

**ANALISI BEBAN DINAMIK PADA  
STRUKTUR JALAN REL DENGAN PEMODELAN NUMERIK  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA<sup>1</sup>**

Hambali<sup>2</sup>, Sri Atmaja PJNR<sup>3</sup>, Agus Setyo Muntohar<sup>4</sup>

---

**ABSTRAK**

Transportasi merupakan unsur primer dalam menunjang pertumbuhan dan pemerataan pembangunan di satu/beberapa wilayah. Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki beragam moda transportasi untuk melakukan distribusi jasa dan barang baik melalui darat atau laut. Rosyidi (2015) menyebutkan bahwa di dalam UU No. 13 Tahun 1992 telah menetapkan bahwa angkutan kereta api merupakan angkutan utama di dalam sistem transportasi nasional. Struktur jalan rel kereta api adalah suatu konstruksi yang amat sangat rumit dalam perencanaannya, mulai dari tanah dasar (*subgrade*), subbalas, balas dan sampai kepada relnya. Pada penelitian ini struktur jalan rel kereta api dimodelkan dengan tiga variasi ketebalan balas yaitu 30 cm, 40 cm, 50 cm dan masing-masing dengan kecepatan yang berbeda pula yaitu 80 km/jam, 100 km/jam dan 120 km/jam. Dalam pemodelan ini data yang digunakan data skunder dan kemudian dilanjutkan dan kemudian dianalisis dengan menggunakan *software* PLAXIS 2D versi 8.2. Hasil atau keluaran berupa data besaran deformasi vertikal yang terjadi akibat kereta api yaitu beban dinamik. Beban dinamik adalah beban yang dihasilkan kereta api yaitu berupa gelombang harmonik yang memiliki frekuensi tertentu dengan amplitudo konstan. Getaran yang dihasilkan akibat perjalanan kereta api yang menyebar sampai tanah yang biasa disebut beban dinamik. Besar kecil beban yang diterima struktur jalan rel dipengaruhi oleh kecepatan laju kereta api tersebut.

***Kata Kunci : Transportasi, Rel, , Beban Dinamik***

---

<sup>1</sup>*Disampaikan pada Seminar Tugas Akhir*

<sup>2</sup>*Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil NIM 20120110240*

<sup>3</sup>*Dosen Pembimbing I*

<sup>4</sup>*Dosen Pembimbing II*

## PENDAHULUAN

Struktur jalan rel kereta adalah suatu konstruksi yang direncanakan sebagai prasarana infrastruktur dan perjalanan kereta api. Konsep struktur jalan rel merupakan rangkaian superstruktur dan sub-struktur menjadi suatu kesatuan yang saling berhubungan untuk menerima dan mendukung pergerakan kereta api secara aman (Rosyidi, 2015).

Tanah sebagai bagian dari jalan rel, baik itu tanah asli maupun tanah yang sudah mengalami perbaikan, akan mengalami perubahan bentuk (*deformation*) akibat memikul beban dari lapisan di atasnya yaitu lapisan *ballast* dan *subballast*. Secara umum, tanah akan memampat dan menyebabkan terjadinya penurunan struktur yang ada di atasnya (Muntohar, 2009).

Pembebanan pada struktur jalan rel menimbulkan berbagai gaya pada rel diantaranya gaya vertikal, gaya transversal (*lateral*) dan gaya longitudinal. Perlunya analisis pembebanan berguna untuk mengurangi resiko kerusakan pada jalan rel yang disebabkan respon jalan rel akibat beban yang terjadi. Perhitungan beban dan gaya ini perlu dipahami secara benar untuk dapat merencanakan dimensi, tipe dan disain jalan rel, bantalan, ketebalan balas dan seterusnya.

Beban kereta api merupakan beban lalu lintas yang akan diterima rel selama masa layanan. Beban kereta api bervariasi tergantung beban muatan kereta apinya. Ukuran, jumlah dan jarak gerbong kereta api berpengaruh terhadap pendistribusian beban kereta api ke dalam rel kereta. Beban kereta api di Indonesia menggunakan kriteria pembebanan dalam PM No.60 Tahun 2012 yaitu sebesar 18 ton untuk beban gandar maksimum.

Pola distribusi beban yang melebar akan menghasilkan tekanan yang lebih kecil yang dapat diterima oleh lapisan tanah dasar. Gaya vertikal yang dihasilkan beban gandar oleh lokomotif, kereta dan gerbong merupakan beban statik, sedangkan pada kenyataannya, beban yang terjadi pada struktur jalan rel merupakan beban dinamis yang dipengaruhi oleh faktor aerodinamik (hambatan udara dan beban angin), kondisi geometrik dan kecepatan pergerakan rangkaian kereta api. Oleh karena itu, diperlukan transformasi gaya statik ke gaya dinamik untuk merencanakan beban yang lebih realistis. Persamaan TALBOT (1918) merupakan transformasi gaya berupa pengkali faktor dinamis sebagai berikut :

$$P_d = I_d + P_s \dots\dots\dots(1)$$

dimana,

$P_d$ = beban roda dinamik rencana (kN/kg)

