



TESIS - RC185401

PENGARUH PARAMETER TRACK QUALITY INDEKS (TQI) TERHADAP PERILAKU BANTALAN BETON

WAWARISA ALNU FISTCAR
NRP.03111850080001

DOSEN KONSULTASI
Ir. Hera Widyastuti, M.T., Ph.D
Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK DAN MANAJEMEN JALAN REL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020



TESIS - RC185401

**PENGARUH PARAMETER TRACK QUALITY INDEKS (TQI)
TERHADAP PERILAKU BANTALAN BETON**

**WAWARISA ALNU FISTCAR
NRP.03111850080001**

**DOSEN KONSULTASI
Ir. Hera Widyastuti, M.T., Ph.D
Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK DAN MANAJEMEN JALAN REL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020**

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN
TESIS**

Tesis Ini Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Magister Teknik (M.T)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

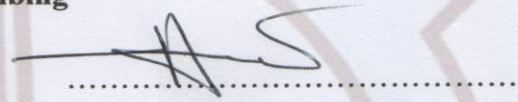
**Wawarisa Alnu Fistcar
NRP.03111850080001**

Tanggal Ujian : 13 Januari 2020

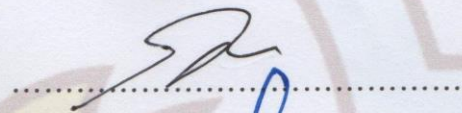
Periode Wisuda : Maret 2020

**Disetujui oleh :
Pembimbing**

1. **Ir. Hera Widyastuti, M.T., Ph.D**
NIP : 196008281987012001

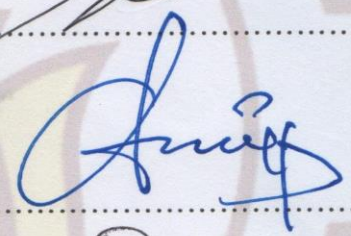


2. **Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D**
NIP : 198004302005011002

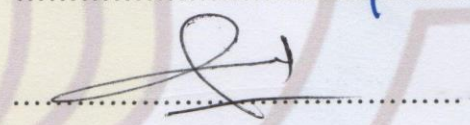


Penguji :

1. **Dr. Catur Arif Prastyanto, S.T., M.Eng**
NIP : 197007081998021001



2. **Dr. Machsus, S.T., M.T**
NIP : 197309142005011002



Kepala Departemen Teknik Sipil

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan (FTSPK)



Dr. techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc
NIP. : 197212021998021001

“Halaman Sengaja Dikосongkan”

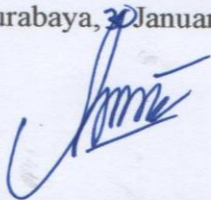
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

Tesis yang berjudul: **“Pengaruh Parameter Track Quality Indeks (TQI) Terhadap Perilaku Bantalan Beton”** ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya/tulis untuk memperoleh gelar akademik, maupun karya ilmiah/tulis yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tulis orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah tesis maupun daftar pustaka.

Apabila ternyata ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur plagiasi di dalam naskah **tesis** ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan akademik ITS dan/atau perundang-undangan yang berlaku.

Surabaya, 30 Januari 2020



Wawarisa Alnu Fistcar

NRP: 03111850080001

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

PENGARUH PARAMETER TRACK QUALITY INDEKS (TQI) TERHADAP PERILAKU BANTALAN BETON

Nama Mahasiswa : Wawarisa Alnu Fistcar
NRP : 03111850080001
Jurusan : S2 Teknik dan Manajemen Jalan Rel
Dosen Konsultasi :1. Ir. Hera Widyastuti, MT., Ph.D
2. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D

Abstrak

Untuk mengatasi pergerakan pertumbuhan lalu lintas jaringan kereta api di Indonesia khususnya di Jalur Surabaya - Mojokerto (Km 17+ 000 - 57+ 000), dimana jalur tersebut merupakan jalur tersibuk di lintas selatan Pulau Jawa. Hal tersebut dapat mempengaruhi kondisi geometri lintasan yang menyebabkan terjadinya penurunan kualitas rel. Kontrol kualitas jalan rel mulai dikembangkan di berbagai negara dengan beberapa pendekatan dan metodologi yang hanya terkonsentrasi pada satu komponen jalan rel, hingga paling komprehensif yang merangkul semua faktor utama dalam penurunan kualitas jalan rel. Evaluasi kualitas jalan rel di Indonesia hanya dihitung dengan menggunakan standar perkeretaapian Indonesia yaitu track kualitas indeks (TQI). Dengan demikian, dibutuhkan penelitian untuk mengetahui semua faktor utama penurunan jalan rel.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh ketidakstabilan geometri terhadap ketahanan struktur jalan rel yang difokuskan pada struktur atas jalan rel. Dalam mengkaji nilai penyimpangan geometri lintasan menggunakan perhitungan standar deviasi pada setiap parameter pengukuran, yang selanjutnya diolah menjadi nilai track kualitas indeks (TQI). Data parameter pengukuran di dapatkan dari kereta ukur Galunggung untuk tahun 2018 dan kereta ukur EM-120 untuk tahun 2019. Perbedaan hasil perhitungan nilai kualitas jalan rel (TQI) dengan tahun yang berbeda, dijadikan patokan untuk penentuan lokasi survey manual dengan menggunakan alat ukur matisa dan meter listring. Hasil pengukuran geometri dilapangan dimodelkan dengan program bantu perhitungan kekuatan struktural. Simulasi model dengan melakukan analisis menggunakan *Finite Elemen Method (FEM)* terhadap beberapa kondisi sesuai dengan kategori penyimpangan geometri (TQI).

Hasil penelitian ini didapatkan bahwa, propertis material bantalan, dengan kuat tekan beton (F_c') 54 MPa dan kuat tarik *wire prestressed* (F_y) 1400 MPa, tipe rel adalah R.54, serta properti balas sesuai PM.60 tahun 2012. Beban aksial yang bekerja sebesar 16.241 Kg, Dari hasil analisa pada nilai penyimpangan geometri kategori 3 ($25 < TQI < 40$), didapatkan spesimen bantalan (B4) mengalami tegangan tekan 15.566 MPa dan tegangan tarik sebesar 5.178 MPa. Analisa kondisi tersebut, material beton tidak dapat menumpu gaya tarik yang dipersyaratkan yaitu, 4.632 MPa ($0.32 F_c^{0.67}$). Demikian terjadi juga, pada kondisi penyimpangan geometri kategori 4 ($TQI > 40$).

Kata Kunci : Track kualitas index (TQI), Tegangan tekan, Tegangan Tarik, Bantalan Beton, Finite Elemen Analisis (FEM).

“Halaman Sengaja Dikосongkan”

THE EFFECT OF TRACK QUALITY INDEX (TQI) PARAMETERS ON BEHAVIOR CONCRETE SLEEPER

Student Name : Wawarisa Alnu Fistcar
NRP : 03111850080001
Department : Master Program of Railway Management and Engineering
Supervisor : 1. Ir. Hera Widyastuti, MT., Ph.D
2. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D

Abstract

To overcome the movement of railways traffic growth in Indonesia, especially in the Surabaya - Mojokerto Line (Km 17+ 000 - 57+ 000), where the line is the busiest route in the southern crossing of the island of Java. This can affect the geometry conditions of the track which causes a decrease in the quality of the rail. Railway quality control has begun to be developed in various countries with several approaches and methodologies that are only concentrated on one component of the railway, to the most comprehensive one that embraces all the main factors in the decline in railway quality. Evaluation of the quality railways in Indonesia is only calculated using the Indonesian railways standard namely track quality index (TQI). Thus, research is needed to find out all the main factors of decline in railway tracks.

There are many factors that affect the decline in the quality of the railways including the stability of the geometry, the resistance of the upper structure and the lower structure of the railways. This research was conducted to determine the effect of geometry instability on the resistance railways structure that is focused on the structure of the railways. In assessing the geometry deviation value of the path using the calculation of the standard deviation each measurement parameter which is then processed into a track quality indexes (TQI). Measurement parameter data is obtained from Galunggung measuring train for 2018 and EM-120 measuring train for 2019. Differences in the calculation of the value of railways quality (TQI) with different years are used as a benchmark for determining the location of a manual survey using a measurement tool and meter listring. The results of field geometry measurements are modeled with a program to help calculate structural strength. Model simulation by analyzing using Finite Element Method (FEM) for several conditions according to the geometry deviation category (TQI).

The results of this study found that, concrete sleeper material properties, with concrete compressive (F_c) 54 MPa and 1400 MPa prestressed wire strength (F_y), rail type is R.54 and ballast property according to PM.60 of 2012. The axial load is working at 16,241 kg, From the analysis of the geometric deviation value of category 3 ($25 < TQI < 40$), it was found that concrete sleeper specimen (B4) experienced compressive stress of 15,566 MPa and tensile stress of 5,178 MPa. Analysis of these conditions, concrete bearings can not rely on the required tensile force that is, 4,632 MPa ($0.32 F_c$).

Keywords: Track Quality Index (TQI), Concrete Sleeper, Compressive Stress, Tensile Stress, Railways, Finite Element Method (FEM).

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR ISI

COVER	I
LEMBAR PENGESAHAN	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
ABSTRAK	VII
<i>ABSTRACT</i>	IX
DAFTAR ISI	XI
DATAR TABEL	XV
DAFTAR GAMBAR	XVII
KATA PENGANTAR	XXIII
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Tujuan Penelitian	7
1.4. Manfaat Penelitian	8
1.5. Pembatasan Masalah	8
1.6. Lokasi Penelitian	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1. Umum	11
2.2. Studi Terdahulu	11
2.3. Track Quality Indeks	12
2.3.1. Kereta Ukur Jalan Rel	12
2.3.1.1. Bagian-bagian Kereta	13

2.3.1.2. Pelaksanaan Pengukuran	15
2.3.1.3. Hasil Pengukuran	16
2.3.2. Parameter Pengukuran.....	18
2.3.3. Kondisi Jalan Rel	19
2.4. Beban Angkut Tahunan (<i>Passing Tonnage</i>).....	22
2.5. Rel	23
2.5.1. Bentuk dan Dimensi Rel di Indonesia.....	24
2.6. Bantalan	26
2.7. Pembebanan.....	29
2.7.1. Beban gandar.....	31
2.7.2. Kecepatan	32
2.7.3. Gaya Vertikal	33
2.7.4. Gaya Horisontal (Lateral).....	34
2.7.5. Gaya Horisontal (Longitudinal)	36
2.8. Penelitian Eksperimental Bantalan Beton.	38
2.9. Permodelan Numerik Bantalan Beton Prestressed	39
2.10. <i>Constitutive Material Equation</i>	41
2.11. <i>Concrete damage plasticity</i>	42
BAB 3 METODOLOGI STUDI	47
3.1. Umum	47
3.2. Diagram Alir Penelitian.....	47
3.3. Langkah Penelitian	50
3.3.1. Tahap Persiapan	50
3.3.2. Tahap Identifikasi Masalah	51
3.3.3. Studi Pustaka	51

3.3.4. Pengumpulan Data	52
3.3.4.1. Data Primer	52
3.3.4.2. Data Sekunder	52
3.3.5. Analisis Data.....	53
3.3.5.1. Analisis Setiap Parameter Kerusakan	54
3.3.5.2. Perhitungan Track Quality Indeks (TQI)	55
3.3.5.3. Pengukuran Kondisi Eksisting	56
3.3.5.4. Penentuan Kelas Jalan Berdasarkan Daya Angkut Tahunan (<i>Passing Tonnage</i>).....	57
3.3.5.5. Perhitungan Perilaku struktur Bantalan Beton Pada Kondisi Ideal (Kategori Baik Sekali)	60
3.3.5.6. Validasi Hitungan Teoritis Dengan Penelitian Sebelumnya	70
3.3.5.7. Permodelan Bantalan Beton type N-67.....	71
3.3.5.8. Validasi Permodelan Pada Kondisi Ideal.....	77
3.3.5.9. Permodelan Bantalan Beton type N-67 Dengan Hasil TQI Sesuai Kategori Kerusakan.....	77
3.3.6. Kesimpulan dan Saran.....	79
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	81
4.1. Umum	81
4.2. Pengolahan Data	81
4.2.1. Kereta Ukur EM-120.....	82
4.2.2. Kereta Ukur Galunggung	85
4.2.3. Perhitungan Nilai Track Quality Indeks (TQI).	109
4.3. Pengukuran Parameter TQI Manual	115
4.4. Perhitungan Kelas Jalan Berdasarkan Daya Angkut Tahunan	122

4.4.1. Perhitungan beban eksisting.....	131
4.5. Pemodelan Dengan Program Bantu.....	132
4.5.1. Material Propertis.....	133
4.5.2. Permodelan Bantalan N-67	136
4.5.3. Pembebanan dan Perletakan.....	136
4.5.4. Study parameter beton akibat beban tekan.....	137
4.5.5. Study parameter beton akibat beban tarik.....	141
4.5.6. Study parameter tarik tulangan	143
4.5.7. Validasi permodelan dengan penelitian sebelumnya	144
4.5.8. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi 1 (TQI < 15)	145
4.5.9. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi 2 (15 < TQI < 25).....	151
4.5.10. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi 3 (25 < TQI < 40).....	153
4.5.11. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi 4 (TQI > 40)	156
4.5.12. Rekapitulasi Hasil	158
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	169
5.1. Kesimpulan.....	169
5.2. Saran	170
DAFTAR PUSTAKA	171
BIODATA PENULIS	173

DATAR TABEL

Tabel 2.1 Kategori Kelas Berdasar Kecepatan Maksimum.....	20
Tabel 2.2 Nilai Toleransi berdasar Kelas Jalan.....	20
Tabel 2.3 Nilai Toleransi Yang Diizinkan dan Jenis Perbaikan Track	20
Tabel 2.4 Standar Nilai Track Quality Index (TQI).....	21
Tabel 2.5 Batasan (<i>thresholds</i>) Nilai Kerusakan Per Kategori	21
Tabel 2.6 Kelas Jalan.....	23
Tabel 2.7 Tipe Rel di Indonesia	25
Tabel 2.8 Panjang Minimum Rel Panjang.....	26
Tabel 2.9 Standar Gandar.....	31
Tabel 2.10 Data Mutu Material	39
Tabel 2.11 Tabulasi Penelitian Terdahulu.....	43
Tabel 2.12 Tabulasi Penelitian Terdahulu (Lanjutan 1).....	43
Tabel 3.1 Contoh Output Kereta Ukur	53
Tabel 3.2 Batasan (<i>thresholds</i>) Nilai Kerusakan per Kategori	55
Tabel 3.3 Daftar kereta yang melintas.....	58
Tabel 3.4 Susunan gerbong	58
Tabel 3.5 Beban Gerbong.....	58
Tabel 3.6 Tegangan Ijin.....	60
Tabel 3.7 Validasi Hitungan Teoritis	71
Tabel 4.1 Ouput nilai track quality indeks (TQI) dengan <i>software</i> EM-120	83
Tabel 4.2 Data bacaan KA Ukur pada KM.18 dalam 1 segmen (200 meter).....	87
Tabel 4.3 Contoh Perhitungan Standar Deviasi dengan Formula Ms. Excel ...	110
Tabel 4.4 Contoh Perhitungan Standar Deviasi dengan Secara Manual.....	111
Tabel 4.5 Nilai standar deviasi tiap parameter kerusakan KM 18+000 -18+200.....	112
Tabel 4.6 Hasil Survey Pendahuluan KM 18 + 000 -19 + 000	116
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Manual 200 m'	119
Tabel 4.8 Hasil analisa track quality indeks pengukuran manual	119
Tabel 4.9 Daftar Kereta Barang yang melintas Surabaya – Mojokerto	122
Tabel 4.10 Daftar Kereta Penumpang yang melintas Surabaya – Mojokerto..	122
Tabel 4.11 Stamformasi kereta penumpang	124
Tabel 4.12 Stamformasi kereta barang.....	124
Tabel 4.13 Beban gerbong penumpang yang melintas.....	125
Tabel 4.14 Beban gerbong barang yang melintas	126
Tabel 4.15 Beban Lintas Harian Kereta Api Penumpang Lintas Surabaya - Mojokerto (Gapeka, 2018).....	123
Tabel 4.16 Beban Lintas Harian Kereta Api Barang Lintas Surabaya - Mojokerto (Gapeka 2018).....	125

Tabel 4.17 Beban yang bekerja pada bantalan	132
Tabel 4.18 Properti Bantalan Beton	135
Tabel 4.19 Luas elemen tulangan	136
Tabel 4.20 Nilai <i>Spring Stiffness</i> Tanah	146
Tabel 4.21 Rekapitulasi kondisi bantalan beton N-67 pada kondisi TQI 1 (satu)	161
Tabel 4.22 Rekapitulasi kondisi bantalan beton N-67 pada kondisi TQI 2 (dua)	162
Tabel 4.23 Rekapitulasi kondisi bantalan beton N-67 pada kondisi TQI 3 (tiga)	163
Tabel 4.24 Rekapitulasi kondisi bantalan beton N-67 pada kondisi TQI 4 (empat)	164

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Panjang lintas (PT.Kereta Api Indonesia, 2017)	9
Gambar 1.2 Lokasi penelitian.....	10
Gambar 2.1 KA.Ukur EM-120 (PT.Kereta Api Indonesia, 2019)	17
Gambar 2.2 KA.Galunggung.....	18
Gambar 2.3 Bagian komponen rel (Esveld, 2001)	25
Gambar 2.4 Kemiringan ($\tan \alpha$) 1 : 40 (Esveld, 2001).....	26
Gambar 2.5 Bantalan baja (Esveld, 2001).....	28
Gambar 2.6 Pola Distribusi Pada Struktur Jalan Rel (Esveld, 2001)	30
Gambar 2.7 Beban Yang Bekerja Pada Lintasan (Esveld, 2001).....	33
Gambar 2.8 Gaya Horizontal (Esveld, 2001)	35
Gambar 2.9 Distribusi Tekanan Temperatur CWR (Esveld, 2001)	37
Gambar 2.10 Pola Retak Momen Dudukan B (Puspasari et al., 2016)	38
Gambar 2.11 Sketsa Pola Retak pada Pengujian Momen Dudukan B (Puspasari et al., 2016).....	38
Gambar 2.12 Monoblok tipe B70 (Rezaie et al., 2016).....	39
Gambar 2.13 Permodelan Monoblock dengan ABAQUS (Kaewunruen et al., 2016).....	40
Gambar 2.14 Strain – stress beton tekan $F_c = 60$ MPa (Rezaie et al., 2016).....	41
Gambar 2.15 Strain – stress beton tarik $F_c = 60$ MPa (Rezaie et al., 2016).....	41
Gambar 2.16 Perilaku beton dengan gaya axial tekan dan tarik (Saatcioglu & Razvi, 1999).....	43
Gambar 2.17 Damage parameter (Saatcioglu & Razvi, 1999).....	43
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Penelitian	49
Gambar 3.2 Segmentasi Perhitungan Nilai TQI per 200 m (Kurniawan, 2015)	55
Gambar 3.3 Alat Ukur Manual.....	57
Gambar 3.4 Cara Kerja Alat Ukur Manual.....	57
Gambar 3.5 Dimensi Bantalan Beton N-67 (PT.Wijaya Karya Beton, 2016)...	60

Gambar 3.6 Dimensi Rel (Peraturan Dinas No.10, 1986)	62
Gambar 3.7 Letak beban yang bekerja	65
Gambar 3.8 Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal	67
Gambar 3.9 Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Efektif	68
Gambar 3.10 Input data Geometri pada Abaqus	72
Gambar 3.11 Sketsa Bantalan N-67 C3D8R	72
Gambar 3.12 Sketsa rel type R.54 T2D3 pada Abaqus	73
Gambar 3.13 Input Data Material pada Abaqus	73
Gambar 3.14 Model numerik <i>assembly</i> bantalan beton N-67 dan Rel type 54 pada Abaqus	74
Gambar 3.15 Input <i>Step</i> pada Abaqus	75
Gambar 3.16 Input <i>Constraints</i> pada Abaqus	76
Gambar 3.17 <i>Meshing Model</i> pada Abaqus	76
Gambar 3.18 <i>Data Check</i> pada Abaqus	77
Gambar 3.19 Letak beban akibat penyimpangan horizontal (lebar spoor dan listringan)	78
Gambar 3.20 Letak beban akibat penyimpangan vertikal (pertinggian dan angkatan)	78
Gambar 4.1 Notifikasi eror membuka aplikasi format pnr	82
Gambar 4.2 Nilai track quality indeks (TQI) dengan EM-120)	85
Gambar 4.3 Data ukur KA.Galunggung format CSV	86
Gambar 4.4 Arah lendutan pada parameter Listringan dan Angkatan	108
Gambar 4.5 Arah lendutan pada parameter Angkatan (+) dan Angkatan (-) ..	108
Gambar 4.6 Nilai track quality indeks (TQI) dengan perhitungan standar deviasi tahun 2018	114
Gambar 4.7 Grafik <i>Track Quality Indeks</i> (TQI) 2019 dengan EM-120, dan 2018 dengan perhitungan standar deviasi output KA Galunggung	115
Gambar 4.8 Pengukuran 4 parameter TQI manual	117
Gambar 4.9 Ilustrasi pembacaan lebar spoor	118
Gambar 4.10 Ilustrasi pembacaan pertinggian	118

Gambar 4.11 Hasil nilai track quality indeks dengan EM-120 dan hasil survey	121
Gambar 4.12 Ilustrasi beban pada segmen 3 meter (Profilidis, 2006)	132
Gambar 4.13 Permodelan per 3m sesuai geometri	132
Gambar 4.14 Kurva tegangan – regangan model konstutif tekan beton $F_c' = 54 \text{ Mpa}$	134
Gambar 4.15 Kurva tegangan – regangan model konstutif tarik beton.....	134
Gambar 4.16 Kurva tegangan – regangan model konstutif tarik tulangan $F_y = 1400 \text{ MPa}$	135
Gambar 4.17 Permodelan bantalan beton tipe N-67.....	136
Gambar 4.18 Model beton akibat beban tekan (<i>Bondary condition</i> tekan).....	137
Gambar 4.19 Kurva <i>inelastic strain-yield compressive stress</i> F_c 54 MPa.	138
Gambar 4.20 Kurva <i>inelastic strain - damage parameter compressive stress</i> F_c 54 MPa.....	139
Gambar 4.21 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan menggunakan nilai viskositas 0.001	140
Gambar 4.22 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan input CDP dan tidak dengan CDP	140
Gambar 4.23 Model beton akibat beban Tarik (<i>Bondary condition</i>)	141
Gambar 4.24 Kurva <i>inelastic strain-yield tensile stress</i> F_c 54 MPa.	141
Gambar 4.25 Kurva <i>inelastic strain-damage parameter</i> beton tarik F_c 54 Mpa	142
Gambar 4.26 Kurva tegangan-regangan beton akibat tarik menggunakan persamaan Attard dan Setunge (1996).....	143
Gambar 4.27 Kurva tegangan-regangan tulangan kuat leleh 1400 MPa akibat tarik menggunakan persamaan Mander (1989).....	144
Gambar 4.28 Tegangan pada rel type R.54	145
Gambar 4.29 Pembebanan dan tumpuan pada segmen 3 meter	145
Gambar 4.30 Pembebanan dan tumpuan pada 1 Bantalan	146
Gambar 4.31 Momen akibat penyimpangan parameter TQI.....	147
Gambar 4.32 Lateral pada ujung kepala rel.....	148
Gambar 4.33 Input Spring Stiffness pada ABAQUS.	148

Gambar 4.34 Perilaku beton pada kondisi tanah bagus (<i>sand dense</i>) dengan penyimpangan TQI 1.....	149
Gambar 4.35 Perilaku beton pada kondisi tanah sedang (<i>silty sand</i>) dengan penyimpangan TQI 1.....	150
Gambar 4.36 Perilaku beton pada kondisi tanah jelek (<i>clay</i>) dengan penyimpangan TQI 1.....	151
Gambar 4.37 Perilaku beton pada kondisi tanah bagus (<i>sand dense</i>) dengan penyimpangan TQI 2.....	152
Gambar 4.38 Perilaku beton pada kondisi tanah sedang (<i>silty sand</i>) dengan penyimpangan TQI 2.....	152
Gambar 4.39 Perilaku beton pada kondisi tanah jelek (<i>clay</i>) dengan penyimpangan TQI 2.....	153
Gambar 4.40 Perilaku beton pada kondisi tanah bagus (<i>sand dense</i>) dengan penyimpangan TQI 3.....	154
Gambar 4.41 Perilaku beton pada kondisi tanah sedang (<i>silty sand</i>) dengan penyimpangan TQI 3.....	155
Gambar 4.42 Perilaku beton pada kondisi tanah jelek (<i>clay</i>) dengan penyimpangan TQI 3.....	155
Gambar 4.43 Perilaku beton pada kondisi tanah bagus (<i>sand dense</i>) dengan penyimpangan TQI 4.....	156
Gambar 4.44 Perilaku beton pada kondisi tanah sedang (<i>silty sand</i>) dengan penyimpangan TQI 4.....	157
Gambar 4.45 Perilaku beton pada kondisi tanah jelek (<i>clay</i>) dengan penyimpangan TQI 4.....	157
Gambar 4.46 Permodelan dengan nilai TQI = 52.5 mm.....	158
Gambar 4.47 Tegangan tarik (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 1 (satu).....	165
Gambar 4.48 Tegangan tekan (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 1 (satu).....	165
Gambar 4.49 Tegangan tarik (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 2 (dua).....	166

Gambar 4.50 Tegangan tekan (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 2 (dua).....	166
Gambar 4.51 Tegangan tarik (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 3 (tiga).	167
Gambar 4.52 Tegangan tekan (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 3 (tiga).	167
Gambar 4.53 Tegangan tarik (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 4 (empat).....	168
Gambar 4.54 Tegangan tekan (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 4 (empat).....	168

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Dengan mengucapkan puji syukur kepada Allah SWT atas segala karunia, rahmat, dan ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul "*Pengaruh Parameter Track Quality Indeks (TQI) Terhadap Perilaku Bantalan Beton*".

Dalam proses penyusunan tesis, penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Orang tua yang telah memberi dukungan, baik secara moril materiil yang tak terhingga sehingga penulis bisa menyelesaikan tesis
2. Ibu Ir. Hera Widyastuti, MT., Ph.D selaku dosen konsultasi, serta dosen wali kelas Teknik Manajemen Jalan Rel angkatan 2018 yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi dalam penyusunan tesis.
3. Bapak Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen konsultasi bidang struktur yang telah memberikan bimbingan, arahan dan motivasinya
4. Bapak Dr. Catur Arif Prastyanto, S.T., M.Eng selaku dosen konsultasi bidang material dan geometri yang telah membimbing dengan penuh kesabaran.
5. Bapak Dr. Machsus, S.T., M.T selaku dosen penguji yang memberikan masukan dan koreksi demi kesempurnaan tesis ini.
6. Bapak Dr.techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc selaku Kepala Departemen Teknik Sipil dan Bapak Ir. I Putu Artama Wiguna, M.T., Ph.D selaku Ketua Program Pasca Sarjana Departemen Teknik Sipil FTSPK – ITS yang telah banyak membantu selama menjalani Pendidikan jenjang S2 dan dalam penyelesaian tesis ini.
7. Bapak Djunarko, Bapak Fuazi, Bapak Robin, Bapak Pras dan seluruh staf administrasi Departemen Teknik Sipil ITS yang telah membantu kelancaran penyelesaian tesis ini.

8. Bapak M. Januar Pratito, S.T selaku kepala Resor 8.13 Sepanjang terima kasih atas bimbingan dilapangan dan motivasinya.
9. Bapak Bambang Setiyo Prayitno selaku Manager Administrasi and Facility PT. Kereta Api Indonesia (Persero) yang memberikan ijin survey dan peminjaman data pengukuran kualitas jalan rel.
10. Bapak Taufik selaku Junior Manager Geometri Track and Bridge PT. Kereta Api Indonesia (Persero) yang membantu peminjaman data serta memberikan wawasan tentang teori pengukuran *Track Quality Indeks* (TQI).
11. Bapak Bony dan Sahabatku Panji Kurniawan, selaku karyawan PT. Kereta Api Indonesia (Persero), yang mensupport data serta memberikan semangat.
12. Anggih Frahanski, S.E, Welly Nawi Berlian S.T, Triwibowo, S.T, Raga Hidayat, S.T, Fajar Gede Prakoso, S.T., M.T dan Seluruh PPCP 71 PT. Wijaya Karya (Persero), yang sering direpotkan dengan pengumpulan data.
13. Teman – teman koloni pasukan kuda blok F.77 yang selalu memberikan support dalam penyelesaian tesis ini.
14. Teman-teman S-2 Prodi Teknik Manajemen Jalan Rel Departemen Teknik Sipil ITS 2018 lainnya, terima kasih atas semangat perjuangan yang telah diberikan.
15. Semua pihak terkait yang telah membantu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik demi sempurnanya penyusunan tulisan ini. Semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca dan semua pihak.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pulau Jawa merupakan salah satu Pulau dengan jaringan konektivitas perkeretapian terbesar di Indonesia dalam fungsi operasionalnya salah satunya yaitu jalur kereta api Surabaya – Mojokerto, jalur kereta api Surabaya - Mojokerto merupakan jalur utama di jalur rel kereta api lintas selatan Pulau Jawa . Jalur ini merupakan jalur kereta api dengan jadwal perjalanan tersibuk di Indonesia (Umbu et al., 2013). Hal tersebut dikarenakan jalur ini adalah jalur selatan yang menghubungkan Surabaya – Jogjakarta. Jalur ini sedang ada penambahan jalur ganda (*double track*) yang dikerjakan bertahap. Jalur Surabaya – Mojokerto adalah jalur yang belum dilakukan penambahan track yaitu tepatnya pada Resor 8.13 Sepanjang dan 8.14 Mojokerto (Survey pendahuluan). Jalur ini termasuk dalam wilayah Daerah Operasi VIII Surabaya. Surabaya adalah pusat ekonomi Jawa Timur dimana efektifitas infrastruktur transportasi sangat penting untuk menjaga pertumbuhan ekonomi (Ravitharan et al., 2017).

Peranan jalur kereta api adalah untuk memandu pergerakan atau perjalanan lokomotif, menanggung efek komprehensif dari kontribusi variabel lingkungan dan beban dari roda, mendistribusikan beban roda ke jalan, jembatan atau terowongan, menyediakan lintasan yang mulus untuk menjalankan roda, menjaga biaya operasi, keamanan perjalanan dan kenyamanan penumpang dalam kisaran yang diterima dan bantalan dalam kondisi baik (Berawi et al., 2010). Sedangkan menurut Rosyidi (2015), jalur kereta api merupakan suatu sistem struktur yang menghimpun komponen-komponennya seperti rel, bantalan, penambat dan lapisan fondasi serta tanah dasar secara terpadu dan disusun dalam sistem konstruksi dan analisis tertentu untuk dapat dilalui kereta api secara aman dan nyaman. Selain itu jalur kereta api juga bagian dari jaringan logistik, maka penulis perlu mengetahui tonase maksimum yang diijinkan dan batas kecepatan pada jaringan kereta api. Tonase tergantung pada infrastruktur jalur kereta api, sistem pemeliharaan dan pemantauan yang dipraktikkan oleh Kereta Api Indonesia (Ravitharan et al., 2017).

Infrastruktur jalan rel dibagi menjadi dua bagian struktur yang terdiri dari beberapa kumpulan komponen – komponen yaitu, struktur bagian atas dan struktur bagian bawah. Struktur jalan rel harus memenuhi beberapa persyaratan teknis yaitu kekakuan (*stiffness*), elastisitas (*elastic*), ketahanan terhadap deformasi tetap, stabilitas, dan kemudahan untuk pengaturan serta pemeliharaan (*adjustability*) (Lasisi and Attoh-Okine, 2018). Struktur jalan rel merupakan suatu konstruksi yang direncanakan sebagai prasarana atau infrastruktur perjalanan kereta api dan satu bagian yang berperan mempengaruhi kinerja operasional kereta api yang terdiri atas beberapa indikator, seperti keselamatan, ketepatan waktu, pelayanan, serta kenyamanan. Kinerja operasional kereta api yang terganggu akan menyebabkan kerugian, baik dari segi waktu, material, bahkan mengancam keselamatan penumpang. Agar semua itu tercapai maka harus dilakukan peningkatan keandalan kondisi dan analisa perbaikan jalan rel kereta api dengan metode pemeliharaan yang tepat sehingga kegagalan pada jalan rel dapat berkurang atau bahkan tidak terjadi.

Lalu lintas kereta api akan terus meningkat sesuai dengan perkembangan ekonomi. Karena kereta api adalah moda transportasi darat yang hampir bisa dipastikan ketepatan waktunya. Hal tersebut dapat mempengaruhi kondisi geometri lintasan yang menyebabkan terjadinya penurunan kualitas lintasan sehingga perlu suatu pemeliharaan untuk mengukur suatu kondisi dan kualitas lintasan. Terkait dengan hal ini, kecelakaan lalu lintas kereta api telah lama menjadi masalah sosial-ekonomi yang telah menyebabkan meningkatnya kekhawatiran masyarakat di seluruh dunia (Lasisi and Attoh-Okine, 2018). Perlu diadakannya peningkatan keandalan kondisi dan analisa perbaikan jalan rel kereta api dengan metode pemeliharaan yang tepat sehingga kegagalan pada jalan rel dapat berkurang atau bahkan tidak terjadi. Hal tersebut sangat mungkin terjadi bila struktur jalan rel yang lambat laun mengalami penurunan kualitas tidak dilakukan tindakan. Oleh karena itu, dilakukanlah pemeliharaan untuk mengontrol kinerja operasional kereta api. Namun pelaksanaan pemeliharaan sering terpengaruh dengan masalah biaya yang terbatas maupun terlambat dalam pencairannya, sehingga dana yang ada harus digunakan dengan bijak agar pengalokasiannya tepat sasaran (Aulia and Parikesit, 2017). Namun, industri kereta api mencoba meningkatkan produktivitas tim pemeliharaan mereka melalui kontrol yang lebih efektif terhadap kerusakan jalur.

Di berbagai negara cara mengontrol kualitas jalan rel dilakukan dengan beberapa pendekatan dan metodologi untuk mengevaluasi degradasi jalan rel untuk optimasi pemeliharaan jalan rel, telah dikembangkan selama beberapa tahun terakhir, dari model sederhana yang hanya terkonsentrasi pada satu komponen jalan rel individu hingga yang paling komprehensif yang merangkul semua faktor utama dalam penurunan kualitas lintasan.

Standar tata cara perawatan prasarana perkeretaapian di Indonesia diatur oleh Peraturan Menteri Perhubungan No. 32 tahun 2011. Prasarana perkeretaapian adalah jalur kereta api dimana, jalur tersebut terdiri atas rangkaian petak jalan rel yang meliputi ruang manfaat jalur kereta api, ruang milik jalur kereta api, dan ruang pengawasan jalur kereta api termasuk bagian atas dan bawahnya yang diperuntukkan bagi lalu lintas kereta api. Elemen terpenting dari perkeretaapian adalah jalan rel, diketahui jalan rel merupakan suatu kesatuan konstruksi yang terbuat dari baja, beton atau konstruksi lain yang terletak di permukaan, di bawah atau di atas tanah atau bergantung beserta perangkatnya yang mengarahkan jalannya kereta api. Jalan rel yang digunakan pada sistem perkeretaapian di Indonesia memiliki lebar sepur sebesar 1067 mm dan termasuk lebar sepur sempit. Rel pada jalan rel mempunyai fungsi sebagai pijakan menggelindingnya roda kereta api dan untuk meneruskan beban dari roda kereta api ke bantalan. Dalam hal ini diperlukan adanya suatu persyaratan untuk rel yang harus dipenuhi dari beberapa parameter untuk menciptakan suatu kondisi yang ideal bagi jalannya kereta api. Pengukuran kualitas jalan rel di Indonesia menggunakan dua tipe kereta ukur geometri yang digunakan, yaitu kereta ukur EM-120 dan kereta ukur HKPW U-76501 (Kurniawan, 2015). Hasil pengukuran dari kereta ukur adalah angka yang dapat memberikan informasi kualitas jalan rel yang dilewati pada suatu wilayah Daerah Operasi. Angka tersebut dibedakan menjadi 4 (empat) kategori yaitu, kategori baik sekali, baik, sedang dan jelek. Metode pengukuran ini disebut *Track Quality Index (TQI)*. *Track Quality Index (TQI)* terdiri dari 4 (empat) parameter pengukuran lebar spur, angkatan, listringan dan pertinggian. Selain parameter tersebut, selama pengukuran juga dicatat kecepatan operasional pengukuran. Pengambilan data ukur dilakukan secara kontinyu sepanjang segmen (200 m). Untuk angkatan, listringan dan pertinggian satu segmen mewakili panjang 40

meter. Sedangkan untuk lebar spur 1 (satu) segmen mewakili panjang 20 meter. Namun industri kereta api terus melakukan peningkatan dalam kontrol perawatan kerusakan jalur agar lebih efektif. Beberapa pendekatan dan metodologi untuk mengevaluasi degradasi *track* untuk optimasi pemeliharaan *track*, telah dikembangkan selama beberapa tahun terakhir, dari model sederhana yang hanya terkonsentrasi pada satu komponen *track* individu hingga yang paling komprehensif yang merangkul semua faktor utama dalam penurunan kualitas lintasan. Ada dua aspek untuk memprediksi pemeliharaan *track*, yaitu degradasi struktural dan dagrasi geometri. Pada aspek pertama, melacak model degradasi didasarkan pada pertumbuhan kondisi struktur fisik. Parameter yang mempengaruhi degradasi *track*, termasuk *tonase passage*, kecepatan kereta api, karakteristik balas, jenis rel, jenis bantalan dll (Berawi et al., 2010). Sebaliknya, melacak model degradasi dalam aspek kedua menggunakan parameter geometri sebagai kriteria degradasi utama harus dilakukan. Karena kondisi geometri lintasan memainkan peran penting dalam memastikan keselamatan perjalanan kereta dan kenyamanan penumpang (Aulia and Parikesit, 2017).

Penggantian komponen jalan rel biasanya diukur dari komponen terpasang dan umur layanan. Bantalan dan balas sudah memiliki ketetapan umur layan pada masing-masing jenisnya. Banyaknya penggantian komponen bergantung dengan jumlah komponen yang terpasang di lapangan. Berbeda dengan rel yang meskipun dengan jenis rel yang sama, umur layannya belum tentu sama. Hal ini dikarenakan oleh lamanya umur layan rel yang dipengaruhi beberapa faktor, yaitu nilai koefisien keausan rel yang berhubungan dengan lengkung tempat dimana kerap terjadi keausan (Liu et al., 2015), daya angkut lalu lintas yang menggambarkan frekuensi gesekan antar roda kereta api dengan rel, dan jenis rel itu sendiri yang berkaitan (Aulia and Parikesit, 2017). Dari pernyataan tersebut umur layanan dan kekuatan ijin dari rel sendiri dipengaruhi oleh beberapa aspek dan tidak bisa diprediksi. Pembebanan dan pergerakan kereta api di atas struktur jalan rel menimbulkan berbagai gaya pada rel. Gaya-gaya tersebut diantaranya gaya vertikal, gaya transversal (lateral) dan gaya longitudinal. Gaya vertikal menyebabkan terjadinya defleksi vertikal yang merupakan indikator terbaik untuk penentuan kualitas, kekuatan dan umur jalan rel. Secara global, besarnya gaya vertikal dipengaruhi oleh

pembebanan oleh lokomotif, kereta maupun gerbong. Selain itu dipengaruhi oleh ketidakratahan geomtri jalan rel yang bekerja pada titik yang tidak sama dengan gaya vertikal. Gaya ini dapat menyebabkan tercabutnya penambat akibat gaya angkat (*uplift force*), pergeseran pelat andas dan memungkinkan terjadinya *derailment* (anjlog atau keluarnya roda kereta dari rel) (Esveld, 2001). Pada literatur *modern railway track Delft University of Technology*, mengatakan bahwa tegangan pada rel sangat bervariasi tergantung jarak antar bantalan, letak gaya yang bekerja pada struktur rel serta besarnya gaya yang bekerja pada struktur rel.

Dimensi rel yang digunakan di Indonesia sesuai PD 10 tahun 1986. Penamaan tipe rel untuk tujuan klasifikasi rel di Indonesia disesuaikan dengan berat dalam kilogram (kg), untuk setiap 1 (satu) meter panjangnya, misalnya, tipe R.54 berarti rel memiliki berat sekitar 54 kg untuk setiap 1 (satu) meter panjangnya. Masing-masing profil rel memiliki dimensi momen inersia, jarak terhadap garis netral luas penampang yang berbeda untuk keperluan perencanaan dan pemilihan dimensi yang tepat untuk struktur jalan rel. Karena ada perbedaan lebar spur sedangkan lebar *boogie* kereta tetap yaitu direncanakan pada lebar spur 1067 mm, maka titik pembebanan bisa jadi tidak tepat terhadap garis netral, luas penampang yang akan mengakibatkan tegangan pada rel sendiri bervariasi. Tegangan ijin tergantung pada mutu rel yang digunakan. Untuk perencanaanya PT.Kereta Api Indonesia (Persero) menggunakan dasar kelas jalan yaitu untuk jalan kelas 1 menggunakan R.60 dan R.54 dengan tegangan ijin 1325 kg/cm^2 (Rosyidi, 2017). Pengujian bantalan beton kereta api tipe S35/20 untuk rel R-54/R.60 sudah pernah dilakukan. Pengujian bantalan beton dilakukan menggunakan standar uji AREMA (*American Railway Engineering and Maintenance of Way Association*). Uji ini meliputi, uji momen negatif dan positif dudukan rel A, uji momen negatif dan positif tengah bantalan, uji momen negatif dan positif dudukan rel B, uji beban berulang dudukan rel B, uji ketahanan geser *wire*, dan uji bebas ultimate. Kondisi jalur yang handal dan memenuhi persyaratan keselamatan transportasi secara teknis layak untuk dioperasikan dan harus dilakukan pengujian di laboratorium penguji. Dari pengujian yang telah dilakukan atas 3 (tiga) benda uji, 2 (dua) benda uji dinyatakan memenuhi spesifikasi, sedangkan 1 (satu) benda uji tidak memenuhi spesifikasi diakibatkan adanya retak struktural pada pengujian momen positif

terhadap beban desain (Purwanto et al., 2008), penelitian tersebut hanya menghasilkan layak atau tidak layaknya bantalan beton, akibat beban ultimate dari jalan rel tersebut. Selanjutnya dilakukan penelitian lanjutan yang menghasilkan beban maksimum yang ditumpu pada bantalan adalah 569.601 kN dengan lendutan maksimum 0.681 mm dan dihitung secara teoritis retak awal terjadi pada beban 256.838 Kn (Puspasari et al., 2016).

