

# Analisis Dampak Penambahan Beban Gandar Kereta Api terhadap Struktur Jalan Rel

L.R. Wiradarma<sup>1</sup>, M.R.F. Amrozi<sup>2\*</sup>, S. Siswosukarto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Magister Sistem dan Teknik Transportasi, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

<sup>2</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

\*Corresponding author: fahmi.amrozi@ugm.ac.id

## INTISARI

Pengembangan infrastruktur kereta api trans batu bara merupakan salah satu strategi peningkatan pertumbuhan ekonomi dan efisiensi pengangkutan logistik batu bara di Kalimantan Timur. Saat ini, batu bara diangkut menggunakan truk dan kapal tongkang dari lokasi tambang menuju pelabuhan induk. Selain untuk memangkas waktu angkut dan bongkar muat, penggunaan moda kereta api diharapkan mampu memenuhi target kapasitas angkut 70 juta ton per tahun dengan desain beban gandar 25 Ton. Namun demikian, jalan rel kelas I di Indonesia didesain dengan standar beban gandar 22.5 Ton. Untuk itu diperlukan analisis struktur yang komprehensif untuk mengetahui dampak peningkatan beban gandar dan memastikan struktur jalan rel mampu menanggung beban 25 Ton tanpa mengorbankan faktor keamanan dan kenyamanan perjalanan. Analisis pembebanan struktur atas jalan rel dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak SAP2000, struktur bawah berupa balas dan sub-balas dianalisis menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D, dan analisis kebutuhan material menggunakan Ms. Excel. Penggunaan standar rel tipe R.60/UIC60 pada pemodelan jalan rel dengan lebar sepur 1435 mm dan bantalan tipe S-35 memberikan hasil analisis struktur masih aman. Namun, nilai volumetrik material balas dan sub-balas menjadi lebih besar dari beban gandar standar 22.5 Ton.

**Kata kunci:** Kereta api barang, batu bara, struktur jalan rel, beban gandar, pembebanan, faktor aman.

## 1 PENDAHULUAN

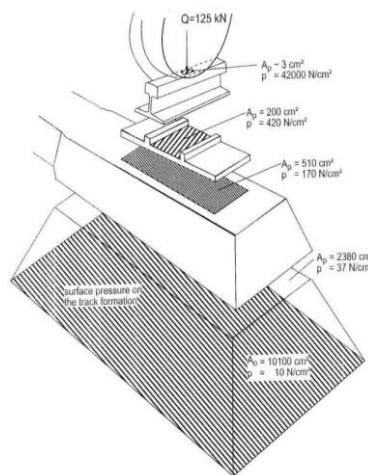
Infrastruktur jalan merupakan aspek utama transportasi yang mempunyai peran besar terhadap aspek ekonomi, sosial, budaya dan politik pada suatu wilayah (Teopilus and Amrozi, 2023). Infrastruktur jaringan jalan rel pada kereta api mulai dirintis oleh pemerintahan Belanda di Pulau Jawa dan Sumatera. Transportasi kereta api yang pada awalnya diperuntukkan bagi angkutan barang (Ihlah, 2017), saat ini menjelma menjadi angkutan masal yang paling efisien untuk dikembangkan. Penggunaan kereta api sebagai angkutan logistik batu bara telah lama digunakan di Sumatera Selatan (Ihlah, 2017), kereta api tersebut biasa disebut Kereta Api Batu Bara Rangkaian Panjang (KA Babaranjang). Kereta Api Babaranjang adalah kereta api jenis barang yang mengangkut batu bara milik PT Bukit Asam, sebagai wujud kerjasama antara PT. Bukit Asam dengan PT. Kereta Api Indonesia. Pada daerah lain seperti Kalimantan yang mana daerah tersebut merupakan daerah tambang terbesar di Indonesia (Alafi, Nugroho and Hadi, 2012), belum ada angkutan logistik batu bara berupa kereta api. Pulau Kalimantan sendiri ditargetkan memiliki panjang jalur kereta api sepanjang  $\pm 1200$  km pada tahun 2030, ditambah lagi saat ini Kalimantan Timur akan menjadi pusat pemerintahan Republik Indonesia (ibu kota negara), maka sudah sepantasnya di Pulau Kalimantan ini dibangun transportasi kereta api.

