

ANALISIS DISTRIBUSI BEBAN KERETA API PADA KONSTRUKSI TIMBUNAN JALUR KERETA API

Imam Muthohar

Fakultas Teknik - UGM
Jln. Grafika 2, Kampus UGM,
Yogyakarta, 55281
Telp: (0274) 545675
imuthohar@mstt.ugm.ac.id;

Nur Budi Susanto

Fakultas Teknik - UGM
Jln. Grafika 2, Kampus UGM,
Yogyakarta, 55281
Telp: (0274) 545675
nbsusanto@yahoo.com

Abstract

Kroya-Kutoarjo double track construction based on Rencana Induk Perkeretaapian Nasional that included in PP No. 43 Tahun 2011, explain that there will a lifting elevation up of the track work from the existing elevation. This study analyzed the factored load of train and track structure's self weight as an input data for calculate heaped soil stability at KM 410+900 and 472+800 between Kroya-Kutoarjo.

Specification used in this study was based on national government regulation about railway. Data processing for analyze the slope stability use a software named *Slope/W*.

The result of this study shows that factored load of train was 350,52 kN. Distributed load by the sleeper to the ballast was 56,11 N/cm². Distributed load with 73,1 cm equivalent depth of ballast was 14,14 N/cm². Slope stability at KM 410+900 and KM 472+800 Kroya-Kutoarjo have safety factor more than 1,3 as the minimum safety factor of slope stability, so the slope at that locations are safe from the sliding risk.

Keywords: Kroya-Kutoarjo, train, load distribution, slope stability, heaping construction

Abstrak

Konstruksi jalur ganda Kroya-Kutoarjo, berdasarkan Rencana Induk Perkeretaapian Nasional yang tercantum dalam PP Nomor 43 Tahun 2011, menunjukkan bahwaterdapat pekerjaan peninggian elevasi rel rencana dari elevasi rel eksisting. Penelitian ini memperhitungkan beban terfaktor kereta api serta berat struktur badan jalan rel sebagai masukan untuk menghitung kestabilan timbunan pada KM 410+900 serta KM 472+800 lintas Kroya-Kutoarjo.

Spesifikasi penelitian berdasarkan pada peraturan pemerintah tentang perkeretaapian. Pengolahan data untuk memperhitungkan stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak *Slope/W*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban kereta api terfaktor sebesar 350,52 kN. Beban yang terdistribusi oleh bantalan menghasilkan beban maksimum pada balas sebesar 56,11 N/cm². Distribusi beban dengan tebal balas ekuivalen 73,1 cm memberikan beban pada tanah dasar sebesar 14,14 N/cm². Stabilitas lereng pada KM 410+900 dan KM 472+800 Kroya-Kutoarjo sesuai desain rancangan mempunyai angka aman lebih besar angka aman minimum kestabilan lereng sebesar 1,3 sehingga lereng pada titik yang ditinjau merupakan lereng yang aman terhadap kelongsoran.

Kata Kunci: Kroya-Kutoarjo, kereta api, distribusi beban, kestabilan lereng, konstruksi timbunan

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Berdasarkan Rencana Induk Perkeretaapian Nasional, terdapat rencana untuk membangun jalur ganda kereta api di jalur selatan Pulau Jawa. Untuk tahun 2014 – 2016 ini, direncanakan pembangunan jalur ganda antara Stasiun Kutoarjo dan Stasiun Kroya yang memiliki jarak 76 kilometer dan berada di KM401+900 di stasiun Kroya hingga KM 478+000 di stasiun Kutoarjo.

Pada beberapa titik konstruksi jalan rel kereta api Kutoarjo-Kroya diperlukan adanya pekerjaan tanah karena elevasi maupun posisi jalur rel baru yang direncanakan berbeda dengan elevasi rel eksisting. Salah satu hal yang patut dicermati adalah adanya peninggian elevasi rel kereta api untuk jalur baru, sehingga mempengaruhi jalur lama untuk ditinggikan agar tetap dapat mencapai kelayakan secara geometri jalan rel. Potensi masalah adalah kekuatan tanah timbunan untuk dilewati kereta api. Untuk itu perlu diperhitungkan kekuatan dukung tanah timbunan maupun tanah dasar di kawasan tersebut.

Rumusan Masalah

Dalam desain rencana dari Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, tidak disertakan perhitungan kekuatan tanah di titik-titik kritis. Pada gambar tersebut hanya ada tinggi timbunan dan gambar perkuatan timbunan tanah. Oleh karena itu, dibutuhkan verifikasi kuat dukung tanah terhadap beban kereta yang melintas saat masa konstruksi pada titik tersebut. Selanjutnya hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi kepada pihak pelaksana pekerjaan apakah dapat menggunakan desain rencana dari Kementerian Perhubungan atau perlu adanya penyesuaian agar struktur kuat mendukung beban kereta.