1.2. Rumusan Masalah

Kurniawan (2015) kereta ukur yang digunakan di lintas pulau jawa yaitu EM -120, yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi geometri rel secara keseluruhan, Sedangkan Esveld (2001) kerusakan jalan rel juga dipengaruhi oleh ketidakrataan geomtri jalan rel yang bekerja pada titik yang tidak sama dengan gaya vertikal dengan adanya variasi perbedaan lebar *gauge* (lebar jalur). Ada dua aspek untuk memprediksi pemeliharaan *track*, yaitu degradasi struktural dan dagrasi geometri (Berawi et al., 2010). Sedangkan penelitian eksperimental tentang perilaku struktur bantalan beton di Indonesia pernah diteliti (Puspasari et al., 2016), dan (Purwanto et al., 2008). Di berbagai negara cara mengontrol kualitas jalan rel, dilakukan dengan beberapa pendekatan, baik dari model yang sederhana pada satu komponen jalan rel, hingga yang paling komprehensif yang merangkul semua factor utama dalam penurunan kualitas lintasan.

Dalam penelitian ini, evaluasi kualitas geometri jalan rel dihitung dengan menggunakan standar perkeretaapian Indonesia yaitu *Track Quality Index* (TQI), serta divalidasi dengan survey dilapangan dengan menggunakan alat ukur yang dapat membaca lebar dan beda tinggi, pada lokasi yang mempunyai hasil pengukuran yang berbeda. Penentuan lokasi survey berdasarkan perbedaan hasil pengukuran dari tahun yang berbeda. Batas perbedaan nilai ukur adalah lebih dari 1 (satu) centimeter (cm) dari total nilai *Track Quality Index* (TQI). Hasil pembacaan kondisi geometri yang digunakan dalam penelitian ini adalah, kereta ukur Galunggung (2018) dan kerta ukur EM-120 (2019). Hasil nilai aktual akan dijadikan pedoman perletakan dalam perhitungan struktural. Sedangkan kondisi struktural pada kondisi ideal dihitung secara teoritis menggunakan persamaan empiris sesuai material dilapangan dan divalidasi dengan penelitian sebelumnya.

Dengan diadakannya penelitian ini diharapkan dapat mengetahui kondisi degradasi struktur jalan rel akibat penyimpangan geometri arah vertikal serta horizontal. Nilai penyimpangan geometri sesuai dengan hasil analisis *Track Quality Index* (TQI) dilokasi penelitian. Hasil yang diharapkan adalah, mengetahui perilaku struktur jalan rel yang difokuskan pada bantalan, setiap kategori penyimpangan geometri untuk dasar penentuan pemeliharaan.

Adapun rumusan masalah tersebut adalah :

1. Bagaimana perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori 1 ($TQI \leq 15$) ?.
2. Bagaimana perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori 2 ($15 \leq TQI \leq 25$) ?.
3. Bagaimana perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori 3 ($25 \leq TQI \leq 40$) ?.
4. Bagaimana perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori 4 ($TQI > 40$) ?.

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan diatas, maka tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori 1 ($TQI \leq 15$).
2. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori 2 ($15 \leq TQI \leq 25$).
3. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori 3 ($25 \leq TQI \leq 40$).
4. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori 4 ($TQI > 40$).

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah :

1. Memberikan dan menambahkan wawasan mengenai *Track Quality Index* (TQI) berdasarkan standar Perkeretaapian Indonesia.
2. Memperoleh informasi terkait perilaku struktural bantalan beton sesuai dengan nilai kategori kualitas.
3. Batas kekuatan tarik serta tekan bantalan beton.
4. Sebagai masukan untuk perencanaan pemeliharaan jalan rel di Indonesia.

1.5. Pembatasan Masalah

Penelitian ini akan dibatasi oleh beberapa parameter. Parameter tersebut adalah :

1. Penelitian ini hanya dilakukan pada lintas Surabaya – Mojokerto
2. Analisa *Track Quality Index* (TQI) jalan rel hanya menggunakan parameter yang ada di Indonesia.
3. Penelitian ini hanya menganalisa struktur atas jalan rel (*Super Structure*) yaitu komponen bantalan dan rel.
4. Pembebanan dan spesifikasi material yang dipakai dalam perhitungan adalah pada kondisi yang sesuai dengan kelas jalan yang sesuai dengan lokasi penelitian
5. Perhitungan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak.
6. Perhitungan dilakukan pada kondisi jalan rel baru serta masing – masing kategori penilaian kualitas sesuai kondisi di lapangan.
7. Variasi permodelan hanya dilakukan pada perbedaan kondisi geometrik yaitu lebar spur, pertinggian, angkatan, dan listringan.
8. Tidak memperhitungkan keausan rel di lapangan.
9. Kondisi tanah *subgrade* dari data sekunder.

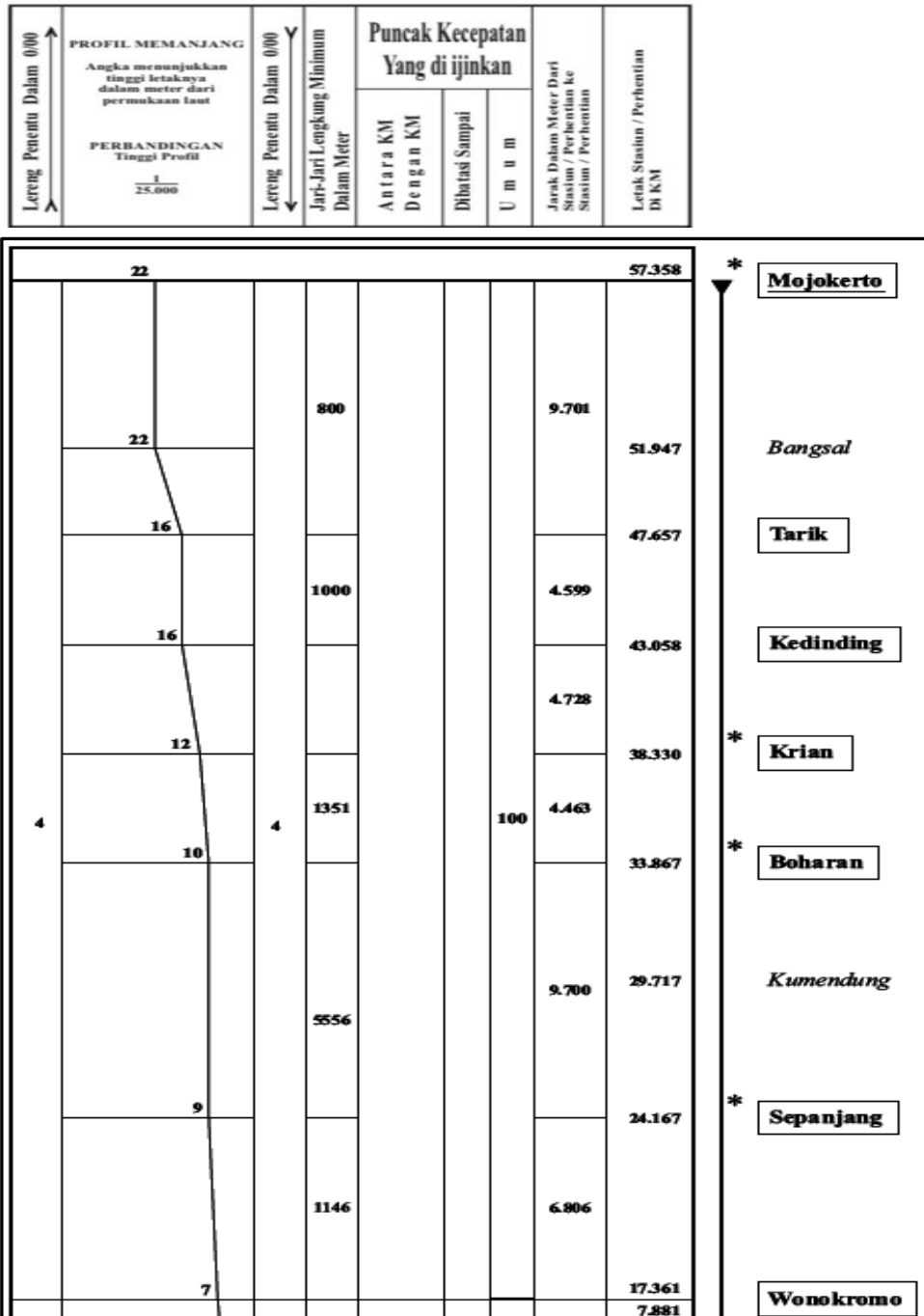
1.6. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah lintas stasiun Wonokromo – Stasiun Mojokerto meliputi 2 (dua) wilayah Resor (8.13 Sepanjang dan 8.14 Mojokerto), dengan

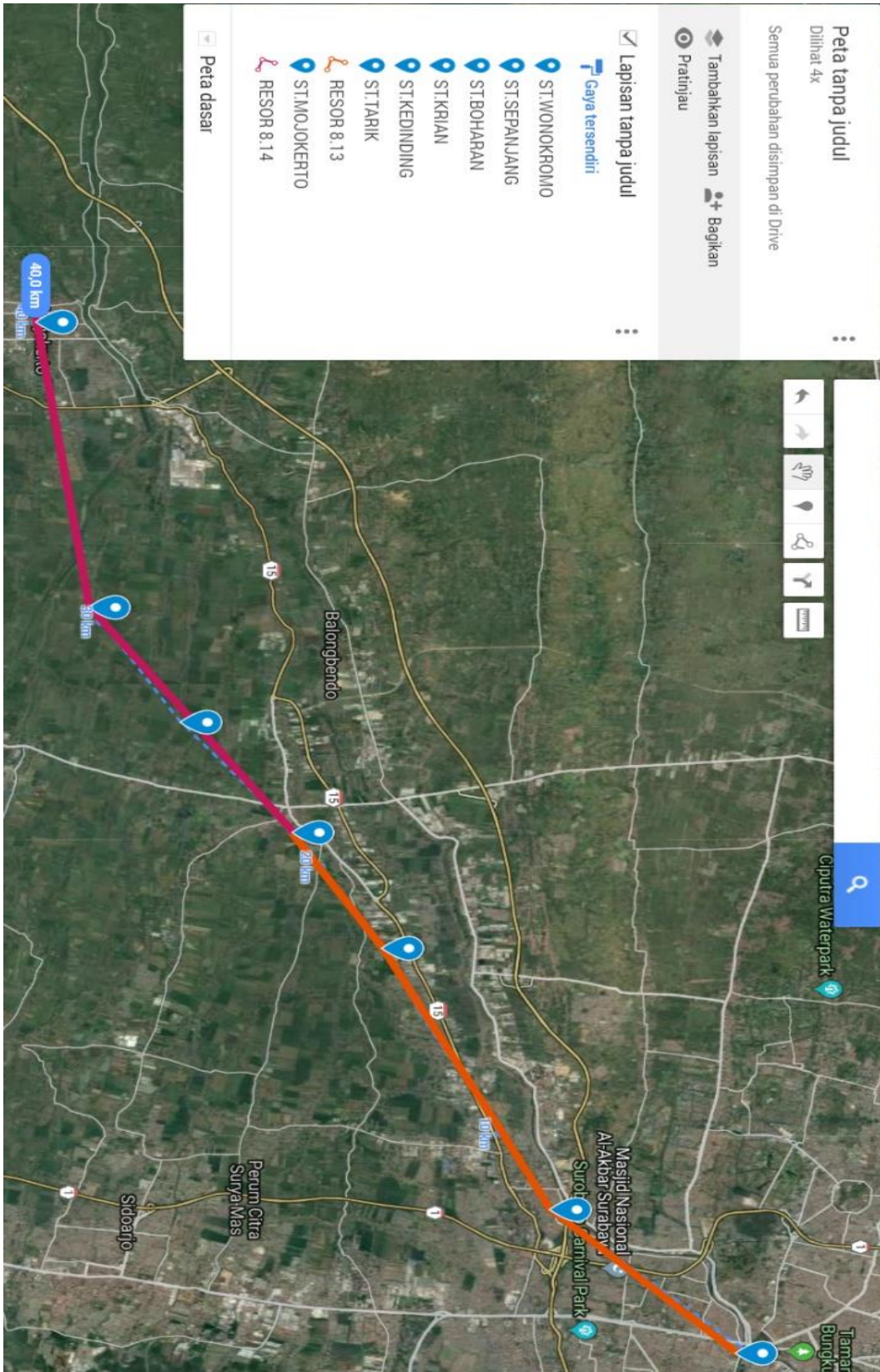
panjang total 39.997 meter, yang di dapat dari grafik perjalanan kereta api (GAPEKA) dan di ukur dengan *google my maps* pada tanggal 4 Mei 2019. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 1.1 dan Gambar 1.2.



LAMPIRAN I
KEPUTUSAN DIREKTUR JENDERAL PERKERETAAPIAN
NOMOR : KA.407/SK.332/DJKA/12/16
TANGGAL : 29 Desember 2016



Gambar 1.1 Panjang lintas (PT.Kereta Api Indonesia, 2017)



Gambar 1.2 Lokasi penelitian (<https://www.google.com/maps/d/edit/mid>, diakses 05 Mei 2019)

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Pada bab 2 akan membahas mengenai dasar teori yang digunakan dalam penelitian ini. Dasar teori dan acuan yang digunakan diambil dari sumber-sumber seperti buku, peraturan, dan hasil dari penelitian terkait sebelumnya. Bab ini akan menjelaskan lebih rinci mengenai perhitungan kualitas track indek dengan menggunakan standar perkeretaapian Indonesia, penentuan kelas jalan berdasarkan beban lintas tahunan (*passing tonnage*), beban yang bekerja dalam struktur jalan rel serta konsep dasar statika.

2.2. Studi Terdahulu

Seperti yang diketahui jalan rel merupakan suatu kesatuan konstruksi yang terbuat dari baja, beton atau konstruksi lain yang terletak di permukaan, di bawah atau di atas tanah atau bergantung beserta perangkatnya yang mengarahkan jalannya kereta api. Jalan rel yang digunakan pada sistem perkeretaapian di Indonesia memiliki lebar sepur sebesar 1067 mm dan termasuk lebar sepur sempit. Rel pada jalan rel mempunyai fungsi sebagai pijakan menggelindingnya roda kereta api dan untuk meneruskan beban dari roda kereta api ke bantalan. Dalam hal ini diperlukan adanya suatu persyaratan untuk rel yang harus dipenuhi dari beberapa parameter untuk menciptakan suatu kondisi yang ideal bagi jalannya kereta api. Pengukuran kualitas jalan rel di Indonesia menggunakan dua tipe kereta ukur geometri yang digunakan, yaitu kereta ukur EM-120 dan kereta ukur HKPW U-76501 (Kurniawan, 2015). Hasil pengukuran kereta ukur adalah, angka yang dapat memberikan informasi kualitas jalan rel yang dilewati pada suatu wilayah daerah operasi . Angka tersebut dibedakan menjadi 4 (empat) kategori yaitu, kategori baik sekali, baik, sedang dan jelek. Metode pengukuran ini disebut *Track Quality Index* (TQI). *Track Quality Index* (TQI), terdiri dari 4 (empat) parameter pengukuran lebar spur, angkatan, listringan dan pertinggian. Selain parameter tersebut, selama pengukuran juga dicatat kecepatan operasional pengukuran. Pengambilan data ukur dilakukan secara kontinyu sepanjang segmen (200 m).

Untuk angkatan, listringan dan pertinggian satu segmen mewakili panjang 40 meter. Sedangkan untuk lebar spur satu segmen mewakili panjang 20 meter. Esveld (2001) mengusulkan bahwa, kerusakan jalan rel juga dipengaruhi oleh ketidakrataan geomtri jalan rel yang bekerja pada titik yang tidak sama dengan gaya vertikal dengan adanya variasi perbedaan lebar gauge (lebar jalur) dan listringan. Ada dua aspek untuk memprediksi pemeliharaan *track*, yaitu degradasi struktural dan dagrasi geometri (Berawi et al., 2010). Penelitian eksperimental tentang perilaku struktur bantalan beton di Indonesia pada kondisi ideal pernah diteliti (Puspasari et al., 2016) dan (Purwanto, 2008).

2.3. Track Quality Indeks

Track Quality Index (TQI) merupakan nilai atau output berupa angka dari hasil pengukuran kereta ukur. Dalam hal ini, kereta ukur digunakan untuk memberikan informasi kondisi kualitas jalan rel yang dilewati pada wilayah Daerah Operasional (DAOP), yang dilakukan inspeksi. PT. Kereta Api Indonesia (Persero), memiliki dua tipe kereta ukur geometri yang digunakan, yaitu kereta ukur EM-120 dan kereta ukur HKPW U-76501. Kereta ukur EM-120 beroperasi untuk mengevaluasi jalur di lintas Jawa, yang digunakan untuk mengukur kondisi geometri rel secara keseluruhan seperti, lebar spur (jarak antar kepala rel terluar), pertinggian, angkatan serta listringan, hasil pembacaan dalam satuan panjang yaitu millimeter (Kurniawan, 2015). Bentuk dari kereta ukur EM-120 dapat dilihat pada Gambar 2.1. Dirjen Perkeretaapian Indonesia (DJKA) juga memiliki kereta ukur yaitu, kereta ukur Galunggung yang digunakan untuk mengetahui kondisi lintasan geometri sebagai kontrol pemerintah sebagai regulasi. Visualisai kereta ukur Galunggung dapat dilihat pada Gambar 2.2.

2.3.1. Kereta Ukur Jalan Rel

Kereta ukur yang dimiliki PT. Kereta Api Indonesia (Persero), adalah kereta ukur EM – 120, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Kereta tersebut digunakan untuk mengukur kondisi geometri jalan rel secara keseluruhan seperti (angkatan, listringan, skilu, pertinggian, serta lebar spur), dengan waktu yang telah ditentukan. Kereta ukur EM – 120 beroperasi pada lintas jawa, dan digunakan sesuai

jadwal dari bagian geometri direktorat *track and bridge*. (PT. Kereta Api Indonesia (Persero), 2012). Bagian-bagian alat ukur pada EM-120 terdiri dari:

1. Bagian Utama, yang terdiri dari 3 (tiga) buah gandar teleskopis yang dihubungkan ke bogie secara lateral agar dapat menyesuaikan diri pada waktu melewati lengkung. Bagian ini mengukur lebih dari satu parameter dengan mendeteksi permukaan rel. Untuk mendeteksi permukaan rel, roda pada gandar ini diberi tekanan ke arah luar dan ke bawah melalui silinder *pneumatic* yang dipasang di bagian tengah gandar.
2. *Transducer*, yaitu suatu alat yang berfungsi mengubah gerakan mekanis roda dan roda pengukur menjadi sinyal listrik. Sinyal listrik ini kemudian dikirim ke komputer melalui analog/digital input dan dilewatkan *low-pass filter* sebelum diubah menjadi sinyal digital dengan ADC (*Analog to Digital Converter*)
3. Unit perekam grafis, tiap parameter geometri direkam dalam hard disk dan dicetak dengan plotter matriks berkecepatan tinggi (untuk grafik) dan dengan printer berkecepatan tinggi (untuk laporan kerusakan).
4. Sistem komputer, yang terdiri dari komputer (PC) dan perlengkapannya mengendalikan kerja pengukuran, perekaman, penyimpanan data dan prosedur evaluasi untuk data yang masuk setiap 1 (satu) meter 4 (empat) kali atau 25 cm.

2.3.1.1. Bagian-bagian Kereta

Menurut diktat kereta ukur jalan rel oleh PT. Kereta Api Indonesia tahun 2013 bahwa bagian-bagian kereta terdiri dari :

1. Umum
EM - 120 dilengkapi dengan mesin penggerak dan mempunyai 3 (tiga) bogie yang masing-masing terdiri dari 2 (dua) gandar dan satu gandar pengukur. Gandar pengukur ini dihubungkan pada bogie dengan batang teleskopis longitudinal. Gandar pengukur ini dapat diangkat bila tidak mengukur.
2. Rangka
Rangka terbuat dari batang dan plat baja yang dilas dan dirancang untuk dapat melewati lengkung dengan radius minimal 140 m.

3. Roda penggerak
Dari ketiga bogie, hanya satu yang dihubungkan dengan penggerak.
4. Roda
Roda solid dari baja kualitas R7.
5. Penyangga gandar (*Axle Bearing*)
6. Suspensi
Suspensi EM - 120 terdiri dari 2 (dua) tahap yaitu, suspensi primer dengan per chevron tipe MEGI dan suspensi sekunder dengan per spiral
7. Gandar pengukur
Terdiri dari gandar teleskopis.
8. Badan kereta/body
Terbuat dari baja struktural yang dilengkapi dengan isolator panas dan suara.
9. A.C
Empat buah AC terpasang di langit-langit dipakai untuk mengatur suhu sampai $\pm 25^0$ C, serta mengatur kelembaban udara.
10. Intercom
Intercom dipasang pada kabin masinis dan meja operator.
11. Alat peringatan
Klakson elektronik dan udara tekan dipasang pada kedua ujung kereta. Alarm pada meja operator untuk memberi peringatan hilangnya tekanan pada roda pengukur, serta ada fungsi lain yang terganggu. Alarm pada panel DC akan memberi peringatan bila tekanan udara turun sampai dibawah 4 Bar.
12. Sistem penggerak
Mesin diesel berpendingin udara dengan daya 380 KW atau 520 HP menggerakkan roda pada gandar depan dengan perpindahan gigi semi otomatis. Kereta mampu bergerak mundur dengan kecepatan sama dengan maju dan mampu menarik kereta seberat 40 ton.
13. Sistem *pneumatik*
Sebuah kompresor yang digabungkan dengan yang memasok tekanan udara sampai 7 (tujuh) bar untuk pengereman dan pengukuran.
14. Unit Pengering

Pengering ini digabungkan pada alat *pneumatik* untuk mengeringkan udara pada mesin.

2.3.1.2. Pelaksanaan Pengukuran

1. Persiapan

Persiapan yang harus dilakukan sebelum pengukuran antara lain, kesiapan kereta, kesiapan personil dan kesiapan alat ukur. Kesiapan kereta meliputi pemeriksaan mesin disel, generator, BBM, pelumas, peralatan komputer, mekanik, elektronik, pneumatic serta semboyan yang harus dibawa dalam perjalanan. Kesiapan personil adalah kesiapan operator masing-masing peralatan yang beroperasi di kereta. Kesiapan alat ukur meliputi kelengkapannya dan pemeriksaan kondisinya serta kalibrasi alat ukur. Kalibrasi dimaksudkan untuk meyakinkan bahwa alat ukur bekerja dengan cara dan pedoman yang benar.

2. Pelaksanaan

Kereta ukur EM - 120 serba otomatis dalam pelaksanaannya diperlukan beberapa personil untuk mengoperasikannya. Selain masinis sebagai pengemudi juga diperlukan seorang mekanik, teknisi dan operator komputer serta seorang pembantu umum. Dalam pelaksanaannya yang aktif bekerja adalah masinis dan operator komputer, yang harus menyesuaikan letak km (karena dilapangan kadang-kadang tidak tepat 1000 m), agar letak km dalam gratik selalu tepat sehingga memudahkan pencarian lokasi yang mengalami kerusakan, sedang mekanik dan teknisi listrik harus siap apabila terjadi gangguan pada kereta. Penumpang maksimal 10 (spuluh) orang termasuk kru. Setelah kereta siap berangkat, roda ukur diturunkan sehingga menyentuh rel dan kereta ukur siap beroperasi. Proses pengukuran selebihnya dilakukan secara otomatis.

3. Proses Pegambilan Data

Pada waktu kereta berjalan, gerakan roda dan roda ukur diteruskan ke *transducer*, oleh *transducer* gerakan ini diubah menjadi sinyal listrik dan dikirimkan ke ADC untuk diubah dari sinyal analog menjadi sinyal digital. Sinyal digital ini kemudian diproses oleh komputer dan ditampilkan ke layar monitor dalam bentuk grafik serta ke printer dalam bentuk grafik serta angka. Proses tersebut berlaku untuk parameter angkatan, listringan dan lebar sepur, sedang untuk

pertinggian dan skilu sinyal yang berasal dari *inclinometer* dikirim ke ADC diteruskan ke komputer dan seterusnya. Data diambil setiap 25 cm, kemudian dirata-rata setiap 200 m dalam bentuk standar deviasi yang disebut *Track Quality* (kilometer/device) atau dalam suatu panjang tertentu untuk laporan kerusakan.

2.3.1.3. Hasil Pengukuran

Menurut diktat kereta ukur, hasil pengukuran berupa grafik dan angka. Hasil yang berupa grafik rnenggambarkan besarnya kerusakan yang terjadi pada Jalan rel yang ditampilkan dalam skala tertentu, dilengkapi dengan petunjuk letak piket dan km untuk memudahkan penentuan lokasinya. Hasil yang berupa angka terbagi merupakan hasil dari *Track Quality Index* (TQI).

1. Grafik

Pada grafik ditampilkan 10 (sepuluh) lajur, yaitu :

Lajur pertama berisi :

KM = Kilometer (dan piket)

LRS = Lurusan

BH = Bangunan Hikmat

JPL = Jalan Perlintasan

WSL = Wesel

SNL = Sinyal

T/S - Tangent to Spiral = Lurusan ke Peralihan

S/C = Spiral to Curve = Peralihan ke Lengkung

C/S = Curve to Spiral = Lengkung ke Peralihan

S/T = Sprial to Tangent = Peralihan ke Lurusan.

Jika notasi T/S, S/C, C/S dan S/T ini muncul di lurusan, maka berarti di lokasi tersebut terjadi kerusakan listringan yang panjang sehingga seolah-olah ada lengkung. Lajur kedua dan ketiga adalah grafik kerusakan angkatan rel kiri (L) dan rel kanan (R) (jika dari km besar ke km kecil maka grafik kiri berlaku untuk rel kanan dan grafik kanan berlaku untuk rel kiri, L=R), dengan skala 1:2 yang berarti jika besarnya kerusakan pada grafik sebesar 1 mm maka kerusakan yang terjadi di lapangan adalah sebesar 2 mm. Lajur keempat adalah grafik kerusakan lebar sepur. Lajur kelima adalah grafik kerusakan skilu dengan skala 1: 4, yang berarti jika

besarnya kerusakan pada grafik sebesar 1 mm maka kerusakan yang terjadi di lapangan adalah 4 mm. Lajur keenam adalah grafik kerusakan pertinggian dengan skala 1:4. Lajur ketujuh dan kedelapan adalah grafik kerusakan listringan kiri dan listringan kanan. Lajur kesembilan adalah grafik goyangan vertical badan kereta (tidak berpengaruh terhadap hasil pengukuran) CBMV (*Car Body Motion Vertical*). Lajur kesepuluh adalah grafik kecepatan.

2. Laporan kerusakan

Laporan kerusakan berisi data kerusakan pada jalan rel yang melebihi toleransi yang diijinkan (artinya harus segera diperbaiki). Yang ditampilkan dalam laporan ini adalah : letak kerusakan, jenis kerusakan, panjang kerusakan, dan besarnya kerusakan.

3. *Track Quality*

Menampilkan kualitas kondisi jalan rel per 200 m, yaitu besarnya penyimpangan pada parameter yang diukur (lebar sepur, angkatan, pertinggian dan Listringan) dan dirinci menurut Device (LRS, BH, JPL, WSL) yang ada di dalamnya.

4. Laporan kondisi jalan rel

Berisi rangkuman kondisi jalan rel pada lintas-lintas tertentu dalam suatu Daerah operasi (daop) serta panjang track di lintas tersebut berdasarkan klasifikasinya, dalam bentuk tabel dan grafik.



Gambar 2.1 KA.Ukur EM-120 (PT.Kereta Api Indonesia, 2019)



Gambar 2.2 KA.Galunggung (<https://stalktr.net/tag/kaugalunggung>, diakses tanggal 05 Mei 2019)

2.3.2. Parameter Pengukuran

Berdasarkan Standar Perkeretaapian Indonesia, terdapat 4 (empat) parameter yang digunakan dalam menghitung *Track Quality Index* adapun parameter tersebut adalah sebagai berikut :

1. Listringan (Alinyemen Horizontal)

Pengukuran listringan dilakukan dengan roda ukur bagian tengah, roda yang terpasang pada gandar teleskopis (bagian kiri dan kanan tidak saling mengikat) ini diberi tekanan ke arah luar sehingga selalu mepet pada rel, bila terjadi pelebaran atau penyempitan maka roda akan selalu menyesuaikan. Perubahan ini diukur dengan *transducer* dan dibandingkan dengan perubahan pada roda ukur bagian depan dan belakang sehingga membentuk anak panah. Jika jaraknya = 0 maka rel dalam keadaan lurus. Panjang benang listringan adalah 10 m. Nilai listringan rel kanan dan kiri dihitung standard deviasinya untuk setiap jarak 40 meter. Nilai TQI listringan dihitung berdasar rata-rata setiap interval 200 meter dengan memperhitungkan deviasi pengukuran yang terjadi.

2. Lebar Sepur

Nilai Lebar spur yang ditampilkan dalam grafik adalah nilai langsung yang diperoleh oleh transducer lebar spur, dalam perhitungan TQI dihitung berdasarkan nilai standar deviasi lebar spur yang diperoleh oleh troli depan, tengah dan belakang belakang dalam jarak 20 meter. Nilai akhir TQI lebar spur dihitung

berdasarkan berdasarkan rata-rata 200 meter dengan memperhitungkan deviasi pengukuran yang terjadi.

3. Angkatan (Alinyemen Vertikal)

Diukur pada jarak 10 m dengan menggunakan bogie tengah yang bebas (tidak terikat pada rangka sehingga bebas naik turun). Bila terjadi kerusakan pada angkatan, bogie tengah akan turun/naik sehingga terjadi jarak antara as bogie tengah dengan garis hubung as bogie depan dan belakang sebesar kerusakan yang terjadi. Angkatan yang dimaksud adalah angkatan rata-rata memanjang. Nilai angkatan rel kanan dan kiri dihiung standard deviasinya untuk setiap jarak 40 meter. NilaiTQI angkatan angkatan dihitung dihitung berdasar rata-rata rel-kanan dan rel-kiri untuk setiap interval 200 meter dengan memperhitungkan deviasi pengukuran yang terjadi.

4. Perteingian

Pengukuran perteingian dilakukan dengan memakai alat yang disebut rate gyro dan inclinometer (pengukur kemiringan) yang dipasang badan rangka bawah diatas bogie tengah. Alat ini mengukur perbedaan tinggi antara rel kiri dan rel kanan. Pada jalan lurus yang bekerja hanya inclinometer, sedang pada lengkung, gaya sentrifugal yang mempengaruhi inclinometer akan dikompensasi oleh *rate gyro*, sehingga inclinometer akan menghasilkan data kemiringan relatif.

2.3.3. Kondisi Jalan Rel

Berdasarkan Balai Pelatihan Teknik Perkeretaapian tahun 2015, kondisi jalan rel dapat dikelompokkan dengan mempertimbangkan faktor :

1. Kecepatan lintas (*Permissible Track Speed*)

EM-120 mengelompokkan jalan rel yang akan diukur kecepatan maksimum yang diijinkan di lintas tersebut.

- a. Kelas 1 (*new*) untuk jalan rel yang dapat dilewati kecepatan > 90 km/jam
- b. Kelas 2 untuk kecepatan antara 75 s.d. 90 km/jam
- c. Kelas 3 untuk kecepatan antara 50 s.d. 75 km/Jam
- d. Kelas 4 untuk kecepatan dibawah 50 km/jam

Diluar ke empat kelas tersebut ada tanda yang menunjukan parahnya tingkat kerusakan, yaitu tanda silang (x) mulai dari satu (x) yang berarti kerusakan parah,

sampai silang empat yang berarti sangat parah/berbahaya. Pada Tabel 2.1 menyajikan tentang kategori kelas berdasarkan kecepatan maksimum.

Tabel 2.1 Kategori Kelas Berdasar Kecepatan Maksimum

Kategori	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4
Kecepatan (km/jam)	>90	75-90	50-75	<50

Sumber: PT. Kereta Api Indonesia, 2013

2. Toleransi

Toleransi adalah ambang batas yang tidak dilewati agar jalan rel dapat dikategorikan pada kelas ambang batas ini terlampaui maka jalan rel akan masuk yang lebih rendah. Toleransi yang diprogramkan pada EM - 120 adalah ditabelkan pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 Nilai Toleransi berdasar Kelas Jalan

	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	x	xx	xxx	xxx
Toleransi (mm)	2,0	5,1	7,1	10,1	15,1	20,1	25,1	40,1

Sumber: PT. Kereta Api Indonesia, 2013

Toleransi yang umum dipakai dalam penentuan kondisi untuk kecepatan 60 s.d. 100 km/jam , adalah pada Tabel 2.3 berikut:

Tabel 2.3 Nilai Toleransi Yang Diizinkan dan Jenis Perbaikan Track

Parameter	Jenis Perbaikan			
	Non-sensitive (mm)	Renewal (mm)	Maintenance (mm)	Immediate repair (mm)
Angkatan dan pertinggian	-2 s.d +2	-10 s.d + 10	-15 s.d + 15	-20 s.d + 20
Listringan	-2 s.d +2	-10 s.d + 10	-15 s.d + 15	-20 s.d + 20
Twist	-2 s.d +2	-10 s.d + 10	-15 s.d + 15	-20 s.d + 20
Lebar jalur	-2 s.d +2	-2 s.d +5	-5 s.d +10	-5 s.d + 20

Sumber: PT. Kereta Api Indonesia, 2015

3. *Track Quality Index (TQI)*

Indeks kualitas jalan rel berdasarkan kondisi geometrinya. Indeks ini didapatkan dengan menjumlahkan 4 (empat) parameter pengukuran, yaitu angkatan rata-rata, listringan rata-rata, lebar sepur dan pertinggian. Skilu yang merupakan perbandingan dari pertinggian tidak dimasukkan dalam perhitungan ini, karena jika dihitung akan terjadi duplikasi. TQI ini tidak mempunyai satuan, karena walaupun merupakan hasil penjumlahan dari satuan yang sama (mm) tetapi vektornya berbeda. Standar nilai TQI yang digunakan PT. Kereta Api Indonesia (Persero) ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Standar Nilai Track Quality Index (TQI)

Kategori	Total TQI	Kecepatan(km/jam)	Jenis Kategori
I	$TQI \leq 20$	100-120	1
II	$20 < TQI \leq 35$	80-100	2
III	$35 < TQI \leq 50$	60-80	3
IV	>50	<60	4

Sumber: Kurniawan, 2015

Batasan nilai kerusakan per kategori kerusakan pada nilai TQI ditunjukkan pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 Batasan (*thresholds*) Nilai Kerusakan Per Kategori

Parameter	New	Kat. 1	Kat.2	Kat.3	Kat.4
Angkatan (mm)	1	2	5	8	>8
Listringan (mm)	1	1.5	4	10	>10
Pertinggian (mm)	1	2	6	9	>9
Lebar spur (mm)	0	2	5	10	>10
Skilu 3 m (mm)	2	6.5	9	12	>12
TQI (max)	10	20	35	50	>50
Kec. GAPEKA		100-120	80-100	60-80	<60

Sumber: Kurniawan, 2015

2.4. Beban Angkut Tahunan (*Passing Tonnage*)

Pada penentuan kelas membutuhkan data sekunder yang di dapatkan dari PT. Kereta Api Indonesia (Persero), Daerah Operasi 8 Surabaya yaitu :grafik perjalanan kereta api (daftar kereta api yang melintas), pada ruas Surabaya – Mojokerto, susunan kereta (*stamformasi*), serta berat gerbong.

Lintas kereta api direncanakan untuk melewati berbagai jumlah angkutan barang dan penumpang dalam suatu jangka waktu tertentu. Perencanaan konstruksi jalan rel harus direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat dipertanggung jawabkan secara teknis dan ekonomis. Secara teknis diartikan konstruksi jalan rel tersebut harus dapat dilalui oleh kendaraan rel dengan aman dengan tingkat kenyamanan tertentu selama umur konstruksinya. Secara ekonomis diharapkan agar pembangunan dan pemeliharaan konstruksi tersebut dapat diselenggarakan dengan biaya yang sekecil mungkin dimana masih memungkinkan terjaminnya keamanan dan tingkat kenyamanan. Perencanaan konstruksi jalan rel dipengaruhi oleh jumlah beban, kecepatan maksimum, beban gandar dan pola operasi. Atas dasar ini diadakan klasifikasi jalan rel, sehingga perencanaan dapat dibuat secara tepat guna (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia 1986).

1. Kecepatan.

Kecepatan rencana adalah kecepatan yang digunakan untuk merencanakan konstruksi jalan rel. Untuk perencanaan struktur jalan rel, $V_{rencana} = 1,25 \times V_{maks}$. Kecepatan maksimum adalah kecepatan tertinggi yang diijinkan untuk operasi suatu rangkaian kereta pada lintas tertentu. Kecepatan komersil kecepatan rata-rata kereta api sebagai hasil pembagian jarak tempuh dengan waktu tempuh.

2. Daya angku lintas

Daya angkut lintas adalah jumlah angkutan anggapan yang melewati suatu lintas dalam jangka waktu satu tahun. Daya angkut lintas mencerminkan jenis serta jumlah beban total dan kecepatan kereta api yang lewat di lintas yang bersangkutan. Daya angkut disebut daya angkut T dengan satuan ton/ tahun yang dapat dijadikan penentuan kelas jalan seperti pada Tabel 2.6. Untuk rumus yang digunakan disajikan pada bab metodologi. Menurut penelitian Rosyidi tahun 2015 menyatakan bahwa besar tegangan ijin pada setiap kelas jalan, yaitu sebagai berikut kelas I =

1325 kg/cm², Kelas II = 1325 kg/cm², Kelas III = 1663 kg/cm², Kelas IV = 1843 kg/cm², dan kelas V = 2000 kg/cm².

Tabel 2.6 Kelas Jalan

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (Juta ton/tahun)	Beban Roda Dinamis (kg)	Jenis Rel	Jenis Bantalan	Tegangan ijin (kg/cm ²)
I	>20	19940	R60/54	Beton	1325
II	10 - 20	16241	R54/50	Beton/Kayu	1325
III	5 - 10	15542	R54/50/42	Beton/Kayu/Baja	1663
IV	2.5 - 5	14843	R54/50/42	Beton/Kayu/Baja	1843
V	<2.5	14144	R42	Kayu/Baja	2000

Sumber: Peraturan Dinas No.10, 1986

2.5. Rel

Rel merupakan struktur balok menerus yang diletakkan di atas tumpuan bantalan yang berfungsi sebagai penuntun, serta mengarahkan pergerakan roda kereta api. Rel juga disediakan untuk menerima secara langsung dan menyalurkan beban kereta api kepada bantalan tanpa menimbulkan defeksi, yang berarti pada bagian balok rel, diantara tumpuan bantalan. Oleh karena itu, harus memiliki nilai kekakuan balok tertentu sehingga perpindahan beban titik roda dapat menyebar secara baik pada tumpuan di bantalan.

Rel juga berfungsi sebagai struktur pengikat dalam pembentukan struktur jalan *relying* kokoh. Oleh sebab itu, bentuk dan geometrik rel dirancang sedemikian sehingga dapat berfungsi sebagai penahan gaya akibat pergerakan dan beban kereta api. Pertimbangan yang diperlukan dalam membuat geometrik rel adalah :

1. Permukaan rel harus dirancang memiliki permukaan yang cukup lebar untuk membuat tegangan kontak diantara rel dan roda sekecil mungkin.
2. Kepala rel harus cukup tebal untuk memberikan umur manfaat yang panjang.
3. Badan rel harus cukup tebal untuk menjaga dari pengaruh korosi dan mampu menahan tegangan lentur serta tegangan horisontal.
4. Dasar rel harus cukup lebar untuk dapat mengecilkan distribusi tegangan ke bantalan baik melalui pelat andas maupun tidak.