Pengembangan infrastruktur kereta api trans batu bara merupakan salah satu strategi peningkatan pertumbuhan ekonomi dan efisiensi pengangkutan logistik batu bara di Kalimantan Timur. Berdasarkan Rencana Induk Perkeretaapian Nasional (RIPNAS), pemerintah menargetkan pembagian moda angkutan barang dari 1.1% pada tahun 2023 menjadi 11-13% atau setara dengan 995 ribu ton barang di tahun 2030 (Kementerian Perhubungan Ditjen Perkeretaapian, 2011). Untuk barang tambang, kereta api dinilai penting peranannya terhadap perkembangan batu bara di Indonesia yang mana Indonesia merupakan salah satu produsen dan eksportir batu bara terbesar di dunia (Afin and Kiono, 2021). Lokasi tambang batu bara umumnya berada di daerah pedalaman Kalimantan yang jauh dari lautan. Saat ini, batu bara diangkut menggunakan truk dan kapal tongkang menyusuri sungai dari lokasi tambang menuju pelabuhan induk (Alafi, Nugroho and Hadi, 2012). Namun demikian, cara ini dinilai masih kurang efektif sehingga penggunaan moda kereta api diharapkan mampu memangkas waktu angkut dan bongkar muat. Selain itu, penggunaan moda kereta api diharapkan mampu meningkatkan kapasitas angkut hingga memenuhi target 70 juta ton per tahun.

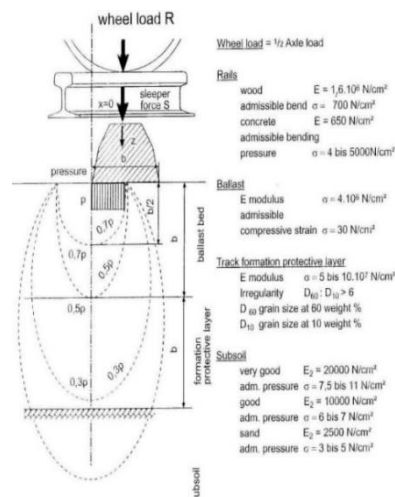
Kereta api merupakan sarana transportasi yang bergerak di atas struktur jalan rel dari suatu tempat ketempat lainnya (Utomo, 2009). Struktur jalan rel perlu didesain secara komprehensif untuk memenuhi desain standar dan kebutuhan teknis pengangkutan yakni beban kereta beserta orang dan barang yang diangkut. Angkutan kereta api batu bara di Kalimantan didesain untuk memenuhi target kapasitas angkut batu bara sebesar 70 juta ton per tahun sehingga struktur jalan rel perlu didesain mampu menahan beban gandar sebesar 25 Ton. Namun demikian, berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012, jalan rel kelas I di Indonesia didesain dengan standar beban gandar 22.5 Ton (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2012). Sejauh ini belum ada penelitian mengenai dampak struktural dari penambahan beban gandar dari standar yang ada. Untuk itu diperlukan analisis struktur untuk mengetahui dampak peningkatan beban gandar dan memastikan struktur jalan rel mampu menahan beban 25 Ton tanpa mengorbankan faktor keamanan dan kenyamanan perjalanan. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis seberapa aman struktur jalan rel apabila beban gandar pada kereta api naik dari 22.5 menjadi 25 Ton pada perlintasan jalur ganda (*double track*) dengan lebar sepur sebesar 1435 mm. Selain itu, perhitungan analisis kebutuhan bahan dan material struktur jalan rel dilakukan per 1 km panjang pada rencana jalan rel kereta api trans batu bara di Kalimantan Timur.

## 2 METODE PENELITIAN

Distribusi beban merujuk pada cara beban atau gaya diterapkan dan tersebar pada suatu struktur (Fadlunmias, Rosyidi and Muntohar, 2015). Dalam konteks struktur jalan rel, distribusi beban mencakup cara beban yang dihasilkan oleh rangkaian kereta, muatan, yang menerus pada beban gandar dan faktor-faktor lainnya diterapkan dan dibagikan ke berbagai bagian struktur (Putro and Chomaedhi, 2014). Distribusi beban yang terjadi dapat bermacam macam, pada struktur jalan rel arah beban yang dihasilkan yaitu arah vertikal dan horizontal (gesek dan lateral) (Dian, Imam and Gurmel, 2013). Gambar 1 dan Gambar 2 berikut menunjukkan skematika distribusi gaya dari roda pada *subgrade*.



Gambar 1. Distribusi gaya roda kereta terhadap struktur badan rel (Lichtberger, 2005).



Gambar 2. Distribusi gaya pada roda terhadap *subgrade* (Lichtberger, 2005).

