

STUDI NUMERIK TERHADAP RESPON STRUKTUR PADA BANTALAN BETON TERMODIFIKASI UNTUK *NON-BALLASTED TRACK*

Danang Purwanto¹, Imam Satyarno², Andreas Triwiyono³

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Email: danangpurwanto09@gmail.com

²Department of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Email: imansatyarno@ugm.ac.id

³Department of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Email: andreas.triwiyono@ugm.ac.id

ABSTRACT

Referring to Rencana Induk Perkeretaapian Nasional (RIPNas), the 2030 development target of the railway network and services includes a national network of 12,100 km (spread across Java-Bali, Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, and Papua). Therefore, modernization of the railroad transportation facilities and infrastructure is needed, one of which is the railway line construction. The railway lines construction is generally divided into two main types, namely ballasted and non-ballasted tracks. This study researchers used concrete sleeper on the ballasted track by modifying the concrete sleeper width in the construction of non-ballasted track railroad tracks. This is an alternative solution especially for the railway that will be built in an area where the coarse aggregate natural resources used for the ballast are unavailable. The research covers several types of soil condition including gravel, dense sand, medium dense sand, silty medium dense and loose sand. This study analyzes railroad displacement responses and bending stresses on the modified concrete sleepers of non-ballasted track in different soil condition. The analysis was carried out utilizing the SAP2000 software v.14 to examine the rail displacement responses and bending stresses on the modified concrete sleepers having specific dimensions of 400 x 2440 mm²; 1200 x 2440 mm²; 2000 x 2440 mm²; 2800 x 2440 mm², and 3600 x 2440 mm² for each different types of soil to determine the dimensions of modified concrete sleepers. The result is on gravel using concrete sleeper dimensions of 400 x 2440 mm², dense sand using concrete sleeper dimensions 1200 x 2440 mm², dense sand medium using 2000x2440 mm², silty medium dense using concrete sleeper dimensions 2800x2440 mm² and loose sand unable to use concrete sleepers modified because the rail displacement value exceeds 6 mm

Keywords: *non-ballasted, displacement, sleeper, width, SAP2000*

PENDAHULUAN

Menurut Rencana Induk Perkeretaapian Nasional, atau disingkat RIPNas, memuat rencana pengembangan perkeretaapian Indonesia hingga tahun 2030 mendatang. Sasaran pengembangan jaringan dan layanan perkeretaapian yang ingin dicapai pada tahun 2030 antara lain jaringan nasional sepanjang 12.100 km (tersebar di Pulau Jawa-Bali, Sumatera, Kalimantan, Sulawesi dan Papua), termasuk jaringan kereta api kota/perkotaan sepanjang 3.800 km.

Salah satu rencana yang sedang dikembangkan oleh pemerintah adalah pengembangan jaringan jalur kereta di Sumatera dengan mewujudkan *Trans Sumatera Railways*. Oleh hal tersebut diperlukannya modernisasi pada sarana dan prasarana transportasi kereta api, salah satunya adalah konstruksi jalur kereta api.

Konstruksi jalur kereta api umumnya dibagi menjadi dua tipe utama yaitu, *ballasted track* dan *non-ballast track*. *Ballasted track* adalah jalur kereta api yang terdiri dari rel, sistem penambat rel (*fastener*), bantalan, *ballast* dan *subgrade*. Sedangkan untuk *non-ballast track* susunan lapisan beton yang

tersusun rapat menggantikan *ballast*. *Ballast* adalah suatu lapisan berupa batu-batu berukuran kecil yang ditaburkan di bawah bantalan, tepatnya di bawah, samping, dan sekitar bantalan dan sebagai tempat peletakan bantalan. Fungsinya adalah untuk meredam getaran bantalan saat rangkaian kereta melintas dan menyebarkan beban dari bantalan ke lapian landasan dibawahnya, sehingga bantalan tidak ambles.

Madhkan dkk, (2011) menyatakan penerapan rel kereta api *non-ballasted* telah banyak digunakan di negara maju terutama pada terowongan dan jembatan. Penggunaan rel ini lebih menguntungkan karena mengurangi ketinggian kereta api, mengurangi pemeliharaan dan biaya total, meningkatkan kehidupan pelayanan kereta api, memfasilitasi kereta kecepatan tinggi, dan meningkatkan kekuatan lateral dari kereta api.

Penelitian ini meneliti menggunakan bantalan beton pada *ballasted track* dengan memodifikasikan lebar bantalan beton pada kontruksi jalur kereta api *non-ballasted track*. Selain itu, dipilih *non-ballasted track* dilakukan untuk mengurangi penggunaan agregat kasar pada *ballast* sehingga bila digunakan pada daerah yang tidak mempunyai sumber daya alam berupa agregat kasar dapat dilalui oleh kereta api. Perlu adanya penelitian tentang perencanaan desain bantalan beton termodifikasi kereta api tanpa *ballast* yang sesuai dengan kondisi alam Indonesia.

Penelitian ini dilakukan sesuai dengan keadaan tanah *gravel*, *dense sand*, *medium dense sand*, *silty medium dense* dan *loose sand*. Jenis tanah yang berbeda menimbulkan respon atau perilaku yang berbeda pula dari modifikasi bantalan kereta api yang terletak diatas permukaan tanah. Penelitian ini menganalisis *displacement* rel dan tegangan lentur rel pada bantalan beton termodifikasi kereta api untuk penggunaan tanpa *ballast* pada beberapa kondisi tanah.

Perbandingan Respon Struktur *Ballasted Track* dengan *Ballastless Track*

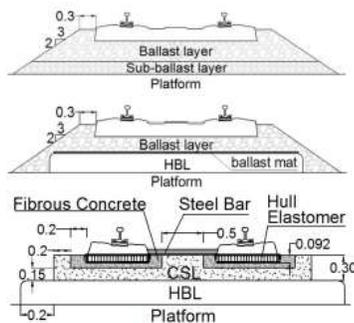
Michas (2012) membandingkan *ballastless track* dengan *ballasted track* dengan memodelkan 3D model pada *ABAQUS* dengan tujuan mengetahui respon global pada track kereta saat dilalui dengan beban kereta. Penelitian ini menghasilkan *ballastless* dengan model *slab track* dengan *system rheda 2000* mengalami deformasi lebih kecil daripada *ballasted track*. *Ballasted track* tidak dapat mendistribusikan gaya di daerah lebih luas mengakibatkan deformasi dan *stresses* yang tinggi pada daerah pembebanan.