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis beban dinamis kereta api yang bekerja pada struktur badan jalan kereta api.
2. Menganalisis distribusi beban kereta api yang harus didukung oleh tanah dasar.
3. Menganalisis stabilitas tanah timbunan yang harus didukung oleh tanah dasar pada titik penelitian.

Batasan Penelitian

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian dilakukan di titik KM 410+900 dan KM 472+800 jalur kereta api Kroya-Kutoarjo.
2. Perhitungan kestabilan tanah menggunakan perangkat lunak *Geo Slope 2007* dan hanya memperhitungkan faktor aman terhadap kelongsoran.
3. Spesifikasi bahan yang digunakan dalam perhitungan menggunakan spesifikasi yang ditentukan oleh perencana, yaitu Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.

Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat, sebagai berikut.

1. Memberikan informasi beban dinamis kereta yang bekerja pada struktur jalan rel serta beban struktur jalan rel yang membebani tanah dasar untuk perencanaan pembangunan rel kereta api.
2. Memberikan informasi stabilitas tanah yang akan diaplikasikan pada pembangunan jalur ganda kereta api Kroya-Kutoarjo di KM 410+900 dan KM 472+800.

TINJAUAN PUSTAKA

Peran Penting Rencana Induk Perkeretaapian Nasional dalam Meningkatkan Mobilisasi Penduduk

Menurut Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 43 Tahun 2011, kereta api mempunyai banyak keunggulan dibanding moda transportasi darat antara lain: kapasitas angkut besar (massal), cepat, aman, hemat energi dan ramah lingkungan serta membutuhkan lahan yang relatif sedikit. Pada Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 43 Tahun 2011 tercantum Rencana Induk Perkeretaapian Nasional sebagai pedoman pengembangan perkeretaapian nasional sampai tahun 2030 serta sebagai landasan hukum dalam pelaksanaan kebijakan, strategi dan program pembangunan perkeretaapian nasional serta menjadi rujukan pengembangan perkeretaapian propinsi dan kabupaten/kota pada saat ini dan masa depan.

Rencana Induk Perkeretaapian Nasional membahas berbagai hal, di antaranya:

1. Arah kebijakan dan peranan perkeretaapian nasional dalam moda transportasi,
2. Prakiraan perpindahan orang dan/atau barang menurut asal tujuan perjalanan dalam tataran nasional,
3. Rencana kebutuhan prasarana perkeretaapian nasional,
4. Rencana kebutuhan sarana perkeretaapian nasional,
5. Rencana kebutuhan sumber daya manusia perkeretaapian.

Komponen Sarana Penggerak dan Pengangkut Kereta Api

Menurut Hartono (2012), komponen utama pada kereta api adalah sebagai berikut.

1. Lokomotif,
2. Kereta Rel Diesel dan Kereta Rel Listrik,
3. Kereta dan Gerbong.

Komponen Utama dalam Struktur Jalan Rel

Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012, konstruksi jalan rel adalah sebagai berikut:

A. Konstruksi rel bagian atas:

1. Rel
2. Sambungan rel
3. Bantalan
4. Penambat rel
5. Balas

B. Konstruksi rel bagian bawah:

1. Badan jalan
2. Proteksi lereng
3. Drainase

LANDASAN TEORI

Gaya oleh Kereta Api

1. Gaya Vertikal Kereta

A. Gaya Lokomotif

Menurut Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012, beban gandar adalah beban yang diterima oleh jalan rel dari satu gandar. Beban gandar untuk lebar jalan rel 1067 mm pada semua kelas jalur maksimum sebesar 18 ton.

B. Gaya Kereta

Kereta dipakai untuk angkutan penumpang. Berat kereta (berisi penumpang) sebesar 40 ton. Kereta ditumpu oleh 2 bogie ($P_b=20$ ton), masing-masing bogie terdiri atas 2 gandar, sehingga $P_g = 10$, dan $P_s = 5$ ton.

C. Gaya Gerbong (Wagon)

Gerbong digunakan untuk angkutan barang. Satu gerbong dapat terdiri atas 2 gandar (tanpa bogie) atau 4 gandar (dengan bogie).