Berdasarkan pada tekanan dari bantalan pada balas, ilustrasi tersebut menunjukkan bahwa tekanan pada balas berkurang hingga setengah pada kedalaman kurang lebih sedalam tinggi dari sebuah bantalan di bawah titik bawah bantalan. Hanya 30% dari tekanan yang memberikan efek pada *subgrade* (Lichtberger, 2005). Ahli perkeretaapian terbiasa dengan penyederhanaan asumsi bahwa ketika sebuah beban dari roda ditumpu oleh bantalan, bantalan di bawahnya akan mendapat beban sebesar 50% dari beban setiap roda dan dua bantalan terdekatnya masing-masing menerima beban 25% (Profillidis, 2006)

Perangkat lunak SAP2000 merupakan salah satu program analisis struktur yang lengkap dan mudah dioperasikan, dengan perangkat lunak ini distribusi beban dapat dimodelkan dengan lebih teliti namun tetap dengan asumsi-asumsi yang ditetapkan sebelumnya (Wiradarma, 2022). Dalam pemodelan analisis struktur atas jalan rel, baja rel yang diasumsikan sebagai baja profil I yang dimensinya disesuaikan dengan spesifikasi baja jalan rel yang ada dengan momen inersia yang paling mendekati. Selanjutnya untuk bantalan diasumsikan dengan menggunakan tumpuan sendi dengan perletakan menyesuaikan standar dan untuk jarak antar beban yang bekerja menyesuaikan dengan dimensi *bogie* pada lokomotif. Digunakan beban lokomotif karena lokomotif memiliki beban gandar terbesar pada satu rangkaian kereta api.

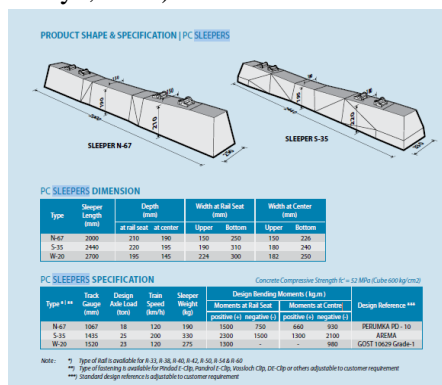
Perangkat lunak Plaxis 2D adalah perangkat lunak untuk menentukan kuat dukung tanah (Manurung, Mochtar and Satrya, 2021), perangkat ini juga dapat digunakan untuk menganalisis tebal balas dan sub-balas secara 2 dimensi potongan melintang. Perangkat lunak ini digunakan untuk mengetahui tebal optimum balas dan sub-balas dalam mengantisipasi terjadinya longsoran ketika tanah dasar sudah dianggap kuat.

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer berupa survei langsung dimensi lokomotif dan *bogie* yang nantinya akan diasumsikan sama dengan lokomotif yang digunakan pada penelitian ini dan data sekunder berupa informasi yang diperoleh dari berbagai sumber, termasuk data yang dikeluarkan oleh pemerintah (Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012), temuan dari penelitian sebelumnya, dan sumber data lainnya. Beberapa data sekunder dari PM 60 Tahun 2012 tersebut ada pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Pembagian kelas jalan rel berdasarkan kapasitas angkut lintas pada lebar jalan rel sebesar 1435 mm (Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012).

Kelas Jalan Rel	Kapasitas Angkut Lintas (x10 <sup>6</sup> ton/tahun)	Kecepatan Maksimum (km/jam)	P maks gandar (ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan/Jarak (mm)	Jenis Penambat Rel
I	> 20	160	22.5	R.60/R.54	Beton/600	EG
II	10 – 20	140	22.5	R.54/R.50	Beton/Kayu/600	EG
III	5 – 10	120	22.5	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/Baja/ 600	EG
IV	< 5	100	22.5	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/Baja/ 600	EG/ET

Dari data tersebut di atas maka akan digunakan kelas I jalan rel, dan dengan tipe rel R.60 atau pada pasaran dunia disebut rel UIC60. Sedangkan berikut ini merupakan bantalan dengan tipe dan spesifikasi yang didapatkan dari Katalog PT. Wijaya Karya (PT Wijaya Karya, 2017).



Gambar 3. Spesifikasi bantalan beton pracetak (Katalog PT. Wijaya Karya, 2017).

Spesifikasi yang paling tepat digunakan untuk dimodelkan adalah bantalan tipe S-35 dengan momen kapasitas *ultimate* berdasarkan beberapa sumber yang nantinya akan dibandingkan. Sedangkan untuk tipe penambat akan disesuaikan dengan kuat jepit yang diperoleh dari gaya gesek yang dihasilkan oleh pembebanan. Begitu juga untuk balas dan sub-balas menggunakan beberapa data sekunder yang menjadi asumsi spesifikasi. Untuk dimensi struktur atas jalan rel disesuaikan dengan yang ada pada PM 60 Tahun 2012.

Berikut merupakan persamaan yang digunakan dalam pembebanan, persamaan yang pertama adalah persamaan beban dinamis yang digunakan.

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

Dimana DAF adalah faktor dinamis, t adalah koefisien standar deviasi untuk menunjukkan aplikasi perhitungan, untuk perhitungan keamanan dipilih nilai sebesar 3,  $\varphi$  merupakan kondisi jalur kereta, untuk kondisi rel normal digunakan nilai 0,2, dan V adalah kecepatan kereta api yang dinyatakan pada satuan (km/jam) (Muthohar and Santoso, 2015).

