

pemeriksaan secara intensif dan terpadu pada jalan kereta api [11].

IV. KESIMPULAN

Kejadian anjloknya Kereta Api Bima pada KM. 8+625 petak Wonokromo – Waru ini disebabkan oleh patahnya rel eksisting. Berdasarkan hasil analisis diketahui bahwa nilai tegangan yang terjadi pada rel adalah $1116,44 \text{ kg/cm}^2 < \text{tegangan ijin pada rel (kelas jalan rel I) } 1325 \text{ kg/cm}^2$

Nilai tegangan hitung yang terjadi pada rel sudah aman atau di bawah dari tegangan ijin, tetapi pada kondisi kritis. Artinya besar tegangan hitung pada rel hampir mendekati nilai tegangan ijin rel sehingga kondisi rel eksisting rawan terhadap kelelahan material (*fatigue*) lebih awal. Sebagai rekomendasi maka rel eksisting yang menggunakan tipe R42 harus diganti dengan tipe R54.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] X. Liu, C. P. L. Barkan, and M. R. Saat, "Analysis of Derailments by Accident Cause," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2261, no. 1, pp. 178–185, 2011.
- [2] M. Bagheri, F. Saccomanno, S. Chenouri, and L. Fu, "Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 43, no. 3, pp. 613–620, 2011.
- [3] L. Ling, M. Dhanasekar, and D. P. Thambiratnam, "Assessment of road-rail crossing collision derailments on curved tracks," *Aust. J. Struct. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 125–134, 2017.
- [4] N. Utomo and I. Sholichin, "Determining Safety Distance of Road Users at Unprotected Railway Level Crossing (Case Study: Oro-Oro Ombo Wetan 1-2 Railway Level Crossings)," *Proc. 2018 Int. Conf. Sci. Technol. (ICST 2018)*, pp. 45–49, 2018.
- [5] S. H. T. Utomo, *Jalan Rel*, !!St. Yogyakarta: Beta Offset, 2003.
- [6] PJKA, *Peraturan Dinas No. 10 Perencanaan Konstruksi Jalan Rel*, 1st ed. Bandung: Penerbit PJKA, 1986.
- [7] E. Herdianto, I. Sulistyowati, U. Trisakti, and U. Trisakti, "Kapasitas Kekuatan Lentur Bantalan Beton Pada jalan Rel Kelas I Indonesia," *Semin. Nas. cendekiawan ke 4*, pp. 243–249, 2018.
- [8] J. M. Valentino, "ANALISA RESISTANCE, TRACTIVE EFFORT DAN GAYA SENTRIFUGAL PADA KERETA API TAKSAKA DI TIKUNGAN KARANGGANDUL," *J. Tek. Mesin Untirta*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2015.
- [9] S. T. Atmadja and T. Momen-guling, "Analisa Keluar Rel Kereta Api," *Rotasi (Semarang)*, vol. 3, no. 1, pp. 33–38, 2001.
- [10] C. T. Dick, C. P. L. Barkan, E. Chapman, and M. P. Stehly, "ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE LOCATION AND FREQUENCY OF BROKEN RAILS," *Proc. World Congr. Railw. Res. Col. Ger.*, pp. 1–19, 2001.
- [11] G. Ridho P., "Kumpulan Kisah Pekerjaan Penyelamat perjalanan Kereta Api," 2018.