$P_s$ = beban roda statik dari kereta api (kN/kg)

$I_d$ = faktor atau indek beban dinamik *dimesnsionless* (nilainya > 1)

**Persamaan TALBOT** : Persamaan Talbot (1918) memberikan transformasi gaya berupa pengkalai faktor dinamis sebagai berikut :

$$I_p = 1 + 0,01 \left( \frac{v}{1,609} - 5 \right) \dots\dots\dots(2)$$

dimana,

$I_p$ =faktor/indek beban dinamis (dimensioless/tidak berdimensi)

$v$ = kecepatan rencana (dalam km/jam)

Persamaan TALBOT di atas, adalah persamaan yang digunakan sebagai standar perencanaan struktur jalan kereta api di Indonesia (Peraturan Dinas No. 10 tahun 1986, dan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 tahun 2012).

Rel didesain menggunakan konsep “*beam on elastic foundation model*” dengan mengasumsikan bahwa setiap rel akan berperilaku sebgai balok menerus (*infinite beam*) yang diletakkan di atas tumpuan elastic linier (Rosyidi, 2015). Ketika beban eksternal (beban dari roda kendaraan) disalurkan di atas balok (rel) yang diletakkan di atas fondasi elastic

linier, maka gaya reaksi pada fondasi nilainya adalah proporsional terhadap nilai defleksi yang terjadi pada setiap titik pada balok tersebut. Asumsi ini menjadi dasar perhitungan model *beam on elastic foundation* (BoEF). Pembebanan pada bantalan diperhitungkan menggunakan rumus:

$$Q_1 = 0,786 \times \frac{P_d \times S}{x_1} \dots\dots\dots(3)$$

dimana,

$Q_1$  = Distribusi beban ke bantalan (kg)

$P_d$  = Beban roda dinamik rencana (kN/kg)

$S$  = Jarak bantalan (cm)

$x_1$  = Jarak momen 0 ke momen maksimal (cm)

maka,

$$X_1 = \frac{\pi}{4\lambda} \text{ dengan } \lambda = \left[ \frac{k}{4EI} \right]^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots(4)$$

dimana,

$E$  = modulus elastisitas jalan rel (kg/cm<sup>2</sup>)

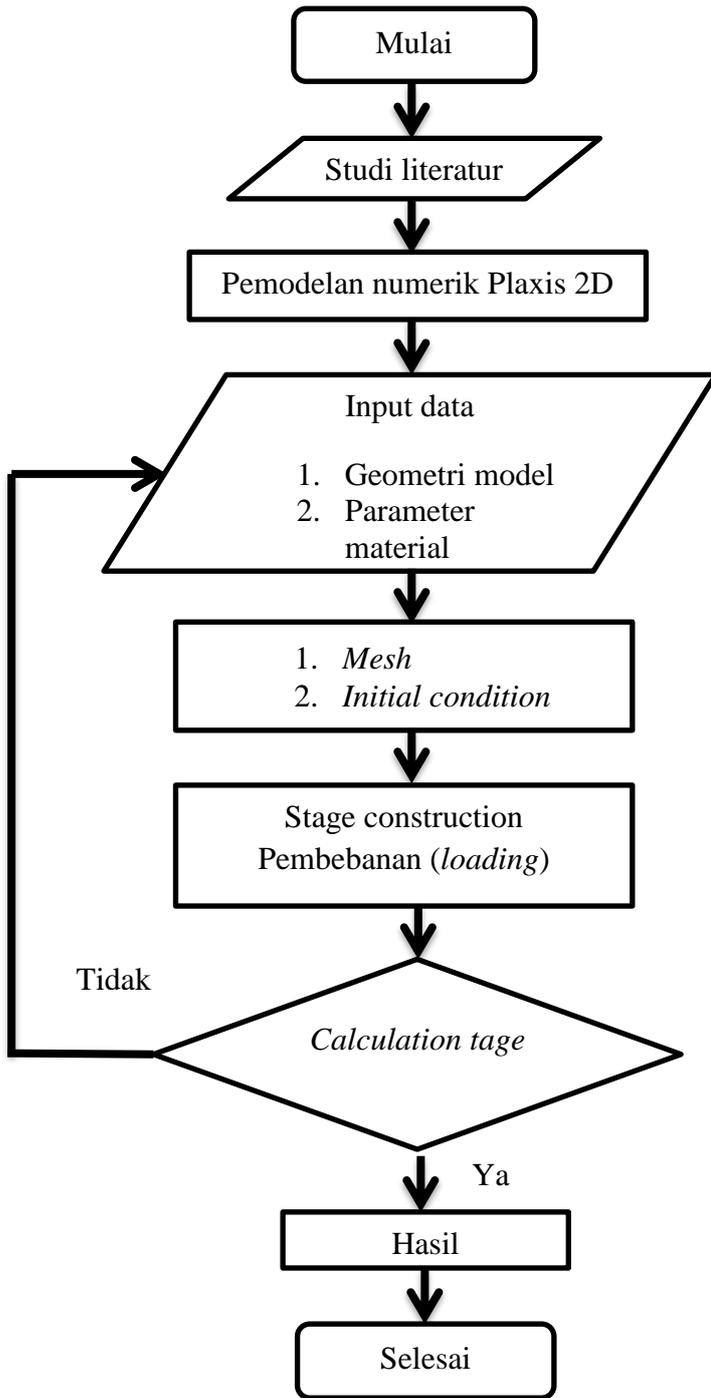
$I$  = momen Inersia (cm<sup>4</sup>)