D. Faktor Dinamis

Akibat dari beban dinamik kereta api, maka timbul faktor dinamik. Untuk mentransformasi gaya statis ke gaya dinamis digunakan Persamaan Eisenmann berikut.

$$DAF = 1 + t \cdot \varphi (1 + (V-60) / 140) \quad (1)$$

dengan:

DAF : faktor dinamis,

t : koefisien standar deviasi, untuk perhitungan keamanan dipilih nilai sebesar 3,

φ : kondisi jalur kereta, untuk kondisi rel normal digunakan nilai 0,2, dan

V : kecepatan kereta api (km/jam).

Kemudian gaya dinamis dapat dihitung dengan rumus:

$$P_d = P_s \times DAF \quad (2)$$

dengan:

P_d : gaya dinamis (ton),

P_s : gaya statis (ton), dan

DAF : faktor dinamis.

Gaya Horizontal Tegak Lurus Sumbu Jalur Kereta Api

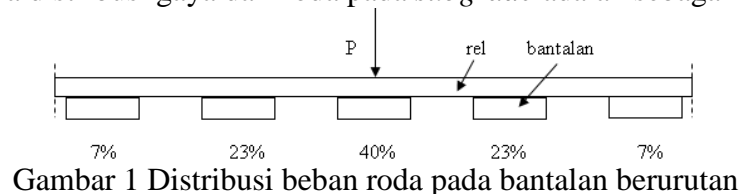
Gaya ini disebabkan oleh “snake motion” kereta api, gaya angin yang bekerja pada kereta api (sisi kanan/kiri) dan gaya sentrifugal sewaktu kereta api melintasi tikungan.

Gaya Horizontal Membujur Searah Sumbu Jalur Kereta Api

Gaya ini disebabkan oleh gayapengereman, gesekan antara roda kereta api dengan kepala rel, gaya akibat kembang susut rel dan gaya berat jika jalan rel berupa tanjakan/turunan.

Distribusi Beban Kereta Api pada Lapisan Subgrade

Roda kereta api memberikan gaya vertikal dan horisontal pada rel. Menurut Profilidis (2006), skematika distribusi gaya dari roda pada subgrade adalah sebagai berikut:



1. Bahan Penyusun Struktur Jalan Rel yang Memberikan Gaya pada Subgrade

A. Rel

Pembagian kelas jalan rel serta tipe rel adalah sebagai berikut:

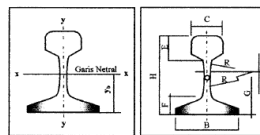
Tabel 1 Pembagian kelas jalan rel di Indonesia (PM No. 60 Tahun 2012)

Kelas Jalan Rel	Kapasitas Angkut Lintas ($\times 10^6$ ton/tahun)	Kecepatan Maksimum (km/jam)	Tipe Rel	Jenis Bantalan/Jarak (mm)	Jenis Penambat
I	> 20	120	R.60/R.54	Beton/600	EG
II	10 – 20	110	R.54/R.50	Beton/Kayu/600	EG
III	5 – 10	100	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja/600	EG
IV	2,5 – 5	90	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja/600	EG/ET
V	< 2,5	80	R.42	Kayu/Baja/600	ET

Sementara itu, spesifikasi rel kereta api adalah sebagai berikut:

Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R 42	R 50	R 54	R 60
H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
G (mm)	72,00	76,00	74,79	80,95
R (mm)	320,00	500,00	508,00	120,00
A (cm ²)	54,26	64,20	69,34	76,86
W (kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055
Y _s (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95

A = luas penampang
W = berat rel per meter
I_x = momen inersia terhadap sumbu x
Y_s = jarak tepi bawah rel ke garis netral



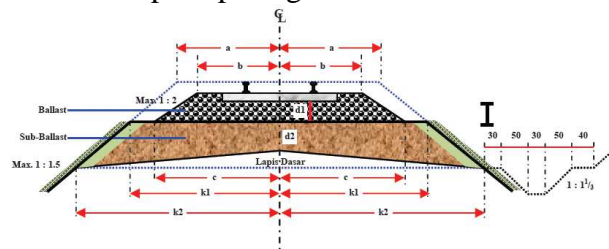
Gambar 2 Spesifikasi rel kereta api di Indonesia (PM No. 60 Tahun 2012)

2. Bantalan

Bantalan yang umum digunakan di Indonesia adalah bantalan beton. Jarak bantalan adalah jarak antara titik tengah pada bantalan yang beraturan dan nilai optimal untuk rel standar maupun metrik adalah sebesar 0,6 meter. (Profildis, 2006).

3. Balas

Balas berfungsi sebagai pendistribusi beban dinamis kereta. Bentuk dan dimensi potongan melintang lapisan balas adalah seperti pada gambar 3 berikut.