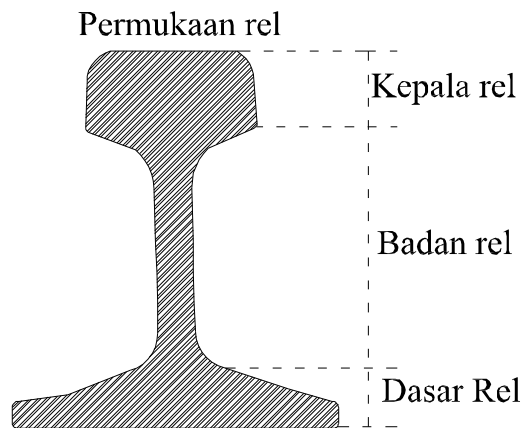
5. Dasar rel juga harus tebal untuk tetap kaku dan menjaga bagian yang hilang akibat korosi.
6. Momen inersia harus cukup tinggi, sehingga tinggi rel diusahakan tinggi dan mencukupi tanpa bahaya tekuk.
7. Tegangan horisontal diusahakan dapat direduksi oleh kepala dan dasar rel dengan perencanaan geometriknya yang cukup lebar.
8. Stabilitas horisontal dipengaruhi oleh perbandingan lebar dan tinggi rel yang mencukupi.
9. Titik Pusat sebaiknya di tengah rel.
10. Geometrik badan rel harus sesuai dengan pelat sambung.
11. Jari-jari kepala rel harus cukup besar untuk mereduksi tegangan kontak .

Pertimbangan lainnya adalah perencanaan rel dengan berat yang sama tetapi memiliki geometrik yang berbeda sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Contohnya, ARA (*American Railways Association*) membagi rel menjadi kelas A dan B. Kepala rel jenis A dibuat tipis dengan tujuan agar momen inersia tinggi sehingga rel ini dipakai untuk kereta api berkecepatan tinggi. Lain halnya dengan kepala rel jenis B yang dibuat sedemikian sehingga memiliki momen inersia cukup untuk menahan bahaya aus karena beban gandar yang tinggi dengan kecepatan kereta api sedang.

2.5.1. Bentuk dan Dimensi Rel di Indonesia.

Gambar 2.3 menerangkan 4 (empat) komponen rel yang dipakai di Indonesia

1. Permukaan Rel untuk pergerakan kereta api atau disebut sebagai *running surface* (*rail thread*),
2. Kepala Rel (*head*),
3. Badan Rel (*web*),
4. Dasar Rel (*base*)



Gambar 2.3 Bagian komponen rel (Esveld, 2001)

Ukuran serta dimensi bagian-bagian profil rel di atas dijelaskan dalam Tabel 2.7 untuk dimensi rel yang digunakan di Indonesia sesuai PD 10 tahun 1986. Penamaan tipe rel untuk tujuan klasifikasi rel di Indonesia disesuaikan dengan berat (dalam kilogram, kg) untuk setiap 1 meter panjangnya, misalnya : tipe R 54 berarti rel memiliki berat sekitar 54 kg untuk setiap 1 meter panjangnya (Rosyidi 2015). Setiap tipe rel memiliki dimensi dan berat yang berbeda serta mempunyai kekuatan yang berbeda sesuai dengan layanan kelas jalan yang direncanakan.

Tabel 2.7 Tipe Rel di Indonesia

Tipe	Berat (Kg/m)	Tinggi (mm)	Lebar dasar (mm)	Lebar Kepala (mm)	Tebal badan (mm)	Panjang Standart (mm)
R2/25	25,74	110	90	53	10	6.5 – 10.2
R3/33	33,40	134	105	58	11	11.9 – 13.6
R14/41	41,52	138	110	68	13.5	11.9 – 17.0
R14A/42	42,18	138	110	68.5	13.5	13.6 -17.0
R50	50,40	153	127	63.8	15	17.0
UIC54/R54	54,40	159	140	70	16	18.0/24.0
R60	60,34	172	150	74.3	16.5	

Sumber :Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2012

Jenis Rel Menurut Panjangnya.

Menurut panjangnya dibedakan tiga jenis rel, yaitu :

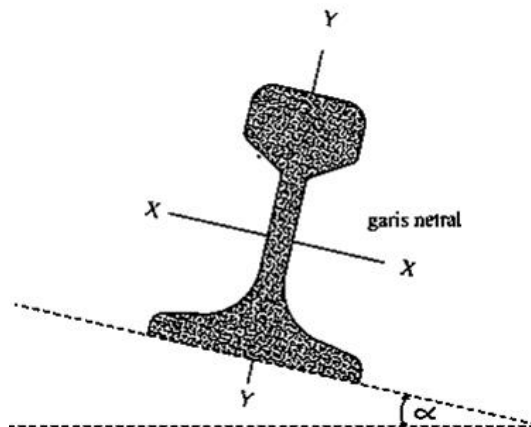
1. Rel standar adalah rel yang panjangnya 25 meter.
2. Rel pendek adalah rel yang panjangnya maksimal 100 m.
3. Rel panjang adalah rel yang panjang tercantum minimumnya pada Tabel 2.8

Tabel 2.8 Panjang Minimum Rel Panjang

Jenis Bantalan	Tipe Rel			
	R.42	R.50	R.54	R.60
Kayu	325 m	375 m	400 m	450 m
Beton	200 m	225 m	250 m	275 m

Sumber :Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2012

Kedudukan rel kecuali pada wesel dan di *emplacement* dengan kecepatan kereta lambat, rel dipasang miring ke dalam dengan kemiringan 1:40. Seperti pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Kemiringan ($\text{tg } \alpha$) 1 : 40 (Esveld, 2001)

2.6. Bantalan

Bantalan merupakan suatu struktur untuk mengikat rel (dengan penambat) sedemikian sehingga kedudukan rel menjadi kokoh dan kuat. Bantalan juga membentuk sistem pembebanan dari kendaraan rel terdistribusi secara lebih ringan dan merata kepada struktur fondasi. Bantalan mempunyai fungsi yang sangat

penting dalam membentuk *super-structure* (struktur bagian atas) dalam struktur jalan rel. Oleh karena itu diperlukan perencanaan yang baik mengenai jenis dan karakteristiknya, inter-koneksi daerah yang akan dilayani oleh jalan rel (daerah timbunan atau galian) terhadap fungsi drainasi, ukuran bantalan yang akan digunakan dan berbagai pertimbangan teknis lainnya.

Bentuk bantalan dapat dibagi menurut arah pemasangannya yaitu: bantalan arah melintang (bantalan kayu, baja dan beton) yang dipasang tegak lurus arah rel, dan bantalan arah membujur (*Concrete Slab-Track*), yang dipasang searah rel. Pemasangan bantalan melintang banyak digunakan di Indonesia. Pemasangan bantalan arah membujur perlu memperhatikan beberapa pertimbangan berikut ini :

1. Air hujan akan terbendung di antara *slab track*, sehingga dibutuhkan kondisi balas yang prima dengan demikian penyaluran air hujan dapat berlangsung dengan baik. Implikasi dari penggunaan bantalan ini, adalah diperlukannya frekuensi pemeliharaan (pembersihan) balas yang tinggi dimana akan menyebabkan anggaran pemeliharaan semakin tinggi.
2. Diperlukan konstruksi penambat arah melintang supaya jarak antar bantalan tetap terpelihara dengan baik.
3. Bahan konstruksi yang tepat untuk bantalan membujur adalah konstruksi beton mengingat pertimbangan praktis dan teknisnya.

Menurut Peraturan Menteri Perhubungan No.60 (2012), bantalan mempunyai fungsi meneruskan beban kereta api dan berat konstruksi jalan rei ke balas, mempertahankan lebar jalan rei dan stabilitas ke arah luar jalan rel. Bantalan dapat terbuat dari kayu, baja ataupun beton. Pemilihan jenis bantalan didasarkan pada kelas dan kondisi lapangan serta ketersediaan. Spesifikasi masing-masing tipe bantalan harus mengacu kepada persyaratan teknis yang berlaku. Bantalan tidak boleh goyang, pecah, retak pada bagian simpul serta harus kuat terhadap gaya tekan. Ukuran bantalan umumnya 250 x 130 x 2600 mm, toleransi saat inspeksi pemeliharaan adalah:

1. Lebar = +12mm/-0mm
2. Tebal = +11mm/-0mm,
3. Panjang = +12 mm/-0mm.

(Ministry of Defence United Kingdom Railways, 2009).

Kriteria bantalan :

1. Transfer beban dan distribusi yang sesuai dari rel ke bantalan.
2. Jarak rel harus konstan yang di tentukan oleh lebar spoor
3. Kekuatan mekanik yang memadai baik dari vertikal ataupun horizontal.

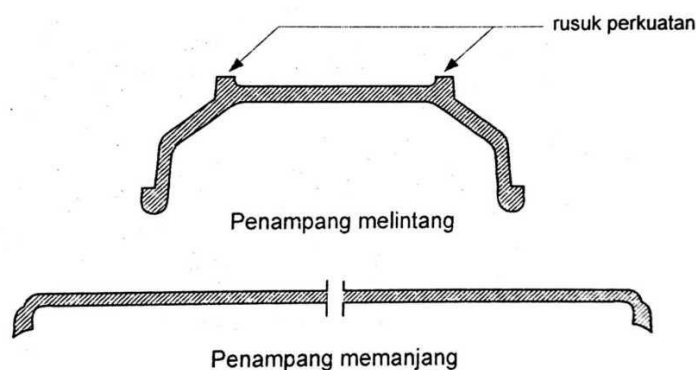
Secara garis besar, peranan bantalan adalah meletakkan dan menambat batang rel, menjaga lebar spoor agar selalu konstan, menjaga batang rel agar tidak melengkung saat dilewati kereta, menampung beban gandar yang diterima dari batang rel dan plat landas, untuk disebarkan kelapisan ballas dibawahnya. Bantalan disusun melintang dari posisi rel dengan jarak antar bantalan maksimal 60 cm.

Jenis bantalan :

1. Bantalan baja
2. Bantalan kayu
3. Bantalan beton, ada beberapa tipe misalnya:

Twin – block reinforced concrete sleeper (B-Blok), Monoblock Prestressed – concrete sleeper dan slab track.

Bantalan baja adalah produk industri yang memiliki konstruksi sederhana. Ujung pada bantalan baja ditempa sebagai penahan pada lapisan ballast sehingga menjamin stabilitas jalur melintang pada trek detainya dapat dilihat pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Bantalan baja (Esveld, 2001)

Kelebihan, bantalan baja mudah diproduksi, dipasang, dan dipelihara menjaga gauge tetap konstan dalam waktu yang lebih lama. Kekurangan, memiliki resistensi melintang yang rendah, harga bahannya yang mahal, bantalan baja

menimbulkan suara bising. Umur Bantalan Baja berkisar antara 30 sampai 60 tahun dengan nilai rata-rata 50 tahun.

Bantalan kayu, mendistribusikan beban lebih baik dibandingkan dengan jenis bantalan lainnya. Bantalan kayu direkomendasikan untuk trek pada tanah dasar yang mempunyai kualitas buruk, dimana pada bantalan beton akan memerlukan ketebalan yang relatif besar untuk lapisan ballast. Sifat bantalan kayu sangat sensitif dan kekuatannya akan berkurang seiring berjalannya waktu akibat dari, kemunduran dari karakteristik mekanik, pengaruh sifat kimiawi, pengaruh sifat biologi. Kelebihan memiliki tingkat elastisitas yg tinggi, distribusi beban yang lebih baik dibandingkan jenis bantalan lainnya. Kekurangan, tidak tahan lama, terutama pada daerah yang mempunyai curah hujan dan tingkat kelembaban tinggi sehingga mengakibatkan kayu mudah lapuk. Masa penggunaan yang relatif singkat, biaya lebih tinggi dan resistensi melintang juga rendah sehingga menghalangi kecepatan tinggi di jalurnya.

Seiring dengan teknologi beton bertulang, dan teknologi beton pratekan, ada dua tipe bantalan beton yg dikembangkan yaitu, *Twin-block reinforced-concrete sleeper*, terdiri dari dua bagian beton bertulang trapesium yang digabungkan dengan penghubung dan *Monoblock prestressed-concrete sleeper*, dimana dapat berupa *pre-tension* atau *post-tension*. Indonesia mulai mengembangkan bantalan tanpa ballas (*slab track*), karena ballas adalah batuan alam yang lambat laun, akan habis seiring dimanfaatkannya batuan tersebut.

2.7. Pembebanan

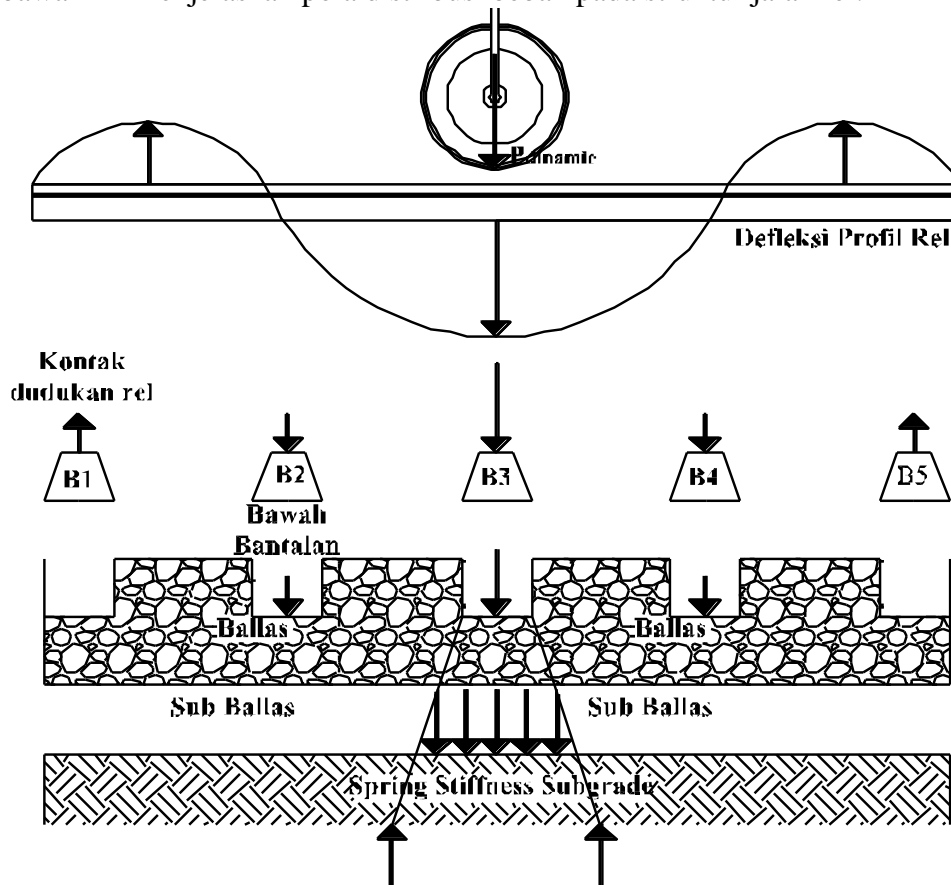
Pembebanan dan pergerakan kereta api di atas struktur jalan rel menimbulkan berbagai gaya pada rel. Gaya-gaya tersebut diantaranya gaya vertikal, gaya transversal (lateral) dan gaya longitudinal. Perhitungan beban dan gaya ini perlu dipahami secara benar untuk dapat merencanakan dimensi, tipe dan disain rel, bantalan dan seterusnya pola distribusinya berfungsi untuk merencanakan tebal lapisan balas dan subbalas. Pola distribusi gaya vertikal beban kereta api dapat dijelaskan secara umum sebagai berikut :

1. Beban dinamik diantara interaksi roda kereta api dan rel merupakan fungsi dari karakteristik jalur, kendaraan dan kereta, kondisi operasi dan lingkungan.

Gaya yang dibebankan pada jalur oleh pergerakan kereta api merupakan kombinasi beban statik dan komponen dinamik yang diberikan kepada beban statik. Beban dinamik diterima oleh rel dimana terjadi tegangan kontak diantara kepala rel dan roda, oleh sebab itu, sangat berpengaruh dalam pemilihan mutu baja rel.

2. Beban ini selanjutnya didistribusikan dari dasar rel ke bantalan dengan perantara pelat andas ataupun alas karet.
3. Beban vertikal dari bantalan akan didistribusikan ke lapisan balas dan subbalas menjadi lebih kecil dan melebar. Pola distribusi beban yang melebar dan menghasilkan tekanan yang lebih kecil yang dapat diterima oleh lapisan tanah dasar.

Prinsip pola distribusi gaya pada struktur rel bertujuan untuk menghasilkan reduksi tekanan kontak yang terjadi diantara rel dan roda ($\pm 6000 \text{ kg/cm}^2$) menjadi tekanan yang sangat kecil pada tanah dasar ($\pm 2 \text{ kg/cm}^2$) (Jaya, 2018). Gambar 2.5 di bawah ini menjelaskan pola distribusi beban pada struktur jalan rel.



Gambar 2.6 Pola Distribusi Pada Struktur Jalan Rel (Esveld, 2001)

2.7.1. Beban gandar

Konsep pembebanan oleh esveld, 2001 pada buku *Modern Railway Track* yang diterbitkan oleh *Delf Technology University* yaitu sebagai berikut :

Beban gandar yang diijinkan berdasarkan The Netherlands:

Kereta penumpang+gerbong	= 120 kN
Gerbong + mesin	= 170 kN
Kereta barang	= 225 kN
Lokomotif	= 215 kN
BR	= 250 kN
Angkutan berat (USA, Australia)	= 250 – 350 kN

Kategori standard beban gandar menurut UIC (*International Union of Railways*) adalah seperti pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Standar Gandar

kategori	Beban gandar (kN)	Berat/m (kN/m)
A	160	48
B1	180	50
B2	180	64
C2	200	64
C3	200	72
C4	200	80
D4	225	80

Sumber: Esveld, 2001

Kategori C2 digunakan untuk mengikuti jaringan jalan rel yang sudah ada, sedangkan untuk lintasan jalan baru menggunakan kategori C4 atau D4.

$$T_f = T_p \frac{V}{100} + T_g \frac{P_c}{18D} \text{ tonnes}$$

Keterangan :

T_p = Real load for daily passenger traffic

T_g = Real load for daily freight traffic

V = Maximum permissible speed (km/jam)

$D = \text{Minimum wheel diameter (m)}$

$P_c = \text{Maximum axle load with wheels of diameter } D \text{ (tonnes)}$

Kelompok yang digunakan NS secara global :

Kelas I $40.000 < T_f$

Kelas II $20.000 < T_f < 40.000$

Kelas III $10.000 < t_f < 20.000$

Kelas IV $T_f < 10.000$

2.7.2. Kecepatan

Standard kecepatan maksimum yang digunakan untuk jalur NS adalah 40, 60, 80, 100, 130 dan 140 km/jam.

Kecepatan Kereta cepat untuk kereta penumpang adalah :

Netherlands = 140km/jam (200 km/jam kedepannya)

Britain = 200 km/jam

Germany = 250 km/jam

Italy = 250 km/jam

Japan = 270 km/jam

France = 300 km/jam

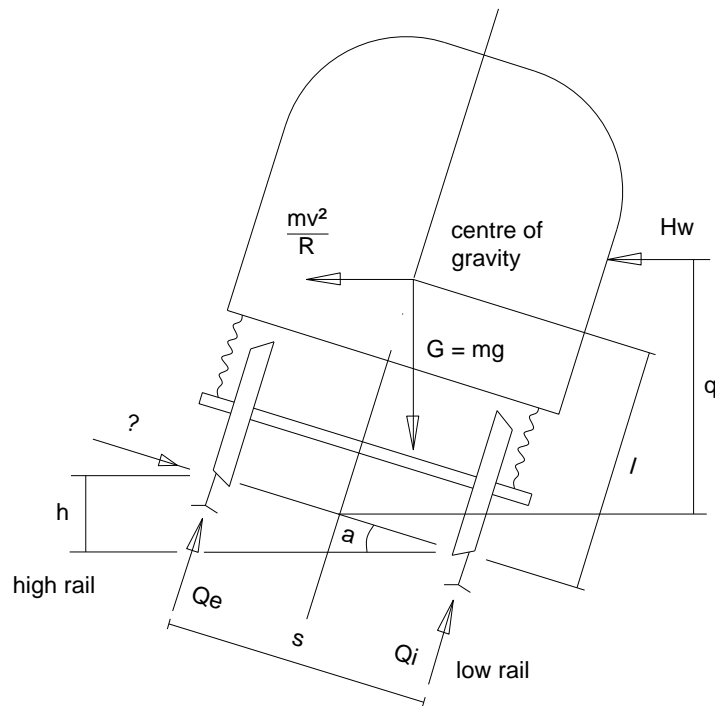
Rekor DB ICE dunia yang dibangun 1 Mei 1988 dapat melaju dengan kecepatan 406.9 km/jam.

Kecepatan maksimum kereta barang yang diijinkan adalah 100 km/jam. Beberapa tes sedang dilakukan apakah kecepatan dapat ditingkatkan menjadi 120 km/jam. Gaya utama yang bekerja pada lintasan kereta api adalah bisa dilihat pada Gambar 2.6 yang menggambarkan kereta pada posisi tikungan :

Gaya vertikal

Gaya horizontal (transversal)

Gaya horizontal (longitudinal)



Gambar 2.7 Beban Yang Bekerja Pada Lintasan (Esveld, 2001)

2.7.3. Gaya Vertikal

Gaya ini adalah beban yang paling dominan dalam struktur jalan rel. Gaya vertikal menyebabkan terjadinya defleksi vertikal yang merupakan indikator terbaik untuk penentuan kualitas, kekuatan dan umur jalan rel. Secara global, besarnya gaya vertikal dipengaruhi oleh pembebanan oleh lokomotif, kereta maupun gerbong.

1. Gaya Lokomotif (*locomotive*), jenis lokomotif akan menentukan jumlah bogie dan gandar yang akan mempengaruhi berat beban gandar di atas rel yang dihasilkannya.
2. Gaya Kereta (*car, coach*), Karakteristik beban kereta dipengaruhi oleh jumlah bogie dan gandar yang digunakan. Selain itu, faktor kenyamanan penumpang dan kecepatan (faktor dinamis) mempengaruhi beban yang dihasilkan.
3. Gaya Gerbong (*wagon*), Prinsip pembebanan pada gerbong adalah sama dengan lokomotif dan kereta. Meskipun demikian, kapasitas muatan gerbong sebagai angkutan barang perlu diperhatikan dalam perencanaan beban.

$$Q_{tot} = Q_{stat} + Q_{centr} + Q_{wind} + Q_{dyn}$$

Keterangan :

Q_{stat} = Statik beban roda adalah setengah dari statik beban gandar, dihitung pada lintasan lurus.

Q_{centr} = Peningkatan beban roda pada rel luar (akibat gaya sentrifugal pada tikungan).

Q_{wind} = Beban angin yang melintas

Q_{dyn} = Komponen beban roda yang dihasilkan :

Sprung mass 0 - 20 Hz

Unsprung mass 20 – 125 Hz

Gelombang, pengelasan, keausan roda 0 – 2000 Hz

Dari persamaan diatas dapat dihitung gaya yang bekerja pada kendaraan.

Berikut ini persamaan untuk menghitung gaya yang diterima setiap roda :

$$Q_{centr} + Q_{wind} = G \frac{h_d l}{s^2} + H_w \frac{q}{s}$$

Dimana berdasarkan persamaan berikut :

$$h_d = \frac{s v^2}{g R} - h \text{ (penurunan kan)}$$

Dimana,

G = Berat kendaraan per roda

L = Jarak pusat gravitasi kendaraan

s = Lintasan

H_w = Tekanan angin

q = Jarak pusat gravitasi permukaan lateral

v = Kecepatan

g = Percepatan gravitasi

R = Jari-jari

h = Kan

Proporsi dari Q_{centr} biasanya 10 – 25% dari beban roda statis. Dengan beeban angin disisi lain H_w adalah negatif. Hal ini sangat penting agar kendaraan tetap stabil pada tikungan.

2.7.4. Gaya Horisontal (Lateral)

Gaya ini terjadi akibat adanya gaya sentrifugal (ketika rangkaian kereta api berada di lengkung horizontal), gerakan ular rangkaian (*snake motion*) dan

ketidakrataan geomtrik jalan rel yang bekerja pada titik yang sama dengan gaya vertikal. Gaya ini dapat menyebabkan tercabutnya penambat akibat gaya angkat (*uplift force*), pergeseran pelat andas dan memungkinkan terjadinya *derailment* (anjlog atau keluarnya roda kereta dari rel). Total tekanan lateral horizontal yang diberikan oleh roda di luar rel adalah :

$$Y_{tot} = Y_{flange} + Y_{centr} + Y_{wind} + Y_{dyn}$$

Dimana,

Y_{flange} = Gaya lateral pada tikungan akibat flange berlawanan dengan rel luar

Y_{centr} = Gaya lateral akibat gaya sentrifugal

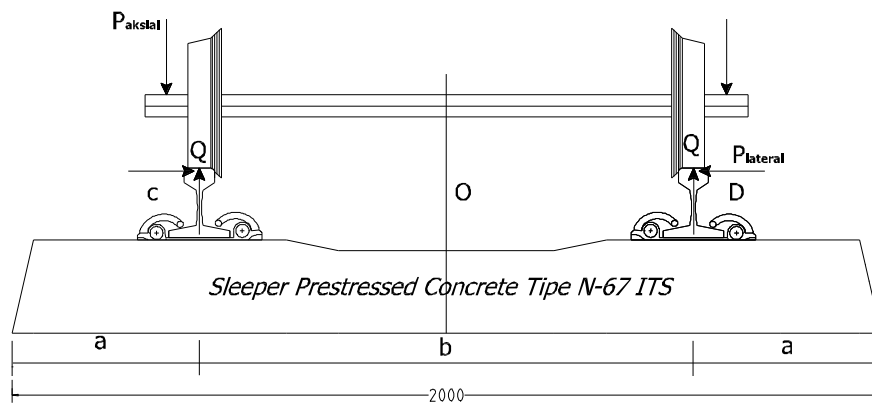
Y_{wind} = Beban angin

Y_{dyn} = Komponen gaya lateral dinamis

Persamaan beban yang diterima per roda :

$$Y_{centr} + Y_{wind} = G \frac{h_d}{s} + H_w$$

Letak beban horizontal dan vertical dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2.8 Gaya Horizontal (Esveld, 2001)

Pengelinciran bisa terjadi akibat rasio $\frac{Y}{Q}$ mengalami kenaikan nilai akibat tingginya gaya lateral Y atau rendahnya beban roda Q . Dalam hal ini *flange* bisa terangkat menjauhi rel sehingga kereta dapat tergelincir. Untuk menghitung keseimbangan pendekia flens dapat menggunakan persamaan berikut : $\frac{Y}{Q} > tg(\beta + \emptyset)$, dimana, $tg \emptyset = f$ (koefisien friksi). Percobaan – percobaan yang dilakukan oleh

ore pada tahun 82 menunjukkan bahwa penggelinciran dapat terjadi jika rasio $\frac{Y}{Q}$ jaraknya lebih dari 2 m atau lebih dari 1.2 m. Untuk alasan nilai berikut inilah biasanya dibuat kriteria keamanan (faktor keamanan) terhadap penggelinciran : $\frac{Y}{Q} <$

1.2 Gaya lateral total terjadi akibat roda pada lintasan harus dilawan menggunakan : Resistensi terhadap perpindahan gaya lateral pada bantalan ke alas balas dan kekakuan horizontal dari kerangka lintasan (5 – 10%). Nilai praktis untuk ketahanan lateral yang dibutuhkan oleh lintasan untuk menjamin stabilitas menggunakan formula berikut : $H_s > 10 + \frac{P}{3}$ dimana, H_s adalah gaya horizona (kN), yang diperlukan untuk perpindahan gaya lateral pada lintasan. P adalah beban gandar (kN).Beban roda horizontal dari kendaraan dibatasi dengan menggunakan rumus berikut : $H_w < 0,85 (10 + \frac{P}{3})$.

2.7.5. Gaya Horisontal (Longitudinal)

Gaya horizontal (longitudinal) yang terjadi pada lintasan diakibatkan oleh : Tekanan suhu, terutama pada lintasan CWR. Gaya-gaya ini dianggap sebagai beban statis, percepatan dan pengereman, tekanan susut akibat gesekan rel pada lintasan, rangkai pada lintasan (Rosyidi 2015).

Gaya longitudinal dapat diakibatkan oleh perubahan suhu pada rel (thermal stress) Gaya ini sangat penting di dalam analisis gaya terutama untuk konstruksi KA yang menggunakan rel panjang (*long welded rails*). Gaya longitudinal juga merupakan gaya adhesi (akibat gesekan roda dan kepala rel) dan gaya akibat pengereman roda terhadap rel (Esveld 2001).

1. Tekanan suhu

Perubahan panjang rel akibat tekanan suhu dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t$$

Dimana,

α = koefisien ekspansi linear baja

Δt = perubahan suhu

l = panjang asli rel

Dalam kasus rel yang dilas (tanpa sambungan) terjadi regangan. Untuk mencegah perpindahan aksial rel sepenuhnya akibat perubahan suhu menggunakan persamaan berikut :

$$N = E \cdot A \frac{\Delta l}{l} = E \cdot A \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

E = modulus elastisitas dari rel baja

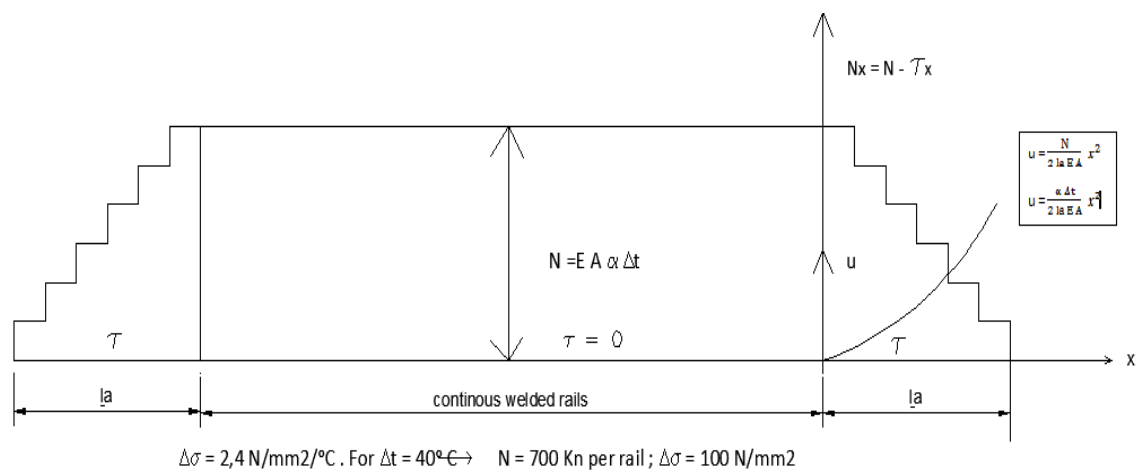
A = luas penampang rel

2. Rangkak pada lintasan

Rangkak pada lintasan dapat disebabkan oleh :peningkatan kekuatan CWR,terlalu besar atau terlalu kecil sela pada sambungan (*join*) lintasan,ketidakteragamannya rangkakan pada rel akan menghasilkan ketidakselarasan antara bantalan karena adanya momen lentur horizontal pada rel, perpindahan bantalan mengakibatkan terganggunya stabilitas lintasan pada alas balas.

3. Beban pengereman

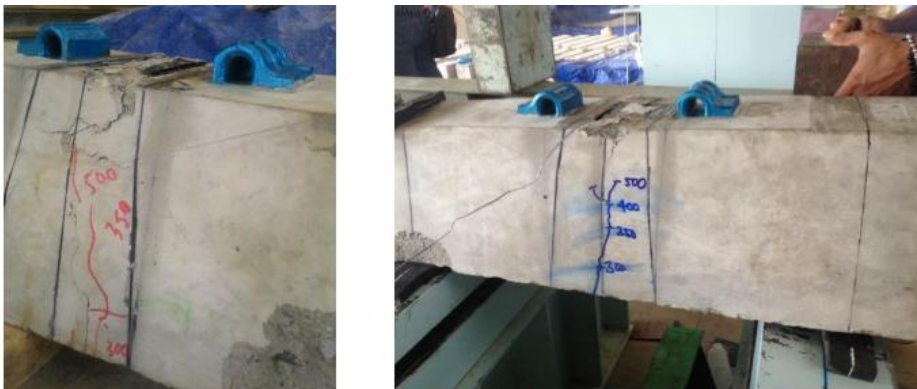
Beban pengereman harus diperhitungkan. Biasanya beban tersebut diasumsikan 25% dari berat kereta untuk gaya aksial seperti pada Gambar 2.8.



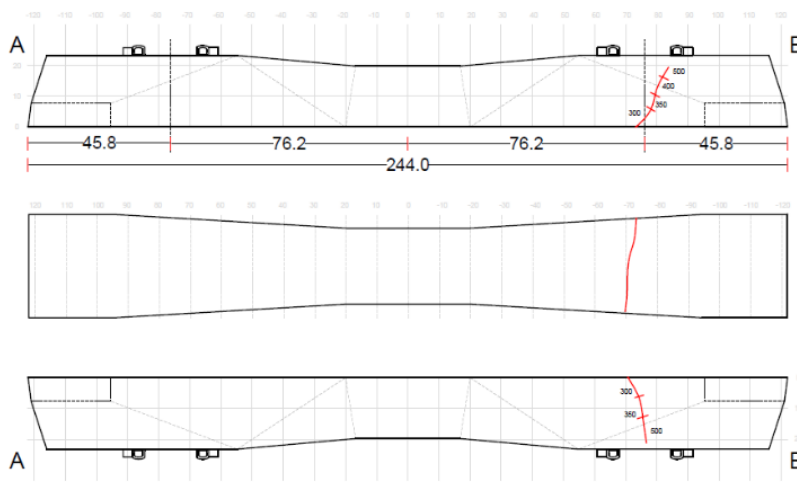
Gambar 2.9 Distribusi Tekanan Temperatur CWR (Esveld, 2001)

2.8. Penelitian Eksperimental Bantalan Beton.

Dilakukan oleh (Puspasari et al., 2016) yang menghasilkan nilai lendutan 0.681 mm pada posisi dudukan rel dan 0.489 mm pada kondisi beban desain, sedangkan retak awal yang didapatkan pada beban 256.835 Kn terjadi retak rambut yang tidak dapat dilihat secara visual. Dokumentasi Pola retak dan sketsa pola retak dapat dilihat pada gambar 2.9 dan 2.10. Uji regangan menggunakan *strain gauge* yang berfungsi untuk membaca regangan pada beton terputus diakibatkan terlepasnya *strain gauge* dari permukaan beton sehingga pembacaan berhenti. dimana saat dibebani dengan beban desain pada dudukan rel, dimana menghasilkan regangan 837.211×10^{-6} , saat dibebani pada beban retak awal menghasilkan regangan 871.362×10^{-6} , serta menghasilkan regangan maksimum sebesar 1471.180×10^{-6} terjadi saat pemberian beban 446.67 Kn.



Gambar 2.10 Pola Retak Momen Dudukan B (Puspasari et al., 2016)



Gambar 2.11 Sketsa Pola Retak pada Pengujian Momen Dudukan B (Puspasari et al., 2016)

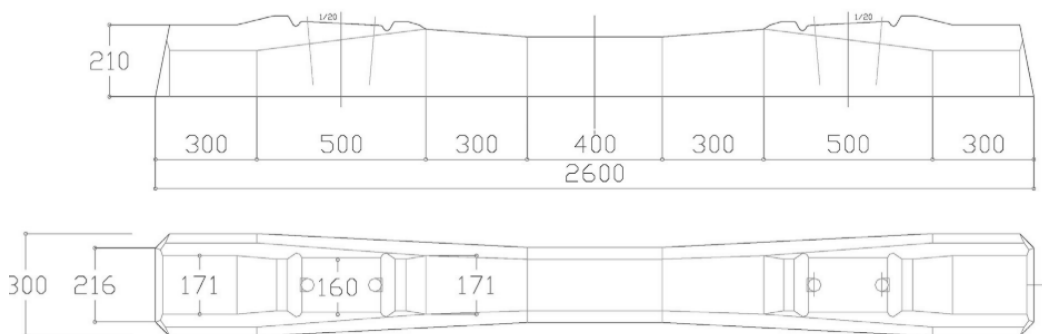
2.9. Permodelan Numerik Bantalan Beton Prestressed

Rezaie et al., (2016) melakukan penelitian numerik tentang analisa sensitivitas beton prestressed untuk faktor efektif retak longitudinal. Investigasi dilakukan dengan ukuran *sleeper mono block* ukuran 2600 x 210 x 300 seperti Gambar 2.11 dan data material yang di pakai dari produk tipe B70 pabrikan Iran seperti pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Data Mutu Material

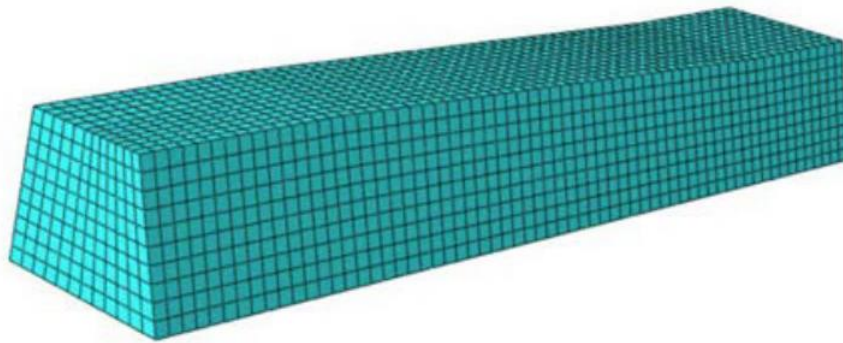
Material	Poison Rasio	Modulus Elastisitas (Mpa)	Dilation Angle	Kuat Tekan (Mpa)
Beton	0.15	34551	36	60
	Poison Rasio	Modulus Elastisitas (Mpa)	Tegangan Leleh (Mpa)	Tegangan Ultimit (Mpa)
Tulangan	0.3	200000	1400	2000

Sumber : Rezaie et al., 2016



Gambar 2.12 Monoblok tipe B70 (Rezaie et al., 2016)

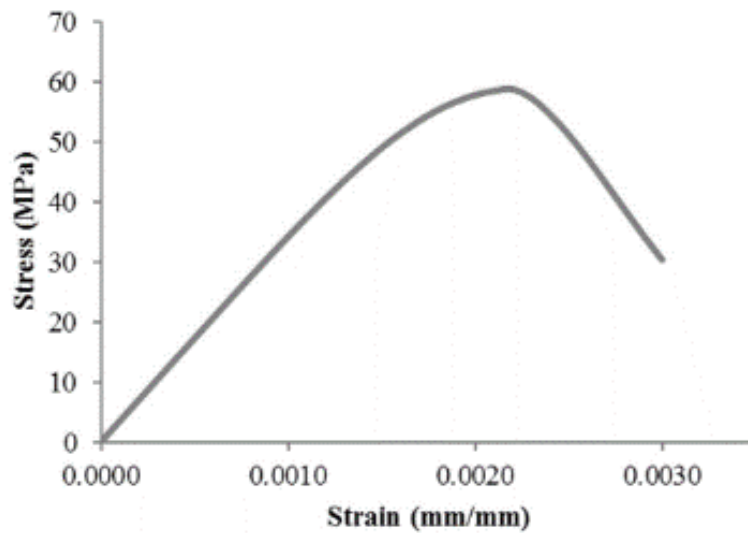
Bantalan Beton Prestressed dimodelkan secara numerik dengan program bantu ABAQUS hanya serperempat Bantalan berdasarkan anggapan lentur yang simetris seperti yang disajikan pada Gambar 2.12 (Rezaie et al., 2016). Geometri Bantalan dimodelkan dengan elemen hingga *hexahedral*. Elemen *truss* dipilih untuk memodelkan sengkang dan tulangan baja. Elemen *shell* dipilih untuk memodelkan sambungan. Hasil analisa pemodelan numerik didapatkan dari pembebanan *monotonic* dan *cyclic* yang dilakukan secara horisontal. Model yang digunakan dengan *mesh* total 13184.



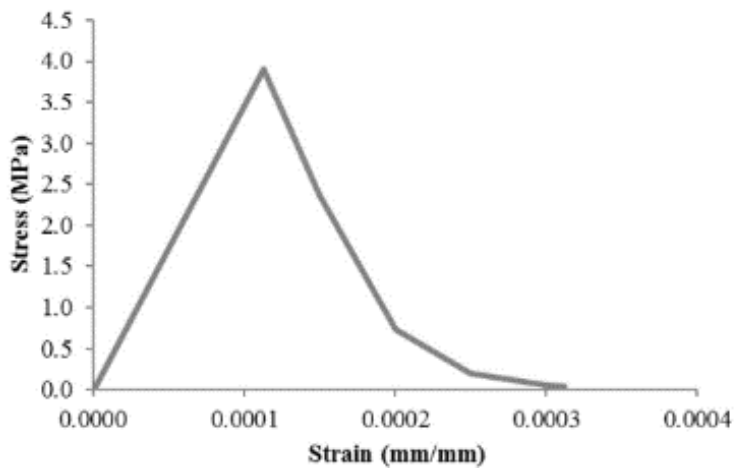
Gambar 2.13 Permodelan Monoblock dengan ABAQUS (Kaewunruen et al., 2016).

Dalam model retakan berlubang beton, diasumsikan bahwa retak adalah faktor terpenting dalam perilaku material. Perilaku " non-isotropik" akan mengatur materi setelah retak. Semakin banyak retakan yang memengaruhi proses perhitungan dan menciptakan masalah dalam hasil yang menjadi konvergen. Dianjurkan untuk menggunakan beton retak model yang disarankan dalam kasus-kasus di mana beton berada di bawah tekanan yang relatif rendah (hampir seperempat atau seperlima dari tekanan yang dapat ditoleransi oleh beton). Oleh karena itu, model plastisitas kerusakan beton harus digunakan.