Matias (2015) dalam penelitian tentang *Numerical Modeling and Design of Slab Track* yaitu meneliti perbandingan antara *ballasted track* (VB), *ballasted track* yang dimodifikasikan dengan mengganti *sub-ballast layer* dengan *ballast mat* (VBZT 1) dan *ballastless track* jenis *slab track Stedaf* (VSB) seperti pada Gambar 1. Pemodelan ini diberi pembebanan sebesar 20 ton.

Penelitian ini menghasilkan VBZT 1 merupakan solusi terbaik untuk dalam distribusi beban ke bantalan beton. VBZT 1 dapat mengurangi 60% distribusi beban ke bantalan beton dibanding VB sedangkan untuk VSB hanya dapat mengurangi beban ditribusi ke bantalan beton sebesar 46% dibanding VB. Kekakuan pada *pad rail* VSB lebih kecil 80% daripada VB dan VBZT 1, hal ini menyebabkan *slab track Stedaf* lebih fleksibel daripada yang lain karena lebih elastis. Hasil yang paling menonjol dari *slab track* adalah dapat mengurangi tegangan vertikal pada *platform* sebesar 77% dibandingkan *ballasted track*.

Penelitian yang mengulas tentang perbandingan jenis kereta api *ballasted track* dengan *non-ballasted track* dilakukan oleh Aly dkk (2017) menghasilkan perbandingan jenis kereta api *ballasted track* dan *ballastless track* yang ada di Mesir. Tujuan penelitian ini adalah untuk menginvestigasi dan mempelajari respons dinamik pada *ballastless track* untuk tanah lunak dengan

kereta kecepatan kereta 100 sampai 250 kph dengan menggunakan metode finite element tiga dimensi. Investigasi ini dilakukan dengan membandingkan dengan *ballasted track* dengan modifikasi *ballastless track* yaitu model *deck track*, *inverted track*, dan *curved track*. Dengan membandingkan *inverted deck track*, *deck track*, *curved track* dan *ballasted track* menghasilkan *inverted deck track* dapat mengurangi *displacement vertical* dengan rata-rata sebesar 60% dan *vertical acceleration* berkurang dengan presentase rata-rata sebesar 40% yang jauh lebih menguntungkan daripada hasil *deck track*.



Gambar 1 Perbandingan *ballasted track* dan *ballastless track* (Matias, 2015)

Perbandingan Respon Struktur Antara Jenis *Ballastless Track*

Matias (2015) dalam penelitiannya membandingkan respon struktur antara beberapa jenis *ballastless track* yaitu *Stedaf*, *Rheda 2000* dan *Bögl*. Penelitian ini menghasilkan *displacement* pada rel untuk *stedaf* -1,81 mm, *Rheda 2000* sebesar -1,62 mm dan *Bögl* sebesar -1,69 mm. Sedangkan *Bögl* merupakan sistem terbaik *ballastless track* untuk mengurangi tegangan vertikal pada platform, yaitu sebesar 32,2% dibandingkan dengan *stedaf* dan 46,6% dibandingkan *Rheda 2000*.

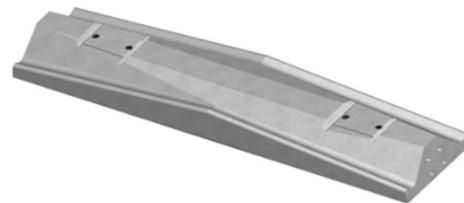
Bantalan Beton Termomodifikasi

Menurut Esveld (2001) sudah dikembangkan beberapa desain bantalan beton untuk

ballasted track. Tujuannya adalah untuk mengurangi distribusi beban ke bawah bantalan beton menuju fondasi. Hal ini dilakukan agar pendistribusian beban ke bawah bantalan beton tidak merusak *ballast* karena dapat menurunkan kualitas jalur kereta api. Terdapat dua bantalan beton termomodifikasi, yaitu *wide sleeper* dan *frame sleeper*.

1. *Wide Sleeper*

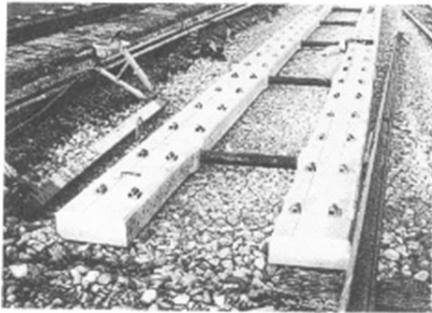
Esveld (2001) menyatakan *Wide sleeper* pada Gambar 2 dikembangkan di Jerman. Dimensi *wide sleeper* sepanjang 2,40 meter dengan lebar 57 centimeter. Jarak antar *wide sleeper* sebesar 60 centimeter dengan celah sebesar 3 centimeter yang ditutupi dengan *rubber cover*.



Gambar 2 *Wide sleeper* (www.railone.com)

2. *Frame-Sleeper*

Frame sleeper dibuat untuk menyebarkan beban struktur pada *ballasted track* tradisional. Yaitu dengan memotong jarak regular pada bantalan beton dengan *girder-grid* sehingga dapat mengkombinasikan balok menerus longitudinal dengan bantalan beton yang lain. Balok longitudinal yang dimaksud dibentuk oleh bagian-bagian pada *frame* yang terhubung dan ditahan oleh rel. Karena itu beban roda diteruskan secara terus menerus ke dasar *ballast* untuk mengurangi tekanan di bawah bantalan. Susunan 4 *fastener* per *frame-sleeper* memberikan kekakuan yang tinggi pada bidang horizontal untuk mendukung stabilitas dan kuat tekuk pada *frame-sleeper*.



Gambar 3 *Frame-sleeper* (www.rtri.or.jp)

Menurut *Riessberger* (2001) *frame-sleeper* pada Gambar 3 memiliki keunggulan yaitu:

- a. tegangan pada rel lebih baik bantalan beton *ballasted track* tradisional,
- b. *displacement* vertikal lebih kecil bantalan beton *ballasted track* tradisional,
- c. gaya tahan lateral lebih baik daripada bantalan beton *ballasted track* tradisional.