Selanjutnya adalah persamaan gaya dinamis yang dihasilkan yaitu sebagai berikut.

$$Pd = Ps \times DAF \tag{2}$$

Dimana Pd merupakan gaya dinamis, Ps adalah gaya stasis (gaya roda atau 0,5 gaya gandar), dan DAF adalah faktor dinamis yang didapatkan pada persamaan sebelumnya di atas.

Sementara itu untuk gaya pengereman yang dimodelkan adalah 25% dari beban kereta, dan bekerja pada pusat gaya berat kereta ke arah rel (secara longitudinal).

Sedangkan untuk beban lateral bekerja pada bagian atas dan tegak lurus arah rel, secara horizontal besarnya adalah 15% atau 20% dari beban gandar untuk masing-masing lokomotif atau kereta.

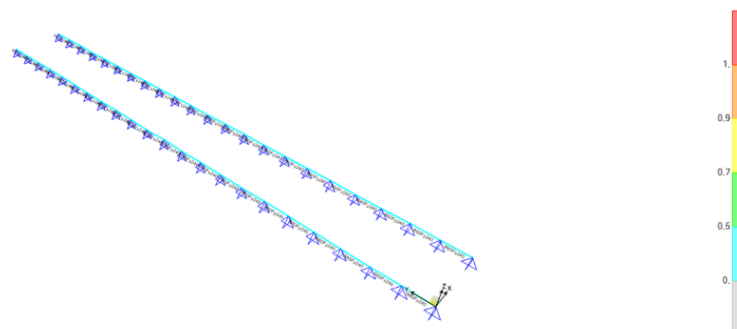
### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Selanjutnya dilakukan analisis pembebanan pada SAP2000 kemudian didapatkan bahwa rel dan bantalan dalam keadaan aman dengan beban *combo* (kombinasi) maksimum sebesar 22,15 Ton yang terjadi, beban tersebut telah direduksi dengan prinsip pembebanan pada SAP2000 yaitu 1,2 DL + 1,6 LL (SNI 03-1729-2002), pada titik yang diperjelas oleh Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Reaksi tiap titik tumpu/bantalan pada SAP2000 arah sumbu yz (*Output* pada SAP2000, 2023).

Struktur jalan rel dari mulai baja rel dan bantalan dikatakan aman setelah dilakukan proses *running* pada program SAP2000 dan dinyatakan bahwa tidak ada reaksi defleksi yang melebihi warna indikator merah yaitu lebih dari 1 cm pada baja rel dan tumpuan (bantalan) yang ada pada Gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. *Display steel design* (*Output* pada SAP2000, 2023).

Untuk beban yang diterima oleh bantalan juga dianggap aman karena beban 22,15 Ton dinilai lebih kecil dari 256,839 kN atau 26,193 Ton dan 350 kN atau 35,69 Ton, kedua batas beban tersebut berasal dari literasi berupa uji lab beton pracetak bantalan rel tipe S-35, yang mana pada pengujian lab didapatkan retak awal yang terjadi saat beban yang diberikan mencapai 256,839 kN atau 26,193 Ton dan 350 kN atau 35,69 Ton (Puspasari, 2016). Maka tipe rel R.60/UIC60 dan bantalan tipe S-35 dinilai aman dan dapat dilanjutkan pada perhitungan dimensi, jenis dan kuantitas balas.

### 3.1 Jalan Rel

Digunakan Rel Tipe R.60 / UIC60 karena kereta rencana masuk dalam kelas 1 jalan rel sesuai dengan kriteria desain menurut PM 60 Tahun 2012 dan beberapa literasi. Berikut merupakan gambar keterangan lebar sepur dan tampang dari Rel R.60/UIC60. Dimensi rel dari UIC60 dimasukkan dan dimodelkan dengan SAP2000 dan menghasilkan momen inersia yang hampir setara, yaitu yang seharusnya sebesar  $3055 \text{ kg.cm}^2$  didapatkan sebesar  $3033,64 \text{ kg.cm}^2$ , hal ini dibuat lebih kecil agar kondisi sesungguhnya tetap lebih aman, begitu juga dengan *material properties* berupa tegangan leleh ( $f_y$ ) rel, yang seharusnya sebesar 950 Mpa pada SAP2000 dimodelkan menjadi 240 Mpa.