Concrete damage plasticity menggunakan konsep kerusakan isotropik di wilayah linier, menggabungkan kekuatan tarik isotropik dan plastisitas untuk menunjukkan perilaku beton non-linier. Model yang digunakan adalah model kontinyu berdasarkan perilaku plastik dan retak yang disebabkan oleh tekanan adalah mekanisme kerusakan utama pada model. Diagram hubungan tegangan dan regangan *tensile concrete* dan *compressive concrete* $F_c' = 60\text{MPa}$ dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.14 Strain – stress beton tekan $F_c = 60$ MPa (Rezaie et al., 2016)



Gambar 2.15 Strain – stress beton tarik $F_c = 60$ MPa (Rezaie et al., 2016)

2.10. Constitutive Material Equation

Razvi & Saatcioglu, (1999) mendekati persamaan hubungan tegangan-regangan beton mutu tinggi. Kekuatan beton yang terkekang dapat ditentukan dengan persamaan 2.1 berdasarkan model kekangan yang diusulkan oleh Razvi & Saatcioglu (1999). Dimana f_{le} adalah tekanan lateral seragam.

$$f'_{co} = f'_{cc} + k_1 f_{le}$$

$$k_1 = 6,7 (f_{le})^{-17}$$

$$f_{le} = k_2 f_l$$

$$f_l = \frac{\sum_{i=1}^a (A_s f_s \sin \alpha)}{s_{bc}}$$

$$k_2 = 0,15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \frac{b_c}{s_1}} \leq 1,0$$

Dimana :

f_l = Tekanan lateral rata-rata

f_s = Tegangan tulangan transversal saat tegangan beton puncak

s = Jumlah kaki sengkang melintasi inti beton

Hubungan tegangan-regangan tarik pada beton dapat didekati persamaan yang diturunkan oleh Hsu and Zhang (1996) sebagai berikut :

$\sigma_r = E_c \epsilon_r$ untuk $\epsilon_r \leq \epsilon_{cr}$

$\sigma_r = f_{cr} (\epsilon_r / \epsilon_{cr})^{0.4}$ untuk $\epsilon_r > \epsilon_{cr}$

Dimana:

E_c = Modulus Young beton

f_{cr} = Kuat tarik beton

ϵ_r = Regangan tarik beton

ϵ_{sh} = Regangan pada titik awal hardening Persamaan

Persamaan berikut untuk mengidealkan strain-hardening non linear yang diusulkan oleh (Mander, 1983)

$\sigma_{st} = f_u + (f_y - f_u) (\epsilon_u - \epsilon_{st} / \epsilon_u - \epsilon_{sh})^P$

untuk $\epsilon_{sh} < \epsilon_{st} \leq \epsilon_u$.

$P = E_{sh} (\epsilon_u - \epsilon_{sh} / f_u - f_y)$

Dimana :

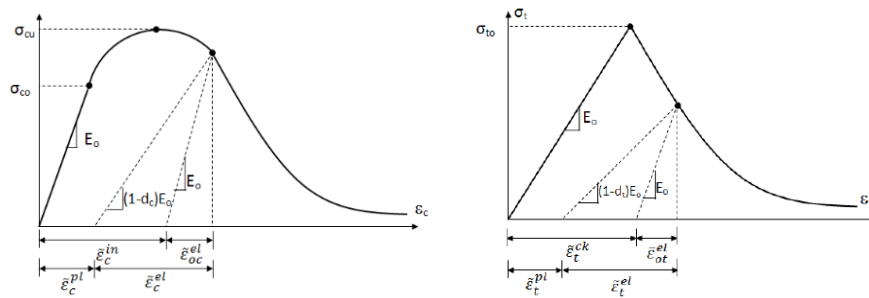
f_u = Kuat tarik ultimit

ϵ_u = Regangan tarik ultimit

P = Parameter yang menggambarkan bentuk kurva *hardening*

2.11. Concrete damage plasticity

Perilaku konstitutif beton pada Abaqus didefinisikan perilaku elastik dan *Concrete Damage Plasticity* (CDP) baik tekan maupun tarik beton. Nilai tegangan tarik beton adalah $f_t = 0.62 \sqrt{f_c}$ yang didefinisikan berdasarkan ACI 318M 2014. *Fracture energy* (G_f) pada tekan beton dihitung dari luas trapesium setiap pias didalam kurva tegangan-regangan beton pada Gambar 2.12 terhadap sumbu x dan y *fracture energy*. Regangan elastis didefinisikan tegangan dibagi modulus elastis

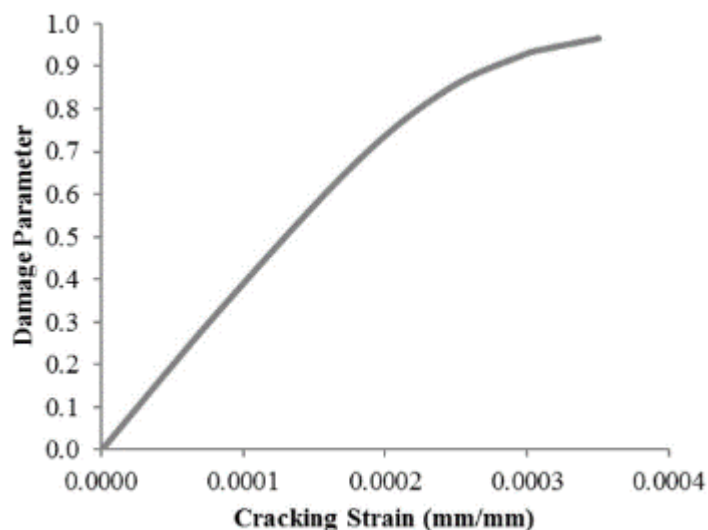


Gambar 2.16 Perilaku beton dengan gaya axial tekan dan tarik (Saatcioglu & Razvi, 1999)

Gambar 2.14 menunjukkan bahwa regangan plastis didapatkan dari hasil pengurangan regangan beton terhadap regangan elastis. Dari luas trapesium tegangan beton terhadap regangan plastis didapatkan *Fracture energy* (G_f). Damage parameter beton didapatkan dari pembagian akumulatif *Fracture energy* (G_f) terhadap total *Fracture energy* (G_f). ABAQUS menghitung regangan plastis menggunakan persamaan :

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{(1-d_c)E_0}$$

Parameter plastisitas yang direkomendasikan oleh Abaqus adalah eksentrisitas aliran potensial $\varepsilon = 0.1$, rasio kekuatan tekan biaxial/uniaxial $\sigma_{b0}/\sigma_{c0} = 1.16$, dan rasio invarian tegangan deviatorik $K = 0,667$. Sudut dilatasi dan viskositas diasumsikan agar sesuai dengan hasil eksperimental $\psi = 40^\circ$ dan $\nu = 0.001$. Contoh hasil damage plasticity dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.17 Damage parameter (Saatcioglu & Razvi, 1999)

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

Tabel 2.11 Tabulasi Penelitian Terdahulu

No	Judul	Penulis	Tahun	Metode	Variabel	Parameter	Kesimpulan
1	Analisis Kelayakan Kontruksi Bagian Atas Jalan Rel Dalam Kegiatan Revitalisasi Jalur Kereta Api Lubuk Alung - Kayu Tanam (Km 39.699 - Km 60.038)	Wahab, Wilton	2017	Perhitungan kekuatan bantalan dan rel dengan pedoman PD 10 1986	Tegangan ijin,Regangan dan Revitalisasi	Panjang rel, Kelas jalan, Jenis lokomotif, Daya angkut, Kecepatan maksimum, Beban gandar,Jenis bantalan	Mengetahui jenis bantalan dan rel yang akan direvitalisasi
2	Combining Track Quality and Performance Measures to Assess Track Maintenance Requirements	Roghani, Alireza,Macciotta, Renato,Hendry, Michael	2015	Penilaian Perawatan Gemotrik Jalan rel yang berfokus pada kekauan rel	Pengelompokan Kekakuan rel existing dan revitalisasi	Data pengukuran dilapangan :Angkatan,Listringan,Pertinggian dan Lebar track.Data strandart kekauan baja	Hubungan antara kekauan rel dan kualitas track dapat menjadi usulan untuk pemeliharaan
3	Damage and failure modes of railway prestressed concrete sleepers with holes/web openings subject to impact loading conditions	Kaewunruen, Sakdirat,Ngamkhanong, Chayut,Lim, Chie Hong	2018	Permodelan struktural dengan penambahan lubang pada bantalan beton pratekan seta pemilihan tulangan transversal dan longitudinal paling efisien	Tegangan,regangan serta pemilihan model paling efisien	Data dan spesifikasi,beton,rel,tulangan,beban lalu lintas	Penambahan lubang dapat membuat kinerja bantalan lebih elastis
4	Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro	Liu, Reng-Kui,Xu, Peng,Sun, Zhuang-Zhi,Zou, Ce,Sun, Quan-Xin	2015	Membandingkan nilai hasil pengukuran kuitas track (TQI) dengan berbagai metode	Pengelompokan kualitas trak	Penaialn track berdasarkan metode berbagai negara	Penilaian kualitas jalan harus dilakukan dengan penggabungan keseluruhan penilaian tidak hanya berfokus pada nilai geometrik
5	Evaluasi Komponen Jalan Rel Berdasarkan Passing Tonnage Dan Analisis Kebutuhan Pemeliharaan Tahunan Jalan Rel Dengan Analisa Jo Tahun 2011	Panjaitan, Herbet,Sembiring, Irwan Suranta	2011	Perhitungan kekuatan bantalan dan rel berdasarkan beban angkut tahunan	Pengelompokan kekakuan rel existing dan revitalisasi	Panjang rel, Kelas jalan, Jenis lokomotif, Daya angkut, Kecepatan maksimum, Beban gandar,Jenis bantalan	Mengetahui jenis bantalan dan rel yang akan direvitalisasi

Tabel 2.12 Tabulasi Penelitian Terdahulu (Lanjutan 1)

No	Judul	Penulis	Tahun	Metode	Variabel	Parameter	Kesimpulan
6	Evaluasi Struktur Atas Komponen Jalan Rel Berdasarkan Passing Tonnage (Studi Kasus : Jalan Rel Lintas Tanjung Karang – Bekri)	Jaya, Fery Hendi	2018	Perhitungan kekuatan bantalan dan rel berdasarkan beban angkut tahunan	Pengelompokan kekakuan rel existing dan revitalisasi	Panjang rel, Kelas jalan, Jenis lokomotif, Daya angkut, Kecepatan maksimum, Beban gandar, Jenis bantalan	Mengetahui jenis bantalan dan rel yang akan direvitalisasi
7	Evaluating track geometrical quality through different methodologies	Berawi, Abdur Rohim Boy, Delgado, Raimundo, Calçada, Rui, Vale, Cecilia	2010	Menganalisa hasil dari TQI dilapangan untuk perencanaan pemeliharaan	Penialain kekrisisan kualitas track dari segi geometrik	Data pengukuran dilapangan : Angkutan, Listringan, Perti nggian dan Lebar track.	Data pengukuran geometrik hanya dapat digunakan untuk penilaian kualitas.
8	Kajian Sistem Manajemen Pemeliharaan Jalan Rel Daerah Operasi 2 Bandung : Studi Kasus Distrik 23C Kiaracondong	Adityadharma, Cahyo	2014	Menganalisa hasil dari TQI dilapangan untuk perencanaan pemeliharaan	Penialain kekrisisan kualitas track dari segi geometrik	Data pengukuran dilapangan : Angkutan, Listringan, Perti nggian dan Lebar track, serta penggolongan kelas jalan	Prosentase pergantian Rel dan Bantalan
9	Kapasitas Kekuatan Lentur Bantalan Beton Pada Jalan Rel Kelas 1 Indonesia	Herdianto, Erwin, Sulistyowati, Indah	2018	Membandingkan beberapa dimensi bantalan dengan tegangan yang terjadi	Perhitungan optimalisasi dimensi bantalan	Beban yang bekerja, Spesifikasi bantalan, modifikasi dimensi	Bantalan dengan dimensi paling optimum
10	Modelling Railway Prestressed Concrete Sleepers (Crossties) with Holes and Web Openings	Kaewunruen, Sakdirat, Gamage, Erosha Kahawatta, Remennikov, Alex M.	2016	Permodelan struktural dengan penambahan lubang pada badan sleeper	Tegangan, regangan serta pemilihan model paling efisien	Data dan spesifikasi, beton, rel, tulang an, beban lalu lintas	Penambahan lubang dapat pada badan membuat kinerja bantalan lebih elastis tetapi tidak dapat menumpu beban statik

BAB 3

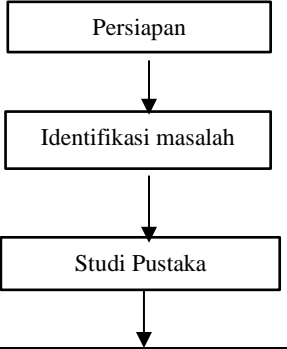
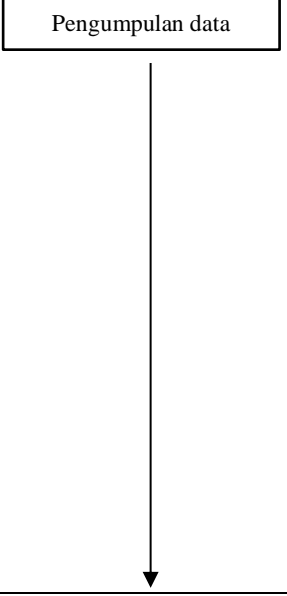
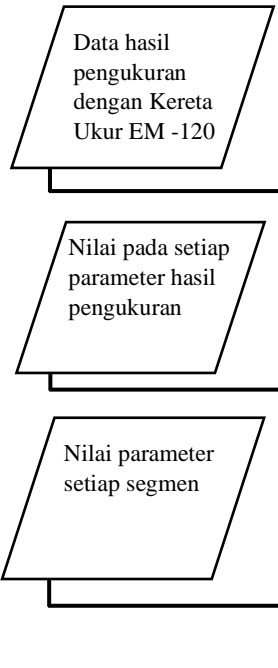
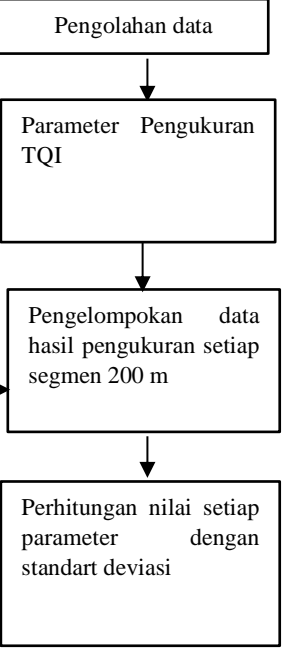
METODOLOGI STUDI

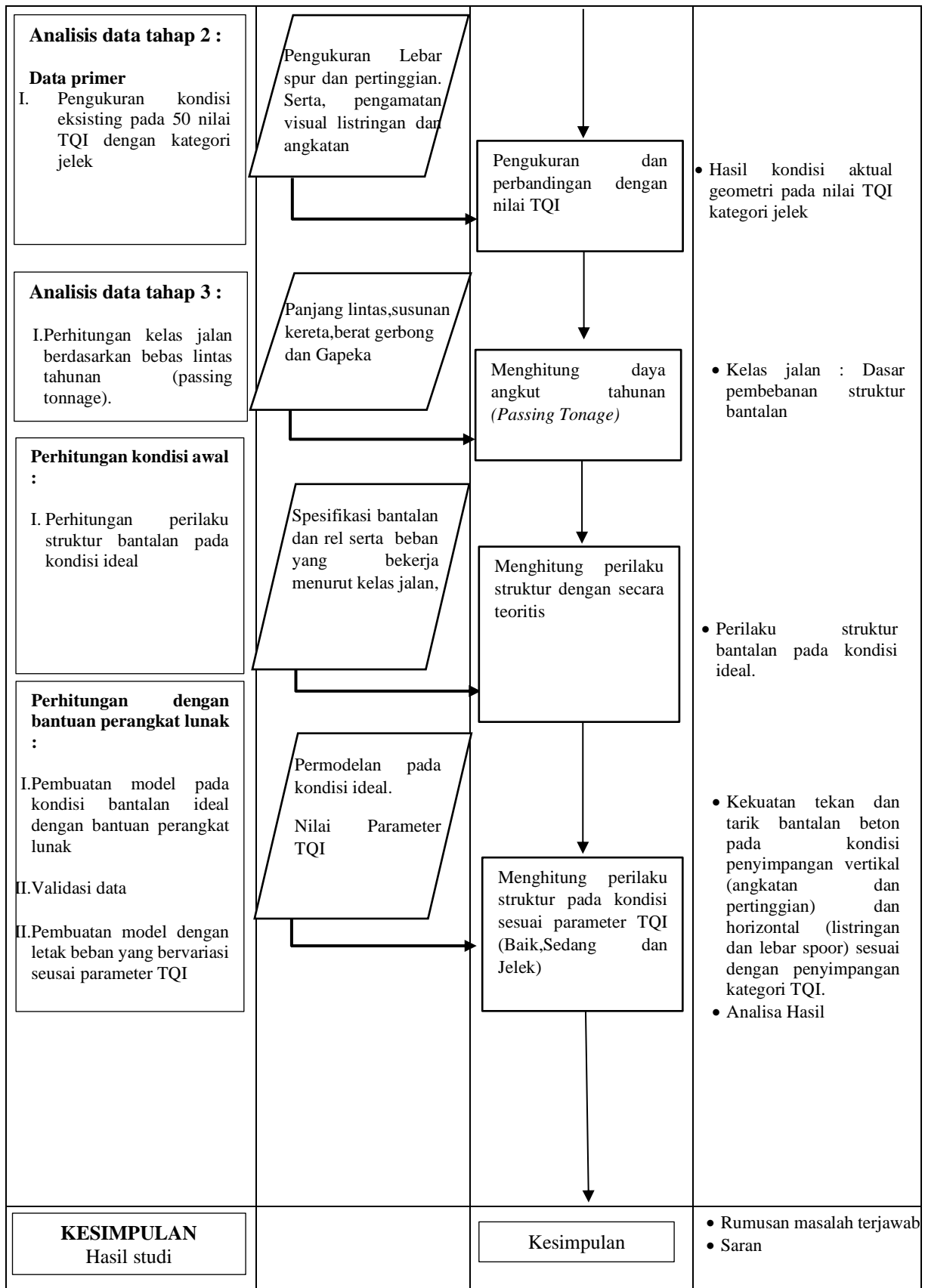
3.1. Umum

Di dalam menyelesaikan penelitian berjudul pengaruh parameter track quality indeks (TQI) terhadap perilaku bantalan beton, menggunakan metodologi yang telah disusun secara sistematis. Sehingga penelitian dapat terlaksana dengan baik dan efisien. Berikut penjelasan metode pelaksanaan dalam penelitian ini.

3.2. Diagram Alir Penelitian

Dalam penyusunan penelitian diperlukan alur berpikir dan pelaksanaan dari awal hingga akhir penulisan. Untuk diagram alir dalam penyusunan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Tahapan	Input	Proses	Output
<p>PENDAHULUAN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifikasi Masalah : Penilaian kualitas track indeks di Indonesia hanya memperhitungkan geometrik jalan rel tanpa memperhatikan keandalan struktur jalan rel tersebut. • Pengumpulan literatur 		 <pre> graph TD A[Persiapan] --> B[Identifikasi masalah] B --> C[Studi Pustaka] </pre>	<ul style="list-style-type: none"> • Latar belakang • Rumusan masalah • Tujuan penelitian • Lokasi penelitian • Cangkupan penelitian • Metodologi penelitian
<p>PENGUMPULAN DATA</p> <p>I.Data Primer : Hasil survey kondisi lebar spur dan pertinggian eksisting pada hasil nilai TQI kategori jelek</p> <p>II.Data sekunder : Data hasil pengukuran dari kereta ukur (TQI), Panjang lintas, <i>Stamformasi</i> gerbong, Berat gerbong,Spesifikasi teknis bantalan dan rel, Grafik perjalanan kereta (Gapeka)</p>		 <pre> graph TD A[Pengumpulan data] </pre>	<p>Data primer :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kondisi aktual geometri lintas <p>Data sekunder :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nilai setiap parameter (TQI) pada setiap segmen • Panjang Lintas • Spesifikasi Bantalan dan Rel • Kuantitas bantalan dan rel • Stamformasi Kereta Lintas (hari). • Beban Gerbong Lintas
<p>Analisis data tahap 1</p> <p>I.Analisa terhadap parameter kerusakan pada hasil pengukuran dengan kereta ukur (TQI) pada tiap segmen</p> <p>II.Perhitungan nilai parameter TQI dengan standart deviasi</p>	 <pre> graph TD A[/Data hasil pengukuran dengan Kereta Ukur EM -120/] --> B[Parameter Pengukuran TQI] C[/Nilai pada setiap parameter hasil pengukuran/] --> D[Pengelompokan data hasil pengukuran setiap segmen 200 m] E[/Nilai parameter setiap segmen/] --> F[Perhitungan nilai setiap parameter dengan standart deviasi] </pre>	 <pre> graph TD A[Pengolahan data] --> B[Parameter Pengukuran TQI] B --> C[Pengelompokan data hasil pengukuran setiap segmen 200 m] C --> D[Perhitungan nilai setiap parameter dengan standart deviasi] </pre>	<ul style="list-style-type: none"> • Nilai setiap parameter pengukuram • Rekapitulasi data setiap parameter pada panjang pengukuran • Hasil nilai parameter TQI



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Penelitian

3.3. Langkah Penelitian

Langkah yang dilaksanakan pada pengerjaan penelitian ini sesuai dengan diagram alir yang telah dijelaskan pada Gambar 3.1. Berikut detail pengerjaan penelitian ini:

1. Persiapan
2. Identifikasi masalah
3. Studi pustaka
4. Pengumpulan dan Pengolahan data
5. Analisis data
6. Hasil pengerjaan.

3.3.1. Tahap Persiapan

Langkah yang dilaksanakan pada pengerjaan penelitian ini sesuai dengan diagram alir yang telah dijelaskan pada Gambar 3.1. Berikut detail pengerjaan penelitian ini:

Tahap persiapan merupakan tahap awal sebelum memulai pelaksanaan dari penelitian ini. Pengambilan data terkait dilakukan di Stasiun Wilayah Daerah Operasi 8 Surabaya yang terletak dikota Surabaya lebih tepatnya adalah Stasiun Surabaya Gubeng. Persiapan yang dilakukan berupa survey pendahuluan yang dilakukan beberapa hari sebelum pengerjaan penelitian ini dengan tujuan untuk mengamati lingkungan atau kondisi jalan rel pada kondisi eksisting pada segmen terkait. Alasan pemilihan ruas jalan kereta Stasiun Surabaya Gubeng – Stasiun Sidoarjo karena ruas tersebut adalah salah satu jalur kereta api yang dilewati jalur ganda dari sistem perkeretaapian, dimana jalur ini adalah salah satu jalur terpadat di pulau jawa. Maka perlu dilakukannya suatu penilaian dari kondisi permukaan geometri jalan rel, serta keandalan struktur pada komponen bagian atas karena bagian tersebut adalah komponen yang langsung menerima beban dari gaya – gaya yang bekerja (Jaya 2018).

Dari survey pendahuluan ini didapatkan sebuah rencana metode survey pengambilan data primer yang dibutuhkan untuk menghitung nilai track kualiti indek (TQI) pada setiap parameter penilaian dengan menggunakan kereta ukur EM-120. Parameter yang disebutkan diatas yaitu : angkatan, listringan, pertinggian, dan

lebar spur dengan satuan millimeter pada setiap perbedaan yang terjadi dengan kondisi track pada awal pembuatan.

3.3.2. Tahap Identifikasi Masalah

Tahap identifikasi masalah menjadi suatu langkah awal dalam suatu pengerjaan penelitian ini. Di dalam identifikasi ini dilakukan suatu proses penentuan gap analysis, dimana pada gap analysis ini ditentukan kondisi eksisting (current state) dan kondisi ideal (ideal state).

Kondisi eksisting : Penilaian kualitas track indeks hanya dinilai pada kondisi geometri jalan rel berdasarkan parameter dengan menggunakan Standart Perkeretaapian Indonesia yang menghasilkan nilai dari Track Quality Index (TQI) berdasarkan parameter terkait tanpa memperhitungkan keandalan struktur pada track tersebut.

Kondisi ideal : Ideal state ini menjelaskan mengenai keadaan ideal atau keadaan yang seharusnya di lapangan. Dalam kondisi ini diharapkan penilaian kualitas track indeks juga memperhitungkan keandalan struktur pada track tersebut yang berpatokan pada tegangan ijin yang disyaratkan oleh regulasi terkait.

3.3.3. Studi Pustaka

Tahap studi pustaka yang dilakukan yaitu pengumpulan berbagai teori yang mendukung dan berkaitan dengan kondisi serta permasalahan yang ada. Selain itu, pada tahap ini telah diuraikan mengenai dasar teori yang berhubungan dengan materi studi, yaitu mengenai : penilaian kualitas indeks (TQI) dengan parameter geomtri / standar Perkeretaapian Indonesia, penentuan kelas jalan berdasarkan beban angkut tahunan (*passing tonage*), standar kelas jalan menurut Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 tahun 2012, dan penelitian-penelitian terdahulu yang mendukung penyelesaian penelitian.

Untuk lebih detailnya teori serta referensi – referensi yang dipakai dalam penelitian ini di jelaskan pada bab 2 (studi pustaka).

3.3.4. Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan salah satu tahapan penting dalam kegiatan penelitian. Data yang digunakan untuk penelitian ini terdiri dari data sekunder dan data primer. data ini diperoleh dari PT.Kereta Api Indonesia (Persero) Daerah Operasi 8 Surabaya, selaku pengelola stasiun, Direktorat Jendral Perkeretaapian Indonesia serta PT.Wijaya Karya (Persero), selaku supliyer bantalan tipe N-67 yang terkait dengan pengerjaan penelitian ini.

3.3.4.1. Data Primer

Dalam menyusun penelitian ini diperlukan data primer, dimana data primer yang diambil di lapangan didapatkan dengan cara pengukuran dan pengamatan visual dilapangan. Tujuan pemeriksaan visual terutama adalah untuk memeriksa apakah terjadi hal-hal yang dapat membahayakan keselamatan perjalanan kereta api, mengetahui kondisi lebar spur eksisting dan pertinggian eksisting. Pemeriksaan ini dilakukan dengan mengukur aktual dilapangan dengan menggunakan alat ukur manual yang dapat membaca lebar dan beda tinggi rel. Tahap ini bertujuan untuk validasi data hasil dari kereta ukur. Pemeriksaan ini juga dilakukan oleh operator kereta api dengan mengukur ini rutin dilakukan tergantung pada batas kecepatan dan tonase harian, mulai dari beberapa kali seminggu pada lintas penting sampai sebulan sekali pada lintas yang kurang penting. Pada keadaan tertentu, misalnya cuaca yang sangat panas, maka frekuensi pemeriksaan bisa ditambah (Roghani, Macciotta, and Hendry 2015). Pemeriksaan dilapangan menggunakan sampel 100 dengan menggunakan alat ukur matisa untuk parameter lebar spor dan pertinggian, serta meter listring untuk parameter listringan dan angkatan.

3.3.4.2. Data Sekunder

Dalam menyusun penelitian ini diperlukan data sekunder sebagai data pendukung dari suatu analisis. Data sekunder dalam penelitian ini diperoleh dari Stasiun wilayah operasi 8 Surabaya. Data yang dibutuhkan yaitu data panjang lintas, susunan gerbong, berat gerbong, data geometri dan properti bantalan dan rel, kuantitas rel dan bantalan,arsip pemeliharaan, grafik perjalanan kereta aktual

(Gapeka), hasil pengukuran dari kereta ukur (TQI), dimana pada hasil tersebut menghasilkan nilai setiap parameter dari segmen yang diukur. Berikut merupakan contoh hasil kinerja atau output dari suatu kereta ukur yang disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Contoh Output Kereta Ukur

MP	MPFT	LPROF	RPROF	total	LALIGN	RALIGN	total	GAUGE	XLEVEL
(km)	(m)	(40m)	(40m)						
12	1	-2.36	-4.35	-6.71	-3.07	-3	-6.07	1435.25	3.75
12	2	-3.22	-5.14	-8.36	-3	-2.97	-5.97	1435.15	3.84
12	3	-3.75	-5.74	-9.49	-3.29	-3.1	-6.39	1435.05	3.35
12	4	-4.29	-6.25	-10.54	-3.69	-3.29	-6.98	1434.84	3.26
12	5	-4.67	-7.12	-11.79	-3.49	-3.08	-6.57	1434.74	3.66
12	6	-5.13	-7.9	-13.03	-3.48	-2.98	-6.46	1434.64	3.72
12	7	-5.59	-8.43	-14.02	-3.45	-2.83	-6.28	1434.34	3.6
12	8	-6.1	-8.92	-15.02	-3.33	-2.52	-5.85	1434.05	3.78
12	9	-6.18	-9.56	-15.74	-3.11	-2.23	-5.34	1433.94	3.72
12	10	-6.23	-9.63	-15.86	-3.2	-2.3	-5.5	1433.84	3.26
12	11	-6.23	-10.15	-16.38	-3.02	-2.03	-5.05	1433.74	3.94
12	12	-6.24	-10.5	-16.74	-3.17	-2.21	-5.38	1433.84	3.78
12	13	-6.22	-10.8	-17.02	-2.97	-2.12	-5.09	1433.94	3.81
12	14	-6.09	-11.19	-17.28	-2.31	-1.74	-4.05	1434.24	4.68
12	15	-5.66	-11.36	-17.02	-2.2	-1.58	-3.78	1434.34	4.47
12	16	-5.39	-11.32	-16.71	-2.36	-1.4	-3.76	1434.14	4.78
12	17	-4.97	-11.53	-16.5	-2.09	-1.18	-3.27	1434.24	5.24
12	18	-4.65	-11.42	-16.07	-2.3	-1.3	-3.6	1434.14	4.99
12	19	-4.02	-11.42	-15.44	-2.03	-1.22	-3.25	1434.34	5.46
12	20	-3.88	-11.41	-15.29	-1.99	-1.28	-3.27	1434.54	5.86
12	21	-3.57	-11.49	-15.06	-1.75	-0.96	-2.71	1434.64	5.92
12	22	-3.42	-10.91	-14.33	-1.69	-0.99	-2.68	1434.84	5.15
12	23	-3.05	-10.78	-13.83	-1.28	-0.84	-2.12	1435.04	5.52
12	24	-2.75	-10.43	-13.18	-0.91	-0.64	-1.55	1435.24	5.67
12	25	-2.64	-10.66	-13.3	-0.81	-0.56	-1.37	1435.34	5.58
12	26	-2.84	-10.61	-13.45	-0.81	-0.34	-1.15	1435.34	5.4
12	27	-2.74	-10.47	-13.21	-0.59	-0.03	-0.62	1435.24	5.43
12	28	-2.71	-10.33	-13.04	-0.62	-0.13	-0.75	1435.34	5.4

Sumber :Dirjen Perkeretaapian Indonesia, 2018

3.3.5. Analisis Data

Dalam tahap ini, dilakukan proses analisis data untuk menjawab rumusan masalah dalam penelitian. Analisis yang dilakukan untuk menjawab rumusan masalah yaitu :

1. Analisis *Track Quality Index* pada lintas dengan standar perkeretaapian Indonesia, ada beberapa tahapan antara lain :
 - Analisa setiap parameter kerusakan
 - Perhitungan *Track Quality Index* (TQI)

- Pengukuran kondisi eksisting lebar spur
- Pengukuran kondisi eksisting pertinggian

Yang akan dijelaskan pada Sub-bab 3.3.5.1 - 3.3.5.3

2. Mengetahui perilaku bantalan beton pada kondisi ideal atau nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori $TQI \leq 15$, ada beberapa tahapan antara lain :
 - Penentuan kelas jalan berdasarkan daya angkut tahunan (*Passing Tonage*).
 - Perhitungan perilaku bantalan beton type N-67 secara teoritis.
 - Validasi hasil perhitungan teoritis dengan penelitian sebelumnya.
 - Permodelan bantalan beton type N-67.
 - Validasi hasil permodelan pada kondisi ideal.
 - Permodelan bantalan beton type N-67 dengan hasil parameter kategori baik ($TQI \leq 15$).

Yang akan dijelaskan pada Sub-bab 3.3.5.4 – 3.3.5.9.

3. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori $15 \leq TQI \leq 25$ ada beberapa tahapan antara lain :
 - Pada analisa ini langkah yang dilakukan sama dengan cara pada poin ketiga tetapi letak pembebanan di rencanakan pada batas nilai kategori ($15 \leq TQI \leq 25$).
4. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori ($25 \leq TQI \leq 40$) dan $TQI > 40$ ada beberapa tahapan antara lain :
 - Pada analisa ini langkah yang dilakukan sama dengan cara pada poin ketiga tetapi letak pembebanan di rencanakan pada batas nilai kategori ($25 \leq TQI \leq 40$) dan $TQI > 40$

3.3.5.1. Analisis Setiap Parameter Kerusakan

Analisis setiap parameter kerusakan pada penelitian ini menggunakan acuan Pedoman standar PT. Kereta Api Indonesia (Persero).

Track Quality Index (TQI) sendiri terdiri dari 4 (empat) parameter pengukuran lebar spur, angkatan, listringan dan pertinggian. Selain parameter tersebut, selama pengukuran juga dicatat kecepatan operasional pengukuran.

Pengambilan data ukur dilakukan secara kontinyu sepanjang segment (200 m). Untuk angkatan, listringan dan pertinggian satu segment mewakili panjang 40 meter. Sedangkan untuk lebar spur satu segmen mewakili panjang 20 meter. Nilai pada setiap kategori tersebut ditampilkan dengan satuan panjang (millimeter), dari nilai tersebut terdapat pengelompokan kondisi yaitu dibedakan menjadi 4 kategori yaitu kategori $TQI \leq 15$, $15 < TQI < 25$, $25 < TQI \leq 40$ dan > 40 jika parameter skilu 3 mm dihitung maka batas kategori > 50 (Kurniawan 2015). Batasan nilai tersebut ditampilkan pada Tabel 3.2 . TQI ini tidak mempunyai satuan, karena walaupun merupakan hasil penjumlahan dari satuan yang sama (mm) tetapi vektornya berbeda. Standar nilai TQI yang digunakan PT. Kereta Api Indonesia (Persero).

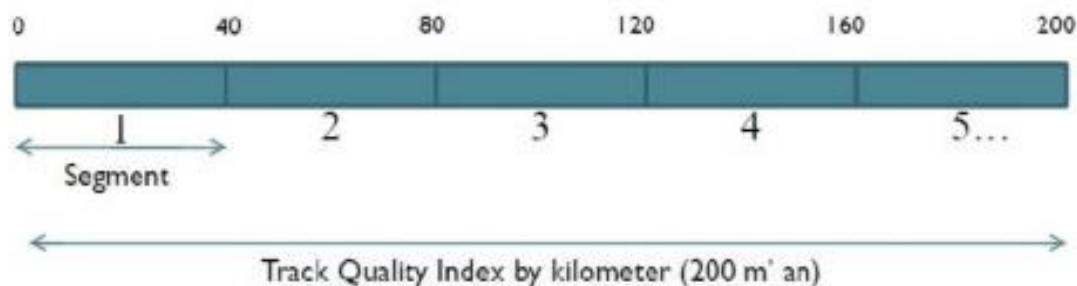
Tabel 3.2 Batasan (thresholds) Nilai Kerusakan per Kategori

Parameter	New	Kat. 1	Kat.2	Kat.3	Kat.4
Angkatan (mm)	1	2	5	8	>8
Listringan (mm)	1	1.5	4	10	>10
Pertinggian (mm)	1	2	6	9	>9
Lebar spur (mm)	0	2	5	10	>10
TQI (max)	8	15	25	40	>40
Kec. GAPEKA		100-120	80-100	60-80	<60

Sumber : Kurniawan, 2015

3.3.5.2. Perhitungan Track Quality Indeks (TQI)

Nilai setiap parameter tiap segmen dihitung nilai standar deviasinya. Segmentasi perhitungan adalah 40 meter pada setiap 200 meteran (Kurniawan 2015). Untuk lebih jelasnya ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Segmentasi Perhitungan Nilai TQI per 200 m (Kurniawan, 2015)

Track Quality Index (TQI) dihitung menggunakan standar deviasi dari nilai masing-masing segmen standar deviasi yaitu:

$$s = \sqrt{\frac{\sum xi^2 - \frac{\sum xi^2}{n}}{n-1}} \dots\dots\dots(3.1)$$

dengan :

- s = nilai standar deviasi
- $\sum xi^2$ = jumlah nilai x dikuadratkan
- n = jumlah data, maka
- TQI = Standar deviasi x TQI Multiplier

Nilai TQI diperoleh dengan cara mencari nilai standar deviasi yang terjadi pada masing-masing segment. Satu segmen mempunyai 11 (sebelas) *record* yang mewakili parameter pertinggian, angkatan, listringan, dan lebar spur. Satu *record* mewakili kerusakan sepanjang 40 meter.

3.3.5.3. Pengukuran Kondisi Eksisting

Tahap pengukuran pada kondisi eksisting dapat dilakukan setelah mendapatkan hasil dari nilai analisa *Track Quality Index* (TQI) pada tahun 2018 dan 2019. Penentuan sampel survey adalah untuk mengetahui kondisi geometri aktual dilapangan, sebagai dasar permodelan *finite elemen analisis* (FEA) karena dari hasil kereta ukur tidak menampilkan arah penyimpangan. Alat ukur yang digunakan adalah mistar ukur untuk penyimpangan (lebar spoor dan pertinggian), serta meter listring untuk (angkatan dan listringan). Detail dan hasil pengukuran dijelaskan pada Sub-bab 4.4.1. Contoh alat ukur yang dapat digunakan seperti pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4. Selain mengukur penyimpangan geometri dalam penelitian ini juga mengukur tipe, dimensi bantalan, jenis rel, serta jenis penambat. Tujuan dari tahapan tersebut, supaya simulasi *Finite Elemen Analisis*, sesuai kondisi aktual dilapangan. Dalam pengukuran eksisting ketebalan ballas serta kondisi tanah tidak diukur, untuk ketebalan ballas menggunakan standart perkeretaapian Indonesia dengan tebal 30 cm’ dan kondisi aktual tanah menggunakan *spring stiffnes* Bowles, (1997).



Gambar 3.3 Alat Ukur Manual (<https://indonesian.alibaba.com/g/rail-gauge.html>, diakses tanggal 8 Agustus 2019)



Gambar 3.4 Cara Kerja Alat Ukur Manual (Survey lokasi, diambil tanggal 29 Agustus 2019)

3.3.5.4. Penentuan Kelas Jalan Berdasarkan Daya Angkut Tahunan (*Passing Tonnage*)

Pada penentuan kelas membutuhkan data sekunder yang di dapatkan dari PT. Kereta Api Indonesia (Persero) Daerah Operasi 8 Surabaya yaitu: grafik perjalanan kereta api atau daftar kereta api yang melintas pada ruas Surabaya – Mojokerto, susunan kereta serta berat gerbong yang melintas contoh data disajikan pada Tabel 3.3 – Tabel 3.5. Tabel – tabel yang disajikan adalah dari penelitian Panjaitan tahun 2011, Tabel 3.3 adalah data kereta yang melintas pada lokasi penelitian, Tabel 3.4 susunan gerbong dalam satu rangkaian dan jenis gerbong yang

ditarik dan Tabel 3.5 adalah beban gerbong yang melintas sesuai dengan jenis gerbong pada tabel rangkaian kereta.