Persyaratan Rel

Menurut peraturan Kementerian Perhubungan Republik Indonesia (2012) untuk persyaratan rel kereta api adalah sebagai berikut:

1. Rel harus memenuhi persyaratan berikut:
 - a. minimum perpanjangan (*elongation*) 10%,
 - b. kekuatan tarik (*tensile strength*) minimum 1175 N/mm²,
 - c. kekerasan kepala rel tidak boleh kurang dari 320 BHN.
2. Penampang rel harus memenuhi ketentuan dimensi rel seperti pada Tabel 1 dan Gambar 4

Tabel 1 Jenis kereta api (Kementian Perhubungan Republik Indonesia 2012)

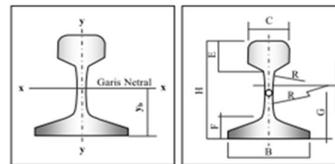
Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R. 42	R. 50	R.54	R. 60
H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30

Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R. 42	R. 50	R.54	R. 60
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 _b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95

A = luas penampang
 W = berat rel permeter
 I_x = momen inersia terhadap sumbu x
 Y_b = jarak tepi bawah rel ke garis netral

1. Beban Mati

Berat jenis bahan yang biasanya digunakan dalam perhitungan beban mati sebagaimana diuraikan dalam Tabel 2.



Gambar 4 Ukuran penampang rel (Kementrian Perhubungan Republik Indonesia 2012)

Tabel 2 Berat jenis bahan (Kementian Perhubungan Republik Indonesia 2012)

Bahan	Berat Jenis
Baja, Baja Cor	78,50 (kN/m ³)
Besi Cor	72,50 (kN/m ³)
Kayu	8,00 (kN/m ³)
Beton	24,00 (kN/m ³)
Aspal Anti Air	11,00 (kN/m ³)
Gravel atau Batu Pecah	19,00 (kN/m ³)

2. Beban Hidup

Beban hidup yang digunakan berdasarkan Gambar 5 *code of design*

High Speed Railway China TB 10621-2009. Hal ini digunakan karena pada pembebanan kereta api pada PM 60 Tahun 2012 yaitu RM 21 hanya digunakan untuk lebar rel 1067 mm sedangkan pada penelitian ini menggunakan lebar rel 1435 mm.

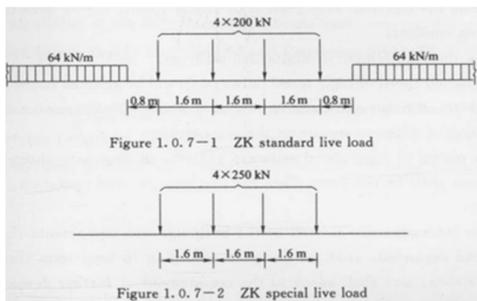
Dukungan Tanah

Dukungan tanah dalam penelitian ini dimodelkan dengan koefisien reaksi subgrade. Menurut Bowles (1991), koefisien subgrade adalah suatu hubungan konseptual antara tekanan tanah dan lendutan di atas tanah. Persamaan dasar koefisien reaksi subgrade (k_s) sebagai berikut:

$$k = k_s \times A \quad (1)$$

dengan:

k_s : modulus reaksi tanah dasar (N/mm^3),
A : luasan *mesh* pada struktur yang digunakan (mm^2).



Gambar 5 Skema pembebanan beban hidup vertical (*Code of Design High Speed Railway China, 2009*)

Interaksi Tanah

Dalam model interaksi tanah dengan pemodelan struktur, pendekatan yang umum digunakan adalah memodelkan tanah sebagai *link* dengan menentukan reaksi modulus tanah dasar dari tanah yang digunakan. Pemodelan *link supports* sebagai pendekatan dari pemodelan tanah dipilih karena *link supports* lebih dapat mengaktifkan perilaku *nonlinier* pada tanah.

Nilai modulus reaksi tanah ditunjukkan pada persamaan :

$$k = \frac{q}{\delta} \quad (2)$$

dengan:

k = kekakuan *link*, Nmm

q = gaya, N

δ = penurunan tanah, mm

METODE PENELITIAN

Acuan Penelitian

Penelitian ini melakukan pemodelan numerik bantalan beton kereta api menggunakan *software* SAP2000 V14. Beberapa pedoman yang digunakan dalam proses penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Peraturan Menteri No 60 Tahun 2012 untuk Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api.
2. *AREMA Part 27* Tahun 1999 untuk ijin defleksi pada rel kereta api tidak lebih dari 6 mm dan tegangan lentur tidak lebih dari 75 MPa.
3. *Code for design High Speed Railway China* untuk pembebanan beban hidup vertikal pada rel kereta api.

Data Perencanaan

Data teknis yang digunakan sebagai data perancangan sebagai berikut:

1. Data Bantalan Beton dan Rel

Dimensi dan *properties* bantalan beton termodifikasi pada penelitian ini dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 3 Data perencanaan bantalan beton dan rel

Lebar (mm)	400	1200	2000	2800	3600
Tinggi (mm)	220	220	220	220	220
Panjang (mm)	2440	2440	2440	2440	2440
Lebar Rel (mm)	1435	1435	1435	1435	1435
Kuat Tekan (MPa)	52	52	52	52	52
Tegangan Putus Rel (N/mm^2)	410	410	410	410	410
Tegangan leleh Rel (N/mm^2)	550	550	550	550	550

2. Koefisien *Subgrade* Tanah

Nilai *coefficient of subgrade* pada tanah yang digunakan pada penelitian ini dijelaskan pada Tabel 4.

Tabel 4 Data daya dukung tanah

Jenis Tanah	<i>Coefficient of Subgrade</i> (N/mm ³)
<i>Gravel</i>	0,190
<i>Dense Sand</i>	0,128
<i>Medium Dense</i>	0,080
<i>Silty Medium Dense</i>	0,048
<i>Loose Sand</i>	0,016

Pemodelan Elemen Struktur

Parameter pemodelan elemen struktur pada SAP2000 dalam penelitian ini dijelaskan pada Tabel 5.

Tabel 5 Parameter pemodelan struktur

Komponen	Model Elemen
REL R.60	<i>Frame</i>
Penambat Rel	<i>Equal Constrain</i>
Bantalan Beton	<i>3-D Shell</i>
Dukungan Tanah	<i>Link/supports Type MultiLinier Elastik</i>

Gambar pemodelan struktur yang dimodelkan pada SAP2000 untuk bantalan beton dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² ditunjukkan pada Gambar 6.