### 3.2 Penambat

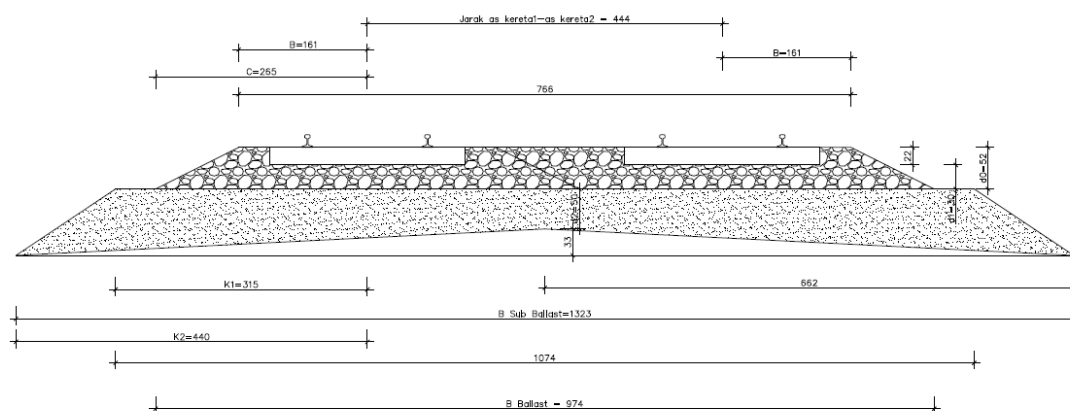
Fungsi utamanya adalah untuk menjaga agar rel tetap pada posisinya dan mencegah pergeseran yang tidak diinginkan. Penambat rel membantu mencegah rel dari pergeseran lateral atau samping. Hal ini sangat penting untuk menjaga kestabilan jalur rel, terutama saat kereta melewati tikungan atau jalan yang meliuk-liuk. Penambat yang digunakan adalah penambat dengan kuat jepit di atas 4,17 Ton, kemungkinan yang dipakai adalah penambat elastis ganda jenis *KA Clip* atau *Spring Clip* (Putra, 2017).

### 3.3 Bantalan

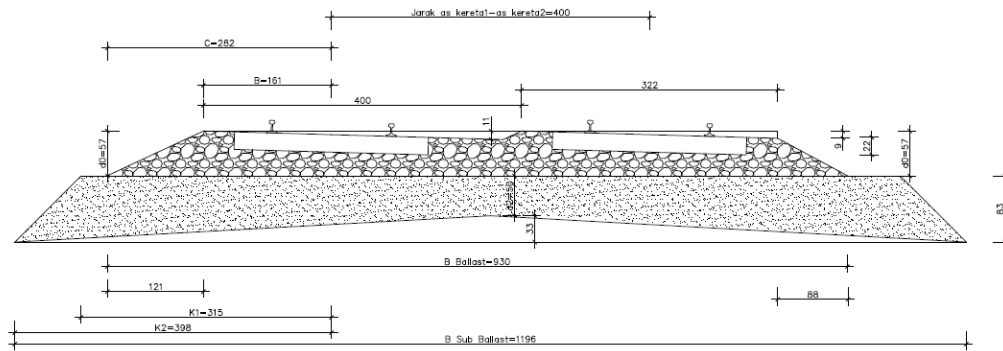
Bantalan rel, juga dikenal sebagai *sleeper*, adalah struktur yang digunakan untuk mendukung rel kereta api dan menyediakan fondasi untuk rel tersebut. Bantalan rel juga memberikan stabilitas struktural pada jalur rel dan menyelaraskan rel secara horizontal dan vertikal. Ini memastikan bahwa kereta dapat berjalan dengan aman dan efisien di atas rel. Bantalan yang digunakan adalah bantalan beton pracetak tipe S-35.

### 3.4 Balas dan Sub-Balas

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan Plaxis 2D guna mengetahui bagaimana deformasi yang terjadi pada balas dan sub-balas jalan rel dengan menggunakan beban kereta api yang telah dihitung sedemikian rupa. Dalam pemodelan Plaxis 2D, diasumsikan bahwa potongan melintang badan jalan rel merupakan tipikal sehingga dapat dimodelkan sebagai model 2D dengan panjang masuk bidang gambar sebesar 1 meter. Struktur jalan rel dimodelkan dalam kondisi lintasan lurus dan menikung. Potongan melintang yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7 berikut.



Gambar 6. Potongan melintang badan jalan rel rencana kondisi lurus (Gambar Penulis pada AutoCAD, 2023).