Tabel 3.3 Daftar kereta yang melintas

No. KA	NAMA KERETA API	LINTAS	JARAK KILOMETER	JENIS LOKOMOTIF
U.27	SRI BILLAH	R.Prapat- Medan	267.611	BB 301
U.28	SRI BILLAH	Medan-R.Prapat	267.611	BB 301
U.29	SRI BILLAH	R.Prapat- Medan	267.611	BB 301
U.30	SRI BILLAH	Medan-R.Prapat	267.611	BB 301
U.31	SRI BILLAH	R.Prapat- Medan	267.611	BB 301
U.32	SRI BILLAH	Medan-R.Prapat	267.611	BB 301
U.33	SRI BILLAH	R.Prapat- Medan	267.611	BB 301
U.34	SRI BILLAH	Medan-R.Prapat	267.611	BB 301
U.35	SRI LELAWANGSA	Tebing-Medan	80.542	KRD
U.36	SRI LELAWANGSA	Medan-Tebing	80.542	KRD
U.37	SIANTAR EKSPRES	Siantar-Medan	129.009	BB 301
U.38	SIANTAR EKSPRES	Medan-Siantar	129.009	BB 301
U.39	PUTRI DELI	T.Balai-Medan	174.442	BB 301
U.40	PUTRI DELI	Medan-T.Balai	174.442	BB 301
U.41	PUTRI DELI	T.Balai-Medan	174.442	BB 301
U.42	PUTRI DELI	Medan-T.Balai	174.442	BB 301
U.43	PUTRI DELI	T.Balai-Medan	174.442	BB 301
U.44	PUTRI DELI	Medan-T.Balai	174.442	BB 301

Sumber : Panjaitan and Sembiring, 2011

Tabel 3.4 Susunan gerbong

No.KA	NAMA KA	JENIS LOKO	LINTAS	GERBONG YANG DITARIK							
U.27,U.28,U.29 U.32, U.33,U.34	KA.SRI BILLAH	BB 301	MEDAN- R. PRAPAT	K1	K1	K2	K2	K2	K2	KMP	BP
U.30& U.31	KA.SRI BILLAH	BB 301	MEDAN- R. PRAPAT	K1	K2	K2	K2	K2	K2	KMP	BP
U.35; U.36	KA. SRI LELA WANGSA	-	MEDAN- TEBING TINGGI	4 KRD (KEPALA DAN BADAN KERETA MENYATU)							
U.39; U.40	KA. PUTRI DELI	BB 301	MEDAN- T.BALAI	K3		K3		K3			
U.41;U.42; U.43; U.44	KA. PUTERI DELI	BB 301	MEDAN- T.BALAI	K3	K3	K3	K3	K3	KMP	BP	-
U19;U.20	KA. SIANTAR EKSPRES	BB 301	MEDAN- SIANTAR	K3	K3	K3	K3	K3	KMP	BP	-

Sumber : Panjaitan and Sembiring, 2011

Tabel 3.5 Beban Gerbong

GERBONG KERETA	BERAT KOSONG (Ton)	BERAT ISI (Ton)	BEBAN GANDAR (Ton)	BEBAN TIAP AS (Ton)
K1 = Kereta Kelas 1	35.5	40	20	10
K2 = Kereta Kelas 2	35.5	40	20	10
K3 = Kereta Kelas 3	35.5	40	20	10
KMP = Kereta Restorasi	32	39	19.5	9.25
KKW= Gerbong Tanki	18	47	23.5	11.75
BP = Kereta Bagasi	28	37	18.5	9.25
KRD = (Kepala dan Badan menyatu)	35	40	20	10

Sumber : Panjaitan and Sembiring, 2011

Daya angkut lintas jalan rel dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\text{Beban Lintas (Pd)} = (T_1) + (T_b) \dots\dots\dots(3.2)$$

Dimana ;

Pd = Beban Lintas Harian Kereta Api (ton)

Tb = Tonase barang dan gerbong harian (ton)

Tp = Tonase penumpang dan kereta harian (ton)

Untuk menghitung daya angkut lintas, PT Kereta Api Indonesia (Persero) menggunakan persamaan :

$$T = 360 \times S \times TE \dots\dots\dots(3.3)$$

$$TE = T_p + (K_b \times T_b) + (K_1 \times T_1) \dots\dots\dots(3.4)$$

dimana ;

T = Kapasitas angkut lintas (ton/tahun),

T_E = Tonase ekuivalen (ton/hari),

T_p = Tonase penumpang dan kereta harian,

T_b = Tonase barang dan gerbong harian,

T₁ = Tonase Lokomotif harian,

S = Koefisien yang besarnya bergantung pada kualitas lintas, yaitu :

S = 1,1 untuk lintas dengan kereta penumpang dengan kecepatan maksimum 120 km/jam

S = 1,0 untuk lintas tanpa kereta penumpang

K_b = Koefisien yang besarnya bergantung pada beban gandar, yaitu :

K_b = 1,5 untuk beban gandar < 18 ton

K_b = 1,3 untuk beban gandar > 18 ton

K₁ = Koefisien yang besarnya ditentukan sebesar 1,4

Berdasarkan hasil perhitungan pada persamaan 3.3 maka didapatkan nilai kapasitas angkut lintas dalam satuan (ton/tahun) yang dapat di konversikan pada tabel kelas jalan Peraturan Menteri Perhubungan No.60 Tahun 2012 yang dapat dilihat pada pada tabel yang ada di studi pustaka yaitu Tabel 2.6.

Menurut penelitian Rosyidi tahun 2018 menyatakan bahwa besar tegangan ijin pada setiap kelas jalan, yaitu sebagai berikut kelas I = 1325 kg/cm², Kelas II = 1325 kg/cm², Kelas III = 1663 kg/cm², Kelas IV = 1843 kg/cm², dan kelas V = 2000

kg/cm². Yang lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.6. Maka pernyataan tersebut dapat dijadikan batas ideal (*boundary condition*).

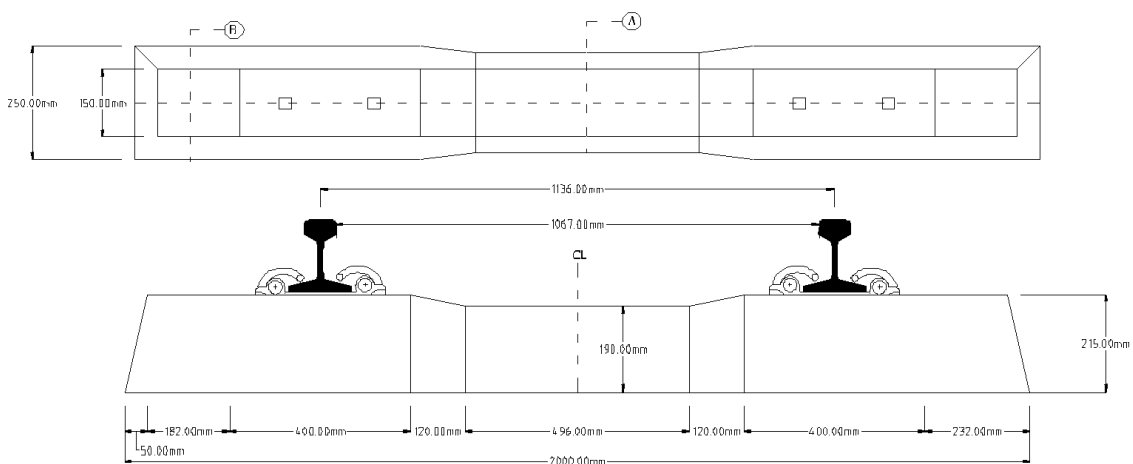
Tabel 3.6 Tegangan Ijin

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (Juta ton/tahun)	Beban roda dinamis (kg)	Jenis Rel	Jenis Bantalan	Tegangan ijin (kg/cm ²)
I	>20	19940	R60/54	Beton	1325
II	10 - 20	16241	R54/50	Beton/Kayu	1325
III	5 - 10	15542	R54/50/42	Beton/Kayu /Baja	1663
IV	2.5 - 5	14843	R54/50/42	Beton/Kayu /Baja	1843
V	<2.5	14144	R42	Kayu/Baja	2000

Sumber : Rosyidi, 2018

3.3.5.5. Perhitungan Perilaku struktur Bantalan Beton Pada Kondisi Ideal (Kategori Baik Sekali)

Perhitungan kondisi ideal dilakukan untuk mengetahui perilaku struktur bantalan pada kondisi ideal. Data geometri bantalan diambil dari data sekunder PT.Wijaya Karya (Persero), dengan mengambil type N-67 yang sesuai dengan lebar spoor 1067 mm, serta type rel R.54. Bentuk serta dimensi dapat dilihat pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6.



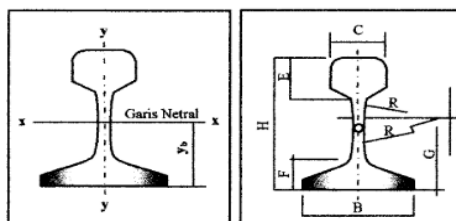
Gambar 3.5 Dimensi Bantalan Beton N-67 (PT.Wijaya Karya Beton, 2016)

Data Perencanaan :

1. Bantalan N-67 Wika Beton

Ukuran Balok	= 2000 mm x 250 mm x 215 mm
Tulangan Tarik (PC Wire)	= 8 ϕ 9
Kuat Tekan Beton (F_c')	= 52 MPa / K.600 (Koefisien 0.83)
Kuat Leleh Baja (F_y)	= 1400 MPa
Elastistas Beton Normal (E_c)	= $4700 \times \sqrt{F_c}$ = 33892.183 MPa
Modulus Elastistas Baja (E_s)	= 200000 MPa
Modulus Keruntuhan (F_r)	= $0.7 \times F_c'^{0.5}$ = $0.7 \times 52^{0.5}$ = 5.04778
Berat Jenis Beton (γ_c)	= 2400 kg/cm ³
Luas Tulangan Prategang (A_{ps})	= 8 ϕ 9 = $(3.14 \times 9 \times 9) \times 8$ = 508.68 mm ²
Kuat TarikTendon (F_{pu})	= 14460 kg/cm ² = 1446 N/mm ²
Angka Ekuivalensi Beton Baja (n)	= E_s / E_c = 5.90106
Dimensi Bawah Rel	
Luas Penampang (A_1)	= 430 cm ²
Momen Inersia (I_{X-1})	= 15139.09 cm ⁴
Momen Tahanan Atas ($W_{1(a)}$)	= 1460.60 cm ³
Momen Tahanan Bawah ($W_{1(b)}$)	= 1571.26 cm ³
Dimensi Tengah Bantalan	
Luas Penampang (A_2)	= 351.5 cm ²
Momen Inersia (I_{X-2})	= 10190.02 cm ⁴
Momen Tahanan Atas ($W_{2(a)}$)	= 1125.35 cm ³
Momen Tahanan Bawah ($W_{2(b)}$)	= 1206.63 cm ³

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 _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			



Gambar 3.6 Dimensi Rel (Peraturan Dinas No.10, 1986)

2. Rel Tipe R.54

Tipe Rel yang digunakan pada Lintas **Surabaya - Mojokerto R.54**, maka dalam perhitungan kondisi ideal dianggap jalan adalah kelas I, karena dalam Peraturan Dinas No.10 (1996), tipe R.54 dapat melayani beban lintas kelas jalan I.

Kecepatan Maksimum (V_{maks})	= 120 km/jam
Kecepatan Rencana ($V_{rencana}$)	= 1.25 x $V_{rencana}$
	= 150 km/jam
Tekanan Gandar	= 18 Ton (<i>PD.10 1986</i>) kelas I
Jenis Rel	= R.54
Momen Inersia (I_x)	= 2346 cm ⁴
Luas Penampang (A)	= 69.34 cm ²
Jarak Tepi Bawah Garis Netral (I_y) / Y_b	= 76.2 mm
Modulus Kekauan Rel (K)	= 180 kg/cm ² (<i>PD.10 1986</i>)
Panjang Rel Per Batang	= 24 m
Modulus Elastisitas Rel (E)	= 210000 MPa

3. Perhitungan Kondisi Ideal

Analisa Beban Dinamis Dengan Persamaan Talbot

(Formulasi Talbot)

$$\begin{aligned} P_d &= P_s \left[1 + 0.01 \left(\frac{V_{rencana}}{1.609} - 5 \right) \right] & \text{Dimana, } P_s &= 0.5 P \\ & & &= 9000 \text{ kg} \\ &= 9000 \left[1 + 0.01 \left(\frac{150}{1.609} - 5 \right) \right] & P_{dijin} &= \text{Kelas jalan I} \\ &= 9000 [1 + 0.01(88.225606)] & &= 19940 \text{ kg} \\ &= 9000 [1 + 0.88225606] \\ &= 9000 [1.88225606] \\ &= 16940.30454 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$P_d < P_d \text{ ijin}$$

$$\text{Maka } 16940.3 < 19940 \quad [\text{OK} \text{ !}]$$

Perhitungan Dumping Faktor Rel (Reduksi / Pengurangan)

$$\begin{aligned} \lambda &= \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \\ &= \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 210000 \times 2346}} \\ &= \sqrt[4]{\frac{180}{1970640000}} \\ &= 0.017384664 \text{ cm} \end{aligned}$$

Perhitungan Momen Maksimum Rel (M_{maks})

$$\begin{aligned} M_{maks} &= \frac{P_d}{4\lambda} \\ &= \frac{16943.3}{4 \times 0.017384664} \\ &= 243609.892 \text{ kg/cm} \end{aligned}$$

Tekanan yang dibebankan adalah kereta terberat 6 Roda (CC) Lintas
Surabaya – Mojokerto

$$\begin{aligned} Ma &= 0.82 \times 243609.892 \\ &= 199760.1115 \text{ kg/cm} \end{aligned}$$

Analisa Tegangan Rel type R.54

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{Ma \times Y}{I} \\ &= \frac{199760.1115 \times 7.62}{2364} \\ &= 648.8371906 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Maka $648.8372 < 1325$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{base}} &= \frac{Ma}{Wb} \\ &= \frac{199760.1156}{1571.26} \\ &= 127.1337089 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Maka $127.1337089 < 1176.80$

Beban yang diterima Bantalan

$$\begin{aligned} Q &= 60\% \times Pd && \text{(Esveld, 2001)} \\ &= 10164.18272 \text{ kg} \end{aligned}$$

Analisa Nilai Modulus Elastisitas Berdasarkan Fc'u

$$\begin{aligned} E &= 6400\sqrt{Fc'} && \text{(Esveld, 2001)} \\ &= 156767.3435 \text{ kg/cm} \end{aligned}$$

Perhitungan Dumping Faktor Bantalan(Reduksi / Pengurangan)

Bawah Rel

$$\begin{aligned} \lambda_{r1} &= \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \\ &= \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 156767.3435 \times 15.139.09}} \\ &= 0.011734492 \text{ cm} \end{aligned}$$

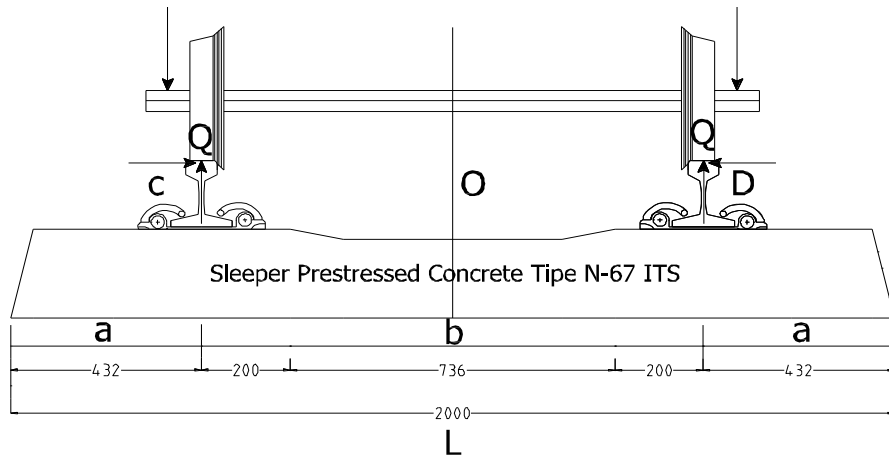
Tengah Bantalan

$$\begin{aligned} \Lambda_{r2} &= \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \\ &= \sqrt[4]{\frac{180}{4 \times 156767.3435 \times 10190.02}} \end{aligned}$$

$$= 0.01295524 \text{ cm}$$

Perhitungan Momen

Letak beban yang pada bantalan beton dapat dilihat pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Letak beban yang bekerja

$$\begin{aligned} M_{\text{desain}} &= 150000 \text{ kg/cm} + \\ &= 75000 \text{ kg/cm} - \\ &= 66000 \text{ kg/cm} + \\ &= 93000 \text{ kg/cm} - \end{aligned} \quad (\text{PT. Wijaya Karya, 2016})$$

Momen yang bekerja pada titik C dan D

$$\begin{aligned} M_c/M_d &= \frac{Q}{4\lambda} \times \frac{1}{\sin\lambda L + \sinh\lambda L} \times [2 \cosh^2 \lambda a (\cos 2 \lambda c + \cosh \lambda L) - 2 \cos^2 \lambda a (\cosh 2\lambda c + \\ &\quad \sinh \lambda L) - \sinh 2\lambda a (\sin 2\lambda c + \sinh \lambda L) - \sin 2 \lambda a (\sinh 2 \lambda c + \sinh \lambda L)] \\ &= \frac{10164.18}{4 \times 0.012} \times \frac{1}{0.675+5.466} \times [2 \times 1.149 \times (2.005+ 5.557) - 2 \times 0.858 \times (2.005 + \\ &\quad 5.557) - 1.303 \times (0.613 + 5.466) - 0.882 \times (1.738 + 5.446)] \\ &= 102123.20 \text{ kg/cm} \end{aligned}$$

Maka momen yang bekerja pada titik C/D $102123.2 \text{ kg/cm} < 150000 \text{ kg/cm}$

Momen yang bekerja pada titik 0

$$\begin{aligned} M_o &= \frac{Q}{2\lambda} \times \frac{1}{\sin\lambda L + \sinh\lambda L} \times [\sinh \lambda c (\sin\lambda c + \sin \lambda(L- c)) + \cosh \lambda c \cos \lambda(L-c) - \cos \lambda c \\ &\quad \cosh \lambda(L-c)] \\ &= \frac{10164.18}{2 \times 0.012} \times \frac{1}{0.516+6.695} \times [1.970 \times (0.990 + 0.951) + 1.267 \times (-0.309) - 0.755 \times \\ &\quad 3.369] \\ &= -50572.43 \text{ kg/cm} \end{aligned}$$

Maka momen yang bekerja pada titik 0 $50572.43 < 75000$ [OK !]

Analisa Tegangan

$$A_s = 8 \phi 9 \\ = 508.680 \text{ mm}^2$$

$$f_i = 0.7 \times f_{pu} \\ = 1012.2 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{inisia} = A_s \times f_i \\ = 514885.896 \text{ N}$$

$$P_{efektif} = 0.8 \times f_i \quad \text{direncanakan } 80\% \\ = 411908.7168 \text{ N}$$

$$e_r = 0.135 \text{ cm}$$

$$e_t = 1.055 \text{ cm}$$

Analisa Tegangan Tahap Pratekan Awal

1 Bawah Rel (Sisi Atas) Dimana, $\sigma_{ijin} = 0.4 F_c$

$$\sigma = \frac{P_{inisial}}{A} - \frac{P_{inisial} \cdot e}{W} \\ = \frac{514885.896}{430} + \frac{514885.896 \times 0.135}{1571.26} \\ = 1149.819306 \text{ N/cm}^2 \\ = 114.98 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2$$

2 Bawah Rel (Sisi Bawah)

$$\sigma = \frac{P_{inisial}}{A} - \frac{P_{inisial} \cdot e}{W} \\ = \frac{514885.896}{430} + \frac{514885.896 \times 0.135}{1571.26} \\ = 1241.647185 \text{ N/cm}^2 \\ = 124.16 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2$$

3 Tengah Bantalan (Sisi Atas)

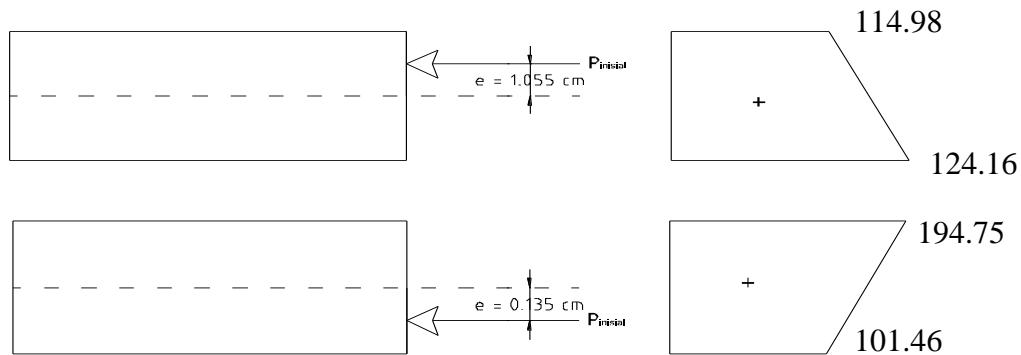
$$\sigma = \frac{P_{inisial}}{A} + \frac{P_{inisial} \cdot e}{W} \\ = \frac{514885.896}{351.5} + \frac{514885.896 \times 1.055}{11125.35} \\ = 1947.523118 \text{ N/cm}^2 \\ = 194.75 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2$$

4 Tengah Bantalan (Sisi Bawah)

$$\sigma = \frac{P_{inisial}}{A} - \frac{P_{inisial} \cdot e}{W}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{514885.896}{351.5} - \frac{514885.896 \times 1.055}{1206.63} \\
&= 1014.641485 \text{ N/cm}^2 \\
&= 101.46 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2
\end{aligned}$$

Kondisi Tegangan tahap pratekan awal pada bawah rel dan tengah bantalan Digambarkan dalam Gambar 3.8



Gambar 3.8 Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal

Analisa Tegangan Tahap Pratekan Efektif

Bawah Rel (Sisi Atas)

$$\begin{aligned}
\sigma &= \frac{P \text{ efektif}}{A} - \frac{P \text{ efektif} \cdot e}{W} + \frac{Mc/d}{W} \\
&= \frac{411908.7168}{430} - \frac{411908.7168 \times 0.135}{1460.60} + \frac{102123.2}{1460.60} \\
&= 1325.370009 \text{ N/cm}^2 \\
&= 132.54 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2
\end{aligned}$$

Bawah Rel (Sisi Bawah)

$$\begin{aligned}
\sigma &= \frac{P \text{ efektif}}{A} + \frac{P \text{ efektif} \cdot e}{W} - \frac{Mc/d}{W} \\
&= \frac{411908.7168}{430} + \frac{411908.7168 \times 0.135}{1571.26} - \frac{102123.2}{1571.26} \\
&= 1169.502988 \text{ N/cm}^2 \\
&= 116.95 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2
\end{aligned}$$

Tengah Bantalan (Sisi Atas)

$$\sigma = \frac{P \text{ efektif}}{A} + \frac{P \text{ efektif} \cdot e}{W} - \frac{Mc/d}{W}$$

$$= \frac{411908.7168}{351.5} + \frac{411908.7168 \times 1.055}{1125.35} - \frac{50572.43}{1125.35}$$

$$= 830.6403824 \text{ N/cm}^2$$

$$= 830.640 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2$$

4 Tengah Bantalan (Sisi Bawah)

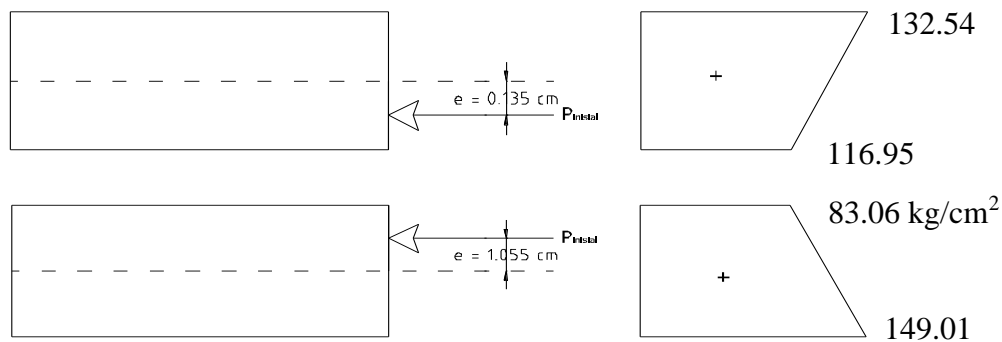
$$\sigma = \frac{P \text{ efektif}}{A} - \frac{P \text{ efektif} \cdot e}{W} + \frac{Mc/d}{W}$$

$$= \frac{411908.7168}{351.5} - \frac{411908.7168 \times 1.055}{1260.63} + \frac{50572.43}{1260.63}$$

$$= 1490.094265 \text{ N/cm}^2$$

$$= 149.01 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2$$

Kondisi Pratekan Efektif dapat dilihat pada Gambar 3.9 tegangan yang bekerja berbanding terbalik dengan tegangan pada tahap pratekan efektif



Gambar 3.9 Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Efektif

Anilasa Rengangan

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$= \frac{F/A}{\Delta l/l_0}$$

Dimana:

$$E = 156767.3 \text{ kg/cm}$$

$$\sigma r(a) = 132.54 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma r(b) = 116.95 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma t(a) = 83.06 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma t(b) = 149.01 \text{ kg/cm}^2$$

Regangan Kondisi Pratekan Efektif

Bawah Rel (Sisi Atas)

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\sigma}{E} \\ &= \frac{132.54}{156767.3} \\ &= 0.000845457 \\ &= 845.347 \times 10^{-6} \\ &= 0.085\%\end{aligned}$$

Bawah Rel (Sisi Bawah)

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\sigma}{E} \\ &= \frac{116.95}{156767.3} \\ &= 0.00074601 \\ &= 746.01 \times 10^{-6} \\ &= 0.075\%\end{aligned}$$

Tengah Bantalan (Sisi Atas)

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\sigma}{E} \\ &= \frac{83.06}{156767.3} \\ &= 0.00052983 \\ &= 529.83 \times 10^{-6} \\ &= 0.053\%\end{aligned}$$

Tengah Bantalan (Sisi Bawah)

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{\sigma}{E} \\ &= \frac{129.01}{156767.3} \\ &= 0.000820517 \\ &= 820.517 \times 10^{-6} \\ &= 0.082\%\end{aligned}$$

Regangan maksimum terjadi pada **bawah rel sisi atas** $\varepsilon_{\max} = 845.347 \times 10^{-6}$ atau 0.085%

Analisa Lendutan

$$\xi = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\sigma}{E}$$

Dimana,

$$l_0 \text{ Bawah Rel} = 752 \text{ mm}$$

$$l_0 \text{ Tengah Bantalan} = 496 \text{ mm}$$

$$\Delta_l = \xi \times l_0$$

1. Bawah Rel (Sisi Atas)

$$\Delta_l = \xi \times l_0$$

$$= 845.457 \times 10^{-6} \times 752$$

$$= 0.636 \text{ mm}$$

2. Bawah Rel (Sisi Bawah)

$$\Delta_l = \xi \times l_0$$

$$= 746.01 \times 10^{-6} \times 752$$

$$= 0.561 \text{ mm}$$

Jadi lendutan maximum terjadi pada **bawah rel** pada sisi atas $\Delta_{lmax} = \mathbf{0.636}$

mm

3. Bawah Rel (Sisi Bawah)

$$\Delta_l = \xi \times l_0$$

$$= 529.83 \times 10^{-6} \times 496$$

$$= 0.561 \text{ mm}$$

4. Bawah Rel (Sisi Bawah)

$$\Delta_l = \xi \times l_0$$

$$= 950.52 \times 10^{-6} \times 496$$

$$= 0.471 \text{ mm}$$

Jadi lendutan maximum terjadi pada **tengah bantalan** pada sisi atas $\Delta_{lmax} = \mathbf{0.471}$ mm.

3.3.5.6. Validasi Hitungan Teoritis Dengan Penelitian Sebelumnya

Validasi data hasil dari hitungan teoritis dibandingkan oleh data hasil penelitian sebelumnya dengan benda uji bantalan beton yang dilakukan oleh Puspasari, Dwi & Djamaludin, 2016. Data tersebut adalah nilai lendutan 0.651 mm pada posisi dudukan rel sisi atas dan 0.489 mm pada tengah bantalan sisi bawah regangan 837.211×10^{-6} pada bawah rel sisi atas pada kondisi pembebanan desain

18.5230 ton. Sedangkan menurut perhitungan bantalan beton secara teoritis dilakukan oleh Jaya, 2018. Yang menghasilkan data tegangan maksimum sebesar 140.28 kg/cm² pada tengah bantalan Untuk lebih jelasnya validasi data hitungan teoritis disajikan pada Tabel 3.7

Tabel 3.7 Validasi Hitungan Teoritis

No	Penelitian	Lendutan (Δ_{max})		Regangan (ξ_{max})		Tegangan (σ_{max})		
		Hasil (mm)	Letak	Hasil	Letak	Hasil (kg.cm ²)	Letak	R.54
1	Puspasari, 2016	0.651	Bawah Rel	0.000837211	Tengah	-	-	
2	Jaya, 2018	-	-	-	-	140.28	Bawah rel	
3	Teoritis	0.636	Bawah Rel	0.000845327	Tengah	149.21	Bawah rel	127.133
4	Perangkat Lunak	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV
5	Persamaan empiris	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	
	-Beton tekan	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	
	-Beton tarik	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	
	-Tarik tulangan	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	Bab IV	
	Selisih	0.015	Sama	0.0000081160	Sama	8.93	Sama	
	Validasi	OK	OK	OK	OK	OK	OK	

3.3.5.7. Permodelan Bantalan Beton type N-67

Pada tahap ini dilakukan pemodelan bantalan type N-67 dengan menggunakan program bantu elemen hingga ABAQUS. Karena tidak semua perangkat lunak dapat memodelkan 3 (tiga) arah dan input material pada program bantu ini, sangat kompleks, dan dapat divalidasi dengan persamaan empiris. Data - data properti dan geometri bantalan beton diinput ke dalam software Abaqus. Pemodelan *finite elemen* menggunakan software abaqus dilakukan dengan tahapan-tahapan tertentu antara lain:

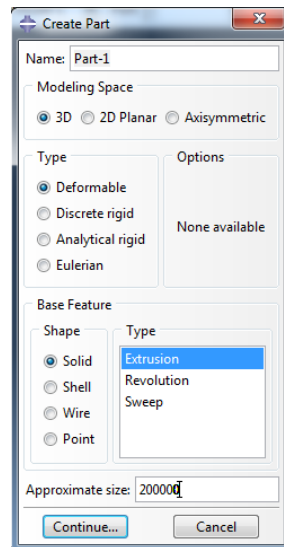
1. *Preprocessing*

Data geometri dan data material seperti ukuran, kuat leleh, dan beban dari pemodelan ditetapkan dan diinput pada tahap ini. Beberapa langkah yang dilakukan dalam tahap ini antara lain:

a. Penetapan geometri model

Langkah pertama dalam pemodelan menggunakan ABAQUS adalah menentukan sistem satuan dan sketsa model yang akan dimodelkan. Satuandalam pemodelan bantalan beton menggunakan program ABAQUS ditentukan dalam N/mm. Pemodelan part beton menggunakan elemensolid hexahedral disebut C3D8R pada ABAQUS sedangkan tulangan longitudinal dan, Rel tipe 54 menggunakan elemen truss yang disebut T3D2 (3D 2 node linear displacement) untuk tulangan polos dan untuk tulngan ulir adalah elemen solid

pada ABAQUS 6.14. Ikatan antara beton dan tulangan didekati sebagai ikatan full bonded yang didefinisikan ABAQUS dengan *embedded region* pada constraint.



Gambar 3.10 Input data Geometri pada Abaqus

Pada ABAQUS 6.14 teori pendekatan yang paling sederhana digunakan pada pemodelan balok solid adalah asumsi Euler-Bernoulli. Pendekatan Euler-Bernoulli digunakan untuk balok untuk regangan aksial dan rotasi yang besar

$$\delta W_1 = \int_{L^f} \int_A \sigma^f \delta \varepsilon^f dA dL^f \dots \dots \dots (3.5)$$

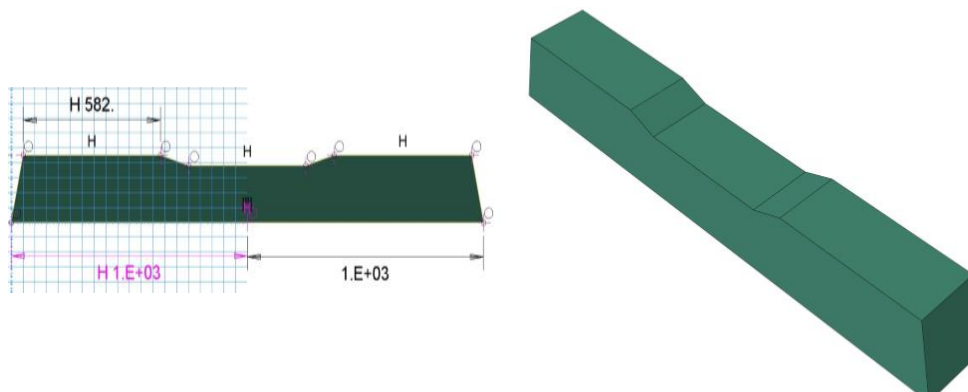
Dimana :

σ^f = Tegangan material

$\delta \varepsilon^f$ = Regangan material

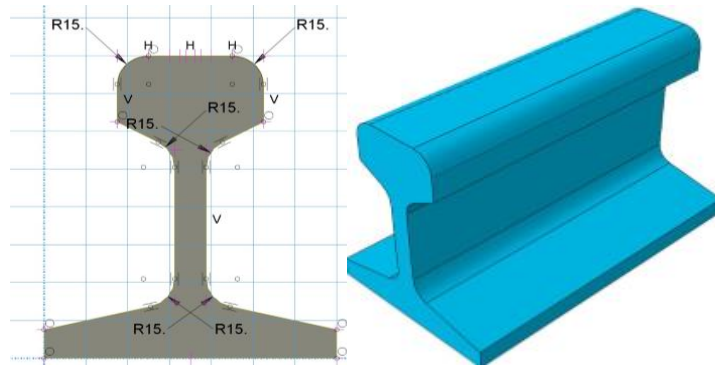
L^f = Panjang serat

Penampang part balok solid beton C3D8R seperti pada Gambar 3.9



Gambar 3.11 Sketsa Bantalan N-67 C3D8R

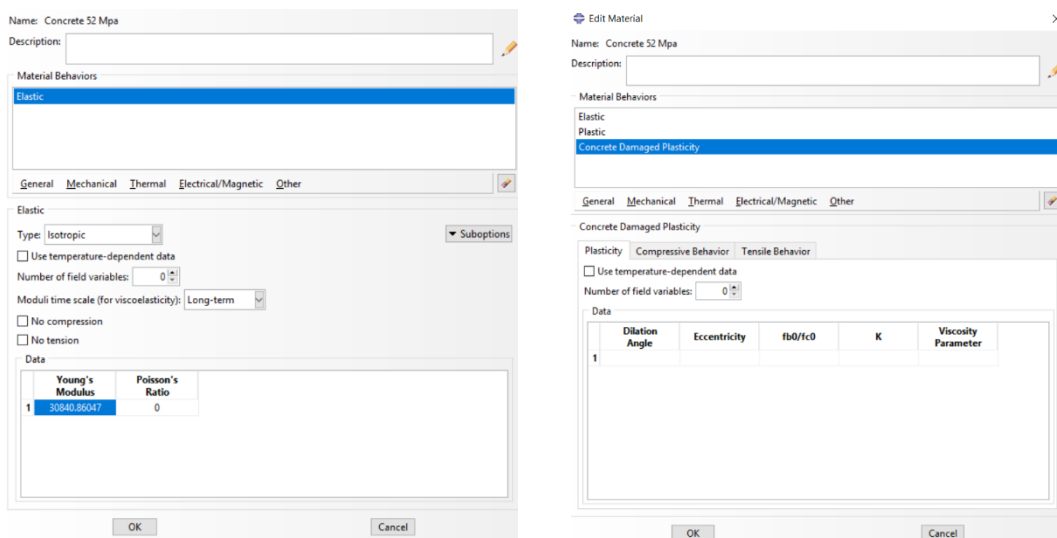
Permodelan Rel type R.54 didekati dengan elemen truss (T2D3) dengan luas penampang sesuai dengan PD 10 tahun 1986 seperti pada Gambar 3.12



Gambar 3.12 Sketsa rel type R.54 T2D3 pada Abaqus

b. Penetapan properti material

Langkah selanjutnya adalah menetapkan properti material yang akan dimodelkan seperti jenis material, modulus elastisitas, dan Kuat Tarik tendon. Pada abaqus jenis material yang di input dapat ditentukan sesuai perilaku material tersebut seperti pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Input Data Material pada Abaqus

Material baja dimodelkan berdasarkan perilaku material *density*, *elastic*, dan *plastic*. Modulus elastisitas dan *poisson ratio* diinput pada perilaku *elastic* baja.

Data tegangan terhadap regangan hasil uji tarik baja diinput pada perilaku *plastic* baja. Material beton dimodelkan berdasarkan perilaku material *density*, *elastic*, dan *concrete damage plasticity* pada ABAQUS. Data tegangan terhadap regangan hasil uji tekan beton diinput pada model *concrete damage plasticity* beton pada ABAQUS seperti yang disajikan pada Gambar 3.13.

Menurut Saatcioglu & Razvi, (1999) dalam *journal of structural engineering / march* halaman 281 – 288 mengenai beton yang terkekang digunakan sebagai verifikasi empiris pada model *concrete damage plasticity* beton pada ABAQUS. Pada pemodelan mekanisme kegagalan material beton digambarkan dengan model *Concrete damage plasticity* pada ABAQUS 6.14. Hubungan tegangan-regangan diatur oleh *scalar damaged elasticity* seperti pada persamaan 3.6.

$$\sigma = (1 - d)D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \dots \dots \dots (3.6)$$

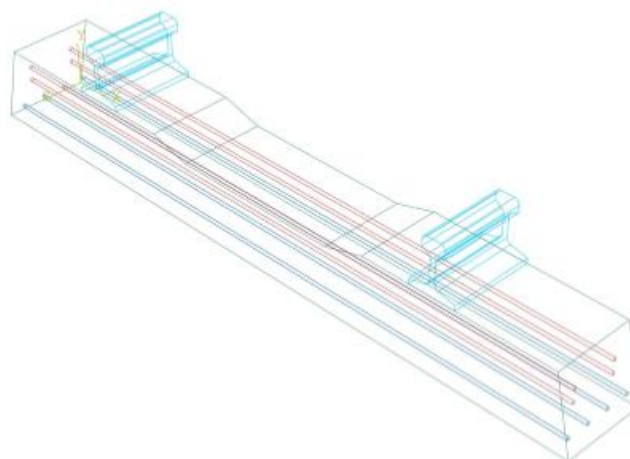
D_0 = *Initial (undamaged) elastic stiffness*

D^{el} = *Degraded elastic stiffness*

d = Variabel degradasi kekuan skalar

c. *Membuat Assembly*

Setelah geometri yang sudah dibuat pada langkah pertama selanjutnya beberapa geometri yang dibuat akan digabungkan (*Assembly*) yang dapat dilihat pada Gambar 3.14



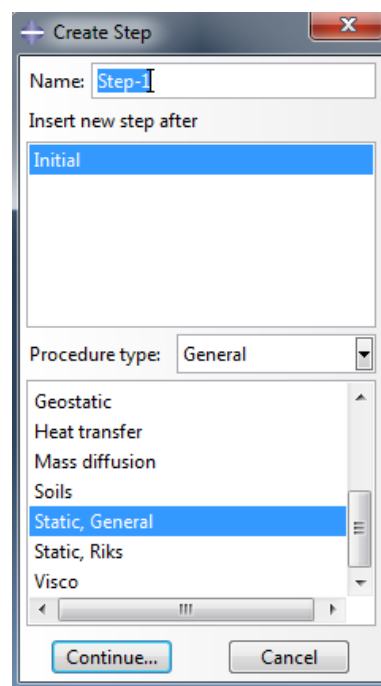
Gambar 3.14 Model numerik *assembly* bantalan beton N-67 dan Rel type 54 pada Abaqus

d. Menentukan *step* dan permintaan output

Pada langkah ini ditentukan *step-step* dan permintaan output untuk analisis yang akan dilakukan. *Step* harus ditentukan sebelum melakukan langkah selanjutnya.

e. Menetapkan tumpuan dan *apply load*

Pendenifisian jenis tumpuan dari model ditetapkan pada langkah ini. Selanjutnya menentukan jenis, arah, dan besar beban yang akan diterapkan pada model. Beban yang diberikan pada bantalan beton adalah Konfersi beban statitik ke beban dinamis dengan persamaan Talbot sudah dihitung pada sub bab 3.3.5.4. sedangkan yang di inputkan adalah $= 60 \% \times P_d$. Untuk lebih jelasnya dilihat pada Gambar 3.15

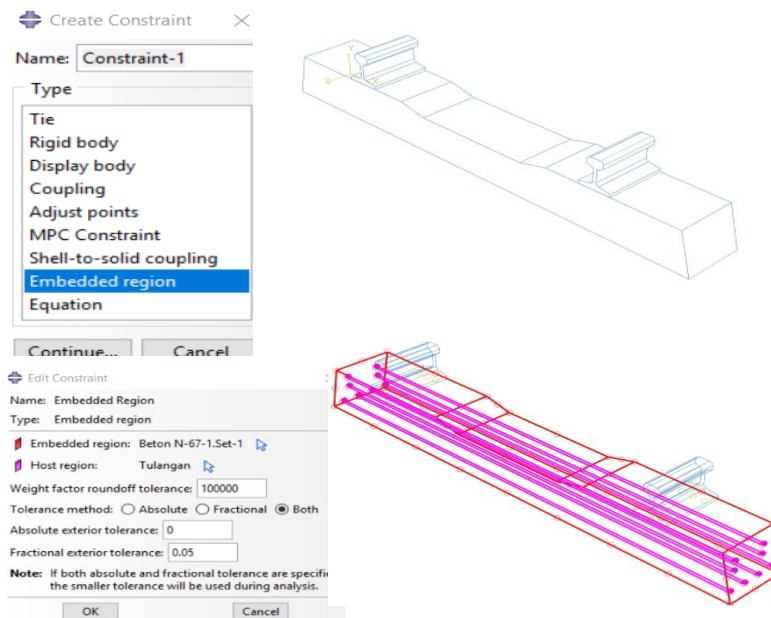


Gambar 3.15 Input *Step* pada Abaqus

f. *Constraints*

Pendefinisian *bonding* antar permukaan elemen ditetapkan pada langkah ini pada ABAQUS. *Constraints* yang digunakan pada pemodelan kolom monolits dan pracetak mutu tinggi adalah *embedded constraints* dan *tie constraints*. Seperti pada Gambar 3.16. ABAQUS 6.14 menyediakan teknik elemen embedded sebagai teknik yang dapat digunakan pada elemen tulangan. ABAQUS mencari hubungan geometrik antara node dari elemen yang ditanamkan dan elemen host sehingga

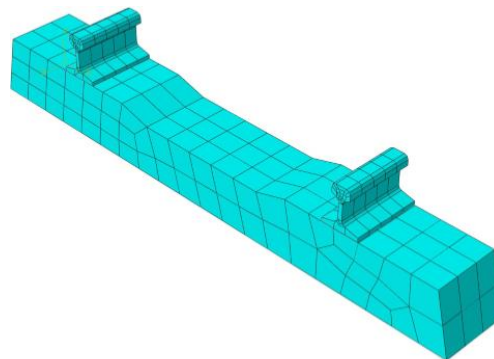
ketika node dari elemen embedded terletak didalam host maka derajat translasi pada node akan dihilangkan



Gambar 3.16 Input *Constraints* pada Abaqus

g. Meshing

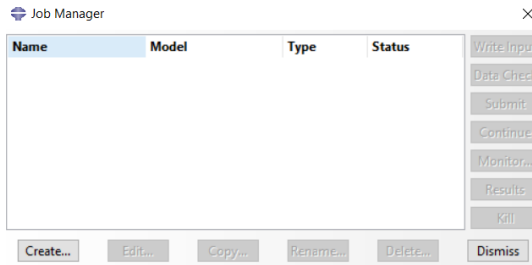
Meshing bertujuan untuk membagi setiap elemen menjadi potongan-potongan lebih kecil sehingga dapat dianalisis oleh abaqus dan didapatkan output dari nodal yang terbentuk. *Meshing* seperti pada Gambar 3.17



Gambar 3.17 *Meshing Model* pada Abaqus

h. *running* model

Setelah meshing dilakukan maka selanjutnya akan dilakukan pendefinisian *job* dan *running* dari model yang sudah dibuat. Kelebihan dari Abaqus adalah jika ada input yang salah tidak dapat melakukan *running* atau terdapat perintah *job aborted* dapat dicek seperti pada Gambar 3.18



Gambar 3.18 *Data Check* pada Abaqus

2. *Postprocessing*

Setelah *running* model maka dipilih output yang akan dikeluarkan yaitu tegangan, regangan dan lendutan.