Gambar 3 Potongan melintang balas (PM No. 60 Tahun 2012)

Tanah dasar harus mampu menopang beban berat lapisan balas, serta menopang tegangan akibat dari gaya yang diteruskan oleh bantalan pada balas yang kemudian diteruskan dan didistribusikan oleh balas kepada lapisan tanah dasar yang diwujudkan pada persamaan distribusi beban berikut.

$$P_a = \frac{W_{\text{kereta}} + W_{\text{rel}} + W_{\text{bantalan}}}{A_{\text{bantalan}}} \quad (3)$$

Metode *Beam on Elastic Foundation* dan JNR pada Rosyidi (2012), mengasumsikan bahwa bantalan diibaratkan sebagai balok serta balas sebagai tumpuan elastik yang diibaratkan pegas, sehingga tekanan di bawah bantalan dihitung dengan Persamaan 4.

$$\sigma_1 = k_e \cdot y \quad (4)$$

dengan:

σ_1 : tekanan tepat di bawah bantalan (kg/cm^2),

k_e : koefisien balas (kg/cm^3),

y : lendutan maksimum balas (cm).

Lendutan maksimum pada bantalan dapat dihitung menggunakan Persamaan 5.

$$y = \frac{P \cdot \lambda}{2 \cdot k \cdot (\sin \lambda l + \sinh \lambda l)} \cdot [2 \cdot \cosh^2 \lambda a \cdot (\cos 2\lambda c + \cosh \lambda l) + 2 \cdot \cos^2 \lambda a \cdot (\cosh 2\lambda c + \cos \lambda l) + \sinh 2\lambda a \cdot (\sin 2\lambda c - \sinh \lambda l) - \sin 2\lambda a \cdot (\sinh 2\lambda c - \sin \lambda l)] \quad (5)$$

dengan:

P : beban roda dinamis ($\frac{\text{beban gandar dinamis}}{2}$),

k : modulus balas = $b \times k_e$,

b : lebar bantalan,

l : panjang bantalan,

λ : *damping factor* = $\sqrt[4]{\frac{k}{E \cdot I}}$,

E : modulus elastisitas bantalan,

I : momen inersia bantalan,

a : jarak tepi bantalan dengan titik sumbu rel terdekat,

c : jarak titik tengah bantalan dengan titik sumbu rel,

k_e : koefisien balas, JNR menentukan koefisien balas seperti pada Tabel 3.

Tabel 2 Koefisien balas yang dipengaruhi oleh kondisi balas (Rosyidi, 2012)

Kondisi Balas	k_e (kg/cm^3)
Buruk	3
Sedang	8 – 10
Baik	12 – 15

Selain metode BoEF dan JNR, Rosyidi (2012) memperhitungkan tekanan di bawah bantalan menggunakan metode AREA dan Talbot seperti pada Persamaan 6.

$$\sigma_1 = \frac{3 \times P}{b \times l} \quad (6)$$

dengan:

σ_1 : tekanan tepat di bawah bantalan (kN/cm²),

P : beban roda dinamis (kN),

b : lebar bantalan (cm)

l : panjang bantalan (cm).

Material pada balas atas dan balas bawah mempunyai spesifikasi yang berbeda, untuk mengonversikan agar menjadi satu kesatuan dalam perhitungan, Esveld (2001) menggunakan Persamaan Odemark (1949) seperti pada Persamaan 7.

$$H_e = 0,9 \cdot \left(H_{\text{balas atas}} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{\text{balas atas}}}{E_{\text{tanah dasar}}}} + H_{\text{balas bawah}} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{\text{balas bawah}}}{E_{\text{tanah dasar}}}} \right) \quad (7)$$

dengan:

H_e : ketebalan balas ekuivalen,

$H_{\text{balas atas}}$: ketebalan aktual balas atas,

$H_{\text{balas bawah}}$: ketebalan aktual balas bawah,

$E_{\text{tanah dasar}}$: modulus elastisitas tanah dasar,

$E_{\text{balas atas}}$: modulus elastisitas balas atas,

$E_{\text{balas bawah}}$: modulus elastisitas balas bawah.

4. Tanah Dasar

Menurut PD No. 10 Tahun 1986, fungsi tanah dasar adalah untuk mendukung beban yang diteruskan oleh balas kepada tanah dasar, meneruskan beban ke lapisan di bawahnya, dan memberikan landasan yang rata pada kedudukan di tempat balas akan diletakkan.