$K$  = modulus jalan rel (Mpa)

## METODE PENELITIAN

### A. Bagan Alir Penelitian

Adapun langkah awal yang dilakukan yaitu pengumpulan studi literatur yang berkaitan dengan pembahasan sebagai acuan dalam penelitian berupa referensi dari buku dan penelitian-penelitian sebelumnya. Bagan alir penelitian bisa dilihat Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

## B. Pemodelan Numerik

Analisis numerik dilakukan dengan memodelkan jalan rel di atas tanah residu sebagai model *plane strain* menggunakan elemen 15-*nodes* dalam PLAXIS 2D versi

8.2. Model *plane strain* digunakan pada kondisi tanah dimana regangan pada satu arah bernilai nol. Analisis yang dilakukan menggunakan analisis PLAXIS dengan beban dinamis (*harmonic loading*) dari getaran yang dihasilkan kereta api. Karena perpindahan yang melibatkan arah sumbu Y ( $\Delta y$ ) bernilai kecil apabila dibandingkan dengan panjang dari arah sumbu lainnya (Budhu, 1999). Sementara penggunaan elemen 15-*nodes* digunakan, karena memberikan hasil yang akurat terhadap interpolasi perhitungan 2D dan prediksi tegangan tingkat tinggi untuk masalah yang kompleks (Brinkgreve dkk, 1998).

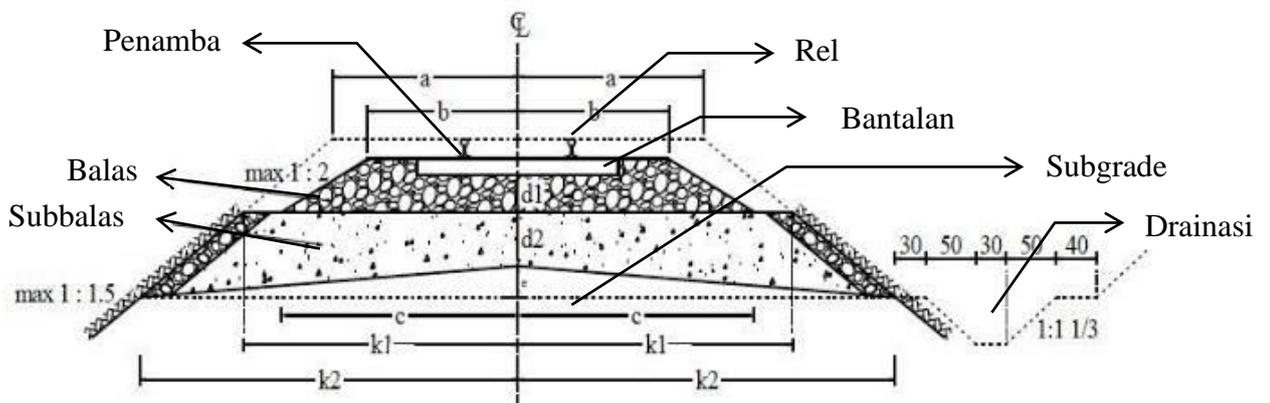
Penampang jalan rel dimodelkan pada potongan melintang yaitu potongan dengan arah tegak lurus sumbu jalan rel (Gambar 2). Dengan ukuran panjang lapisan *subgrade* 10 meter, lapisan subbalas 2,65 meter, lapisan balas 1,5 meter dan lapisan bantalan 1 meter. Struktur perkerasan jalan rel yang dimodelkan terdiri dari 4 lapisan, yaitu lapisan *subgrade* (tanah dasar) setebal 5 meter, lapisan *subbalas* setebal 50 cm, lapisan *balas* dengan beberapa variasi ketebalan, dan lapisan bantalan setebal 20 cm merujuk pada Peraturan Menteri no. 60 Tahun 2012 (Tabel 1). Untuk lapisan *balas* dilakukan pemodelan dengan beberapa variasi ketebalan yaitu 30 cm,

40 cm dan 50 cm. Pemodelan ini dilakukan untuk mendapatkan nilai penurunan terkecil dari struktur jalan rel tersebut dengan variasi tebal lapisan

balas. Sementara untuk beban kereta api diletakkan pada 1 titik sesuai dengan perletakan roda kereta api pada rel.