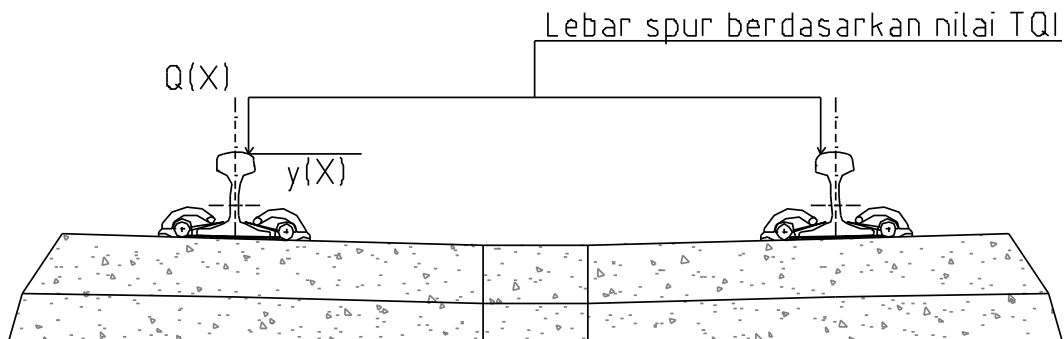
3.3.5.8. Validasi Permodelan Pada Kondisi Ideal

Setelah dilakukan analisa dari hasil output software Abaqus. Selanjutnya hasil output dari pemodelan dengan Abaqus akan divalidasi dengan hasil eksperimental dan hitungan teoritis pada kondisi ideal yang di jelaskan pada sub bab 3.3.5.5 Pada Tabel 3.7. Jika hasil perhitungan dengan menggunakan software Abaqus pada kondisi letak beban yang ideal valid dengan Tabel 3.7 maka proses dapat dilanjutkan.

3.3.5.9. Permodelan Bantalan Beton type N-67 Dengan Hasil TQI Sesuai Kategori Kerusakan

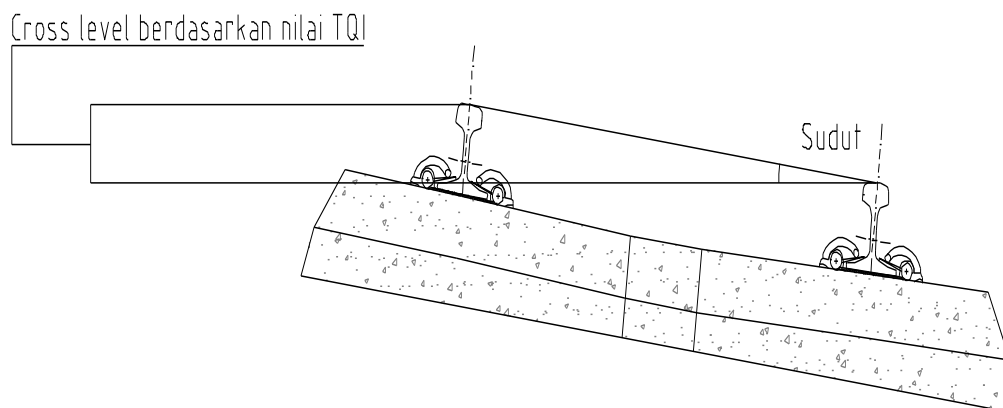
Setelah parameter TQI didapatkan maka permodelan dengan simulasi *finite elemen analisis* (FEA), dengan program bantu perhitungan struktur, proses menetapkan tumpuan dan *aply load* dapat dilakukan. Dengan dasar penelitian adalah Persimpangan beban dari roda kereta *excentris* dan gaya lateral horizontal yang tinggi dapat mengakibatkan tekanan lentur yang cukup besar di tepi rel serta mengakibatkan perbedaan tegangan yang terjadi pada rel. (Yi, 2017). Atau dengan

kata lain beban tidak jatuh tepat pada tengah struktur untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada Gambar 3.19



Gambar 3.19 Letak beban akibat penyimpangan horizontal (lebar spoor dan listringan)

Pengelinciran bisa terjadi akibat rasio $\frac{Y}{Q}$ mengalami kenaikan nilai akibat tingginya gaya lateral (Y) atau rendahnya beban roda (Q) hal ini disebabkan karena beda tinggi (*cross level*) yang semakin besar atau dengan kata lain adanya penyimpangan letak geometri akibat penyimpangan vertikal. Dalam hal ini *flange* bisa terangkat menjauhi rel sehingga kereta dapat tergelincir. Untuk menghitung keseimbangan pendekia flens dapat menggunakan persamaan berikut: $\frac{Y}{Q} > \text{tg}(\beta + \emptyset)$ (Yi, 2017). Atau dengan kata lain beban tidak jatuh pada sumbu Z pusat massa karena ada perbedaan tinggi yang dipengaruhi oleh besarnya sudut, untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada Gambar 3.20



Gambar 3.20 Letak beban akibat penyimpangan vertikal (pertinggian dan angkatan)

Setelah kita mendapatkan nilai penyimpangan geometri (degradasi geometri) sesuai pada kondisi lapangan. Simulasi finite elemen analisis (FEA), dapat dilakukan sesuai letak penyimpangan arah vertikal ataupun horizontal. Terdapat 4 kategori dalam penilaian kerusakan yaitu :

1. $TQI \leq 15$,
2. $15 < TQI < 25$
3. $25 < TQI \leq 40$
4. $TQI > 40$.

Pada masing – masing penyimpangan geometri atau TQI terdapat penyimpangan dengan batasan yang di bagi menjadi 4 kategori (Kurniawan, 2015). Dalam penelitian ini, simulasi penyimpangan perletakan beban dengan program bantu dilakukan sampai roda (beban), tidak jatuh pada node rel (keluar lintasan). Batas kekuatan beton tekan (*compressive strength*) $0.85F_c$, sedangkan batas kekuatan tarik beton (*tensile strength*) adalah $0.32F_c^{0.67}$ untuk beton *no silica foam* (M. M. Attard and Setunge, 1996). Untuk simulasi perletakan, menggunakan koefisien *spring stiffness* pada setiap kondisi tanah menurut J.E.Bowles (1997). Karena kondisi aktual tanah adalah menjadi batasan dalam penelitian ini, dalam mengetahui perilaku tanah harus melakukan penelitian yang cukup panjang di lapangan serta di laboratorium.

3.3.6. Kesimpulan dan Saran

Hasil dari penelitian adalah nilai *Track Quality Indeks* (TQI) dengan metode standar perkeretaapian Indonesia, Perilaku bantalan beton dengan perhitungan teoritis, dan Perilaku bantalan beton yaitu: tegangan, regangan dan lendutan akibat letak pembebanan yang berubah akibat dari hasil parameter *Track Quality Indeks* (TQI) pada masing-masing kategori kerusakan.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Di dalam penelitian ini, dilakukan beberapa analisis data untuk menjawab setiap permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini dalam suatu rumusan masalah pada bab sebelumnya. Analisis yang dilakukan yaitu menghitung nilai TQI. TQI digunakan untuk mengevaluasi kualitas jalan rel dimana terdiri dari 4 parameter yang mempengaruhi yaitu angkatan, listringan, pertinggian, dan lebar spoor (gauge). Penelitian ini membahas penggunaan TQI dalam standar perkeretaapian Indonesia. 50 nilai TQI terbesar di survey secara manual dilapangan agar dapat memvalidasi data perhitungan secara teoritis. Setelah mendapatkan nilai tersebut terdapat pengelompokan kondisi yaitu dibedakan menjadi 4 kategori yaitu kategori $TQI \leq 15$, $15 < TQI < 25$, $25 < TQI \leq 40$ dan $TQI > 40$ dimodelkan numerik dengan bantuan perangkat lunak ABAQUS dengan beberapa parameter pedeketan. ABAQUS sendiri adalah program bantu perhitungan struktural yang sudah sering digunakan para peneliti untuk melakukan investigasi kekuatan struktural misalnya mengetahui letak keretakan, tegangan, regangan dan besarnya perpindahan suatu material (*displacement*).

4.2. Pengolahan Data Track Quality Indeks (TQI)

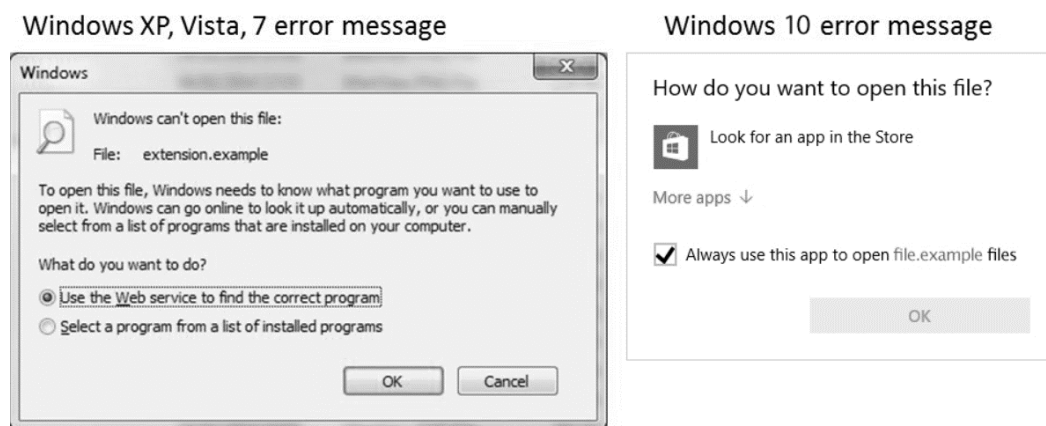
Lokasi penelitian berada pada Lintas Selatan Jawa yaitu Surabaya – Mojokerto Resor 8.13 (Sepanjang) dan Resor 8.14 (Mojokerto), pada KM 17 – KM 57. Perhitungan *track quality index* (TQI), yang digunakan dalam penelitian ini adalah 3 (tiga) jenis yaitu :

1. Kereta Ukur EM -120, untuk data kondisi track tahun 2019.
2. Kereta Ukur Galunggung, untuk data kondisi track tahun 2018, serta
3. Pengukuran manual dengan matisa dan meter listring.

Dari ketiga penilaian kondisi track, cara pengolahan serta metode pengukuran berbeda, yang dijelaskan pada Sub-bab 4.2.1 – Sub-bab 4.2.3.

4.2.1. Kereta Ukur EM-120

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa perhitungan nilai *track quality indeks* (TQI) bertujuan untuk mengevaluasi kondisi lintasan jalan rel dan mengukur permasalahan kondisi lintasan di unit pemeliharaan berdasarkan pada tiap parameter penilaian. Nilai TQI diperoleh dengan cara mencari nilai standar deviasi yang terjadi pada masing-masing segment. Satu segmen mempunyai 11 (sebelas) *record* yang mewakili parameter ketinggian, angkatan, listringan, dan lebar spur. Satu *record* 10 m, 20 m dan 40 m. Pada KA ukur EM-120 ada 2 macam data yaitu diatas kereta ukur EM-120 *on board* dan *off board*. Data *on board* atau hasil *record* data per 10 m, 20 m, dan 40 m ber format .prn data tersebut tidak dapat dibuka kecuali dengan aplikasi bawaan perecord data untuk lebih jelasnya seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Notifikasi eror membuka aplikasi format pnr

Pada data *off board* data yang keluar langsung diolah oleh bawaan software EM-120 series, yang dapat di konversi ke beberapa data seperti, em120_qig, em120_visio, em120_manual dan em120_datasheet. Informasi format dan bentuk data dari hasil wawancara pegawai PT.Kereta Api Indonesia (persero) pada tanggal 10 September 2019 di bagian *geometric unit track and bridge* kantor pusat kereta api Bandung. Bentuk data offboard dari EM-120 pada KM 18 dapat dilihat pada Tabel 4.1 yang biasanya disebut dengan data sebaran.

Tabel 4.1 Ouput nilai track quality indeks (TQI) dengan *software* EM-120

TRACK QUALITY BY DEVICE
PT. KERETA API DAOP 8 SURABAYA

LINTAS SB-SLO KODE SGU-MR
DARI SGU KE MR
ANTARA SGU-MR KECEPATAN 90
KELAS 2

HALAMAN 1
TANGGAL 26.04.2019

ANTARA	---DARI--- KM	---KE--- M	DEVICE KM	PANJANG M	TOTAL TYPE	M	KELAS	TQI	Perting	Angk.rt	Lestr.r	Lb.sp
SGU-MR	18	0	18	22	LK.	23	2	17.5	5.1	7.4	2.5	2.5
SGU-MR	18	22	18	69	LRS.	47	2	23.85	6.6	10.8	3.95	2.5
SGU-MR	18	69	18	76	LK.	8	2	24.45	12.6	4.8	4.35	2.7
SGU-MR	18	76	18	145	JPL.	69	2	34.75	12	16.5	3.75	2.5
SGU-MR	18	145	18	163	LK.	18	2	21.4	4.5	10.1	5.1	1.7
SGU-MR	18	163	18	172	BH.	10	2	28.2	4.2	20.5	2.2	1.3
SGU-MR	18	172	18	200	LK.	28	2	15.75	5.2	7.4	1.25	1.9
SGU-MR	18	200	18	257	LK.	58	2	12.2	3.6	3.4	2.7	2.5
SGU-MR	18	257	18	307	LRS.	50	2	12.75	2	5.8	2.05	2.9
SGU-MR	18	307	18	310	BH.	4	2	11.8	1.9	4.9	1	4
SGU-MR	18	310	18	400	LRS.	90	2	11.65	3	3.6	2.45	2.6
SGU-MR	18	400	18	527	LRS.	128	2	18	5.4	7.1	3.8	1.7
SGU-MR	18	527	18	549	LK.	23	2	32.9	8.8	17.2	5	1.9
SGU-MR	18	549	18	560	JPL.	11	2	37.85	6.4	24.5	4.85	2.1
SGU-MR	18	560	18	565	LK.	6	2	18	4.7	9.3	2.6	1.4
SGU-MR	18	565	18	573	BH.	9	2	20.1	2.6	15.4	1.1	1
SGU-MR	18	573	18	600	LK.	27	2	29.75	10.9	14.2	3.25	1.4
SGU-MR	18	600	18	607	LK.	8	2	11.25	4.8	2.1	2.55	1.8
SGU-MR	18	607	18	800	LRS.	193	2	12.55	3.5	3.2	4.15	1.7
SGU-MR	18	800	19	0	LRS.	200	2	15.65	3.6	5.4	4.05	2.6
SGU-MR	19	0	19	200	LRS.	200	2	21.95	6.2	8.1	4.95	2.7
SGU-MR	19	200	19	372	LRS.	173	2	17.7	6.1	4.6	4.2	2.8
SGU-MR	19	372	19	400	LK.	100	2	20.25	7.8	4.5	5.45	2.5
SGU-MR	19	400	19	506	LK.	106	2	23.5	7.3	9.9	4.2	2.1
SGU-MR	19	506	19	579	LRS.	74	2	13.3	2.9	4.1	4.9	1.4
SGU-MR	19	579	19	594	BH.	15	2	32.45	8.7	16.2	5.45	2.1
SGU-MR	19	594	19	600	LRS.	6	2	16.35	4.3	4.7	4.85	2.5
SGU-MR	19	600	19	764	LRS.	164	2	16.55	6	4.2	4.35	2
SGU-MR	19	764	19	800	LK.	36	2	14.8	2.6	6.7	3.4	2.1
SGU-MR	19	800	19	981	LK.	181	2	12.3	3.1	3.2	3.5	2.5
SGU-MR	19	981	20	0	LRS.	19	2	11.65	2.7	3.5	2.35	3.1

Sumber : PT. Kereta Api Indonesia, 2019

Hasil dari output *off board* kereta ukur EM-120, berformat text maka dapat dibuka dengan notepad. Pada waktu kereta berjalan, gerakan roda dan roda ukur diteruskan ke *transducer*, oleh *transducer* gerakan ini diubah menjadi sinyal listrik dan dikirimkan ke ADC untuk diubah dari sinyal analog menjadi sinyal digital. Sinyal digital ini kemudian diproses oleh komputer dan ditampilkan ke layar monitor dalam bentuk grafik serta ke printer dalam bentuk grafik dan angka. Ini berlaku untuk parameter angkatan, listringan dan lebar sepur, sedang untuk pertinggian dan skilu sinyal yang berasal dari *inclinometer* dikirim ke ADC diteruskan ke komputer dan seterusnya. Data diambil setiap 25 cm kemudian dirata-rata setiap 200 m dalam *Track Quality* (Kilometer/Device) atau dalam suatu panjang tertentu untuk laporan kerusakan (PT. Kereta Api Indonesia, 2019).

Keterangan :

Antar = Listas yang diukur

Kelas = Kelas jalan yang diukur

TQI = Besaran nilai *track quality indeks* (TQI) yang sudah menjadi nilai kualitas jalan (total dari 4 parameter kerusakan).

Type = Jenis geometrik ukur missal

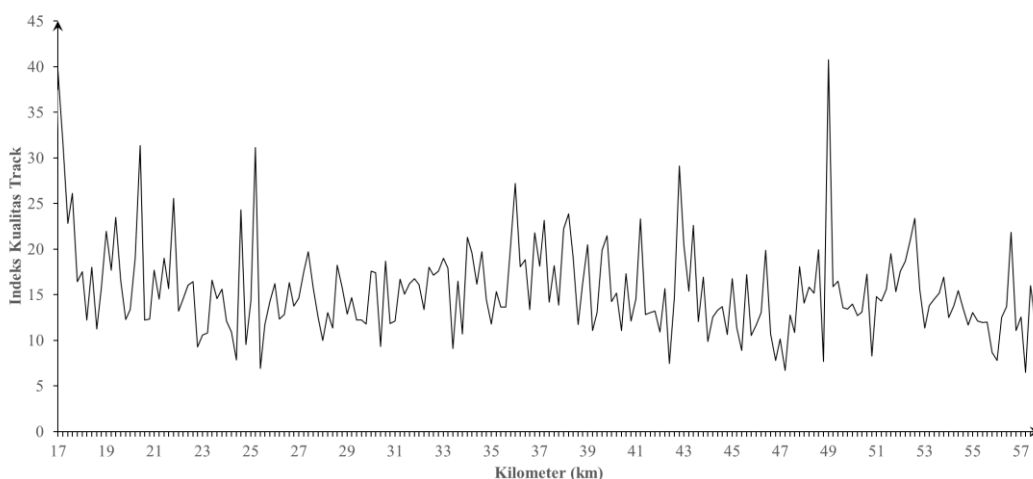
WSL = Wesel,

LK = Lengkung,

BH = Bangunan hikmat / jembatan dll.

Parameter TQI dalam pembacaan EM-120 ada 4 parameter pengukuran, yaitu angkatan, pertinggian, lebar spoor dan listringan. Angkatan adalah menunjukkan lendutan rel kearah vertikal (keatas dan kebawah). Nilai TQI angkatan dihitung berdasar rata-rata rel kanan dan rel kiri untuk setiap interval 200 meter dengan memperhitungkan deviasi pengukuran yang terjadi. Pertinggian adalah perbedaan tinggi antara kepala rel kanan dan rel kiri, Pengukuran pertinggian dilakukan dengan memakai alat yang disebut *rate gyro* dan *inclinometer* (pengukur kemiringan) yang dipasang badan rangka bawah diatas bogie tengah. Alat ini mengukur perbedaan tinggi antara rel kiri dan rel kanan. Pada jalan lurus yang bekerja hanya *inclinometer*, sedang pada lengkung, gaya sentrifugal yang mempengaruhi *inclinometer* akan dikompensasi oleh *rate gyro*, sehingga *inclinometer* akan menghasilkan data kemiringan relative. Lebar spoor adalah menunjukkan jarak antara rel dalam kiri dan kanan. Nilai lebar spur yang ditampilkan dalam grafik adalah nilai langsung yang diperoleh oleh *tranducer* lebar spur, dalam perhitungan TQI dihitung berdasarkan nilai standar deviasi lebar spur yang diperoleh oleh troli depan, tengah dan belakang belakang dalam jarak 20 meter. Nilai akhir TQI lebar sepur dihitung berdasarkan berdasarkan rata -rata 200 meter dengan memperhitungkan deviasi pengukuran yang terjadi. Listringan adalah lendutan rel arah horizontal. Pengukuran listringan dilakukan dengan roda ukur bagian tengah, roda yang terpasang pada gandar teleskopis (bagian kiri dan

kanan tidak saling mengikat) ini diberi tekanan ke arah luar sehingga selalu mepet pada rel, bila terjadi pelebaran atau penyempitan maka roda akan selalu menyesuaikan. Perubahan ini diukur dengan *transducer* dan dibandingkan dengan perubahan pada roda ukur bagian depan dan belakang sehingga membentuk anak panah. Jika jaraknya = 0 maka rel dalam keadaan lurus. Panjang benang listringan adalah 10 m. Nilai listringan rel kanan dan kiri dihitung standard deviasinya untuk setiap jarak 40 meter. Nilai TQI listringan dihitung berdasar rata-rata setiap interval 200 meter dengan memperhitungkan deviasi pengukuran yang terjadi. Hasil nilai TQI pada lintas Surabaya – Mojokerto disajikan dalam bentuk grafik Gambar 4.2



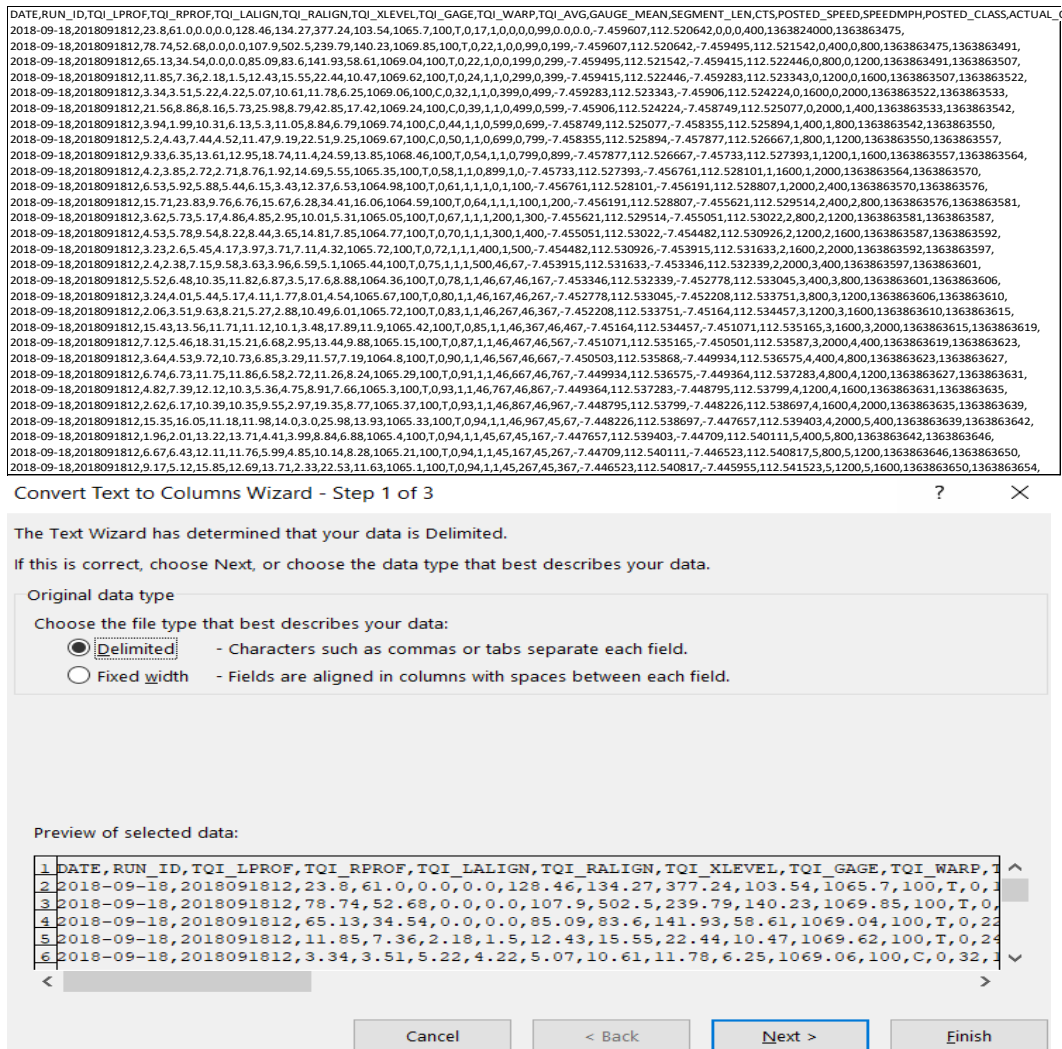
Gambar 4.2 Nilai track quality indeks (TQI) dengan EM-120 (PT.Kereta Api Indonesia (persero), 2019)

Untuk total nilai *track quality indeks* (TQI) dari kereta ukur EM-120 terbesar pada KM 49+200 = 40.75. Batasan nilai *track quality indeks* (TQI) menurut Kurniawan (2015), kategori 1 adalah $TQI < 15$, kategori 2 adalah $15 < TQI < 25$, kategori 3 adalah $25 < TQI < 40$, serta kategori 4 $TQI > 40$. Maka pada KM 49+200 masuk pada kategori 4, pada segmen tersebut harus dilakukan investigasi pemeliharaan.

4.2.2. Kereta Ukur Galunggung

Data bacaan kereta ukur diperoleh dari Dirjen Perkeretaapian. Data yang digunakan dalam perhitungan TQI satu segmen adalah sepanjang 200 m (200 m = 800 data (M/4)). Berikut merupakan sebagian data bacaan dari kereta ukur K.A

Galunggung pada KM 18+000 – 18+200 (1 segmen) yang disajikan dalam Gambar 4.3 yang masih berupa file asli dengan format *comma separated value* (CSV) harus di *delimited* pada ms.exel agar dapat dibaca. Hasil data ukur 1 segmen (200m) yang sudah didelimited dapat dilihat pada Tabel 4.2.



Gambar 4.3 Data ukur KA.Galunggung format CSV (Dirjen perkeretaapian, 2018)

Setelah data di delimited data menjadi beberapa kolom yaitu sebagai berikut,

1. MP, menunjukkan kilometer jalan rel
2. M/4, menunjukkan titik pengambilan data ukur per ft. (1 seg = 200 m (800 data) (0.25 m))
3. X.LEVEL, menunjukkan parameter pertinggian

4. L.PROF 124, menunjukkan parameter angkatan rel sebelah kiri dari awal mulai pengukuran.
5. R.PROF 124, menunjukkan parameter angkatan rel sebelah kanan dari awal mulai pengukuran
6. L.ALGN 124, menunjukkan parameter listringan rel sebelah kiri dari awal mulai pengukuran.
7. R.ALGN 124, menunjukkan parameter listringan rel sebelah kanan dari awal mulai pengukuran.

Tabel 4.2 adalah contoh dari pembacaan kereta ukur Galunggung yang sudah di delimate pada 1 (satu) segmen pembacaan 200 m.

Tabel 4.2 Data bacaan KA Ukur pada KM.18 dalam 1 segmen (200 meter)

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	0	-14.53	-5.3	6.73	6.81	1060.6	-7.81
18	1	-13.74	-4.94	6.14	6.27	1060.9	-7.6
18	2	-12.47	-5.12	5.44	5.85	1060.7	-6.85
18	3	-10.88	-5.12	4.87	5	1060.7	-6.02
18	4	-9.19	-4.15	4.34	3.49	1061.3	-5.89
18	5	-7.55	-2.6	3.8	1.91	1062.1	-6.36
18	6	-5.78	-1.46	3.24	0.75	1062.4	-6.45
18	7	-3.99	-0.81	2.34	-0.39	1062.4	-5.95
18	8	-2.06	0.1	0.99	-1.82	1062.5	-5.58
18	9	0.14	1.59	-0.36	-3.06	1062.5	-5.74
18	10	2.84	3.19	-1.47	-3.88	1062.3	-5.8
18	11	5.64	4.02	-2.53	-4.41	1061.9	-4.74
18	12	8.26	4.46	-3.6	-4.82	1061.5	-2.91
18	13	10.47	5.19	-4.78	-5.29	1060.9	-1.36
18	14	12.25	6.29	-6.24	-6.02	1060.3	-0.47
18	15	13.64	7.37	-7.97	-6.83	1059.6	0.16
18	16	14.94	8.02	-9.26	-7.49	1059.3	1.02
18	17	16.2	7.96	-9.94	-7.9	1059.2	2.26
18	18	17.26	7.15	-10.49	-8.17	1058.9	3.81
18	19	17.95	6.33	-10.97	-8.21	1058.5	5.05
18	20	18.09	6.1	-10.99	-7.96	1058.3	5.46
18	21	18.02	6.97	-10.44	-7.59	1058.7	4.99
18	22	17.71	7.91	-9.81	-7.06	1058.9	4.34

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	23	17.07	8.29	-9.37	-6.3	1058.9	3.72
18	24	16.08	8.29	-9.11	-5.47	1059	2.82
18	25	15.16	8.18	-8.96	-4.83	1059.1	1.98
18	26	14.2	8.17	-8.77	-4.18	1058.9	1.21
18	27	13.04	8.28	-8.2	-3.31	1058.7	0.37
18	28	11.38	8.16	-7.18	-2.3	1058.8	-0.84
18	29	9.79	7.61	-6.13	-1.42	1059.1	-1.77
18	30	8.27	6.77	-5.19	-0.72	1059.3	-2.33
18	31	6.67	6.25	-4.34	-0.37	1059.7	-2.7
18	32	5.15	6	-3.58	-0.49	1060.2	-2.7
18	33	4.01	5.64	-2.68	-0.58	1060.7	-2.33
18	34	3.15	4.97	-1.38	-0.12	1061.2	-1.77
18	35	2.43	4.09	0.27	0.53	1061.9	-0.96
18	36	1.58	3.4	1.41	0.77	1062.7	-0.37
18	37	0.56	3.45	1.72	0.65	1063.1	-0.65
18	38	-0.71	4.19	1.68	0.75	1062.9	-1.86
18	39	-2.12	4.52	1.72	1.12	1062.3	-3.04
18	40	-3.3	3.67	1.93	1.45	1062.2	-3.26
18	41	-4.34	1.88	2.19	1.55	1062.5	-2.82
18	42	-5.43	0.4	2.41	1.4	1063	-2.73
18	43	-6.5	-0.67	2.64	1.12	1063.5	-2.98
18	44	-7.27	-1.91	2.98	0.98	1064.2	-2.88
18	45	-7.77	-3.28	3.54	1.08	1064.8	-2.29
18	46	-8.1	-4.29	4.14	1.19	1065.3	-1.83
18	47	-8.36	-4.95	4.47	1.13	1065.6	-1.74
18	48	-8.26	-5.43	4.4	0.89	1065.8	-1.77
18	49	-7.91	-5.69	4.22	0.64	1066	-1.64
18	50	-7.4	-5.74	4.2	0.47	1066.2	-1.33
18	51	-6.91	-5.9	4.38	0.7	1066.4	-0.84
18	52	-6.52	-6.25	4.65	1.38	1066.2	-0.22
18	53	-6.21	-6.42	4.77	2.02	1065.8	0.31
18	54	-5.84	-6.16	4.61	2.25	1065.6	0.62
18	55	-5.46	-5.7	4.34	2.43	1065.4	0.78
18	56	-5.07	-5.4	4.32	2.99	1065.3	0.96
18	57	-4.55	-5.39	4.64	3.66	1065.1	1.18
18	58	-3.81	-5.49	5.11	3.96	1065.1	1.21
18	59	-3.01	-5.3	5.43	3.94	1065.2	0.99
18	60	-2.42	-4.68	5.45	3.85	1065.3	0.53
18	61	-2.04	-4.03	5.18	3.73	1065.3	0.09
18	62	-1.67	-3.73	4.89	3.59	1065.3	-0.22

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	63	-1.4	-3.61	4.63	3.48	1065.5	-0.59
18	64	-1.46	-3.43	4.29	3.35	1065.6	-1.02
18	65	-1.91	-3.43	3.76	3.04	1065.7	-1.4
18	66	-2.46	-3.9	3.14	2.63	1065.8	-1.46
18	67	-2.96	-4.6	2.55	2.27	1065.8	-1.52
18	68	-3.44	-5.23	2.07	2.02	1065.7	-1.67
18	69	-3.94	-5.85	1.67	1.75	1065.7	-1.77
18	70	-4.31	-6.47	1.17	1.42	1065.7	-1.8
18	71	-4.44	-6.71	0.5	0.98	1065.6	-1.95
18	72	-4.39	-6.57	-0.21	0.41	1065.5	-2.17
18	73	-4.26	-6.48	-0.81	-0.17	1065.4	-2.23
18	74	-4.02	-6.58	-1.3	-0.71	1065.3	-2.11
18	75	-3.64	-6.6	-1.86	-1.29	1065.4	-1.92
18	76	-3.19	-6.33	-2.5	-1.99	1065.5	-1.83
18	77	-2.72	-5.91	-3.16	-2.72	1065.6	-1.74
18	78	-2.24	-5.43	-3.74	-3.34	1065.7	-1.67
18	79	-1.66	-4.82	-4.25	-3.85	1065.7	-1.67
18	80	-0.92	-4.01	-4.71	-4.25	1065.7	-1.64
18	81	-0.08	-2.98	-5.14	-4.58	1065.5	-1.58
18	82	0.83	-1.79	-5.59	-4.89	1065.3	-1.49
18	83	1.85	-0.56	-5.99	-5.17	1065.2	-1.3
18	84	3.03	0.6	-6.13	-5.25	1065.2	-0.93
18	85	4.29	1.82	-6.02	-5.12	1065.2	-0.47
18	86	5.46	3.26	-5.81	-4.95	1065.2	-0.22
18	87	6.46	4.66	-5.56	-4.84	1065.3	-0.06
18	88	7.18	5.62	-5.18	-4.59	1065.4	0.12
18	89	7.4	6.22	-4.67	-4.13	1065.4	0.16
18	90	7.02	6.78	-4.08	-3.65	1065.5	-0.28
18	91	6.2	7.21	-3.47	-3.28	1065.7	-0.99
18	92	5.05	7.27	-2.95	-2.89	1065.8	-1.71
18	93	3.64	7.07	-2.56	-2.43	1065.6	-2.51
18	94	1.92	6.8	-2.28	-2.03	1065.4	-3.53
18	95	0.09	6.42	-1.87	-1.66	1065.4	-4.59
18	96	-1.69	5.8	-1.27	-1.14	1065.6	-5.4
18	97	-3.38	5.02	-0.54	-0.43	1065.6	-5.92
18	98	-4.98	4.2	0.09	0.23	1065.7	-6.23
18	99	-6.47	3.4	0.53	0.68	1065.8	-6.42
18	100	-7.83	2.67	0.87	1	1065.9	-6.45
18	101	-9.02	1.99	1.28	1.36	1065.8	-6.39
18	102	-9.94	1.31	1.82	1.77	1065.7	-6.2

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	103	-10.54	0.64	2.38	2.14	1065.6	-5.77
18	104	-10.91	0.16	2.76	2.35	1065.6	-5.27
18	105	-11.16	-0.14	2.95	2.48	1065.5	-4.84
18	106	-11.21	-0.49	3.06	2.6	1065.4	-4.47
18	107	-10.98	-0.91	3.15	2.74	1065.4	-4.12
18	108	-10.42	-1.12	3.17	2.91	1065.4	-3.81
18	109	-9.46	-1.03	3.08	3.05	1065.3	-3.57
18	110	-8.08	-0.98	3.02	3.21	1065.2	-3.07
18	111	-6.31	-1.1	3.09	3.33	1065.3	-2.2
18	112	-4.22	-1.17	3.29	3.38	1065.4	-1.21
18	113	-1.93	-1.02	3.65	3.41	1065.6	-0.22
18	114	0.49	-0.71	4.04	3.52	1065.8	0.78
18	115	2.92	-0.32	4.23	3.65	1065.8	1.77
18	116	5.27	0.11	4.18	3.67	1065.9	2.6
18	117	7.45	0.5	4	3.6	1066	3.47
18	118	9.44	0.78	3.96	3.7	1066	4.5
18	119	11.22	0.9	4.12	3.98	1066.1	5.77
18	120	12.79	0.8	4.32	4.3	1066.1	7.26
18	121	14.07	0.5	4.5	4.66	1066	8.81
18	122	14.88	0.15	4.64	5.09	1065.8	10.17
18	123	15.2	-0.1	4.7	5.4	1065.4	11.22
18	124	15.19	-0.37	4.53	5.42	1065.1	12.09
18	125	15.02	-0.78	4.17	5.17	1064.9	12.9
18	126	14.7	-1.18	3.81	4.92	1064.7	13.33
18	127	14.05	-1.26	3.51	4.61	1064.6	13.09
18	128	13.21	-1.04	3.18	4.03	1064.8	12.28
18	129	12.26	-0.81	2.71	3.21	1065.1	11.29
18	130	11.14	-0.63	2.09	2.36	1065.3	10.26
18	131	9.69	-0.31	1.27	1.62	1065.3	8.99
18	132	7.94	0.16	0.29	0.91	1065.3	7.5
18	133	6.05	0.6	-0.7	0.19	1065.2	5.95
18	134	4.14	0.7	-1.54	-0.42	1065.1	4.59
18	135	2.19	0.5	-2.22	-1.01	1065	3.32
18	136	0.17	0.22	-2.85	-1.72	1065.2	2.02
18	137	-1.84	0.09	-3.47	-2.62	1065.5	0.62
18	138	-3.86	-0.06	-4.08	-3.58	1065.7	-0.53
18	139	-5.82	-0.49	-4.62	-4.42	1066	-1.27
18	140	-7.65	-1.09	-5.09	-5.25	1066.3	-1.71
18	141	-9.27	-1.59	-5.5	-6.2	1066.6	-2.02
18	142	-10.64	-1.95	-6	-7.15	1066.8	-2.17

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	143	-11.76	-2.3	-6.47	-7.81	1066.8	-2.05
18	144	-12.68	-2.71	-6.63	-7.92	1066.6	-1.67
18	145	-13.42	-3.08	-6.36	-7.59	1066.5	-1.27
18	146	-13.98	-3.31	-5.96	-7.16	1066.4	-1.05
18	147	-14.29	-3.55	-5.67	-6.72	1066.3	-0.96
18	148	-14.38	-3.92	-5.4	-6.11	1066.1	-0.84
18	149	-14.27	-4.32	-4.96	-5.33	1066	-0.74
18	150	-13.85	-4.54	-4.33	-4.48	1066	-0.68
18	151	-13	-4.6	-3.5	-3.64	1066.1	-0.43
18	152	-11.78	-4.63	-2.61	-2.85	1066.3	0.09
18	153	-10.36	-4.64	-1.84	-2.17	1066.5	0.71
18	154	-8.84	-4.4	-1.35	-1.72	1066.6	1.05
18	155	-7.24	-3.78	-0.9	-1.32	1066.6	1.15
18	156	-5.5	-2.95	-0.25	-0.71	1066.6	1.15
18	157	-3.6	-2.2	0.47	0.07	1066.6	1.43
18	158	-1.53	-1.42	1.03	0.78	1066.5	1.8
18	159	0.52	-0.29	1.33	1.33	1066.3	2.08
18	160	2.43	1.16	1.48	1.89	1066.1	2.11
18	161	4.24	2.58	1.61	2.52	1065.8	2.08
18	162	6.04	3.68	1.78	3.08	1065.5	2.39
18	163	7.84	4.5	2.01	3.44	1065.2	3.04
18	164	9.51	5.27	2.23	3.54	1065.2	3.75
18	165	10.94	6.02	2.3	3.37	1065.3	4.28
18	166	12.13	6.52	2.23	3.05	1065.4	4.71
18	167	13.07	6.67	2.2	2.72	1065.5	5.15
18	168	13.69	6.61	2.18	2.39	1065.7	5.46
18	169	13.95	6.57	2.03	2	1065.9	5.4
18	170	13.8	6.44	1.71	1.51	1066.2	5.09
18	171	13.22	6.03	1.3	0.96	1066.4	4.68
18	172	12.32	5.4	0.95	0.46	1066.7	4.34
18	173	11.19	4.73	0.77	0.09	1067	3.91
18	174	9.95	4.19	0.73	-0.16	1067.2	3.26
18	175	8.63	3.62	0.65	-0.46	1067.3	2.54
18	176	7.26	2.88	0.37	-0.81	1067.2	1.95
18	177	5.82	2.11	-0.08	-1.14	1067	1.36
18	178	4.29	1.39	-0.51	-1.38	1066.7	0.81
18	179	2.82	0.61	-0.75	-1.58	1066.6	0.34
18	180	1.48	-0.23	-0.8	-1.78	1066.7	0.09
18	181	0.22	-1.02	-0.84	-1.89	1066.7	-0.12
18	182	-1.03	-1.64	-0.89	-1.87	1066.6	-0.47