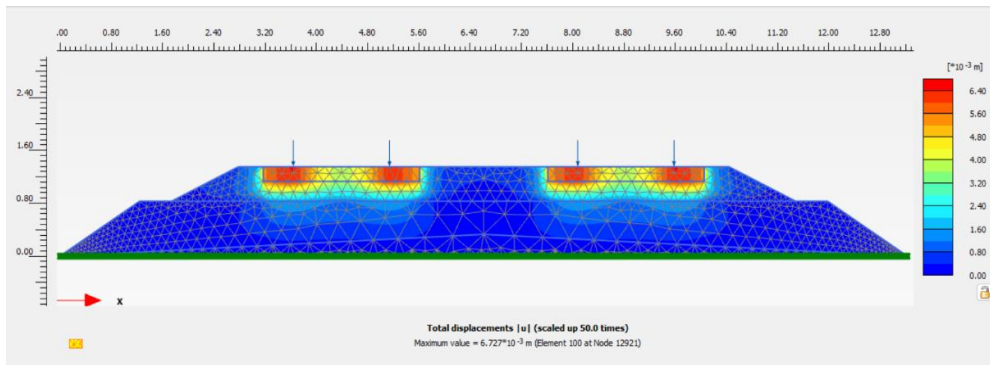
Gambar 7. Potongan melintang badan jalan rel rencana kondisi menikung (Gambar Penulis pada AutoCAD, 2023).

Berikut merupakan asumsi material properti dan hasil yang dimodelkan pada Plaxis 2D (Jiang and Nimbalkar, 2019). Dilakukan 2 model yaitu beban kereta titik dan beban kereta merata sebagai pembandingan pembebanan yang ada pada Tabel 2 berikut ini.

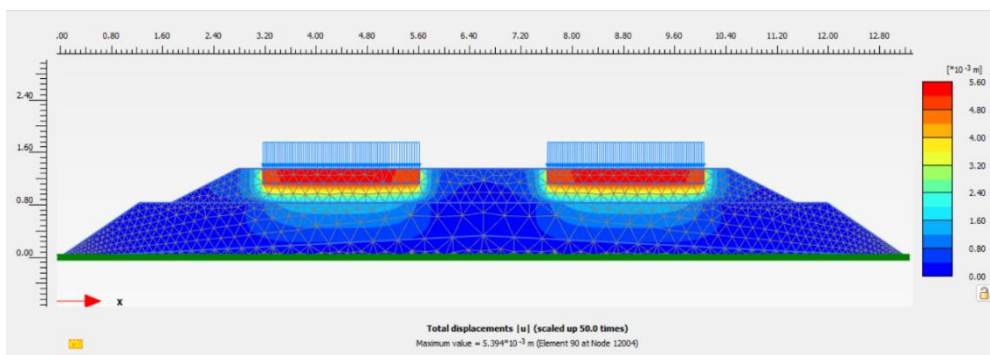
Tabel 2. *Material properties* balas dan sub-balas (Jiang and Nimbalkar, 2019).

<i>Parameters</i>		<i>Concrete Sleeper</i>	<i>Ballast</i>	<i>Sub-ballast</i>
<i>Material Model</i>		<i>Linear Elastic</i>	<i>Hardening Soil</i>	<i>Mohr-Coulomb</i>
<i>Drainage Type</i>		<i>Non-porous</i>	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>
<b>E</b>	kPa	1071764.9		80000
<b>E<sub>50</sub></b>	kPa	-	21340	-
<b>E<sub>oed</sub></b>	kPa	-	21340	-
<b>E<sub>ur</sub></b>	kPa	-	64020	-
<b>γ</b>	kN/m <sup>3</sup>	24	15.6	18
<b>ν</b>		0.15	-	0.3
<b>ν<sub>ur</sub></b>		-	0.2	-
<b>c'</b>	kPa	-	0	4
<b>φ</b>	°	-	58.47	40
<b>ψ</b>	°	-	12.95	-
<b>p<sub>ref</sub></b>	kPa	-	50	-
<b>m</b>		-	0.5	-
<b>k<sub>0</sub><sup>nc</sup></b>		-	0.3	-
<b>R<sub>f</sub></b>		-	0.9	-
<b>R<sub>inter</sub></b>		-	1	-
<b>k<sub>x</sub></b>		-	17280	1728
<b>k<sub>y</sub></b>		-	8640	864