Tabel 1. Dimensi penampang melintang jalan rel (menerangkan Gambar 1)

Kelas Jalan	V maks (km/j)	d <sub>1</sub> (cm)	b (cm)	C (cm)	k <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	e (cm)	k <sub>2</sub> (cm)	a (cm)
I	120	30	150	235	265 – 315	15 – 50	25	375	185–237
II	110	30	150	235	265 – 315	15 – 50	25	375	185–237
III	100	30	140	225	240 – 270	15 – 50	22	325	170–200
IV	90	25	140	215	240 – 250	15 – 35	20	300	170–190
V	80	25	135	210	240 – 250	15 – 35	20	300	170-190



Gambar 2. Potongan melintang struktur jalan rel

### C. Parameter Material

Material tanah dan lapisan struktur jalan rel dimodelkan sebagai model *Mohr-Coulumb*. Parameter material yang digunakan untuk simulasi numerik (Tabel 2). Pada lapisan balas, subbalas, dan

bantalan dinilai parameter material diperoleh dari nilai asumsi dari berbagai literatur (Tabel 3). Sedangkan nilai-nilai parameter material lapisan tanah dasar (*subgrade*) diperoleh berdasarkan data-data

hasil pengujian yang dilakukan Silfiana Dewi (2015) bisa dilihat pada Tabel 4.

Tabel 2 Material propertis yang digunakan untuk *mohr-coulumb*

Parameter	Tanah Lempung	Pasir	Kolom	Subbase course	Base course	Aspal
$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17	20	17	22	21	25
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	22	20	24	23	25
$E^{\text{ref}}$ (MPa)	3,0	6,0	550	200	400	4000
$\nu_u$	0,495	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
$c'$ (kPa)	30	0,01	43	20	30	30
$\phi'$ (degree)	10	30	46	40	40	40
$\psi$ (degree)	-	5	-	10	10	-
Model	MC	MC	Non-Porous	MC	MC	Elastic
Kondisi	Undrained	Drained	Non-Porous	Drained	Drained	Non-Porous

Keterangan:  $E^{\text{ref}}$  = Young's modulus of elastisitas;  $\nu_u$  = the Poisson's ratio;  $c'$  = kohesi;  $\phi'$  = sudut gesek internal tanah;  $\psi'$  = sudut dilatasi;  $\gamma_{\text{unsat}}$  = berat volume tanah kering;  $\gamma_{\text{sat}}$  = berat volume tanah jenuh air

(Sumber: Muntohar, 2014)

Tabel 3 Parameter material yang digunakan dalam PLAXIS

<b>Parameter</b>	<b>Subballas</b>	<b>Ballas</b>	<b>Sleeper</b>
Type	<i>Soil &amp; interfaces</i>	<i>Soil &amp; interfaces</i>	<i>Plates</i>
Model material	<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>	-
Type material	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>	<i>Elastic</i>
$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16	17	-
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	22	-
$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	20	30	-
$\phi'$ (degree)	40	40	-
$\psi$ (degree)	10	10	-
$E_{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	1400	14000	-
<b>Parameter</b>	<b>Subballas</b>	<b>Ballas</b>	<b>Sleeper</b>
EA (kN/m)	-	-	3.615.727,889
EI (kN/m <sup>2</sup> /m)	-	-	12.004,12447
w (kN/m/m)	-	-	7,90513834
d (m)	-	-	0,2
$\nu$ (nu)	0,4	0,4	0,2

Tabel 4. Parameter material lapisan tanah dasar (*Subgrade*)

<i>Parameter</i>	<i>Subgrade</i>
Type	<i>Soil &amp; interfaces</i>
Model material	<i>Mohr-Coulomb</i>
Type material	<i>Drained</i>
$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	14,12
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,95
$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	30
$\phi'$ (degree)	10
$\psi$ (degree)	0
$E_{\text{ref}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	2914,55
$\nu$ (nu)	0,2

(Sumber: Selfiana, 2015)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Kalkulasi Pembebanan Dinamik

Pada perhitungan beban dinamik menggunakan PLAXIS 2D versi 8.2 yang telah dimodelkan dengan potongan melintang jalan rel kereta api, dalam kalkulasi beban dinamik ada tiga fase dalam perhitungan pembebanan. Pertama ‘Kondisi Awal’ dengan tipe kalkulasi *plastic* dengan mengaktifkan beban *gravity load* sebesar 1 kN/m<sup>2</sup> dengan *loadig input : total multipliers*. Kedua, fase ‘Initial Load’ dengan tipe kalkulasi sama dengan fase pertama dan memasukan beban sesuai kecepatan kereta api dengan *loading input : staged constructio*. Ketiga, fase ‘Dynamic Load (*Harmonic*)’ pada fase ini tipe kalkulasinya berbeda dengan fase sebelumnya yaitu dengan tipe *Dynamic*

*analysis* dan juga pada fase ini perlu diinput *harmonic loading* dengan parameter dari literatur.