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	183	-2.33	-2.1	-0.91	-1.82	1066.6	-0.84
18	184	-3.54	-2.5	-0.96	-1.8	1066.6	-1.15
18	185	-4.55	-2.78	-1.04	-1.72	1066.5	-1.4
18	186	-5.38	-2.88	-1.11	-1.53	1066.3	-1.71
18	187	-6.05	-2.78	-1.15	-1.29	1066.1	-2.05
18	188	-6.55	-2.57	-1.04	-1.03	1066	-2.39
18	189	-6.84	-2.33	-0.73	-0.75	1066	-2.67
18	190	-6.91	-2.03	-0.27	-0.42	1066.1	-2.85
18	191	-6.71	-1.6	0.23	-0.03	1066.1	-2.95
18	192	-6.26	-1.02	0.68	0.39	1066.2	-3.04
18	193	-5.68	-0.31	0.99	0.81	1066.3	-3.1
18	194	-5.05	0.26	1.15	1.28	1066.2	-3.04
18	195	-4.33	0.56	1.27	1.84	1065.9	-2.79
18	196	-3.54	0.74	1.45	2.4	1065.5	-2.45
18	197	-2.75	1.09	1.77	2.84	1065.4	-2.17
18	198	-1.98	1.57	2.19	3.2	1065.4	-1.98
18	199	-1.19	1.88	2.56	3.52	1065.4	-1.71
18	200	-0.43	1.96	2.82	3.7	1065.4	-1.33
18	201	0.22	2.05	2.99	3.65	1065.6	-0.99
18	202	0.84	2.33	3.1	3.46	1065.8	-0.9
18	203	1.45	2.7	3.09	3.26	1066	-0.93
18	204	1.95	2.91	3.01	3.09	1066.2	-0.96
18	205	2.32	2.9	2.93	2.95	1066.3	-0.9
18	206	2.58	2.78	2.85	2.79	1066.3	-0.78
18	207	2.81	2.68	2.72	2.58	1066.3	-0.74
18	208	2.98	2.62	2.44	2.25	1066.3	-0.84
18	209	3.12	2.47	1.99	1.88	1066.3	-0.71
18	210	3.19	2.19	1.38	1.59	1066	-0.37
18	211	3.09	1.84	0.7	1.31	1065.6	-0.16
18	212	2.82	1.45	0.04	0.92	1065.4	-0.22
18	213	2.54	0.84	-0.48	0.47	1065.4	-0.19
18	214	2.33	0.14	-0.86	0.06	1065.5	0
18	215	2.05	-0.29	-1.15	-0.32	1065.6	0.03
18	216	1.71	-0.42	-1.42	-0.69	1065.8	-0.19
18	217	1.42	-0.57	-1.7	-1.03	1065.9	-0.31
18	218	1.25	-0.83	-1.95	-1.36	1066.1	-0.22
18	219	1.07	-0.88	-2.19	-1.61	1066.2	-0.34
18	220	0.89	-0.6	-2.43	-1.74	1066.2	-0.65
18	221	0.78	-0.33	-2.63	-1.8	1066.1	-0.81
18	222	0.74	-0.26	-2.7	-1.82	1066.1	-0.87

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	223	0.71	-0.18	-2.73	-1.83	1066.1	-1.05
18	224	0.71	0.11	-2.74	-1.84	1066.1	-1.36
18	225	0.79	0.53	-2.7	-1.89	1066.2	-1.58
18	226	0.85	0.91	-2.54	-1.93	1066.3	-1.67
18	227	0.84	1.22	-2.34	-1.91	1066.4	-1.83
18	228	0.81	1.4	-2.25	-1.81	1066.4	-1.95
18	229	0.71	1.48	-2.19	-1.71	1066.3	-1.8
18	230	0.59	1.63	-1.98	-1.61	1066.3	-1.46
18	231	0.57	1.8	-1.57	-1.48	1066.2	-1.15
18	232	0.65	1.72	-1.09	-1.23	1066.2	-1.02
18	233	0.7	1.37	-0.62	-0.88	1066.3	-1.02
18	234	0.59	0.99	-0.22	-0.57	1066.5	-1.12
18	235	0.36	0.69	0.06	-0.42	1066.9	-1.21
18	236	0.03	0.24	0.27	-0.38	1067.3	-1.18
18	237	-0.43	-0.47	0.44	-0.33	1067.6	-1.09
18	238	-1.06	-1.29	0.59	-0.19	1067.8	-1.09
18	239	-1.75	-2.07	0.71	-0.05	1067.9	-1.15
18	240	-2.41	-2.81	0.8	0.09	1067.9	-1.15
18	241	-3.07	-3.53	0.95	0.29	1067.9	-1.12
18	242	-3.71	-4.26	1.09	0.47	1067.8	-0.99
18	243	-4.28	-4.98	1.16	0.6	1067.7	-0.84
18	244	-4.73	-5.69	1.12	0.66	1067.6	-0.53
18	245	-5.09	-6.32	0.97	0.64	1067.6	-0.16
18	246	-5.33	-6.81	0.65	0.47	1067.4	0.16
18	247	-5.36	-7.12	0.33	0.29	1067.2	0.4
18	248	-5.2	-7.21	0.26	0.23	1067.1	0.68
18	249	-4.93	-7.2	0.39	0.2	1067.1	1.18
18	250	-4.65	-7.27	0.4	0.05	1067.1	1.92
18	251	-4.42	-7.24	0.14	-0.18	1067	2.42
18	252	-4.31	-6.59	-0.32	-0.52	1066.8	2.08
18	253	-4.29	-5.33	-0.84	-1.02	1066.8	0.93
18	254	-4.19	-3.98	-1.29	-1.61	1067	-0.16
18	255	-3.85	-2.9	-1.57	-2.04	1067.3	-0.78
18	256	-3.31	-1.91	-1.68	-2.25	1067.6	-1.15
18	257	-2.66	-0.84	-1.76	-2.38	1067.8	-1.67
18	258	-1.92	0.24	-1.86	-2.64	1068	-2.29
18	259	-1.19	1.23	-1.91	-2.97	1068.2	-2.67
18	260	-0.5	1.95	-1.86	-3.22	1068.5	-2.76
18	261	0.12	2.31	-1.83	-3.27	1068.5	-2.79
18	262	0.73	2.55	-1.84	-3.17	1068.5	-2.76

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	263	1.16	3	-1.8	-3.02	1068.4	-2.7
18	264	1.35	3.63	-1.61	-2.81	1068.4	-2.54
18	265	1.43	4.03	-1.23	-2.35	1068.3	-2.36
18	266	1.49	4.08	-0.72	-1.72	1068.1	-2.08
18	267	1.43	3.96	-0.23	-1.14	1067.9	-1.83
18	268	1.26	3.88	0.06	-0.71	1067.7	-1.71
18	269	1.06	3.85	0.21	-0.24	1067.6	-1.49
18	270	0.91	3.79	0.4	0.3	1067.3	-1.15
18	271	0.81	3.55	0.71	0.87	1067	-0.74
18	272	0.88	3.03	1.11	1.46	1066.9	-0.31
18	273	1.2	2.42	1.54	2.12	1066.8	0.06
18	274	1.64	1.86	1.95	2.84	1066.7	0.5
18	275	2	1.31	2.31	3.43	1066.6	0.96
18	276	2.22	0.85	2.61	3.85	1066.6	1.3
18	277	2.33	0.71	2.81	4.11	1066.6	1.24
18	278	2.36	0.67	2.93	4.36	1066.5	0.9
18	279	2.39	0.5	3.03	4.65	1066.3	0.81
18	280	2.44	0.49	3.12	4.83	1066.1	0.74
18	281	2.44	1.05	3.18	4.68	1066.2	0.09
18	282	2.45	1.69	3.27	4.38	1066.3	-0.68
18	283	2.59	1.69	3.42	4.18	1066.5	-0.68
18	284	2.88	1.16	3.52	3.97	1066.6	0.12
18	285	3.15	0.84	3.37	3.59	1066.7	0.74
18	286	3.27	0.94	3.04	3.12	1066.6	0.84
18	287	3.32	1.03	2.78	2.81	1066.5	0.81
18	288	3.36	0.84	2.67	2.61	1066.6	0.96
18	289	3.39	0.52	2.62	2.34	1066.8	1.21
18	290	3.35	0.34	2.53	2.03	1067	1.3
18	291	3.2	0.36	2.42	1.69	1067.1	1.24
18	292	2.92	0.36	2.32	1.27	1067.4	1.18
18	293	2.49	0.09	2.18	0.83	1067.8	1.15
18	294	1.91	-0.23	1.95	0.47	1068	0.96
18	295	1.25	-0.31	1.55	0.12	1068.1	0.53
18	296	0.63	-0.25	1.06	-0.21	1068	0.16
18	297	0.14	-0.34	0.63	-0.47	1067.9	-0.06
18	298	-0.2	-0.47	0.26	-0.65	1067.7	-0.31
18	299	-0.51	-0.5	-0.17	-0.93	1067.4	-0.53
18	300	-0.81	-0.64	-0.71	-1.29	1067	-0.62
18	301	-1.1	-1.05	-1.26	-1.55	1066.7	-0.62
18	302	-1.42	-1.44	-1.85	-1.7	1066.4	-0.74

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	303	-1.77	-1.55	-2.47	-1.83	1066.1	-0.84
18	304	-2.13	-1.5	-2.98	-1.94	1065.8	-0.71
18	305	-2.42	-1.53	-3.26	-1.99	1065.5	-0.56
18	306	-2.59	-1.64	-3.39	-2.11	1065.4	-0.56
18	307	-2.66	-1.74	-3.56	-2.37	1065.5	-0.56
18	308	-2.73	-1.73	-3.74	-2.68	1065.7	-0.59
18	309	-2.83	-1.53	-3.89	-2.97	1065.9	-0.81
18	310	-2.86	-1.24	-4.03	-3.2	1066.2	-1.12
18	311	-2.78	-1.08	-4.19	-3.3	1066.3	-1.21
18	312	-2.64	-0.97	-4.31	-3.28	1066.4	-1.15
18	313	-2.5	-0.71	-4.38	-3.24	1066.5	-1.12
18	314	-2.35	-0.3	-4.36	-3.2	1066.6	-1.21
18	315	-2.09	0.01	-4.21	-3.1	1066.7	-1.27
18	316	-1.81	0.12	-3.93	-2.95	1066.8	-1.05
18	317	-1.56	0.14	-3.6	-2.81	1066.9	-0.68
18	318	-1.41	0.18	-3.2	-2.63	1067.1	-0.4
18	319	-1.31	0.32	-2.68	-2.24	1067.1	-0.22
18	320	-1.15	0.57	-2.11	-1.7	1067	-0.06
18	321	-0.84	0.91	-1.54	-1.12	1066.9	0.06
18	322	-0.37	1.37	-0.97	-0.64	1066.9	0.12
18	323	0.15	2.04	-0.45	-0.27	1067	0.09
18	324	0.67	2.86	-0.05	0.05	1066.9	0
18	325	1.2	3.7	0.22	0.47	1066.8	-0.09
18	326	1.69	4.42	0.45	1.05	1066.6	-0.28
18	327	2.09	5.06	0.51	1.56	1066.5	-0.53
18	328	2.41	5.68	0.3	1.85	1066.5	-0.81
18	329	2.71	6.19	-0.09	1.98	1066.4	-1.05
18	330	3.02	6.32	-0.41	2.01	1066.6	-1.15
18	331	3.24	6.07	-0.39	1.93	1066.7	-1.12
18	332	3.36	5.65	-0.04	1.79	1066.9	-0.96
18	333	3.38	5.14	0.46	1.63	1067.1	-0.78
18	334	3.3	4.4	0.92	1.41	1067.3	-0.53
18	335	3.1	3.4	1.33	1.16	1067.5	-0.19
18	336	2.8	2.29	1.72	1.01	1067.6	0.34
18	337	2.46	1.16	2	0.99	1067.7	0.96
18	338	2.14	0	2.08	0.95	1067.6	1.64
18	339	1.82	-1.17	2	0.83	1067.6	2.29
18	340	1.45	-2.31	1.86	0.71	1067.6	2.91
18	341	0.96	-3.46	1.74	0.58	1067.7	3.57
18	342	0.34	-4.6	1.62	0.43	1067.8	4.12

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	343	-0.33	-5.62	1.49	0.28	1067.9	4.5
18	344	-0.96	-6.57	1.39	0.12	1068	4.84
18	345	-1.53	-7.52	1.36	-0.21	1068.2	5.15
18	346	-2.09	-8.29	1.43	-0.76	1068.7	5.3
18	347	-2.57	-8.69	1.72	-1.2	1069.4	5.36
18	348	-2.82	-8.94	2.35	-1.34	1070.1	5.55
18	349	-2.95	-9.19	3.31	-1.23	1070.9	5.8
18	350	-3.14	-9.09	4.25	-0.95	1071.6	5.64
18	351	-3.36	-8.39	4.67	-0.49	1071.8	4.93
18	352	-3.41	-7.4	4.38	0.03	1071.1	4.09
18	353	-3.29	-6.49	3.71	0.57	1070	3.41
18	354	-3.09	-5.54	3.06	1.13	1068.9	2.79
18	355	-2.81	-4.3	2.51	1.69	1067.9	2.02
18	356	-2.44	-2.76	1.93	2.1	1067	1.15
18	357	-2.05	-1.17	1.43	2.34	1066.2	0.31
18	358	-1.67	0.24	1.2	2.47	1065.7	-0.37
18	359	-1.29	1.38	1.22	2.52	1065.7	-0.93
18	360	-0.95	2.36	1.31	2.45	1065.8	-1.33
18	361	-0.65	3.26	1.39	2.34	1066	-1.64
18	362	-0.4	3.91	1.48	2.27	1066.2	-1.74
18	363	-0.14	4.19	1.62	2.2	1066.5	-1.61
18	364	0.06	4.29	1.7	2.07	1066.7	-1.4
18	365	0.22	4.4	1.68	1.97	1066.8	-1.33
18	366	0.36	4.33	1.59	1.97	1066.8	-1.18
18	367	0.5	3.89	1.44	2.01	1066.8	-0.74
18	368	0.52	3.29	1.11	1.99	1066.9	-0.19
18	369	0.44	2.8	0.51	1.89	1066.7	0.22
18	370	0.42	2.39	-0.17	1.69	1066.6	0.5
18	371	0.49	1.87	-0.68	1.32	1066.6	0.68
18	372	0.54	1.36	-0.82	0.88	1066.6	0.78
18	373	0.55	1.04	-0.77	0.42	1066.6	0.84
18	374	0.6	0.88	-0.71	-0.03	1066.6	0.87
18	375	0.65	0.65	-0.73	-0.47	1066.6	0.9
18	376	0.67	0.16	-0.78	-0.81	1066.6	1.05
18	377	0.65	-0.34	-0.92	-1.09	1066.5	1.18
18	378	0.59	-0.49	-1.21	-1.41	1066.5	1.09
18	379	0.52	-0.35	-1.6	-1.73	1066.6	0.81
18	380	0.48	-0.33	-1.94	-1.95	1066.6	0.53
18	381	0.51	-0.43	-2.15	-2.1	1066.5	0.43
18	382	0.57	-0.4	-2.28	-2.26	1066.5	0.43

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	383	0.59	-0.18	-2.36	-2.34	1066.5	0.34
18	384	0.53	0.03	-2.4	-2.23	1066.4	0.16
18	385	0.43	0.19	-2.43	-1.93	1066.1	-0.06
18	386	0.33	0.36	-2.53	-1.55	1065.7	-0.4
18	387	0.24	0.58	-2.67	-1.19	1065.4	-0.78
18	388	0.15	0.9	-2.77	-0.92	1065.2	-1.18
18	389	0.05	1.32	-2.77	-0.77	1065.2	-1.46
18	390	-0.06	1.6	-2.7	-0.67	1065.2	-1.58
18	391	-0.19	1.64	-2.58	-0.61	1065.3	-1.64
18	392	-0.29	1.57	-2.38	-0.54	1065.5	-1.67
18	393	-0.34	1.51	-2.11	-0.43	1065.6	-1.64
18	394	-0.31	1.31	-1.79	-0.24	1065.6	-1.4
18	395	-0.26	1.03	-1.43	-0.13	1065.7	-1.15
18	396	-0.22	0.89	-1.05	-0.16	1066	-1.09
18	397	-0.12	0.74	-0.63	-0.2	1066.2	-0.96
18	398	0.06	0.33	-0.21	-0.07	1066.4	-0.56
18	399	0.26	-0.16	0.11	0.17	1066.5	-0.09
18	400	0.36	-0.43	0.25	0.42	1066.5	0
18	401	0.4	-0.51	0.18	0.62	1066.2	-0.03
18	402	0.45	-0.6	-0.02	0.78	1065.9	0.09
18	403	0.48	-0.68	-0.31	0.81	1065.7	0.25
18	404	0.5	-0.71	-0.59	0.65	1065.7	0.31
18	405	0.54	-0.73	-0.78	0.29	1065.8	0.34
18	406	0.6	-0.59	-0.78	-0.17	1066	0.25
18	407	0.61	-0.26	-0.68	-0.71	1066.4	-0.06
18	408	0.6	-0.07	-0.53	-1.18	1066.8	-0.28
18	409	0.62	-0.19	-0.37	-1.51	1067	-0.06
18	410	0.67	-0.4	-0.19	-1.7	1067.2	0.37
18	411	0.71	-0.53	-0.07	-1.76	1067.3	0.65
18	412	0.64	-0.71	-0.05	-1.79	1067.3	0.74
18	413	0.47	-0.98	-0.16	-1.84	1067.3	0.87
18	414	0.24	-1.16	-0.34	-1.91	1067.2	0.99
18	415	0.01	-1.17	-0.59	-1.92	1067.2	0.93
18	416	-0.19	-1.09	-0.86	-1.85	1067.1	0.68
18	417	-0.4	-0.94	-1.06	-1.75	1067	0.4
18	418	-0.59	-0.68	-1.15	-1.73	1066.9	0.16
18	419	-0.68	-0.35	-1.11	-1.8	1067	-0.06
18	420	-0.67	0.03	-0.9	-1.89	1067.2	-0.5
18	421	-0.58	0.43	-0.49	-1.93	1067.3	-0.9
18	422	-0.37	0.71	0	-1.84	1067.4	-1.02

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	423	-0.05	0.89	0.47	-1.62	1067.5	-0.9
18	424	0.3	1.19	0.85	-1.31	1067.6	-0.81
18	425	0.67	1.57	1.1	-0.91	1067.7	-0.81
18	426	1.02	1.76	1.22	-0.49	1067.6	-0.71
18	427	1.29	1.76	1.22	-0.09	1067.4	-0.62
18	428	1.51	1.8	1.19	0.28	1067.3	-0.5
18	429	1.78	1.89	1.2	0.67	1067	-0.19
18	430	2.16	1.92	1.34	0.98	1066.7	0.16
18	431	2.47	1.98	1.56	1.11	1066.5	0.28
18	432	2.55	2.19	1.78	1.17	1066.3	0.12
18	433	2.5	2.39	1.97	1.3	1066.2	0.06
18	434	2.4	2.42	2.12	1.46	1066.2	0.09
18	435	2.28	2.29	2.31	1.61	1066.2	0.03
18	436	2.14	2.05	2.52	1.83	1066.3	0
18	437	1.97	1.74	2.66	2.16	1066.3	0.03
18	438	1.73	1.47	2.66	2.5	1066.3	0.03
18	439	1.42	1.11	2.56	2.72	1066.2	0.03
18	440	1.11	0.55	2.39	2.88	1066	0.06
18	441	0.75	-0.04	2.1	2.99	1065.7	0.09
18	442	0.26	-0.38	1.76	2.98	1065.4	0
18	443	-0.28	-0.58	1.56	2.81	1065.3	-0.12
18	444	-0.75	-1	1.59	2.6	1065.5	-0.09
18	445	-1.18	-1.58	1.71	2.43	1065.7	-0.03
18	446	-1.61	-2.03	1.76	2.34	1065.8	0
18	447	-1.95	-2.33	1.71	2.21	1065.8	0.03
18	448	-2.16	-2.61	1.53	1.96	1065.8	0.22
18	449	-2.55	-2.81	1.14	1.59	1065.7	0.22
18	450	-3.23	-2.79	0.49	1.25	1065.4	-0.25
18	451	-3.83	-2.64	-0.29	1.04	1064.7	-0.84
18	452	-3.98	-2.56	-0.99	0.82	1064.1	-1.02
18	453	-3.81	-2.48	-1.5	0.48	1063.8	-0.87
18	454	-3.61	-2.27	-1.84	0.09	1063.8	-0.84
18	455	-3.43	-1.96	-2.1	-0.29	1063.9	-1.02
18	456	-3.25	-1.72	-2.34	-0.83	1064.1	-1.12
18	457	-3.07	-1.63	-2.51	-1.59	1064.5	-1.09
18	458	-2.9	-1.57	-2.64	-2.34	1065	-1.02
18	459	-2.67	-1.34	-2.77	-2.89	1065.4	-1.09
18	460	-2.43	-0.94	-2.92	-3.28	1065.6	-1.3
18	461	-2.21	-0.57	-3.01	-3.61	1065.7	-1.43
18	462	-1.95	-0.44	-3.09	-3.85	1065.7	-1.27

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	463	-1.66	-0.4	-3.27	-3.92	1065.6	-1.02
18	464	-1.4	-0.22	-3.55	-3.96	1065.4	-0.96
18	465	-1.13	0.06	-3.75	-4.06	1065.3	-1.05
18	466	-0.79	0.29	-3.72	-4.13	1065.3	-1.02
18	467	-0.4	0.4	-3.46	-4	1065.4	-0.78
18	468	-0.02	0.55	-3.04	-3.66	1065.4	-0.53
18	469	0.4	0.71	-2.43	-3.18	1065.5	-0.28
18	470	0.96	0.74	-1.65	-2.66	1065.6	0
18	471	1.51	0.63	-0.82	-2.08	1065.6	0.4
18	472	1.86	0.47	-0.09	-1.44	1065.5	0.84
18	473	2.03	0.33	0.5	-0.76	1065.4	1.18
18	474	2.12	0.17	0.99	-0.06	1065.3	1.46
18	475	2.23	0.02	1.35	0.65	1065.2	1.61
18	476	2.36	0.04	1.57	1.41	1065	1.64
18	477	2.49	0.36	1.74	2.2	1064.7	1.55
18	478	2.63	0.68	1.94	2.89	1064.6	1.52
18	479	2.74	0.71	2.17	3.48	1064.6	1.49
18	480	2.83	0.6	2.41	3.94	1064.5	1.49
18	481	2.94	0.7	2.64	4.23	1064.5	1.46
18	482	3.08	0.96	2.84	4.33	1064.6	1.49
18	483	3.23	1.14	2.99	4.37	1064.6	1.55
18	484	3.35	1.26	3.01	4.4	1064.5	1.49
18	485	3.36	1.54	2.78	4.29	1064.2	1.21
18	486	3.24	1.95	2.3	3.96	1064	0.81
18	487	3.02	2.3	1.71	3.5	1063.8	0.34
18	488	2.77	2.57	1.1	3	1063.7	-0.03
18	489	2.57	2.82	0.5	2.41	1063.7	-0.37
18	490	2.37	3.02	-0.08	1.72	1063.9	-0.59
18	491	2.12	3.16	-0.59	0.97	1064.1	-0.81
18	492	1.82	3.26	-1.04	0.23	1064.4	-1.05
18	493	1.53	3.31	-1.46	-0.52	1064.7	-1.24
18	494	1.26	3.26	-1.87	-1.31	1064.9	-1.3
18	495	0.95	3.13	-2.16	-2.06	1065.2	-1.46
18	496	0.64	2.85	-2.3	-2.73	1065.6	-1.52
18	497	0.4	2.26	-2.36	-3.27	1065.9	-1.3
18	498	0.2	1.64	-2.45	-3.65	1066.1	-0.96
18	499	0	1.36	-2.53	-3.99	1066.3	-0.99
18	500	-0.2	1.19	-2.57	-4.22	1066.6	-1.12
18	501	-0.39	0.6	-2.53	-4.21	1066.8	-0.93
18	502	-0.62	-0.23	-2.45	-3.95	1066.8	-0.56

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	503	-0.97	-0.75	-2.34	-3.72	1066.7	-0.47
18	504	-1.36	-1.04	-2.14	-3.53	1066.6	-0.56
18	505	-1.69	-1.67	-1.7	-3.14	1066.4	-0.4
18	506	-1.94	-2.61	-1.01	-2.47	1066.2	0
18	507	-2.22	-3.4	-0.28	-1.76	1066	0.31
18	508	-2.53	-3.95	0.28	-1.19	1065.9	0.4
18	509	-2.84	-4.53	0.78	-0.66	1065.9	0.62
18	510	-3.12	-5.17	1.35	-0.05	1065.8	0.93
18	511	-3.37	-5.67	1.9	0.56	1065.9	1.15
18	512	-3.59	-5.96	2.37	1.16	1066	1.18
18	513	-3.76	-6.05	2.75	1.77	1066.1	1.21
18	514	-3.89	-6.06	3.11	2.39	1065.9	1.18
18	515	-3.98	-6.06	3.41	2.91	1065.8	1.05
18	516	-4.11	-5.94	3.58	3.22	1065.7	0.78
18	517	-4.34	-5.58	3.66	3.32	1065.6	0.31
18	518	-4.68	-5.22	3.74	3.33	1065.6	-0.16
18	519	-4.98	-5.11	3.83	3.28	1065.6	-0.5
18	520	-5.19	-4.97	3.77	3.1	1065.7	-0.87
18	521	-5.37	-4.4	3.44	2.72	1065.9	-1.55
18	522	-5.43	-3.59	2.98	2.31	1066	-2.26
18	523	-5.23	-2.98	2.66	2.09	1066	-2.57
18	524	-4.76	-2.52	2.46	2.03	1066	-2.57
18	525	-4.19	-1.77	2.18	1.87	1065.9	-2.7
18	526	-3.58	-0.74	1.81	1.56	1065.7	-3.01
18	527	-2.86	0.16	1.53	1.28	1065.6	-3.13
18	528	-1.97	0.81	1.34	1.12	1065.7	-3.01
18	529	-1.02	1.54	1.05	1.01	1065.6	-2.82
18	530	-0.09	2.57	0.58	0.81	1065.5	-2.79
18	531	0.81	3.77	0.09	0.47	1065.5	-2.88
18	532	1.69	4.78	-0.31	0.07	1065.6	-2.76
18	533	2.53	5.43	-0.58	-0.28	1065.7	-2.33
18	534	3.4	5.81	-0.79	-0.52	1065.7	-1.86
18	535	4.35	6.02	-1.01	-0.65	1065.7	-1.55
18	536	5.35	6.13	-1.24	-0.59	1065.5	-1.21
18	537	6.33	6.26	-1.45	-0.28	1065.1	-0.71
18	538	7.22	6.45	-1.63	0.16	1064.7	-0.19
18	539	7.9	6.5	-1.78	0.58	1064.2	0.28
18	540	8.29	6.24	-1.71	1.05	1064	0.71
18	541	8.39	5.74	-1.22	1.61	1064	0.99
18	542	8.18	5.24	-0.61	2.02	1064.2	1.12

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	543	7.5	4.63	-0.24	2.03	1064.6	1.27
18	544	6.32	3.67	-0.07	1.86	1064.9	1.52
18	545	4.88	2.47	0.06	1.75	1065	1.71
18	546	3.4	1.26	0.06	1.63	1065	1.71
18	547	1.84	0.23	-0.18	1.29	1064.9	1.52
18	548	0.17	-0.61	-0.47	0.84	1065.1	1.15
18	549	-1.47	-1.44	-0.55	0.49	1065.4	0.81
18	550	-2.84	-2.45	-0.55	0.27	1065.6	0.71
18	551	-3.89	-3.72	-0.59	0.16	1065.8	1.02
18	552	-4.67	-4.98	-0.6	0.12	1065.8	1.49
18	553	-5.26	-5.75	-0.65	0.04	1065.8	1.86
18	554	-5.76	-5.74	-0.8	-0.18	1065.9	1.52
18	555	-6.32	-5.16	-0.97	-0.54	1065.9	0.43
18	556	-6.89	-4.6	-0.97	-0.96	1066.1	-0.78
18	557	-7.29	-4.36	-0.88	-1.44	1066.4	-1.55
18	558	-7.36	-4.18	-0.86	-2	1066.6	-1.86
18	559	-7.16	-3.55	-0.87	-2.49	1066.8	-2.11
18	560	-6.74	-2.43	-1.01	-2.97	1066.9	-2.54
18	561	-6.08	-1.36	-1.4	-3.47	1066.9	-2.98
18	562	-5.09	-0.73	-1.85	-3.81	1067	-2.88
18	563	-3.73	-0.13	-2.11	-3.85	1067	-2.26
18	564	-2.02	0.95	-2.23	-3.74	1066.9	-1.49
18	565	-0.06	2.33	-2.34	-3.66	1066.8	-0.84
18	566	1.99	3.51	-2.38	-3.57	1066.8	-0.12
18	567	4.06	4.46	-2.26	-3.31	1066.7	0.74
18	568	6.07	5.28	-2.05	-3	1066.7	1.74
18	569	7.9	5.91	-1.84	-2.78	1066.8	2.7
18	570	9.33	6.38	-1.55	-2.6	1067	3.38
18	571	10.28	6.99	-1.27	-2.41	1067.2	3.63
18	572	10.85	7.71	-1.15	-2.23	1067.2	3.57
18	573	11.21	7.98	-1.08	-2.03	1067.1	3.57
18	574	11.42	7.5	-0.84	-1.73	1067.1	3.78
18	575	11.51	6.57	-0.48	-1.38	1067	3.97
18	576	11.48	5.78	-0.11	-1.04	1067	3.81
18	577	11.3	5.26	0.4	-0.73	1067	3.44
18	578	10.88	4.76	1.06	-0.44	1067.1	3.13
18	579	10.28	3.96	1.56	-0.16	1067	3.22
18	580	9.59	2.76	1.92	0.2	1066.9	3.57
18	581	8.88	1.61	2.34	0.73	1066.8	3.69
18	582	8.05	1.05	2.87	1.29	1066.9	3.38

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	583	7.12	0.91	3.28	1.78	1067	3.01
18	584	6.05	0.55	3.56	2.16	1066.9	2.98
18	585	4.84	-0.02	3.78	2.54	1067	2.91
18	586	3.53	-0.48	3.91	2.97	1067.1	2.57
18	587	2.18	-0.84	3.87	3.38	1067.2	2.17
18	588	0.76	-1.26	3.67	3.67	1067.2	1.8
18	589	-0.72	-1.52	3.35	3.81	1067.2	1.21
18	590	-2.13	-1.62	2.97	3.86	1067.2	0.43
18	591	-3.33	-1.96	2.74	3.94	1067.2	-0.12
18	592	-4.45	-2.57	2.64	3.96	1067.2	-0.53
18	593	-5.61	-3	2.42	3.71	1067.1	-1.18
18	594	-6.81	-3.21	1.98	3.31	1067	-2.17
18	595	-7.93	-3.53	1.45	3.06	1066.7	-3.04
18	596	-8.91	-3.99	0.79	2.99	1066.3	-3.84
18	597	-9.81	-4.33	-0.26	2.85	1065.5	-4.71
18	598	-10.55	-4.67	-1.59	2.59	1064.5	-5.3
18	599	-11.02	-5.08	-2.63	2.34	1063.7	-5.36
18	600	-11.27	-5.12	-3.36	2.03	1063.3	-5.46
18	601	-11.43	-4.67	-4.2	1.38	1063.1	-5.95
18	602	-11.53	-4.38	-5.16	0.45	1063.2	-6.33
18	603	-11.49	-4.73	-5.89	-0.43	1063.4	-6.05
18	604	-11.19	-5.29	-6.24	-1.15	1063.7	-5.21
18	605	-10.81	-5.64	-6.35	-1.96	1064.1	-4.37
18	606	-10.47	-5.88	-6.19	-2.92	1065	-3.72
18	607	-10.08	-6.11	-5.72	-3.77	1066.1	-3.16
18	608	-9.47	-6.22	-5.04	-4.28	1067.1	-2.48
18	609	-8.59	-6.24	-4.27	-4.49	1067.8	-1.71
18	610	-7.64	-6.26	-3.49	-4.57	1068.3	-1.02
18	611	-6.74	-6.13	-2.85	-4.68	1068.7	-0.59
18	612	-5.81	-5.71	-2.35	-4.6	1068.9	-0.19
18	613	-4.81	-5.16	-1.78	-4.17	1068.9	0.06
18	614	-3.7	-4.54	-1	-3.51	1068.9	0.22
18	615	-2.58	-3.57	-0.27	-3.02	1069.1	0.12
18	616	-1.57	-2.25	0.27	-2.86	1069.3	-0.03
18	617	-0.57	-1.36	0.99	-2.62	1069.5	-0.12
18	618	0.4	-0.96	1.92	-2.11	1069.6	-0.09
18	619	1.16	0.12	2.64	-1.77	1069.7	0
18	620	1.5	2.31	3.02	-1.88	1069.7	0.43
18	621	1.73	3.95	3.55	-1.96	1069.9	1.24
18	622	2.13	3.81	4.33	-1.39	1070.1	1.95

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	623	2.51	3.3	4.88	-0.78	1070.2	2.05
18	624	2.83	2.31	4.98	0.11	1070	1.67
18	625	2.87	2.79	4.68	0.64	1069.6	1.52
18	626	2.94	3.5	4.26	1.05	1069.1	1.55
18	627	3.12	3.79	3.89	1.53	1068.7	1.46
18	628	3.33	3.82	3.54	1.94	1068.3	1.33
18	629	3.4	4.49	3.01	1.94	1067.8	1.27
18	630	3.34	6.45	2.19	1.38	1067.3	1.21
18	631	3.4	8.34	1.4	0.71	1066.7	1.09
18	632	3.81	8.17	1.08	0.66	1066.2	1.05
18	633	4.34	7.09	0.98	0.66	1066	1.12
18	634	4.83	5.67	0.75	0.9	1065.9	1.27
18	635	5.03	5.5	0.29	0.65	1065.9	1.52
18	636	5.29	4.81	-0.09	0.32	1066.1	1.77
18	637	5.43	4.67	-0.51	0	1066.3	2.05
18	638	5.24	5.8	-1.11	-0.49	1066.6	2.79
18	639	4.57	8.95	-2.01	-1.05	1066.8	3.88
18	640	4.43	8.01	-2.3	-1.03	1067	4.93
18	641	4.53	5.95	-2.35	-0.77	1067.1	6.05
18	642	4.48	5.53	-2.45	-0.91	1067.2	7.47
18	643	4.37	6.12	-2.4	-1.05	1067.3	9.05
18	644	4.22	7.5	-2.12	-1.51	1067.6	10.39
18	645	4.5	6.98	-1.6	-1.48	1067.8	11.57
18	646	4.97	5.89	-1.2	-1.19	1067.8	12.78
18	647	5.21	5.92	-1.21	-1.11	1067.6	13.86
18	648	5.09	6.6	-1.39	-1.03	1067.3	14.73
18	649	4.4	8.83	-1.74	-0.66	1066.9	15.41
18	650	4.02	7.41	-1.64	0.23	1066.2	15.84
18	651	3.51	5.55	-1.56	1.01	1065.5	15.97
18	652	2.58	5.35	-1.73	1.21	1065.1	16.06
18	653	1.43	5.74	-1.96	1.52	1064.9	16.43
18	654	0.08	7.21	-2.08	1.32	1064.9	17.09
18	655	-0.95	6.91	-1.71	1.54	1065.1	17.83
18	656	-1.61	4.55	-0.61	2.66	1065.4	18.6
18	657	-2.33	3.37	0.46	3.62	1065.9	19.47
18	658	-3.3	4.97	0.91	3.34	1066.4	20.47
18	659	-3.02	-1.17	2.02	3.93	1066.9	21.55
18	660	-1.29	-16.94	4.32	8.28	1067.1	22.54
18	661	0.19	-31.36	6.57	13.99	1066.9	23.26
18	662	-0.75	-28.88	6.31	14.49	1066.7	23.69

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	663	-3.06	-18.52	4.11	12.93	1066.3	23.84
18	664	-6.46	-3.11	1.31	7.21	1066.1	23.78
18	665	-7.84	-2.82	0.11	5.56	1065.9	23.53
18	666	-9.14	-3.5	-0.15	5.76	1065.9	23.1
18	667	-10.6	-2.05	-0.41	5.26	1065.9	22.7
18	668	-11.5	-2.38	-0.43	4.7	1065.9	22.45
18	669	-11.5	-6.18	0	4.4	1066	22.36
18	670	-11.6	-7.49	0.29	3.95	1065.9	22.98
18	671	-11.64	-7.99	0.69	3.74	1065.8	24.09
18	672	-11.73	-6.71	0.69	3.25	1066	23.97
18	673	-11.53	-5.38	0.36	2.22	1066.6	23.44
18	674	-10.56	-7.71	0.34	1.52	1067.3	25.8
18	675	-9.72	-7.6	-0.09	1.08	1067.5	27.88
18	676	-9.96	0.42	-2.06	-0.69	1068	24.31
18	677	-9.02	0.14	-3.21	-1.96	1068.6	24.28
18	678	-6.07	-13.57	-2.27	-0.78	1068.2	33.18
18	679	-0.62	-39.95	1.33	0.26	1068	30.51
18	680	-2.02	-17.02	-1.31	-7.4	1071.6	-1.55
18	681	-4.71	15.19	-5.85	-18.5	1078.7	-34.11
18	682	-2.56	11.88	-5.73	-19.44	1079.9	-27.88
18	683	2.48	-10.36	-1.6	-16.56	1080.6	-2.39
18	684	9.11	-40.72	3.28	-5.78	1075.2	35.5
18	685	10.7	-39.19	4.61	-3.3	1072.9	37.05
18	686	11.16	-36.78	4.23	-4.29	1073.8	35.44
18	687	12.14	-40.63	4.33	-3.83	1073.7	40.4
18	688	12.41	-39.51	3.76	-4.13	1073.2	42.14
18	689	12.04	-34.36	2.65	-5.63	1073	40.78
18	690	11.71	-30.6	1.73	-6.73	1072.6	40.12
18	691	11.83	-29.64	1.27	-7.18	1072	40.56
18	692	12.61	-31.98	1.52	-7.15	1071.9	43.13
18	693	13.23	-33.4	1.86	-6.88	1072.2	44.65
18	694	12.91	-29.83	1.59	-6.72	1072.1	41.86
18	695	13	-30.67	1.69	-6.66	1072	43.5
18	696	14.26	-40.27	3.08	-6.01	1073	52.5
18	697	13.59	-37.02	3.04	-6.09	1073.4	48.65
18	698	10.33	-17.71	1.08	-7.33	1072.7	30.57
18	699	0.05	41.64	-7.03	-10.29	1067.2	-41.86
18	700	-1.72	39.62	-7.58	-7.15	1065.5	-57.74
18	701	-0.87	19.52	-5.29	-1.56	1065.7	-52.16
18	702	-2.68	20.55	-5.53	-1.07	1065.7	-51.26