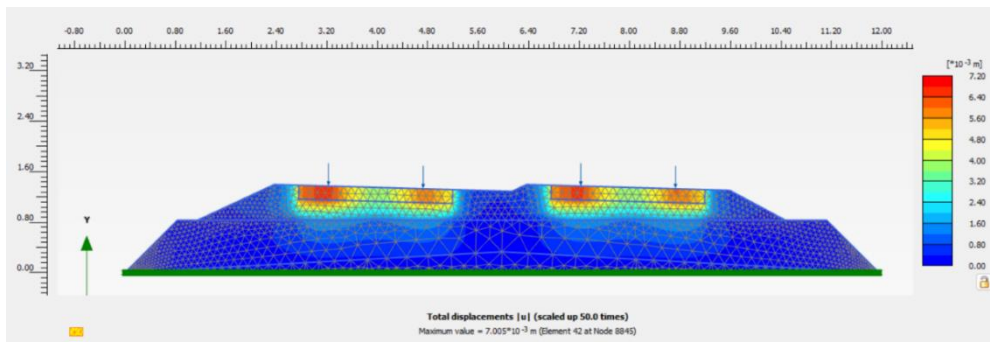
Dengan melakukan 2 kali percobaan sistem pembebanan yaitu dengan *point load* (beban titik) dan *line load* (beban merata) kemudian dicari deformasi terbesarnya. Dari hasil analisis pada SAP2000, didapatkan beban titik pada masing-masing sisi roda kereta api sebesar 22,15 Ton untuk selanjutnya dikonversi menjadi satuan kN sebesar 217,22 kN/m. Berdasarkan hasil beban titik yang telah didapatkan, diasumsikan bahwa adanya bantalan kereta api mengubah beban titik yang berasal dari kereta api menjadi beban merata selebar bantalan kereta api. Lebar bantalan kereta api yang digunakan yakni 2440 mm, oleh karena itu didapatkan beban merata sebesar 178,05 kN/m/m. Berikut merupakan gambar kontur dari hasil total *displacement* pada pembebanan titik  $\Sigma M_{sf} = 1,34$  dengan 0,67 cm penurunan dan merata  $\Sigma M_{sf} = 2,9$  dengan 0,53 cm penurunan kondisi jalan lurus. Pembebanan titik  $\Sigma M_{sf} = 1,29$  dengan 0,70 cm penurunan dan merata  $\Sigma M_{sf} = 2,1$  dengan 0,55 cm penurunan kondisi jalan menikung yang telah dinyatakan aman (tidak terjadi longsor pada lereng balas dan sub-balas).



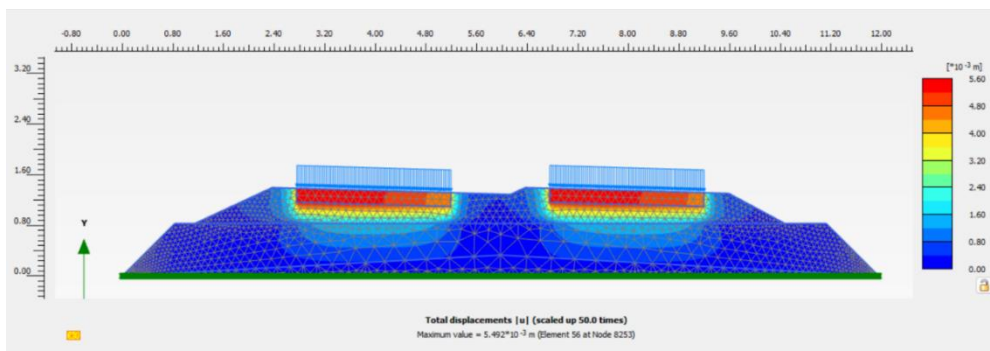
Gambar 8. Total *displacements shadings* pada pembebanan titik kondisi jalan lurus (*Output* pada Plaxis 2D, 2023).



Gambar 9. Total *displacements shadings* pada pembebanan merata kondisi jalan lurus (*Output* pada Plaxis 2D, 2023).



Gambar 10. Total *displacements shadings* pada pembebanan titik kondisi jalan menikung (*Output* pada Plaxis 2D, 2023).



Gambar 11. Total *displacements shadings* pada pembebanan merata kondisi jalan menikung (*Output* pada Plaxis 2D, 2023).

### 3.5 Volume Bahan dan Material

Setelah dilakukan penghitungan biaya dengan bahan dan material sesuai dengan spesifikasi di atas, untuk jalan rel *double track* lurus volume total pada 1 km panjang jalan rel untuk sub-balas adalah sebesar 7764,6 m<sup>3</sup>, volume balas sebesar 3450,4 m<sup>3</sup>, jumlah bantalan sebanyak 3333 bantalan dan memiliki panjang rel sepanjang 4000 m. Untuk jalan rel *double track* kondisi menikung diperlukan volume sub-balas sebesar 7764,6 m<sup>3</sup>, volume balas sebesar 3272,55 m<sup>3</sup>, jumlah bantalan sebanyak 3333 bantalan dan memiliki panjang jalan rel sepanjang 4000 m.