Pola deformasi yang terjadi pada struktur jalan rel pada kondisi awal dan dengan beban kereta menurut kecepatan laju kereta. Pada kondisi awal, struktur jalan rel mengalami deformasi yang merata di sepanjang permukaan struktur. Pada kondisi kedua (*Initian load*), struktur jalan rel mengalami deformasi pada bagian yang berbeda menurut penyebaran bebannya.

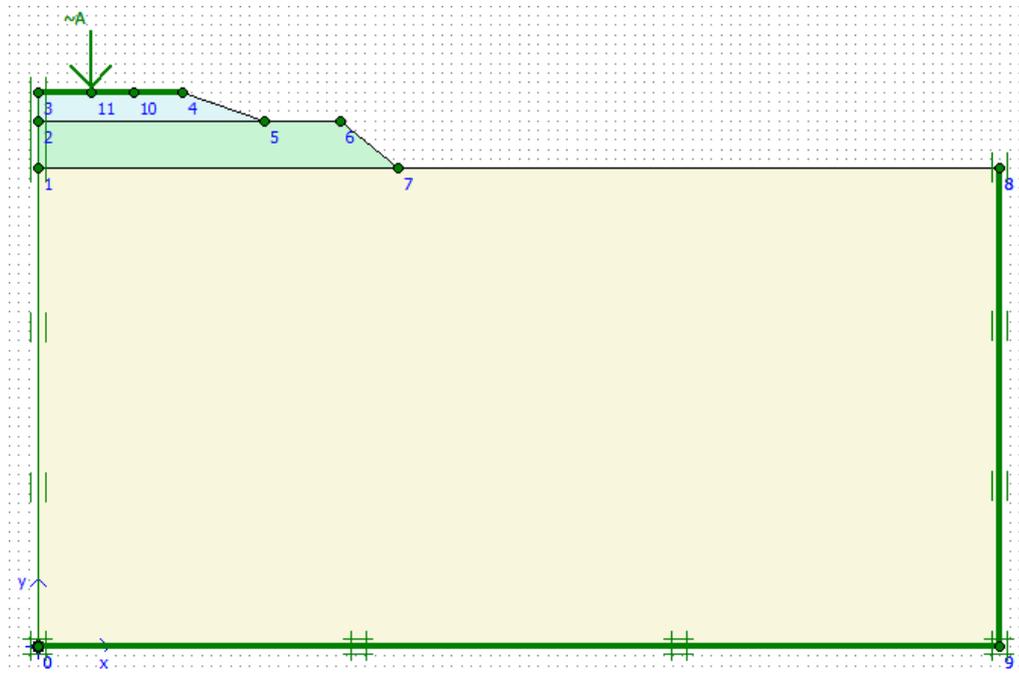
### B. Deformasi Yang Terjadi Akibat Beban Dinamik Terhadap Tanah Dasar dengan Variasi Kecepatan (v) Kereta dan Ketebalan Balas

Pemodelan geometri jalan rel dengan beban dinamik perlu dilakukan beberapa asumsi parameter dan juga beberapa percobaan pemodelan geometri jalan rel yang berbeda untuk mendapatkan hasil yang sesuai. Pada pemodelan ini deformasi yang terjadi akibat beban dinamik sangat besar, untuk mengurangi deformasi yang diakibatkan beban dinamik perlunya penambahan *absorbent boundaries* yaitu sebagai peredam getaran, agar deformasi yang terjadi tidak terlalu besar (Gambar 2).

Pemodelan dilakukan dengan tiga variasi ketebalan balas yaitu 30 cm, 40 cm dan 50 cm, dengan pembebanan dari tiga kecepatan (v) antara lain ; 80 km/jam, 100

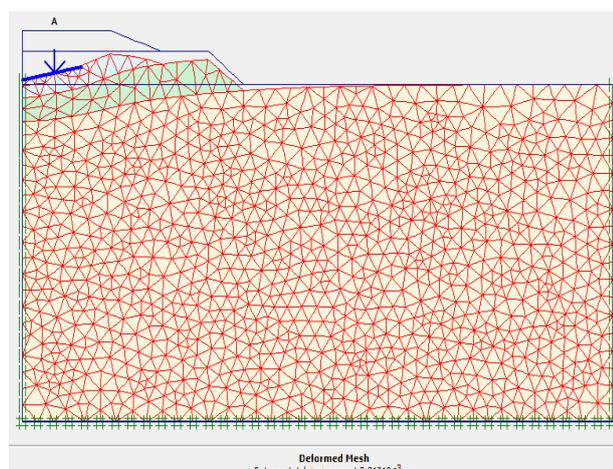
km/jam dan 120 km/jam. Hasil perhitungan menggunakan persamaan TALBOT, dengan kecepatan 80 km/jam,

100 km/jam dan 120 km/jam didapatkan beban dengan berurut 83,02 kN/m<sup>2</sup>, 91,23 kN/m<sup>2</sup> dan 99,44 kN/m<sup>2</sup>.