Gambar tampak samping bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 7.

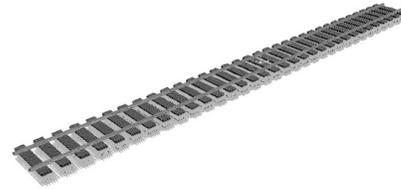
Identifikasi Model Numerik Struktur Bantalan Beton

Analisis numerik adalah solusi pendekatan dengan metode membagi komponen bantalan beton menjadi bagian – bagian kecil (*meshing*) dalam jumlah tertentu. Bagian – bagian kecil ini disebut sebagai elemen. Dengan metode ini akurasi solusi semakin meningkat dengan banyaknya pembagian komponen.

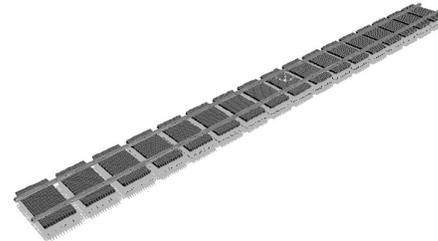
Pemodelan analisis numerik pada struktur bantalan beton kereta menggunakan dimensi bantalan beton 400 mm x 2440 mm yang

akan dibagi sejumlah pembagian komponen (*meshing*)

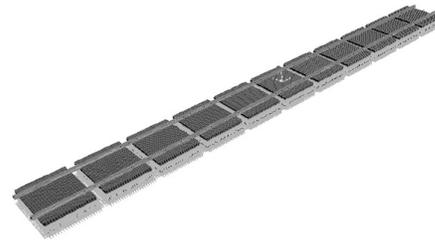
Hasil dari pemodelan analisis numerik ini akan dijelaskan berdasarkan pengaruh jumlah pembagian komponen (*meshing*) terhadap *displacement* yang terjadi pada rel kereta akibat beban hidup vertikal pada Tabel 6.



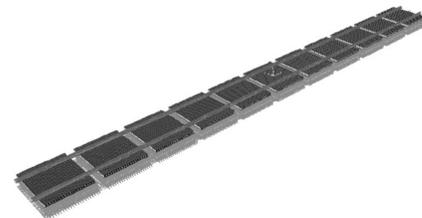
a. Dimensi 400 mm x 2440 mm²



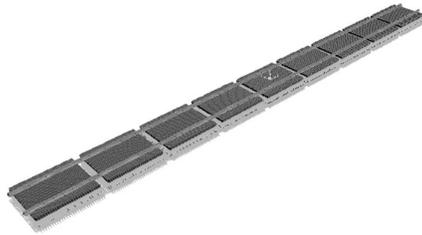
b. Dimensi 1200 mm x 2440 mm²



c. Dimensi 2000 mm x 2440 mm²

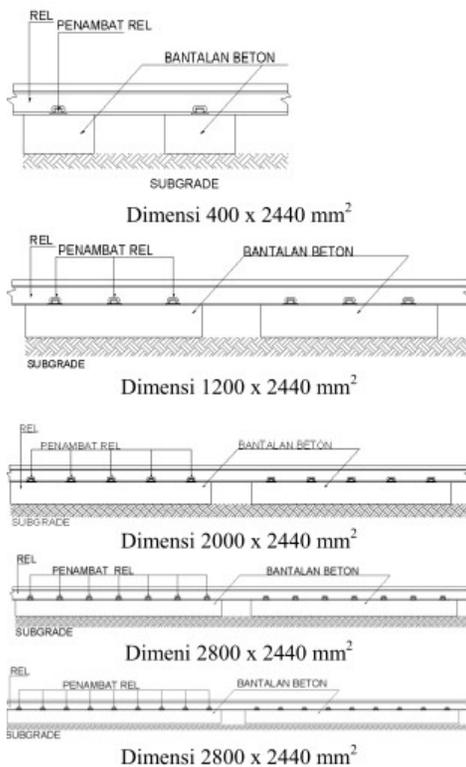


d. Dimensi 2800 mm x 2440 mm²



e. Dimensi 3600 mm x 2440 mm²

Gambar 6 Pemodelan Struktur Bantalan Beton Termodifikasi pada SAP2000



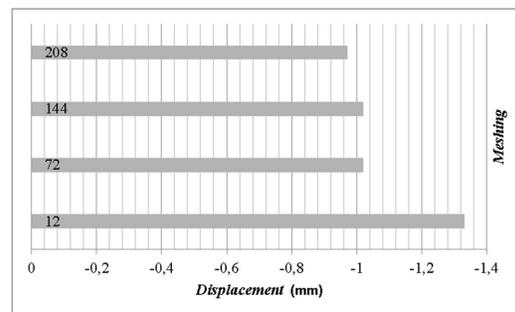
Gambar 7 Tampak samping bantalan beton termodifikasi

Dari Gambar 8 menjelaskan terjadi selisih yang signifikan pada *displacement* rel pada *meshing* 12 dan 72 sebesar 33,8973%. Selisih *displacement* rel 72 dan 144 sebesar 0,0098% dan untuk *meshing* 144 dan 208 selisihnya sebesar 4,892%. Nilai *displacement* rel terlihat lebih konstan dengan selisih lebih mendekati dari sebelumnya terletak pada *meshing* 144, maka

digunakan *meshing* 144 dengan dimensi 100x58,168 mm² untuk daerah dudukan rel pada bantalan beton dan 100x75,465 mm² untuk daerah tengah bantalan beton.

Tabel 6 Pengaruh jumlah *meshing* terhadap *displacement* bantalan beton

Pembagian Komponen (<i>meshing</i>) pada Bantalan Beton Kereta				
<i>Meshing</i>	12	72	144	208
Displacement Rel (mm)	-1,3669	-1,0208	-1,0197	-0,9726
Selisih Disp. (mm)	--	-0,3460	-0,0001	-0,0472
Selisih Disp. (%)	--	33,8973	0,0098	4,8492



Gambar 8 Grafik pengaruh *meshing* terhadap *displacement* rel bantalan kereta.