#### 4 KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulannya adalah digunakan rel R.60/UIC60, bantalan S-35 dengan jarak antar as 60 cm pada kelas I jalan rel, penggunaan *KA Clip/Spring Clip* sebagai penambat karena memiliki kuat jepit lebih dari 4,12 Ton per pasang, tebal balas dan sub-balas dinyatakan aman setelah adanya penambahan 10% tebal termasuk tipe material yang digunakan dengan nilai *safety factor*  $\Sigma M_{sf} = 1,34$  pada beban titik dan  $\Sigma M_{sf} = 2,9$  pada beban merata kondisi *track* lurus,  $\Sigma M_{sf} = 1,29$  pada beban titik dan  $\Sigma M_{sf} = 2,11$  pada beban merata kondisi *track* tikungan (syarat SNI 8460:2017,  $\Sigma M_{sf} > 1,25$ ). Volume bahan dan material telah direkapitulasi dalam 1 km panjang jalur. Perencana jalan rel dapat menggunakan penulisan ini sebagai acuan perencanaan. Namun pada penelitian ini disarankan adanya analisis stabilitas tanah, pengukuran kinerja jalan khususnya jalan rel secara teoritis untuk memastikan jalan rel mencapai kinerja optimalnya (Amrozi and Raihan Pasha Isheka, 2021), validasi soal kuat jepit penambat dan reduksi kombinasi beban horizontal, analisis lebar celah sambungan, serta pemodelan secara 3D/elemen hingga dikemudian hari.

#### REFERENSI

- Afin, A.P. and Kiono, B.F.T. (2021). "Potensi Energi Batubara serta Pemanfaatan dan Teknologinya di Indonesia Tahun 2020 – 2050: Gasifikasi Batubara", *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 2(2), 144–122.
- Alafi, J., Nugroho, S. and Hadi, F. (2012). "Perancangan Simulasi Operasi Angkutan Batubara Berbasis Web Programming.", *Jurnal Teknik ITS*, 1, 54–57.
- Amrozi, M.R.F. (2021). "Optimizing The Functional Performance of Road Network using Vulnerability Assessment to Cope with Unforeseen Road Incidents.", *Journal of the Civil Engineering Forum*, 67–80.
- Dian, S., Imam, M. and Gurmel, G. (2013). "Conventional And Unconventional Railway Track For Railways On Soft Ground In Indonesia (Case Study: Rantau Prapat - Duri Railways Development)."
- Fadlunmias, S.A., Rosyidi, P. and Muntohar, A.S. (2015). "Analisis Struktur Jalan Rel.", *Jurnal Teknik Sipil*, 1–10.
- Ihlas, A. (2017). "Analisis Kerusakan Rel Kereta Api Angkutan Batubara.", *Jurnal Teknologi Bahan Teknik*, 7(1), 7.
- Jiang, Y. and Nimbalkar, S. (2019). "Finite element modeling of ballasted rail track capturing effects of geosynthetic inclusions.", *Frontiers in Built Environment*, 1–11.
- Kementerian Perhubungan Ditjen Perkeretaapian (2011). "Rencana Induk Perkeretaapian Nasional 2030."
- Manurung, W.I., Mochtar, I.B. and Satrya, T.R. (2021). "Analisis Hasil Perencanaan pada Pemodelan Stabilitas Timbunan dengan Program Bantu XSTABL, GEO5, GeoStudio-SLOPE/W, dan PLAXIS.", *Jurnal Teknik Sipil*, 295.
- Menteri Perhubungan Republik Indonesia. (2012). "PM 60 Tahun 2012.", *Kemenuh RI*, 57.
- Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia (2002). "SNI 03-1729-2002.", *Kementerian PUPR RI*.
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). "Persyaratan Perancangan Geoteknik SNI 8460:2017.", *BSN Jakarta*.
- Muthohar, I. and Santoso, N.B. (2015). "Analisis Distribusi Beban Kereta Api Pada Konstruksi Timbunan Jalur Kereta Api.", *The 18th FSTPT International Symposium, Unila, Bandar Lampung, 2015*, 1418–1431.
- Profillidis, V.A. (2006). "Railway Management and Engineering Third Edition."
- Lichtberger, B. (2005). "Track Compendium." *Eurailpress Tetzlaff-Hestra GmbH & Co. KG*.
- PT Wijaya Karya. (2017). "The Precast Concrete Manufacturer.", *Wika-Beton.Co.Id*, 9.
- Puspasari, D. (2016). "Kajian Kapasitas Lentur Dudukan Bantalan Rel Kereta Type Bt25 S35 E36.", 1–66.
- Putra, D.P. (2017). "Desain Geometrik, Struktur, Beserta Metode Pelaksanaan Pembangunan Jalur Rel Ganda Trase Banyuwangi Baru – Kalibaru Kab. Banyuwangi.", *ITS Surabaya*, 259.
- Putro, F.N. and Chomaedhi (2014). "Perencanaan Ulang Jalan Kereta Api Jalur Rel Ganda di Bojonegoro Surabaya KM 159,600 M Sampai dengan KM 161,000 M.", *FTSP ITS Surabaya*, 191.
- Amrozi, F. (2023). "The Evaluation of Pavement Condition Assessment Methods for Road Assets in Coastal Areas."
- Utomo, S.H.T. (2009). "Jalan Rel.", *Beta Offset*, 1–121.
- Wiradarma (2022). "Analisis Struktur Atas Jembatan Kereta Bh 2034.", *UII Yogyakarta*.