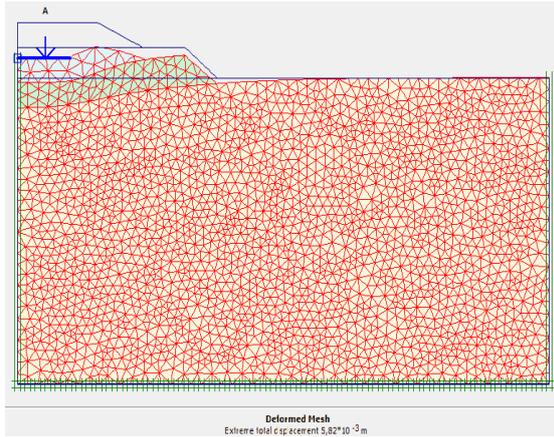


Gambar 3. Geometri dengan penambahan *absorbent boundaries* sebagai peredam gelombang harmonik

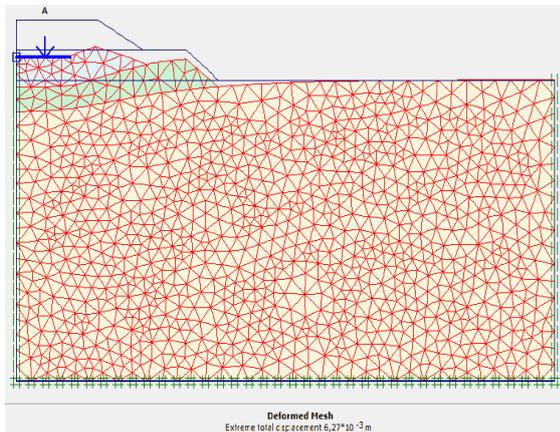
1. Deformasi yang terjadi dengan kecepatan kereta 80 km/jam dan tebal balas 30 cm, 40 cm dan 50 cm.



Gambar 4. Pola deformasi struktur jalan rel dengan tebal balas 30 cm dan beban kereta 83,02 kN/m<sup>2</sup>

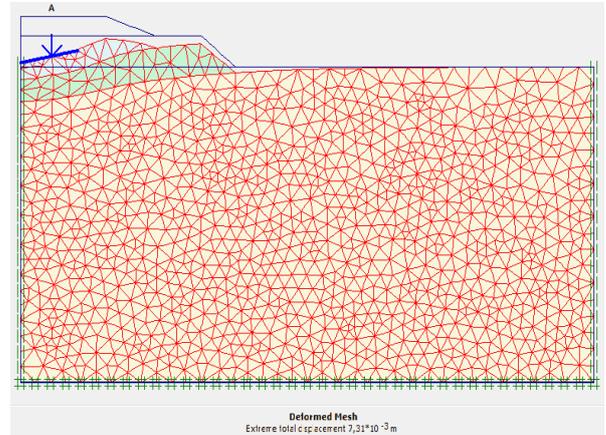


Gambar 5. Pola deformasi struktur jalan rel dengan tebal balas 40 cm dan beban kereta 83,02 kN/m<sup>2</sup>

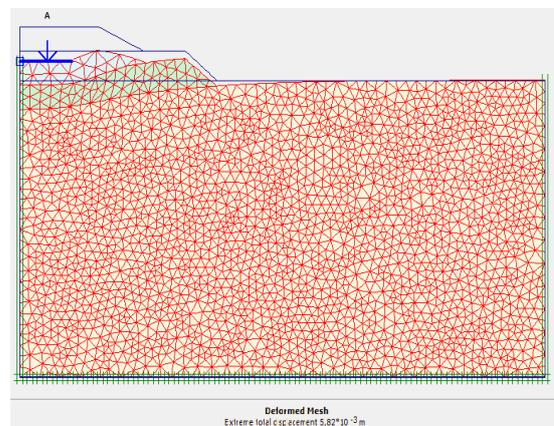


Gambar 6. Pola deformasi struktur jalan rel dengan ketebalan balas 50 cm dan beban kereta 83,02 kN/m<sup>2</sup>

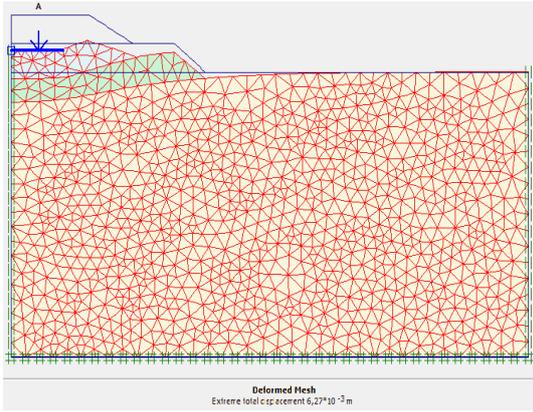
2. Deformasi yang terjadi dengan kecepatan kereta 100 km/jam dan tebal balas 30 cm, 40 cm dan 50 cm.