Menurut Clarke (1957), tekanan pada tanah dasar dapat ditentukan dengan Persamaan 8.

$$\sigma_z = 2 \times Pa \frac{B \times L}{(B+2.z)(L+2.z)} \quad (8)$$

dengan

σ_z : tekanan vertikal pada kedalaman z (kPa),

Pa : tekanan kontak rerata antara bantalan dengan balas (kPa),

Z : kedalaman tanah dasar (dalam hal ini sama dengan lapisan balas, diukur dari bidang kontak antara bantalan dan balas (m),

B : lebar bantalan (m),

L : panjang bantalan di bawah rel (m),

Menurut Schramm (1961), tekanan vertikal diperhitungkan dengan Persamaan 9 berikut.

$$\sigma_z = Pr \frac{1,5 (1-g)B}{\{ 3 (1-g) + B \} z \text{ tg } \theta} \quad (9)$$

dengan

- σ_z : tekanan vertikal pada kedalaman z (kPa),
Pr : tekanan rerata di bawah dudukan rel (kPa),
l : panjang bantalan (m),
g : jarak bantalan (m),
B : lebar bantalan (m),
z : tebal lapisan balas (m),
 θ : sudut gesek internal bahan balas ($^\circ$)

Berdasarkan pendekatan AREA (1997), tekanan pada tanah dasar dihitung dengan Persamaan 10.

$$pc = (16,8 pa/h)^{1,25} \quad (10)$$

dengan:

- h : Ketebalan balas (*inches*)
pa : Tekanan rerata yang didistribusikan oleh bantalan kepada balas (psi)
pc : Tekanan yang diberikan pada tanah dasar, termasuk faktor keamanan (psi)

Rosyidi (2012) menggunakan metode analisis *Beam on Elastic Foundation* (BoEF) dan JNR untuk memperhitungkan tekanan yang bekerja pada balas seperti pada Persamaan 11.

$$\sigma_2 = \frac{58 \times \sigma_1}{10 + d^{1,35}} \quad (11)$$

dengan:

- σ_2 : tekanan yang bekerja pada subgrade (kg/cm^2)
 σ_1 : tekanan tepat di bawah bantalan (kg/cm^2)
d : tebal balas (cm).

Selain itu, Rosyidi (2012) memperhitungkan tekanan yang bekerja pada tanah dasar menggunakan metode analisis AREA dan Talbot seperti pada Persamaan 12.

$$\sigma_2 = \frac{53,87 \times \sigma_1}{d^{1,25}} \quad (12)$$

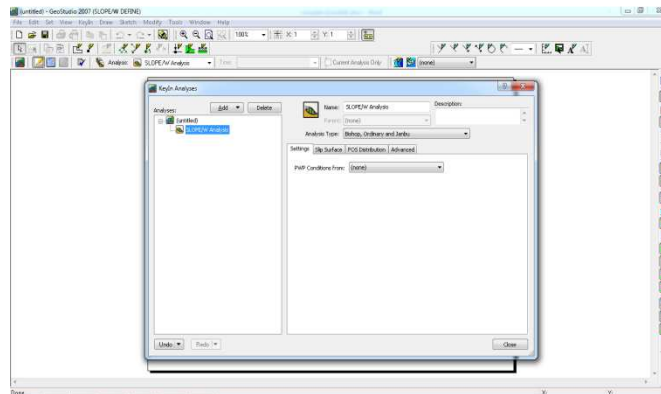
dengan:

- σ_2 : tekanan yang bekerja pada subgrade (kg/cm^2)
 σ_1 : tekanan tepat di bawah bantalan (kg/cm^2)
d : tebal balas (cm).

Kestabilan Konstruksi Timbunan Jalan Rel

Kestabilan konstruksi timbunan jalan rel erat kaitannya dengan stabilitas lereng. Analisis stabilitas lereng dapat menggunakan Metode Irisan. Namun, analisis metode irisan memerlukan iterasi berulang-ulang untuk mendapatkan model kelongsoran sebagai perhitungan angka aman. Penggunaan Slope/W memudahkan perhitungan dalam berbagai kasus geoteknik, salah satunya berupa angka aman. Pemilihan perangkat lunak *Geo*

Slope(Slope/W) karena kemampuannya dalam melakukan perhitungan metode irisan hingga ratusan ribu iterasi, tergantung ketelitian yang dibutuhkan.



Gambar 4 Tampilan perangkat lunak *Geo Slope*

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada jalur kereta api lintas Kroya-Kutoarjo. Sementara itu, titik yang dipilih untuk perhitungan berada pada KM 410+900 dan KM 472+800.

Pengumpulan Data

1. Beban Vertikal Kereta Api

Data yang diambil adalah data beban gandar dari seluruh jenis kereta kemudian diperhitungkan menjadi beban dinamis sebagai beban tumpuan pada badan jalan rel.