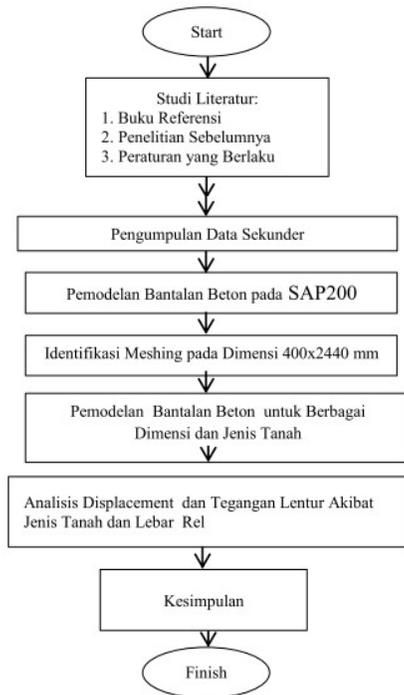
Pemrosesan Data

Pemrosesan data pada penelitian ini merupakan pengolahan data lanjutan dari identifikasi numerik pengaruh pembagian komponen (*meshing*) pada bantalan beton kereta. Setelah didapatkan jumlah pembagian komponen bantalan beton dengan selisih *displacement* paling kecil dalam bentuk persen yang akan digunakan sebagai pembagian komponen bantalan beton untuk dimensi 400 mm x 2440 mm, 1200 mm x 2440 mm, 2000 mm x 2440 mm, 2800 mm x 2440 mm dan 3600 x 2440 mm akan diberikan nilai modulus kekakuan tanah dari tanah *gravel*, *dense sand*, *medium dense sand*, *silty medium dense*, dan *loose sand*.

Pembagian Alur Penelitian

Gambar 9 menjelaskan tentang alur penelitian yang diawali dari studi literatur,

pengumpulan data sekunder, memodelkan bantalan beton termodifikasi pada *software* SAP2000 sehingga menghasilkan *output* berupa respon struktur yang akan dianalisa yaitu nilai *displacement* rel dan tegangan lentur rel terhadap bantalan beton termodifikasi pada penelitian ini. Dari hasil analisa tersebut didapatkan kesimpulan perbandingan nilai *displacement* rel dan tegangan lentur rel pada bantalan beton termodifikasi.



Gambar 9 Alur Penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

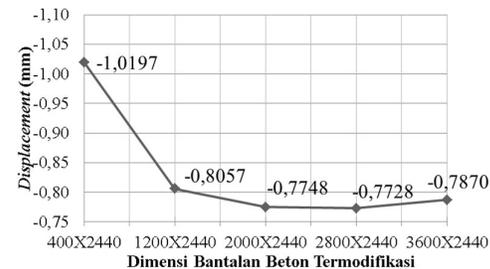
Analisis pada variasi bantalan beton termodifikasi berupa *displacement* rel dan tegangan lentur rel pada variasi bantalan beton termodifikasi. Analisa ini dievaluasi akibat dari nilai modulus kekakuan tanah yaitu tanah *gravel*, *dense sand*, *medium dense sand*, *silty medium dense* dan *loose sand* dengan menggunakan *meshing* 144 dan variasi bantalan beton termodifikasi.

Pada evaluasi struktur, *displacement* rel dan tegangan lentur rel dapat menunjukkan fenomena yang terjadi pada struktur. Pada

AREMA (1999) memberikan batasan pada *displacement* rel kereta sebesar 6 mm dan untuk tegangan lentur rel diberikan batasan sebesar 75 MPa.

Displacement Rel

Displacement rel pada tanah *gravel* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 10.

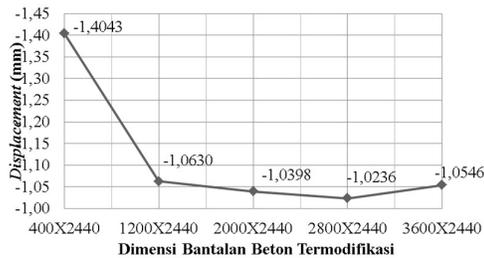


Gambar 10 Pengaruh *displacement* rel pada tanah *gravel* terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi

Gambar 10 menjelaskan grafik *displacement* rel pada tanah *gravel* untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah -1,0197 mm; -0,8057 mm; -0,7748 mm; -0,7728 mm; dan -0,7870 mm.

Displacement rel pada tanah *dense sand* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 11.

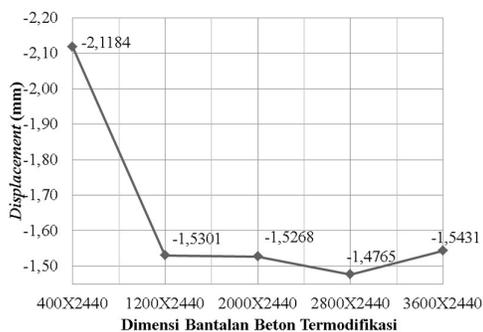
Gambar 11 menjelaskan grafik *displacement* rel pada tanah *dense sand* untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah -1,4043 mm; -1,0630 mm; -1,0398 mm; -1,0236 mm; dan -1,0545 mm.



Gambar 11 Pengaruh *displacement* rel pada tanah *dense sand* terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi

Displacement rel pada tanah *medium dense sand* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 12.

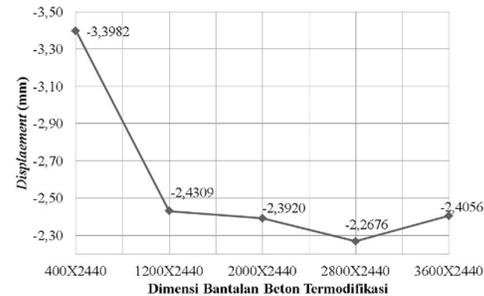
Grafik *displacement* rel pada tanah *medium dense* untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah -2,1184 mm; -1,5301 mm; -1,5268 mm; -1,4765 mm; dan -1,5431 mm seperti pada Gambar 13.



Gambar 13 Pengaruh *displacement* pada tanah *medium dense* terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi

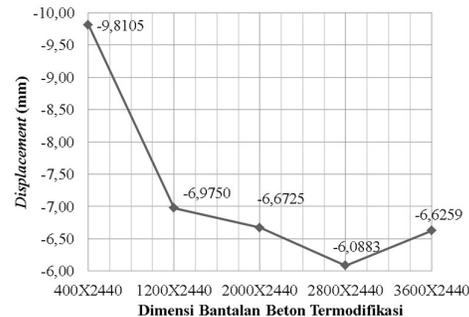
Displacement rel pada tanah *silty medium dense* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 14.