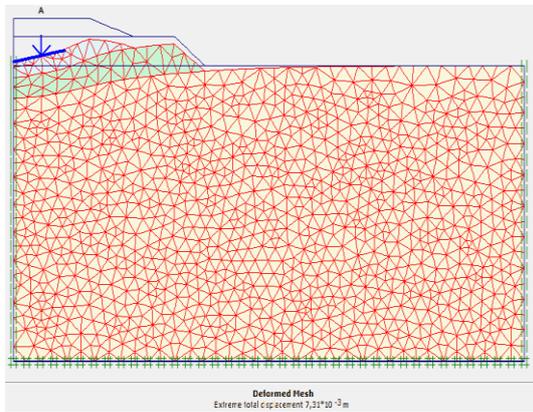
Gambar 7. Pola deformasi struktur jalan rel dengan tebal balas 30 cm dan beban kereta 91,23 kN/m<sup>2</sup>



Gambar 8. Pola deformasi struktur jalan rel dengan tebal balas 40 cm dan beban kereta 91,23 kN/m<sup>2</sup>

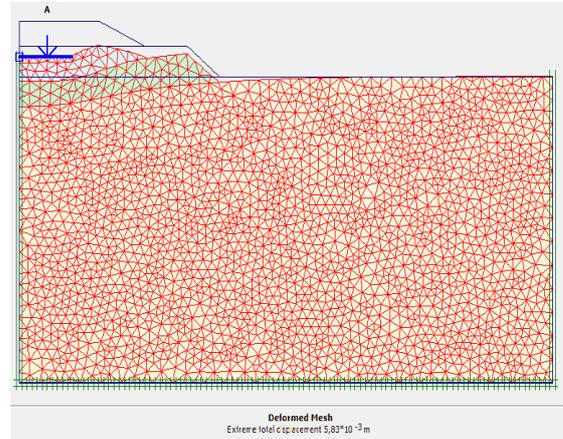


Gambar 9. Pola deformasi struktur jalan rel dengan tebal balas 50 cm dan beban kereta 91,23 kN/m<sup>2</sup>

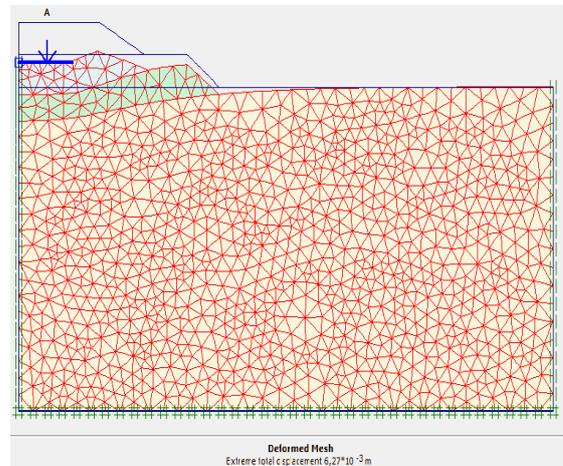


Gambar 10. Pola deformasi struktur jalan rel dengan tebal balas 30 cm dan beban kereta 99,44 kN/m<sup>2</sup>

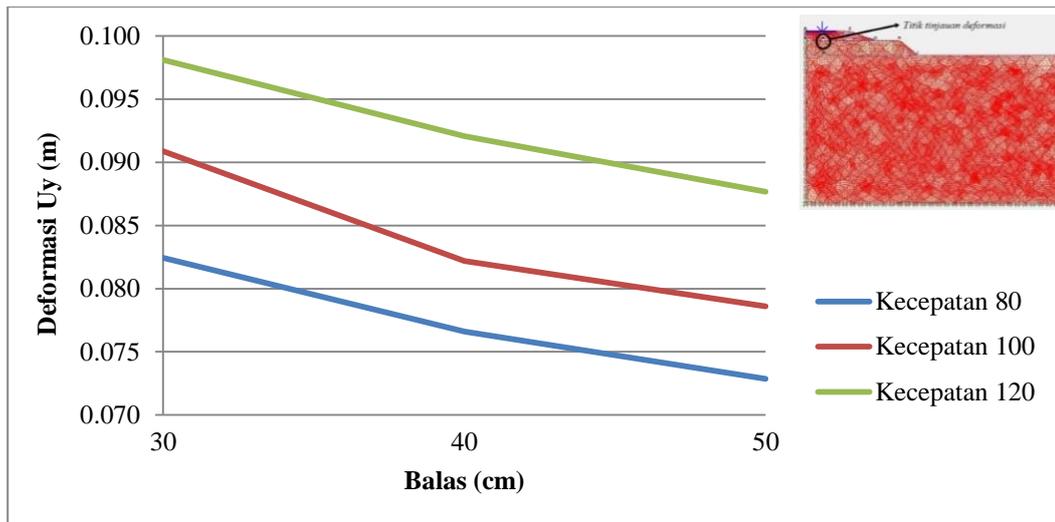
3. Deformasi yang terjadi dengan kecepatan kereta 120 km/jam dan tebal balas 30 cm, 40 cm dan 50 cm.