2. Spesifikasi Bahan Penyusun Badan Jalan Rel Kereta Api

Spesifikasi bahan penyusun badan jalan rel kereta api menggunakan PM. No. 60 Tahun 2012 beserta peraturan lain yang memberikan detail spesifikasi bahan penyusun badan jalan rel kereta api yang digunakan pada ruas Kroya – Kutoarjo.

3. Spesifikasi Bahan Penumpu Badan Jalan Rel Kereta Api

Spesifikasi bahan penumpu badan jalan kereta api menggunakan PM. No. 60 Tahun 2012.

A. Spesifikasi Tanah Dasar di Lokasi Penelitian

Pada titik 410+900, mempunyai ϕ sebesar $32,95^\circ$ serta kohesi $0,09 \text{ kg/cm}^2$ dengan berat jenis $20,594 \text{ kN/m}^3$. Sementara itu, pada titik 472+800, tanah dasarnya mempunyai ϕ sebesar $35,77^\circ$ serta kohesi 0 kg/cm^2 dengan berat jenis $18,633 \text{ kN/m}^3$.

B. Spesifikasi Tanah Timbunan di Lokasi Penelitian

Spesifikasi tanah timbunan yang digunakan mempunyai nilai properties $\gamma_t = 1,33 \text{ gr / cm}^2$, $c_t = 0,09 \text{ kg / cm}^2$ dan $\phi_t = 30,18^\circ$.

C. Spesifikasi Perkuatan yang digunakan di Lokasi Penelitian

Spesifikasi geogrid mempunyai kekuatan 19 kPa untuk geogrid lereng permanen serta 31 kPa untuk geogrid lereng sementara. Sementara itu, spesifikasi minipile mempunyai dimensi 25 x 25 cm, panjang 5 meter serta mempunyai tahanan geser sebesar 137,49 kN.

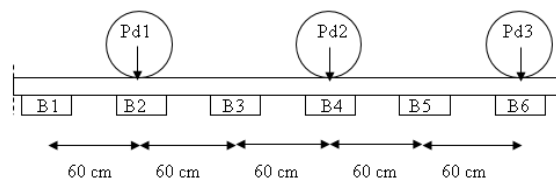
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Beban Aksial yang Bekerja pada Struktur Badan Jalan Rel Kereta Api

Beban aksial kereta yang bekerja pada struktur badan jalan rel dihitung menggunakan beban gandar maksimum. Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012, beban gandar maksimum statis yang diijinkan adalah sebesar $P_s = 18$ ton. Sementara itu, dalam Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012, kecepatan maksimum kereta api sebesar 120 km / jam. Untuk perencanaan jalan rel digunakan V rencana 25% lebih tinggi dari kecepatan maksimum, sehingga V rencana sebesar 150 km / jam.

Dari V rencana 150 km / jam dapat dihitung koefisien faktor dinamis menggunakan Persamaan 1, sehingga mendapatkan nilai DAF sebesar 1,99. Setelah didapat nilai DAF, dapat diperhitungkan gaya dinamis sesuai Persamaan 2, yaitu P_d sebesar 350,49 kN

Berdasarkan ketentuan distribusi beban roda pada bantalan, maka didapat hasil berikut.



Gambar 6. Ilustrasi distribusi beban pada bantalan

Tabel 3 Distribusi beban aksial pada balas

	Beban aksial pada balas					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Akibat P1	23%	40%	23%	7%	0%	0%
Akibat P2	0%	7%	23%	40%	23%	7%
Akibat P3	0%	0%	0%	7%	23%	40%
Total	23%	47%	46%	54%	46%	47%
Total (kN)	76,42	156,16	152,84	189,28	152,84	156,16

Untuk perhitungan pembebanan selanjutnya digunakan beban maksimum, yaitu beban yang berada pada balas tepat di bawah roda sebesar 189,28 kN.

Analisis Beban Mati Struktur Badan Jalan Rel Kereta Api

1. Beban Rel Kereta Api

Berat rel kereta untuk tipe R54 adalah sebesar 0,535 kN/m. Pada struktur jalan rel, terdapat 2 batang rel kereta sehingga berat total rel sebesar 1,0696 kN/m. Karena jarak antar bantalan adalah 60 cm, beban rel kereta sebesar 60% beban per meter, yaitu 0,64 kN.

2. Beban Bantalan Balok Rel Kereta Api

Berat bantalan balok rel beton sebesar 200 kg/buah yang setara dengan 1,96 kN/buah.