Gambar 14 menjelaskan grafik *displacement* rel pada tanah *silty medium dense* untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah -3,3982 mm; -2,4309 mm; -2,3920 mm; -2,2676 mm; dan -2,4055 mm.



Gambar 14 Pengaruh *displacement* rel pada tanah *silty medium dense* terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi

Displacement rel pada tanah *loose sand* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15 Pengaruh *displacement* rel pada tanah *loose sand* terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi

Gambar 15 menjelaskan grafik *displacement* rel pada tanah *loose sand* untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah -9,8105 mm; -6,9750 mm; -6,6725 mm; -6,0883 mm dan -6,6259 mm.

Setelah didapatkan nilai *displacement* rel dari perhitungan numerik, dengan syarat dari AREMA (1999) nilai *displacement* rel kurang dari 6 mm maka didapatkan dimensi bantalan beton termodifikasi pada kondisi tanah yaitu :

1. Tanah *gravel* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 400 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel sebesar -1,0197 mm.

2. Tanah *dense sand* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 400 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel sebesar -1,4043 mm.
3. Tanah *medium dense* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 400 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel sebesar -2,1184 mm.
4. Tanah *silty medium dense* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 400 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel sebesar -3,3982 mm.
5. Tanah *loose sand* tidak dapat menggunakan bantalan beton termodifikasi karena nilai *displacement* rel yang didapat melebihi 6 mm.

Dengan syarat nilai *displacement* rel mendekati nilai *displacement* rel yang didapat dari *displacement* rel pada tanah *gravel* untuk dimensi bantalan beton termodifikasi sebesar -1,0197 mm, maka dimensi bantalan beton termodifikasi pada kondisi tanah yaitu

1. Tanah *gravel* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 400 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel sebesar -1,0197 mm.
2. Tanah *dense sand* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 2800 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel sebesar -1,0236 mm.
3. Tanah *medium dense* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 2800 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel sebesar -1,4765 mm.
4. Tanah *silty medium dense* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 2800 x 2440 mm² -2,2676 mm
5. Tanah *loose sand* tidak dapat menggunakan bantalan beton termodifikasi karena nilai *displacement* rel yang didapat melebihi 6 mm.

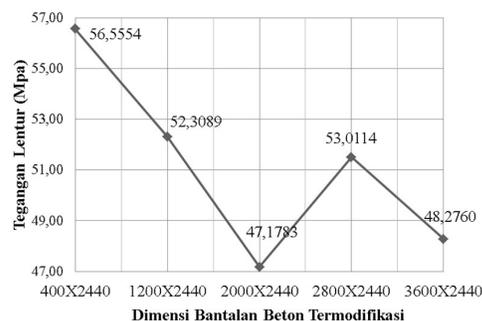
Maka dari kedua persyaratan tersebut, dimensi bantalan beton yang digunakan pada kondisi tanah adalah:

1. Tanah *gravel* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 400 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel -1,0197 mm.
2. Tanah *dense sand* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 1200 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel -1,0630 mm karena perbandingan selisih nilai *displacement* rel terkecil pada tanah tersebut sebesar 3,71%.
3. Tanah *medium dense* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 2000 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel sebesar -1,5268 mm karena perbandingan nilai *displacement* rel terkecil pada tanah tersebut sebesar 3,29%.
4. Tanah *silty medium dense* dengan dimensi bantalan beton termodifikasi 2800 x 2440 mm² dengan nilai *displacement* rel terkecil sebesar -2,2676 mm.
5. Tanah *loose sand* tidak dapat menggunakan bantalan beton termodifikasi karena nilai *displacement* rel yang didapat melebihi 6 mm.

Tegangan Lentur Rel

Tegangan lentur ini didapatkan dari momen rel yang dikalikan setengah tinggi rel lalu dibagi dengan luas inersia rel tersebut. Menurut AREMA (1999), tegangan lentur rel pada *non-ballasted track* tidak boleh lebih dari 75 MPa.

Tegangan lentur rel pada tanah *gravel* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16 Grafik pengaruh perbandingan tegangan lentur rel pada tanah gravel terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi.

Pada Gambar 16 menjelaskan grafik tegangan lentur rel pada tanah gravel untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah 56,5554 MPa; 52,3089 MPa; 47,1783 MPa; 51,5062 MPa dan 48,2760 MPa.

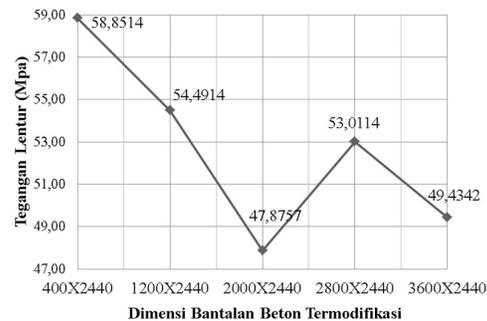
Sebagaimana tertera pada Gambar 18, seiring dengan bertambahnya lebar sleeper, maka tegangan lentur maksimum yang terjadi pada rel juga turut mengalami penurunan. Modifikasi lebar sleeper yang dilakukan dengan pola dikalikan dengan bilangan ganjil (1, 3, 5, 7 dan 9) memberikan gambaran hasil dimana penurunan tegangan lentur pada rel terjadi pada 1, 3 dan 5 kali lebar 400 mm, kemudian mengalami kenaikan kembali pada bantalan beton termodifikasi 7 x 400 mm (2800 x 2440 mm²) dan kemudian kembali mengalami penurunan pada modifikasi sleeper 9 x 400 mm (3600 x 2440 mm²), tetapi nilai penurunan ketika mencapai dimensi 3600 x 2440 mm² masih lebih tinggi dari pada titik terendah penurunan tegangan lentur pada rel yang terjadi pada bantalan beton termodifikasi 5 x 400 mm (2000 x 2440 mm²).

Kejadian tersebut disebabkan oleh permasalahan konfigurasi beban berjalan yang terletak diatas rel. Sehubungan dengan itu, konfigurasi dan dimensi bantalan beton sebagai tempat penambat untuk rel juga mengalami perubahan, maka tidak bisa dicapai kondisi yang sama untuk masing-masing konfigurasi modifikasi lebar bantalan beton. Sehingga walaupun tegangan lentur rel secara umum tetap mengalami penurunan, tetapi pada konfigurasi tertentu akan mengalami anomali, dalam hal ini terjadi pada bantalan beton termodifikasi 7x400 mm, untuk kemudian selanjutnya akan berlaku lagi

sebagaimana pola umum yang terjadi yaitu mengalami penurunan tegangan lagi.