Gambar 11. Pola deformasi struktur jalan rel dengan tebal balas 40 cm dan beban kereta 99,44 kN/m<sup>2</sup>



Gambar 12. Pola deformasi struktur jalan rel dengan tebal balas 50 cm dan beban kereta 99,44 kN/m<sup>2</sup>



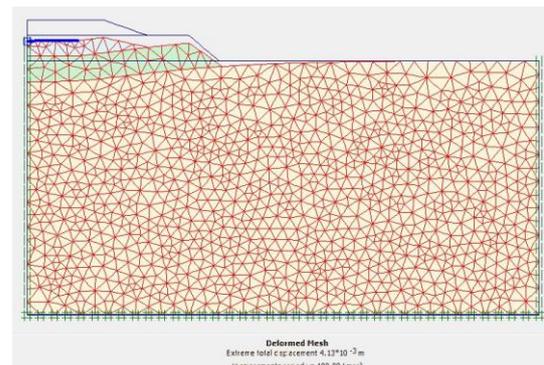
Gambar 13. Grafik hubungan deformasi dan ketebalan balas

### C. Perbandingan Modulus Elastisitas 100 MPa Dengan 14 MPa terhadap Deformasi Yang Terjadi Pada Tebal Balas 30 cm

Hasil analisis yang telah dilakukan menggunakan program PLAXIS 2D, membandingkan deformasi dengan dua varian modulus elastisitas balas pada ketebalan balas 30 cm dengan kecepatan 80 km/jam. Dari hasil analisis nilai deformasi bisa dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Deformasi dengan variasi modulus elastisitas

Modulus Elastisitas (MPa)	Deformasi (m)
14	0.082433352
100	0.070158106



Gambar 4.12 Deformasi pada  $E_{balas}$  100 Mpa dengan tebal 30 cm dan kecepatan 80 km/jam

### KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan pada pemodelan numerik struktur jalan rel kereta api menggunakan PLAXIS 2D versi 8.2, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Deformasi vertikal yang terjadi akibat beban dinamik (dynamic load) dengan variasi ketebalan balas 30 cm, 40 cm dan 50 cm didapat

deformasi terkecil pada ketebalan balas 50 cm karena semakin tebal lapisan balas pola distribusi beban ke struktur bawahnya semakin kecil juga. Jadi deformasi yang dihasilkan juga semakin kecil.

2. Selain menambah ketebalan lapisan balas untuk mengurangi deformasi, dengan menaikkan nilai modulus elastisitas juga dapat memperkecil deformasi yang terjadi pada struktur jalan rel. Sebab dengan nilai modulus elastisitas yang semakin tinggi maka deformasi pada struktur jalan rel juga semakin kecil.

## SARAN

1. Pada penelitian selanjutnya, dapat membandingkan kualitas balas terhadap deformasi yang terjadi.
2. Pada penelitian selanjutnya, untuk mendapatkan parameter beban harmonik agar dilakukan pengujian langsung pada jalan rel kereta api.
3. Pada penelitian selanjutnya, untuk mendapatkan parameter-parameter material pada PLAXIS agar dilakukan pengujian di Laboratorium untuk mempermudah dalam pemodelan.
4. Pada peneliti selanjutnya, Nilai kekakuan lentur (EI) dan kekakuan normal (EA) agar dikaji ulang dengan perhitungan yang terlampir. Untuk

penelitian ini nilai EI dan EA didapat dari penelitian sebelumnya.

## DAFTAR PUSTAKA

Anonim, (2002). *Dynamic Manual*, PLAXIS Manual, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., The Netherlands.

Dewi, S., (2015). *Pengaruh Ketebalan Balas Terhadap Permodelan Numerik Struktur Jalan Rel: Studi Kasus KM. 117+600 dan KM. 117+800 Stasiun Ketapang, Lampung Utara*, Skripsi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Moormann, C, Lehn J, Aschrafi J, dan Sarkar D., (2016) *Numerical Investigations on Track-Substructure System Considering the Effect of Different Train Speeds*, Journal of International Conference on Transportation Geotechnick (ICTG). Volume 143, 2016, Pages 1093-1099.

Muntohar, A.S., (2009). *Mekanika Tanah*. Lembaga Pengembangan Pendidikan, Penelitian dan Masyarakat, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Nugraha, R.A., (2015). *Pemodelan Numerik Sistem Fondasi Jalan Raya Dengan Teknik Kolom – SiCC*. Tugas Akhir, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

Peraturan Menteri no. 60 tahun 2012.  
Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta  
Api

Priest, J.A & Powrie, W., (2009).  
*Determination of Dynamic Track  
Modulus from Measurement of Track Velocity  
during Train Passage*, Journal of  
Geotechnical and Geoenvironmental  
Engineering., 135, 1732-1740.

Rosyidi, S.A., (2015). *Rekayasa Jalan  
Kereta Api Tinjau Khusus Rel*,  
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.