Analisis Beban yang Bekerja pada Tanah Dasar di Bawah Lapisan Balas

1. Analisis Tekanan Kontak Rerata pada Balas dengan Metode Distribusi Beban Terhadap Penampang Bantalan

$$P_a = \frac{W_{\text{kereta}} + W_{\text{rel}} + W_{\text{bantalan}}}{A_{\text{bantalan}}} = \frac{189,28 + 0,64 + 1,96}{2 \times 0,253} = 379,21 \text{ kN} / \text{m}^2 = 37,92 \text{ N/cm}^2.$$

2. Analisis Tekanan Kontak Rerata pada Balas dengan Metode *Beam on Elastic Foundation* (BoEF) dan JNR

Analisis tekanan menggunakan Persamaan 4 dan Persamaan 5, sehingga:

$$\sigma_1 = 9 \times 0,4349 = 3,91 \text{ kg/cm}^2 = 38,39 \text{ N/cm}^2$$

3. Analisis Tekanan Kontak Rerata pada Balas dengan Metode AREA dan Talbot
Analisis tekanan menggunakan Persamaan 6, sehingga:

$$\sigma_1 = \frac{3 \times 9650,57}{2,53 \times 200} = 5,72 \text{ kg/cm}^2 = 56,11 \text{ N/cm}^2$$

4. Tekanan Kontak Rerata Maksimum pada Balas

Beban maksimum pada balas menurut Persamaan 4 dan 6 sebesar 56,11 N/cm².

Analisis Distribusi Beban yang Bekerja pada Tanah Dasar di Bawah Lapisan Balas

Berdasarkan desain rencana, tebal balas atas sebesar 30 cm dan balas bawah sebesar 35 cm. Material penyusun balas atas mempunyai modulus elastisitas sebesar 250 kg/cm², material penyusun balas bawah mempunyai modulus elastisitas sebesar 125 kg/cm², sedangkan tanah dasar berupa lempung sedang yang mempunyai nilai modulus elastisitas sebesar 90 Kg/cm². Ketebalan balas yang digunakan untuk perhitungan tekanan pada tanah dasar dikonversikan menggunakan Persamaan 7 berikut.

$$H_e = 0,9 \cdot \left(30 \cdot \sqrt[3]{\frac{250}{90}} + 35 \cdot \sqrt[3]{\frac{125}{90}} \right) = 73,1 \text{ cm.}$$

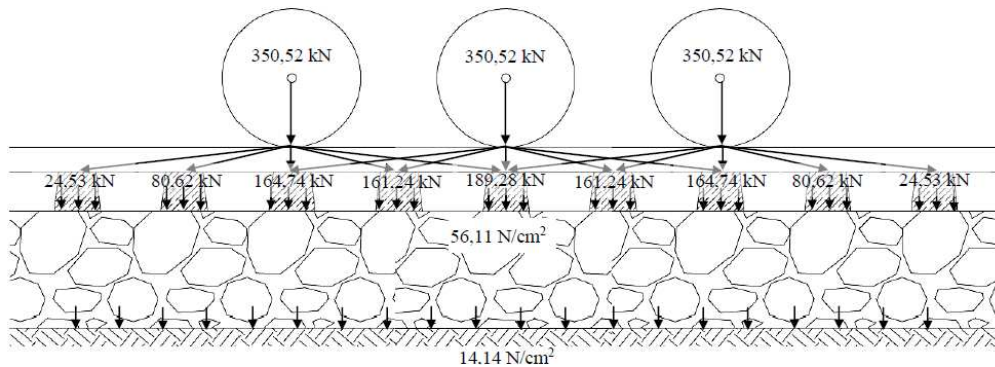
Nilai H_e 73,1 cm digunakan sebagai tebal balas ekuivalen pada penelitian ini.

Berdasarkan analisis menggunakan persamaan Clarke, Schramm AREA, kombinasi BoEF dan JNR, serta kombinasi AREA dan Talbot, didapat beban seperti pada Tabel 5 berikut.

Tabel 4 Nilai tekanan pada tanah dasar dengan tebal balas ekuivalen 73,1 cm

Metode	Nilai Tekanan pada Tanah Dasar (N/cm ²)
Clarke	6,46
Schramm (θ = 30°)	10,72
Schramm (θ = 40°)	7,38
AREA	9,56
BoEF dan JNR	6,58
AREA dan Talbot	14,14

Berdasarkan Tabel 4, pemodelan dengan *Slope/W* menggunakan nilai maksimum sebesar 14,14 N/cm². Sementara itu diagram distribusi beban dinamis kereta api terhadap bantalan, balas serta tanah dasar dari hasil perhitungan adalah seperti pada Gambar 8 berikut.