Karena pada nilai *displacement* rel untuk tanah *gravel* dipilih bantalan beton termodifikasi dimensi 400 x 2440 mm² dan nilai tegangan lentur tidak melebihi dari syarat (AREMA, 1999) maka tegangan lentur untuk tanah *gravel* digunakan bantalan beton termodifikasi dimensi 400 x 2440 mm².

Tegangan lentur rel pada tanah *dense sand* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17 Grafik pengaruh perbandingan tegangan lentur rel pada tanah dense sand terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi

Pada Gambar 17 menjelaskan grafik tegangan lentur rel pada tanah *dense sand* untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah 58,8514 MPa; 54,4914 MPa; 47,8757 MPa; 53,0114 MPa dan 49,4342 MPa.

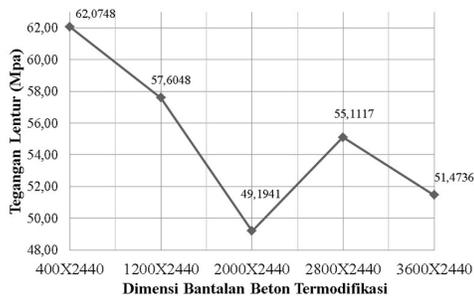
Sebagaimana tertera pada Gambar 19, seiring dengan bertambahnya lebar bantalan beton maka tegangan lentur maksimum yang terjadi pada rel juga turut mengalami penurunan. Modifikasi lebar sleeper yang dilakukan dengan pola dikalikan dengan bilangan ganjil (1, 3, 5, 7 dan 9) memberikan gambaran hasil dimana penurunan tegangan lentur pada rel terjadi pada 1, 3 dan 5 kali lebar 400 mm, kemudian mengalami kenaikan kembali pada bantalan beton termodifikasi 7 x 400 mm (2800 x 2440

mm²) dan kemudian kembali mengalami penurunan pada modifikasi sleeper 9 x 400 mm (3600 x 2440 mm²), tetapi nilai penurunan ketika mencapai dimensi 3600 x 2440 mm² masih lebih tinggi dari pada titik terendah penurunan tegangan lentur pada rel yang terjadi pada bantalan beton termodifikasi 5 x 400 mm (2000 x 2440 mm²). Kejadian tersebut terjadi serupa dengan tegangan lentur untuk tanah *gravel*.

Karena pada nilai *displacement* rel untuk tanah *dense sand* dipilih bantalan beton termodifikasi dimensi 1200 x 2440 mm² dan nilai tegangan lentur tidak melebihi dari syarat (AREMA,1999) maka tegangan lentur untuk tanah *dense sand* digunakan bantalan beton termodifikasi dimensi 1200 x 2440 mm².

Tegangan lentur rel pada tanah *medium dense* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 18.

Gambar 18 menjelaskan grafik tegangan lentur rel pada tanah *medium dense* untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah 62,0748 MPa; 57,6048 MPa; 49,1941 MPa; 55,1117 MPa dan 51,4736 MPa.



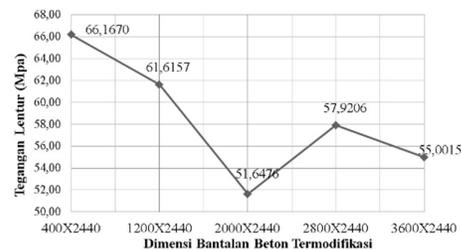
Gambar 18 Grafik pengaruh perbandingan tegangan lentur rel pada tanah *medium dense* terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi.

Sebagaimana tertera pada Gambar 20, seiring dengan bertambahnya lebar sleeper, maka tegangan lentur maksimum yang terjadi pada rel juga turut mengalami penurunan. Modifikasi lebar sleeper yang

dilakukan dengan pola dikalikan dengan bilangan ganjil (1, 3, 5, 7 dan 9) memberikan gambaran hasil dimana penurunan tegangan lentur pada rel terjadi pada 1, 3 dan 5 kali lebar 400 mm, kemudian mengalami kenaikan kembali pada bantalan beton termodifikasi 7 x 400 mm (2800 x 2440 mm²) dan kemudian kembali mengalami penurunan pada modifikasi sleeper 9 x 400 mm (3600 x 2440 mm²), tetapi nilai penurunan ketika mencapai dimensi 3600 x 2440 mm² masih lebih tinggi dari pada titik terendah penurunan tegangan lentur pada rel yang terjadi pada bantalan beton termodifikasi 5 x 400 mm (2000 x 2440 mm²). Kejadian tersebut terjadi serupa dengan tegangan lentur untuk tanah *dense sand*.

Karena pada nilai *displacement* rel untuk tanah *medium dense* dipilih bantalan beton termodifikasi dimensi 2000 x 2440 mm² dan nilai tegangan lentur tidak melebihi dari syarat (AREMA,1999) maka tegangan lentur untuk tanah *dense sand* digunakan bantalan beton termodifikasi dimensi 2000 x 2440 mm².

Tegangan lentur rel pada tanah *silty medium dense* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 19.



Gambar 19 Grafik pengaruh perbandingan tegangan lentur rel pada tanah *silty medium dense* terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi.

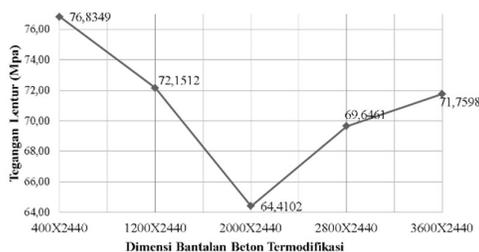
Gambar 19 menjelaskan grafik tegangan lentur rel pada tanah *silty medium dense* untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah

66,1670 MPa; 61,6157 MPa; 51,6476 MPa; 57,9206 MPa dan 55,0015 MPa.