Gambar 7 Diagram distribusi beban aksial kereta api terhadap tanah dasar

Analisis Stabilitas Struktur Timbunan Jalan Rel Menggunakan *Software Slope/W*

1. Analisis Timbunan pada KM 410+900

Tabel 5 Nilai stabilitas timbunan pada KM 410+900 dengan *Geo Slope 2007*

Lokasi	Angka Aman		Panjang Geogrid	Keterangan
	Hasil Pemodelan	Persyaratan		
A. Sisi Kanan	2,47	1,3	-	Aman
B. Sisi Kiri				
1. Kondisi tanpa terpotong	2,87	1,3	-	Aman
2. Kondisi sesuai gambar rencana	2,46	1,3	masing-masing 2,5 m	Aman
1. Kondisi gambar rencana diperkuat	2,54	1,3	bawah = 2 m tengah = 3 m atas = 4,5 m	Aman
2. Kondisi gambar rencana tanpa perkuatan	2,44	1,3	-	Aman
C. Sisi Tengah (lereng sementara)	1,39	1,3	masing-masing 2,5 m	Aman

2. Analisis Timbunan pada KM 472+800

Tabel 6 Nilai stabilitas timbunan pada KM 472+800 dengan *Geo Slope 2007*

Lokasi	Angka Aman		Panjang Geogrid	Keterangan
	Hasil Pemodelan	Persyaratan		
A. Sisi Kanan				
1. Kondisi tanpa terpotong	2,82	1,3	-	Aman
2. Kondisi sesuai gambar rencana	2,32	1,3	masing-masing 2,5 m	Aman
3. Kondisi gambar rencana diperkuat	2,40	1,3	bawah = 2,5 m tengah = 3 m atas = 5 m	Aman
4. Kondisi gambar				

rencana tanpa geogrid	2,32	1,3	-	Aman
5. Kondisi gambar rencana tanpa geogrid dan <i>minipile</i>	2,32	1,3	-	Aman
B. Sisi Kiri				
1. Kondisi sesuai gambar rencana	2,71	1,3	-	Aman
2. Kondisi gambar rencana tanpa <i>minipile</i>	2,67	1,3	-	Aman

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan hal-hal berikut.

1. Beban aksial akibat kereta yang melaju sebesar 350,52 kN. Setelah terdistribusi pada bantalan, beban maksimum yang didukung oleh satu bantalan sebesar 189,28 kN, sedangkan beban maksimum yang terdistribusi pada balas sebesar 56,11 N/cm².
2. Beban terdistribusi yang didukung oleh tanah dasar bergantung pada tebal balas ekuivalen serta jarak antar bantalan. Pada penelitian dengan tebal balas ekuivalen sebesar 73,1 cm dengan jarak antar bantalan sebesar 60 cm, menghasilkan beban terdistribusi pada tanah dasar sebesar 14,14 N/cm².
3. Stabilitas lereng timbunan pada pembangunan jalur ganda kereta api pada KM 410+900 dan 472+800 lintas Kroya-Kutoarjo dengan pemodelan menggunakan perangkat lunak *Geo Slope 2007* mendapatkan angka aman bervariasi pada kisaran 2,32 sampai dengan 2,87, kecuali pada lereng sementara dengan angka aman 1,39; tetapi struktur sudah memenuhi persyaratan angka aman minimum sebesar 1,3.

DAFTAR PUSTAKA

- Esveld, C., 2001. *Modern Railway Track*. Delft: Delft University of Technology.
- Hartono, 2012. *Modul 1 : Sarana Penggerak dan Sarana Khusus*. Bekasi: Sekolah Tinggi Transportasi Darat, Badan Pendidikan dan Pelatihan Perhubungan, Departemen Perhubungan.
- Hartono, 2012. *Modul 2 : Sarana Pengangkut*. Bekasi: Sekolah Tinggi Transportasi Darat, Badan Pendidikan dan Pelatihan Perhubungan, Departemen Perhubungan.
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2011. *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 43 Tahun 2011 tentang Rencana Induk Perkeretaapian Nasional*. Jakarta: Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2012. *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*. Jakarta: Kementerian Perhubungan Republik Indonesia.
- Perusahaan Jawatan Kereta Api, 1986. *Perencanaan Konstruksi Jalan Rel (Peraturan Dinas No.10)*. Bandung: Perusahaan Jawatan Kereta Api.
- Profillidis, V. A., 2006. *Railway Management and Engineering Third Edition*. Burlington: Ashgate.
- Rosyidi, S. A. P., 2012. *Diktat Ajar: Rekayasa Struktur Jalan Rel*. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.