Sebagaimana tertera pada Gambar 21, seiring dengan bertambahnya lebar sleeper, maka tegangan lentur maksimum yang terjadi pada rel juga turut mengalami penurunan. Modifikasi lebar sleeper yang dilakukan dengan pola dikalikan dengan bilangan ganjil (1, 3, 5, 7 dan 9) memberikan gambaran hasil dimana penurunan tegangan lentur pada rel terjadi pada 1, 3 dan 5 kali lebar 400 mm, kemudian mengalami kenaikan kembali pada bantalan beton termodifikasi 7 x 400 mm (2800 x 2440 mm²) dan kemudian kembali mengalami penurunan pada modifikasi sleeper 9 x 400 mm (3600 x 2440 mm²), tetapi nilai penurunan ketika mencapai dimensi 3600 x 2440 mm² masih lebih tinggi dari pada titik terendah penurunan tegangan lentur pada rel yang terjadi pada bantalan beton termodifikasi 5 x 400 mm (2000 x 2440 mm²). Kejadian tersebut terjadi serupa dengan tegangan lentur untuk tanah *medium dense*.

Karena pada nilai *displacement* rel untuk tanah *silty medium dense* dipilih bantalan beton termodifikasi dimensi 2800 x 2440 mm² dan nilai tegangan lentur tidak melebihi dari syarat (AREMA,1999) maka tegangan lentur untuk tanah *silty medium mdense sand* digunakan bantalan beton termodifikasi dimensi 2800 x 2440 mm².

Tegangan lentur rel pada tanah *loose sand* untuk variasi dimensi bantalan beton termodifikasi ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20 Grafik pengaruh perbandingan tegangan lentur rel pada tanah *loose sand* terhadap dimensi bantalan beton termodifikasi.

Tegangan lentur rel pada tanah gravel untuk bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm², 1200 x 2440 mm², 2000 x 2440 mm², 2800 x 2440 mm² dan 3600 x 2440 mm² secara berurutan adalah 76,8349 MPa; 72,1512 MPa; 64,4102 MPa; 69,6461 MPa dan 71,7598 MPa.

Sebagaimana tertera pada Gambar 20, seiring dengan bertambahnya lebar sleeper, maka tegangan lentur maksimum yang terjadi pada rel juga turut mengalami penurunan. Modifikasi lebar sleeper yang dilakukan dengan pola dikalikan dengan bilangan ganjil (1, 3, 5, 7 dan 9) memberikan gambaran hasil dimana penurunan tegangan lentur pada rel terjadi pada 1, 3 dan 5 kali lebar 400 mm, kemudian mengalami kenaikan kembali pada bantalan beton termodifikasi 7 x 400 mm (2800 x 2440 mm²) dan kemudian kembali mengalami penurunan pada modifikasi sleeper 9 x 400 mm (3600 x 2440 mm²), tetapi nilai penurunan ketika mencapai dimensi 3600 x 2440 mm² masih lebih tinggi dari pada titik terendah penurunan tegangan lentur pada rel yang terjadi pada bantalan beton termodifikasi 5 x 400 mm (2000 x 2440 mm²). Kejadian tersebut terjadi serupa dengan tegangan lentur untuk tanah *silty medium dense*.

Karena pada nilai *displacement* rel untuk tanah *loose sand* tidak ada yang kurang dari syarat (AREMA, 1999) walaupun nilai tegangan lentur tidak melebihi dari syarat (AREMA, 1999) maka tegangan lentur untuk tanah *loose sand* tidak dapat menggunakan bantalan beton termodifikasi *non-ballasted*.

KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan pada subbab tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut ini.

1. Untuk tanah *gravel* dapat menggunakan bantalan beton termodifikasi dengan dimensi 400 x 2440 mm² dengan *displacement* rel sebesar -1,0197 mm dan tegangan lentur rel sebesar 56,5554 MPa.
2. Untuk tanah *dense sand* dapat menggunakan bantalan beton

- termodifikasi berdimensi 1200 x 2440 mm² dengan *displacement* rel sebesar -1,0630 mm dan tegangan lentur rel sebesar 54,4914 MPa.
3. Untuk tanah *medium dense* dapat menggunakan bantalan beton termodifikasi berdimensi 2000 x 2440 mm² dengan *displacement* rel sebesar -1,5268 mm dan tegangan lentur rel sebesar 49,1941 MPa.
 4. Untuk tanah *silty medium dense* dapat menggunakan bantalan beton termodifikasi berdimensi 2800 x 2440 mm² dengan *displacement* rel sebesar -2,267626 mm dan tegangan lentur rel sebesar 57,9206 MPa.
 5. Untuk tanah *loose sand* bantalan beton termodifikasi tidak dapat digunakan karena *displacement* rel bantalan beton termodifikasi pada tanah *loose sand* tidak mendekati nilai *displacement* rel bantalan beton 400 x 2440 mm² untuk tanah *gravel* sebesar -1,0197 mm dan syarat dari AREMA nilai *displacement* rel kurang dari 6 mm.

REFRENSI

- Aly, M.I., El-Shabrawy, M., Gendy, M. E., Turk, A. A., (2017). “*Analysis of Ballastless Railway Track Structures Over Soft Clays*”. Malaysian Journal of Civil Engineering 29(2):145-156 (2017).
- AREMA.(1999). Voleme 2, Chapter 8, Part 27, Manual of Railway Engineering, American Railway and Maintenance of Way Association. Landover, MD. USA
- Bowles, J. E. (1991). “*Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah - (Mekanika Tanah)*”. Jakarta: PT. Erlangga.
- Ministry of Railway of the People’s Republic of China. (2009). “*Code for Design-speed Railway*”. TB10621-2009.
- Eveld, C. (2001). “*Modern Railway Track*”. Second Edition. Delft University of Technology.
- Kementrian Perhubungan Republik Indonesia, “*Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*”. No. PM 60 Tahun 2012.
- Kementrian Perhubungan Republik Indonesia. (2011). “*Rencana Induk Perkereta Apian Nasional (RIPNas)*”. Jakarta Pusat.
- Madhkhan, M., Entezam, M., and Torki, E. M., (2011). “*Mechanical Properties of Precast Reinforced Concrete Slab tracks on Non-Ballasted Foundations*”. Sharif University of Technology, Scientia Iranica.
- Matias S. (2015). “*Numerical Modeling and Design of Slab Tracks Comparison with Ballasted Tracks*”. Instituto Superior Técnico, University of Lisbon Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal.
- Michas, G., (2012). “*Slab Track Systems for High-Speed Railways*”. KTH Architecture and the Built Environment.
- Riessberger K. (2001). “*Frame-sleeper upgrade ballast-track*”. WCRK Köln 2001.