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	703	-6.36	34.73	-8.24	-2.55	1064.7	-56.34
18	704	-10.1	49.4	-10.71	-7.53	1063.7	-56.16
18	705	-10.36	46.41	-10.71	-8.02	1063.5	-52.65
18	706	-9.16	45.12	-9.67	-7.12	1064.1	-51.13
18	707	-8.21	48.43	-9.01	-7.24	1064.5	-50.76
18	708	-6.85	46.65	-7.75	-6.16	1064.1	-45.55
18	709	-5.01	39.6	-5.84	-3.21	1063.1	-36.74
18	710	-3.19	32.87	-4.18	-0.21	1061.8	-29.8
18	711	-2.27	30.68	-3.43	1.36	1060.7	-27.88
18	712	-2.59	33.1	-3.6	1.5	1059.9	-28.71
18	713	-3.1	34.96	-3.74	1.55	1059.8	-28.96
18	714	-3.34	35.29	-3.59	1.16	1059.8	-28.62
18	715	-3.71	37.16	-3.53	1.07	1059.8	-29.02
18	716	-4.41	41.59	-3.61	1.35	1059.8	-29.33
18	717	-3.94	39.03	-2.77	2.17	1059.8	-28.4
18	718	-2.16	30.24	-1.27	3.13	1059.6	-27.16
18	719	3.46	-0.16	3.33	5.25	1059.3	-27.04
18	720	5.69	-6.78	5.14	6.24	1059.4	-27.44
18	721	6.53	-5.5	5.96	6.84	1060	-27.04
18	722	7.22	-5.25	6.74	7.26	1060.5	-25.98
18	723	7.84	-6.22	7.36	7.75	1060.5	-25.46
18	724	7.64	-4.12	7.12	7.16	1060.1	-25.74
18	725	6.84	-2.42	6.41	6.41	1060.2	-26.08
18	726	5.33	-1.98	5.63	6.09	1060.2	-26.26
18	727	3.85	-3.53	5.11	6.33	1059.6	-25.83
18	728	2.58	-5.4	4.68	6.13	1059.1	-24.78
18	729	1.64	-7.56	4.47	5.02	1059.1	-24
18	730	0.11	-4.69	3.78	3.11	1059.1	-24.09
18	731	-1.22	-1.2	3.19	2.03	1058.6	-24.03
18	732	-1.75	0.02	2.98	2.37	1057.8	-23.78
18	733	-1.67	-1.43	3.27	3.08	1057.5	-23.97
18	734	-1.17	-5.49	3.74	4.19	1057.2	-24.09
18	735	-0.83	-9.32	4.14	5	1056.8	-22.95
18	736	-1.1	-10.02	3.89	5.29	1056.5	-22.05
18	737	-1.81	-8.81	3.09	5.21	1056.3	-23.01
18	738	-2.68	-8.61	2.17	4.76	1056.1	-24.47
18	739	-2.98	-12.74	1.89	4.43	1055.6	-24.06
18	740	-3.47	-13.6	1.39	3.91	1055.1	-23.1
18	741	-4.05	-11.71	0.64	3.44	1054.8	-23.44
18	742	-4.27	-10.66	0.08	3.32	1054.8	-24.4

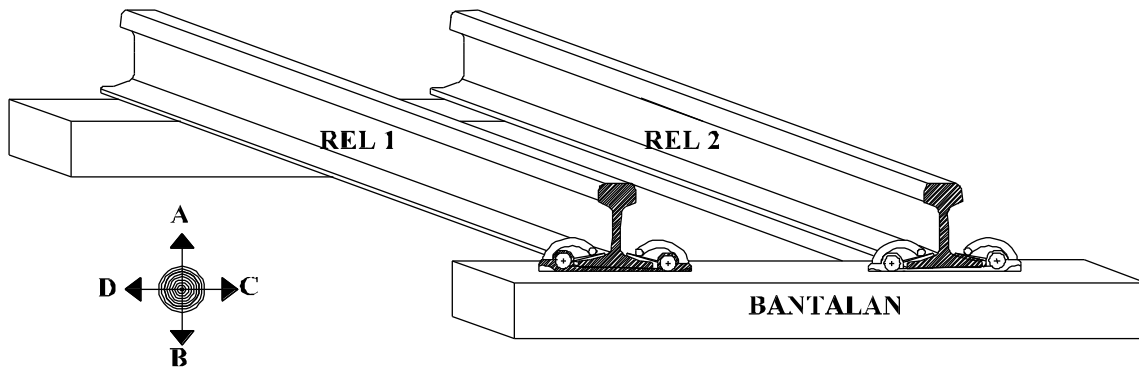
MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	743	-3.82	-12.63	0.32	3.5	1055	-24.74
18	744	-2.73	-16	1.09	4.53	1055.3	-24.78
18	745	-1.6	-17.57	1.8	5.22	1055.8	-24.81
18	746	-0.58	-17.87	2.21	5.45	1056.4	-24.28
18	747	0.35	-17.27	2.41	5.53	1056.5	-23.5
18	748	1.04	-14.91	2.28	5.4	1056.5	-23.47
18	749	1.13	-9.1	1.33	4.5	1056.8	-23.53
18	750	1.7	-7.47	0.67	3.79	1057.1	-22.39
18	751	2.64	-9.5	0.52	3.59	1056.7	-20.74
18	752	3.49	-12.22	0.69	3.5	1056.5	-20.16
18	753	3.82	-11.53	0.45	2.69	1056.7	-20.65
18	754	3.85	-8.35	-0.01	1.44	1056.9	-20.93
18	755	4.09	-4.99	-0.43	0.49	1056.9	-20.28
18	756	4.82	-3.55	-0.47	0.41	1057.1	-19.22
18	757	5.47	-0.64	-0.44	0.43	1057.9	-18.57
18	758	5.67	5.49	-0.64	-0.22	1058.8	-18.33
18	759	5.25	14.48	-1.42	-1.91	1059.3	-18.42
18	760	5.28	18.22	-1.79	-3.19	1059.8	-19.38
18	761	5.58	18.4	-1.82	-3.87	1060.1	-21.92
18	762	5.73	17.95	-1.79	-4.93	1060.5	-25.24
18	763	5.33	19.71	-2.27	-6.91	1061.2	-27.44
18	764	4.6	21.51	-2.8	-7.45	1061.9	-27.6
18	765	3.97	21.71	-3.1	-5.91	1062	-26.29
18	766	3.65	20.42	-3.19	-4.61	1062	-26.05
18	767	3.22	20.16	-3.42	-5.47	1062.3	-27.84
18	768	2.7	21.16	-3.54	-5.47	1062.6	-29.92
18	769	2.02	22.77	-3.39	-2.83	1062.5	-30.14
18	770	1.36	22.69	-2.71	1.85	1062	-29.64
18	771	1.67	15.21	-1.44	3.3	1061.7	-30.51
18	772	3.04	-0.39	1.09	3.55	1062	-32.28
18	773	2.61	-1.56	1.25	3.8	1062	-32.84
18	774	-0.34	14.26	-0.73	2.38	1061.1	-32.34
18	775	-4.5	36.58	-3.81	-2	1060.1	-31.97
18	776	-6.11	38.86	-4.08	-4.6	1060.8	-29.95
18	777	-5.85	27.67	-2.16	-4.05	1062.7	-23.04
18	778	-5.41	16.33	-0.11	-2.2	1063.6	-11.6
18	779	-5.09	8.04	1.66	0.76	1062.4	-1.98
18	780	-5.02	3.13	2.94	3.46	1060.8	0.93
18	781	-5.21	1.68	3.47	4.83	1060.2	-0.78
18	782	-5.14	1.98	3.53	6.41	1059.3	-2.76

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
18	783	-4.5	1.23	3.91	9.06	1057.6	-2.39
18	784	-4.13	0.43	4.52	8.73	1058.2	-1.55
18	785	-4.64	1.49	4.68	4.58	1061.9	-2.67
18	786	-5.48	2.95	4.5	1.13	1065.2	-5.02
18	787	-5.93	3.06	4.35	1.45	1064.8	-6.85
18	788	-6.02	1.12	4.22	0.41	1065	-6.42
18	789	-5.46	-4.06	4.52	-3.87	1070	-0.96
18	790	-4.91	-6.21	4.26	-11.33	1075.7	1.71
18	791	-6.54	8.91	2.4	-13.62	1077.9	-16.16
18	792	-10.29	41.05	-2.63	-14.7	1073.8	-54.08
18	793	-10.33	42.01	-3.03	-14.84	1073.5	-55.63
18	794	-5.4	7.79	0.8	-10.41	1072.7	-15.5
18	795	1.44	-38.51	6.82	-0.71	1069.2	38.95
18	796	3.14	-46.85	7.56	3.52	1065.6	50.05
18	797	2	-35.47	4.77	1.48	1065.8	40.22
18	798	1.52	-30.07	2.62	-0.37	1066.2	39.32
18	799	1.39	-28.18	0.99	-1.74	1065.5	41.36
18	800	1.06	-24.67	-0.74	-3.57	1064.9	38.2

Sumber : Dirjen Perkeretaapian, 2018

Seperti yang terlihat dalam tabel bahwa angkatan dan listringan menghasilkan nilai plus (+) dan minus (-). Parameter angkatan terbagi menjadi 2 pembacaan yang dihasilkan yaitu pembacaan rel kiri dan rel kanan dengan kode L.PROF 124 (kiri) dan R.PROF 124 (kanan). Begitu juga untuk listringan yang terbagi menjadi 2 pembacaan yaitu pembacaan rel kanan dan rel kiri dengan kode L.ALGN 124 (kiri) dan R.ALGN 124 (kanan). Angka 124 menunjukkan pembacaan 10 m (*Short*) dipakai untuk perhitungan pada *track* lurus, 20 m (*Middle*) dipakai untuk bangunan hikmat (BH), wesel (WSL) dsb, 40 m (*Long*) dipakai untuk kereta kecepatan tinggi. Pada KA Galunggung tidak menyatakan tipe *track* dan kategori *track*. Parameter angkatan pada *track* dikatakan baik jika nilai kerataannya nol pada *track* lurus. Jika bacaan kereta ukur menghasilkan nilai minus (-) yaitu menunjukkan adanya penurunan level kepala rel pada rel kiri atau kanan atau penurunan kedua sisi. Parameter listringan menghasilkan nilai plus (+) dan minus (-) dimana jika bacaan kereta ukur menunjukkan nilai minus (-) artinya rel bergeser ke arah dalam sedangkan jika plus (+) artinya rel bergeser ke arah luar. Hal tersebut

akan berpengaruh terhadap parameter lebar jalur (*gauge*). Untuk lebih jelasnya di ilustrasikan pada Gambar 4.4 yang menjelaskan arah letak penyimpangan dan di contohkan pada Gambar 4.5.



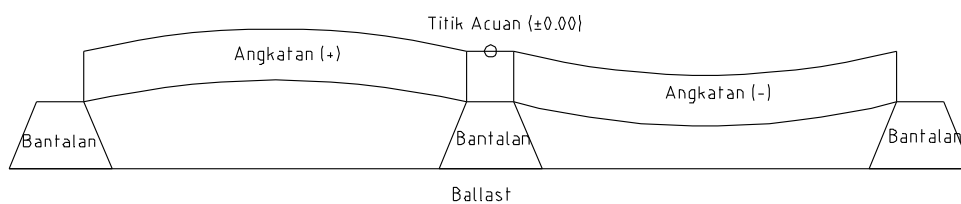
Arah Lendutan Rel

Gambar 4.4 Arah lendutan pada parameter Listringan dan Angkatan

Pada Gambar 4.5 adalah tampak struktur atas jalan rel. Arah lendutan menunjukkan kode penyimpangan geometri yaitu sebagai berikut :

1. Rel A melendut kearah B adalah penyimpangan parameter angkatan (-)
2. Rel B melendut kearah B adalah penyimpangan parameter angkatan (-)
3. Rel A melendut kearah A adalah penyimpangan parameter angkatan (+)
4. Rel B melendut kearah A adalah penyimpangan parameter angkatan (+)
5. Rel A melendut kearah C adalah penyimpangan parameter listringan (-)
6. Rel B melendut kearah C adalah penyimpangan parameter listringan (+)
7. Rel A melendut kearah D adalah penyimpangan parameter listringan (+)
8. Rel B melendut kearah D adalah penyimpangan parameter listringan (-)

Gambar 4.3 memberikan penjelasan pada poin 1 dan poin 2 bisa dilihat sebagai berikut :



Gambar 4.5 Arah lendutan pada parameter Angkatan (+) dan Angkatan (-)

4.2.3. Perhitungan Nilai Track Quality Indeks (TQI).

Pada perhitungan ini akan diperoleh standar deviasi dari setiap parameter berdasarkan data yang didapat Direktorat Jenderal Perkeretaapian karena output datanya masih berupa data sebaran 0.25 m', akan tetapi data yang didapatkan pada tahun 2018 bukan tahun aktual.

Standard deviasi adalah sebuah nilai statistik yang dimanfaatkan untuk menentukan sebuah sebaran data dalam suatu sampel. Untuk menghitung standar deviasi dihitung dengan menggunakan Microsoft Excel untuk mempercepat proses perhitungan. Berikut merupakan contoh perhitungan standar deviasi untuk parameter yang ditinjau. Dalam hal ini perhitungan standar deviasi untuk parameter angkatan digunakan sebagai contoh perhitungan. Tabel 4.3 menjelaskan metode perhitungan standar deviasi dengan Microsoft Excel tanpa menggunakan rumus sedangkan, Tabel 4.4 menjelaskan metode perhitungan dengan menggunakan rumus (secara manual). Dalam perhitungan nilai track quality indeks (TQI) dengan standart deviasi didapatkan nilai TQI pada lintas Surabaya - Mojokerto tahun 2018 yang di sajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.6. Telah disebutkan dalam Sub - bab 3.3.5.2 bahwa nilai indeks kualitas jalan rel berdasarkan kondisi geometrinya. Beberapa parameter yang berpengaruh terhadap nilai TQI adalah angkatan, listringan, lebar sepur, dan pertinggian. Hasil penjumlah standar deviasi dari empat parameter menghasilkan nilai indeks kualitas jalan rel atau biasa disebut dengan *Track Quality Index* (TQI). Langkah pertama untuk menentukan nilai TQI dengan menghitung nilai standar deviasi dari tiap parameter. Indeks kualitas jalan rel berdasarkan kondisi geometrinya. Indeks ini didapatkan dengan menjumlahkan 4 (empat) parameter pengukuran. yaitu angkatan rata-rata, Listringan rata-rata, lebar sepur dan pertinggian. Skilu yang merupakan perbandingan dari pertinggian tidak dimasukkan dalam perhitungan ini, karena jika dihitung akan terjadi duplikasi. TQI ini tidak mempunyai satuan, karena walaupun merupakan hasil penjumlahan dari satuan yang sama (mm) tetapi vektomya berbeda. Hasil dari standart deviasi pada KM 18 dapat dilihat pada Tabel 4.5. Untuk batasan nilai track quality indeks (TQI) mengikuti standart PT.Kereta Api Indonesia, karena KA.Galunggung belum mempunyai batasan yang menyatakan kategori kerusakan.

Tabel 4.3 Contoh Perhitungan Standar Deviasi dengan Formula Ms. Excel

✓ fx **=STDEV(P17322:P18119)** → **A**

	B	C	M	N	O	P	Q
E	MP (km)	M/4 0.25 M	SPEED KM/JAM	LPROF124 (10,20,40m)	RPROF124 (10,20,40m)	Total Profil	S.dev 200 m
							C
	20	3978	31	-2.05	-0.57	-2.62	
	20	3979	31	-1.76	-0.33	-2.09	
	20	3980	31	-1.22	-0.53	-1.75	
	20	3981	31	-0.95	-0.33	-1.28	
	20	3982	31	-0.61	-0.01	-0.62	
	20	3983	31	-0.09	0.24	0.15	
	20	3984	31	0.29	0.28	0.57	
	20	3985	31	1.16	0.27	1.43	
	20	3986	31	1.64	0.57	2.21	
	20	3987	31	2.26	0.66	2.92	
	20	3988	31	2.74	0.47	3.21	
	20	3989	31	3.31	0.32	3.63	
	20	3990	31	3.72	0.14	3.86	
	20	3991	31	4.22	0.16	4.38	
	20	3992	31	4.28	0.05	4.33	
	20	3993	31	4.39	0.55	4.94	
	20	3994	31	4.32	0.87	5.19	
	20	3995	31	4.36	0.95	5.31	
20	3996	31	4.18	0.94	5.12		
20	3997	31	4.14	0.86	5		
20	3998	31	4.11	0.93	5.04		
	20	D 3999	31	3.92	0.75	4.67	B 3.4972583

Keterangan :

- A = Formula pada microsoft excel yang digunakan untuk mencari standar deviasi.
- B = Hasil nilai standar deviasi pada 1 segmen (200 m') pada parameter angkatan. (nilai dari standar deviasi 0-800).
- C = Parameter kerusakan
- D = Letak bacaan KA ukur per 200 m' = 800 data (berlaku kontinyu sampai pindah kilometer), Segmen 1 (800), Segmen 2 (1600), Segmen 3 (2400), Segmen 4 (3200) dan Segmen 5 (4000)
- E = Menunjukkan posisi kilometer pembacaan.

Untuk perhitungan standar deviasi untuk parameter angkatan secara manual menggunakan persamaan 3.1 sebagai berikut :

$$S = \sqrt{\frac{\sum Xi^2 - \frac{(Xi^2)}{n}}{n-1}}$$

Tabel 4.4 Contoh Perhitungan Standar Deviasi dengan Secara Manual

MP (km)	M/4 (m)	L.PROF 124	R.PROF 124	Total (Xi)	X_i^2
18	0	-14.53	-5.3	-19.83	393.23
18	1	-13.74	-4.94	-18.68	348.942
18	2	-12.47	-5.12	-17.59	309.408
18	3	-10.88	-5.12	-16	256
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
18	798	1.52	-30.07	-28.55	815.103
18	799	1.39	-28.18	-26.79	717.704
18	800	1.06	-24.67	-23.61	557.432
Σ				285.93	113596
X_i^2				81756	

$$\begin{aligned}
 S_d &= \sqrt{\frac{\sum Xi^2 - \frac{(Xi^2)}{n}}{n-1}} \\
 &= \sqrt{\frac{113595.78 - \frac{(81755.9649)}{800}}{800 - 1}} \\
 &= 11.88509
 \end{aligned}$$

Jadi standar deviasi (S_d) angkatan pada kilometer 18+000 – 18+200 adalah 11.88509.

Tabel 4.5 Nilai standar deviasi tiap parameter kerusakan KM 18+000 -18+200

MP (km)	M/4 (m)	LPROF 124	RPROF 124	Total	Xi2	LALIGN 124	RALIGN 124	Total	Xi2	GAUGE	Xi2	XLEVEL	Xi2
18	0	-14.53	-5.3	-19.83	393.229	6.73	6.81	13.54	183.332	6.37	40.5769	-7.81	60.9961
18	1	-13.74	-4.94	-18.68	348.942	6.14	6.27	12.41	154.008	6.13	37.5769	-7.6	57.7600
18	2	-12.47	-5.12	-17.59	309.408	5.44	5.85	11.29	127.464	6.32	39.9424	-6.85	46.9225
18	3	-10.88	-5.12	-16	256.000	4.87	5.00	9.87	97.4169	6.28	39.4384	-6.02	36.2404
18	4	-9.19	-4.15	-13.34	177.956	4.34	3.49	7.83	61.3089	5.68	32.2624	-5.89	34.6921
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	796	3.14	-46.85	-43.71	1910.56	7.56	3.52	11.08	122.766	1.37	1.8769	50.05	2505
18	797	2	-35.47	-33.47	1120.24	4.77	1.48	6.25	39.0625	1.22	1.4884	40.22	1617.65
18	798	1.52	-30.07	-28.55	815.103	2.62	-0.37	2.25	5.0625	0.84	0.7056	39.32	1546.06
18	799	1.39	-28.18	-26.79	717.704	0.99	-1.74	-0.75	0.5625	1.49	2.2201	41.36	1710.65
18	800	1.06	-24.67	-23.61	557.432	-0.74	-3.57	-4.31	18.5761	2.06	4.2436	38.2	1459.24
Σ				285.93	113596			-71.3	30272.2	1786.81	9625.83	-931.33	139144
Xi²				81756				5083.69		3192690		867376	

Nilai X_i^2 pada tiap parameter adalah :

$$\begin{aligned} \text{Angkatan} &= 285.93^2 \\ &= 81756 \\ \text{Listringan} &= -71.300^2 \\ &= 5083.69 \\ \text{L.spur} &= 1786.81^2 \\ &= 3192690 \\ \text{Pertinggian} &= -931.33 \\ &= 867376 \end{aligned}$$

Perhitungan nilai standar deviasi 4 parameter kerusakan :

$$\begin{aligned} \text{SD}_{\text{Angkatan}} &= \sqrt{\frac{\sum Xi^2 - \frac{(Xi^2)}{n}}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{113595,78 - \frac{(81755,9649)}{800}}{800-1}} \\ &= 11,88509 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SD}_{\text{Listringan}} &= \sqrt{\frac{\sum Xi^2 - \frac{(Xi^2)}{n}}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{30272,18 - \frac{(5083,69)}{800}}{800-1}} \\ &= 6,12352 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SD}_{\text{LB.Spur}} &= \sqrt{\frac{\sum Xi^2 - \frac{(Xi^2)}{n}}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{9625,83 - \frac{(3192690)}{800}}{800-1}} \\ &= 2,65085 \end{aligned}$$

$$\text{SD}_{\text{Pertinggian}} = \sqrt{\frac{\sum Xi^2 - \frac{(Xi^2)}{n}}{n-1}}$$

$$= \sqrt{\frac{139143,70 - \frac{(867375,57)}{800}}{800 - 1}}$$

$$= 13,500$$

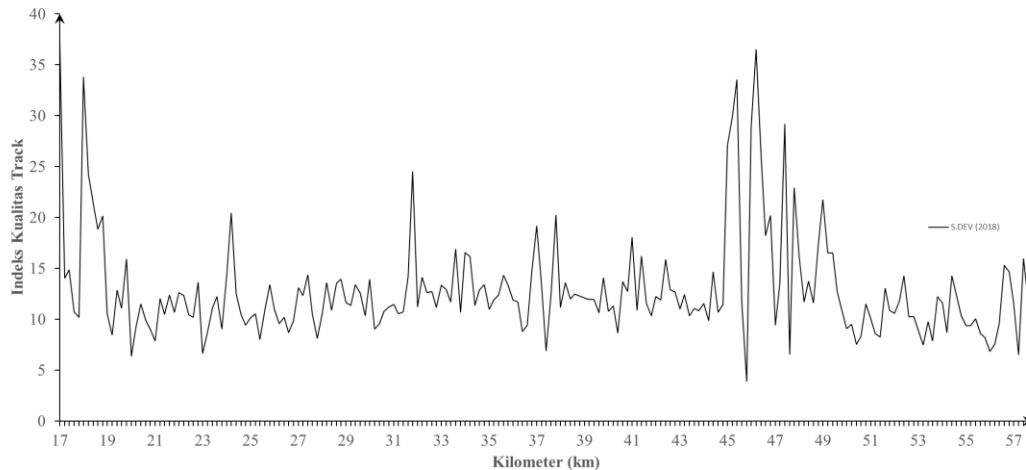
Dari perhitungan standar deviasi di atas, maka didapatkan nilai *track quality indeks* (TQI) pada KM 18 segmen 1 (0-200 meter) adalah sebagai berikut :

$$\text{TQI} = \text{SD angkatan} + \text{SD listringan} + \text{SD lebar sepur} + \text{SD pertinggian}$$

$$= 11,88509 + 6,12352 + 2,65085 + 13,500$$

$$= \mathbf{33,80864}$$

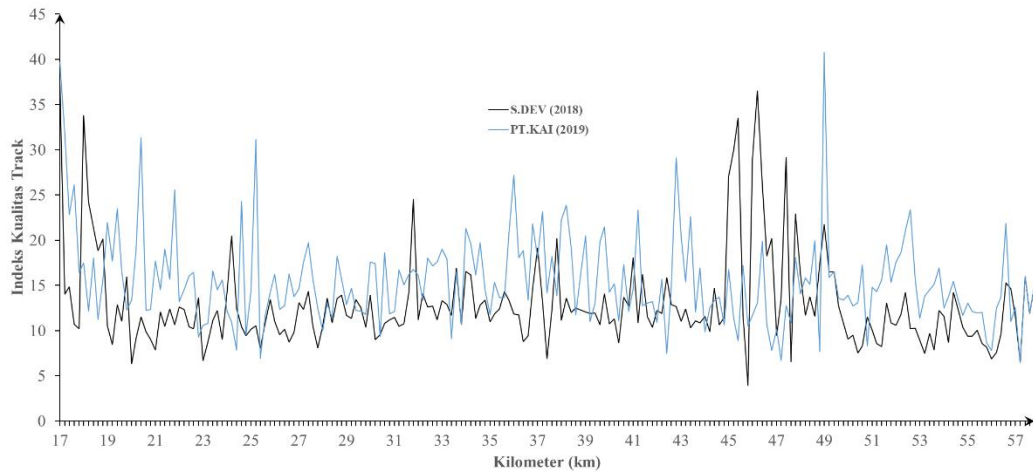
Dari perhitungan didapatkan hasil TQI sebesar 33,80864 yang menunjukkan bahwa kualitas indeks rel masuk dalam kategori 3 $\text{TQI} \leq 40$ Secara keseluruhan, nilai TQI dari KM 17 + 000 sampai dengan km 57 + 000 menunjukkan bahwa prosentase tertinggi yaitu 37.44 pada KM 17. Lebih jelasnya di lihat pada grafik Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Nilai track quality indeks (TQI) dengan perhitungan standar deviasi tahun 2018

Hasil nilai track quality indeks EM-120 dan perhitungan dengan standar deviasi dari output KA Galunggung tidak dapat dibandingkan, karena data terakhir yang di dapatkan dari direktorat jendral perkeretapiian Indonesia (DJKA) tahun 2018, sedangkan data PT.Kereta Api Indonesia (Persero) tahun 2019. Berikut

adalah hasil nilai *track quality Indeks* (TQI) pada tahun 2018 dan 2019 lintas Surabaya – Mojokerto yang dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik *Track Quality Indeks* (TQI) 2019 dengan EM-120, dan 2018 dengan perhitungan standar deviasi output KA Galunggung

Dari grafik terlihat bahwa ada perbedaan nilai kondisi geometri, antara tahun 2018 dan 2019, hal tersebut sangat wajar terjadi sebab kondisi geometri track dapat berubah – ubah. Karena ada perbedaan hasil tersebut maka dilakukan penelitian dilapangan untuk mengetahui nilai aktual kondisi geometri serta pengukuran penyimpangan secara aktual.

4.3. Pengukuran Parameter TQI Manual

Seperti dijelaskan pada Sub – Bab 3.3.5.3 pengukuran dilakukan pada nilai track quality eksisting terjelek, yaitu pada segmen yang mengalami penurunan atau kenaikan yang signifikan dari data hasil perbandingan tahun 2018 dan 2019, dengan menggunakan alat ukur manual. Pengukuran dengan menggunakan alat matisa pada parameter lebar spur dan pertinggian, sedangkan alat ukur listringan dan angkatan menggunakan center benang, serta meter listring. Trial survey dilakukan pada KM untuk pendahuluan 18 + 000 – 19 + 000. Survey pendahuluan didapatkan seperti Tabel 4.6. Survey ini ditujukan untuk mengetahui dimensi bantalan, tipe rel, arah penyimpangan, serta jarak bantalan sebagai dasar permodelan dengan metode *finite elemen method* (FEM).

Tabel 4.6 Hasil Survey Pendahuluan KM 18 + 000 -19 + 000

KM/HM			JERNIS REL		Cacat	Putus	JENIS BANTALAN			
			R. 54	R.50			BETON		KAYU	
Wonokromo - Mojokerto							JUMLAH	RUSAK	JUMLAH	RUSAK
17+900	-	18+000	100	0	0	0	147	0	0	0
18+000	-	18+100	100	0	0	0	157	0	50	0
18+100	-	18+200	100	0	0	0	159	0	0	0
18+200	-	18+300	100	0	0	0	166	0	0	0
18+300	-	18+400	100	0	0	0	168	0	0	0
18+400	-	18+500	100	0	4	0	176	0	2	2
18+500	-	18+600	100	0	2	0	162	0	0	2
18+600	-	18+700	100	0	0	0	158	0	0	0
18+700	-	18+800	100	0	0	0	167	0	0	0
18+800	-	18+900	100	0	0	0	167	0	0	0
18+900	-	19+000	100	0	0	0	164	0	0	0
Σ	=		1100	0	6	0	1791	0	52	4

Pada survey pendahuluan didapatkan jumlah bantalan 1791 bh + 52 bh = 1843 bh bantalan.

Survey nilai parameter *track quality indeks* dilakukan setiap 3 m'.

Lebar spur = Rata – rata 5 pengukuran

Pertinggian = Rata – rata 5 pengukuran

Listringan = 1 Pengukuran

Angkatan = 1 Pengukuran

Untuk mengetahui kondisi aktual geometri dicari sampel untuk diukur secara manual dengan cara mencari perbandingan antara TQI pada tahun 2018 dan TQI tahun 2019. Metode perhitungan menggunakan standar deviasi dengan bantuan Microsoft excel. Pada pengukuran manual setiap 3 m' (5 bantalan) keluar nilai 1 parameter. Untuk contoh lebar spoor seperti berikut :

B1 = 1069 mm

B2 = 1070 mm

B3 = 1069 mm

B4 = 1070 mm

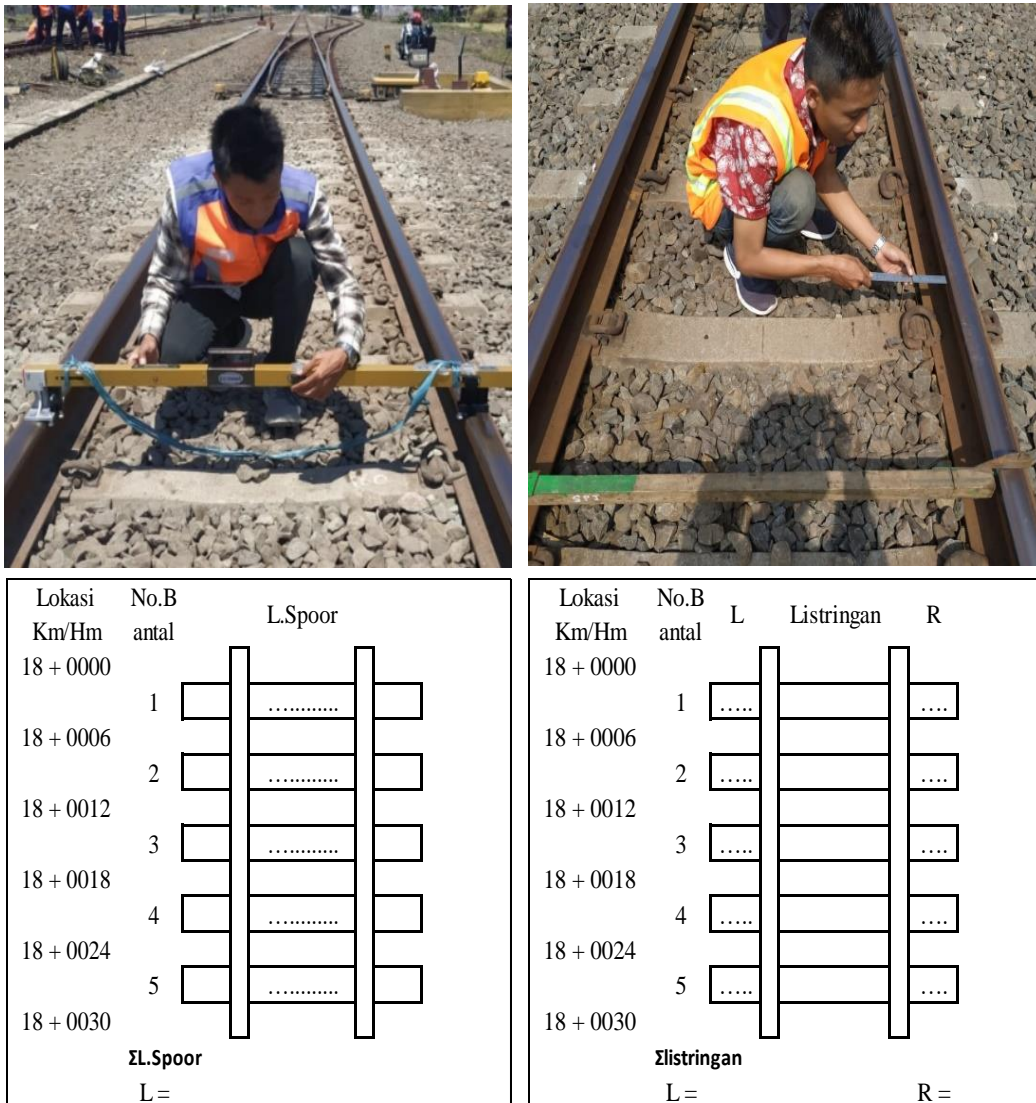
B5 = 1071 mm

Hasil nilai parameter lebar spoor adalah

$$= 1067 - ((1069+1070+1069+1070+1071)/5)$$

$$= 2.8$$

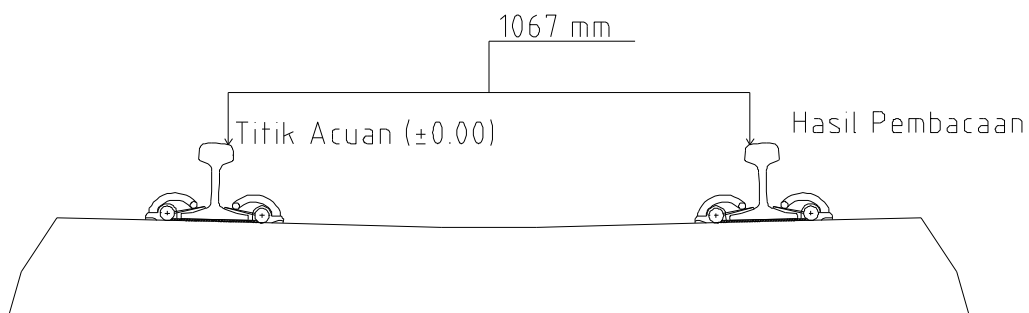
Metode pengukuran dilakukan dengan alat ukur manual yaitu dengan matisa dan meteran listring yang disurvei setiap 5 bantalan / per 3 meteran agar mendapatkan nilai parameter pengukuran yang maksimal untuk lebih jelasnya seperti pada Gambar 4.8. Untuk patokan titik acuan pengukuran (± 0.00) dijelaskan pada Gambar 4.9 – Gambar 4.10.



Gambar 4.8 Pengukuran 4 parameter TQI manual

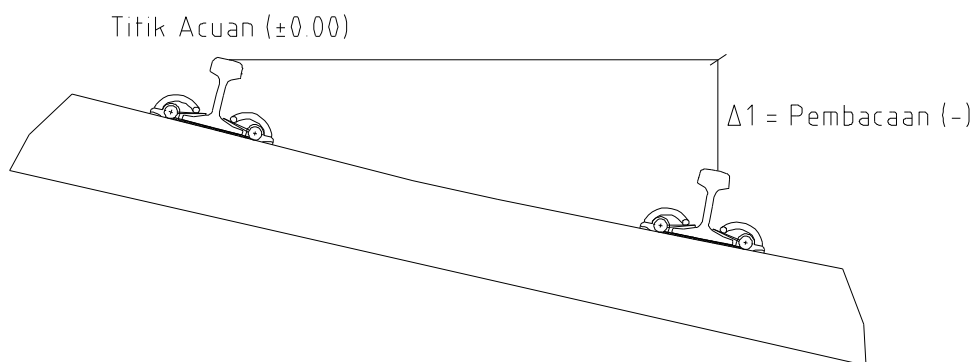
Untuk pengukuran lebar spoor dan pertinggian di gunakan alat ukur matisa alat tersebut dapat membaca jarak arah vertikal dan horizontal. Prinsip alat ukur tersebut mirip dengan waterpass yang membutuhkan titik acuan. Pada kontruksi jalan rel sendiri titik acuan harus sama dengan pengukuran sebelumnya, maka di

dapatkan nilai (+) dan nilai (-) untuk nilai pertinggian. Sedangkan untuk nilai parameter lebar spoor mengacu pada titik acuan pertinggian letak relnya. Dalam penelitian ini rel acuan adalah rel sebelah kiri karena mengacu pada pengukuran yang biasanya di lakukan oleh bagian jalan dan jembatan Resor 8.13 PT.Kereta Api Indonesia (Persero), pembeda titik acuan antara pengukuran lebar spoor dan pertinggian adalah pada letak relnya. Pengukuran lebar spoor diukur dari rel kiri bagian paling dalam, sampai rel kanan bagian paling dalam yang di ilustrasikan pada Gambar 4.9



Gambar 4.9 Ilustrasi pembacaan lebar spoor

Pada Gambar 4.9 menunjukkan bahwa jarak normal sebelum adanya penyimpangan lebar spoor adalah 1067 mm diukur dari kedua ujung kepala rel terluar. Jika nilai ukuran lebih dari 1067 mm maka nilainya positif (+) dan jika nilainya kurang dari 1067 mm maka nilainya negative (-). Dalam perhitungan TQI nilai positif maupun negative hanya menunjukkan arahnya tidak berlaku dalam perhitungan karena nilai parameter TQI adalah absolute. Untuk parameter pertinggian di ilustrasikan pada Gambar 4.10



Gambar 4.10 Ilustrasi pembacaan pertinggian

Jika hasil pembacaan lebih tinggi dari titik acuan maka nilainya positif (+) dan jika lebih rendah seperti Gambar 4.10, maka nilainya negatif (-). Dari hasil pengukuran didapatkan data sebaran didapatkan 201 data setiap 1 segmen untuk pengukuran. Contoh data hasil pengukuran pada KM 19+200 seperti pada Tabel 4.7 dibawah

Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Manual 200 m'

STA	3 m	METERAN LISTRING							MATISA					
		Angkat Kiri	Angkat Kanan	Total Profil	S.dev 200 m	Listring Kiri	Listring Kanan	Total Listring	S.dev 200 m	L.SPOOR	Total Gauge	S.dev 200 m	Pertinggian	S.dev 200 m
150		3.6	6.0	9.6		0.7	1.0	1.7		1065.5	1.5		8.7	
153		3.1	5.3	8.3		0.9	1.0	1.9		1065.9	1.1		7.3	
156		2.4	4.4	6.8		0.7	1.0	1.7		1065.9	1.1		6.3	
159		1.7	3.3	4.9		0.6	1.0	1.7		1066.1	1.0		5.4	
162		1.0	1.4	2.4		0.4	1.2	1.6		1066.0	1.0		4.3	
165		0.3	-0.7	-0.4		0.2	1.3	1.5		1066.0	1.0		3.4	
168		-0.8	-2.1	-3.0		0.0	1.5	1.5		1066.0	1.0		2.8	
171		-1.8	-3.7	-5.5		-0.1	1.5	1.4		1065.8	1.2		2.1	
174		-2.5	-5.2	-7.7		-0.2	1.6	1.3		1065.5	1.5		1.6	
177		-2.9	-6.1	-9.0		-0.2	1.5	1.3		1065.2	1.8		1.1	
180		-3.2	-6.8	-10.0		-0.3	1.4	1.1		1065.0	2.0		0.6	
183		-3.3	-6.9	-10.2		-0.5	1.2	0.7		1064.9	2.1		0.2	
186		-3.3	-7.2	-10.5		-0.5	1.0	0.5		1064.8	2.2		-0.3	
189		-3.3	-7.2	-10.6		-0.7	0.8	0.1		1064.8	2.2		-0.7	
192		-3.5	-6.2	-9.7		-0.9	0.6	-0.3		1064.8	2.2		-1.1	
195		-3.5	-6.4	-9.9		-1.0	0.5	-0.5		1064.7	2.3		-1.5	
198		-3.4	-6.7	-10.1		-1.0	0.5	-0.6		1064.8	2.2		-0.1	
201		-3.3	-6.5	-9.8		-1.1	0.4	-0.7		1064.9	2.1		-2.3	
0		-3.3	-6.3	-9.6	7.5	-1.1	0.3	-0.8	2.2	1065.2	1.8	0.6	-5.3	4.4
18.2	0	-3.0	-6.4	-9.4		-1.0	0.2	-0.8		1065.4	1.6		-3.3	

EM-120
15 26.1

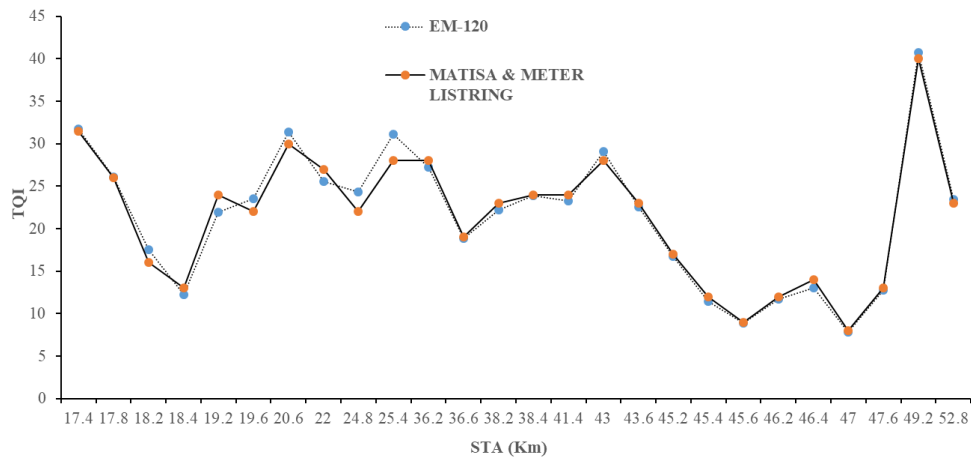
Setelah didapatkan data aktual dilapangan maka di hitung dengan cara standart deviasi agar mendapatkan nilai *track quality indeks* aktual dilapangan. Data hasil pengukuran di bandingkan dengan nilai dari EM-120 milik PT.Kereta api Indonesia. Dengan factor kecocokan data -2 / +1 seperti syarat kategori *track quality indeks* kategori 1 data tersebut disajikan pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.11 yang di sajikan dengan grafik.

Tabel 4.8 Hasil analisa track quality indeks pengukuran manual

NO	STA	KAI	SURVEY	STATUS
1	17.4	31.75	31.5	OK
2	17.8	26.1	26	OK
3	18.2	17.5	16	OK
4	18.4	12.2	13	OK
5	19.2	21.95	24	OK

6	19.6	23.5	22	OK
7	20.6	31.35	30	OK
8	22	25.55	27	OK
9	24.8	24.3	22	TIDAK VALID
10	25.4	31.15	28	TIDAK VALID
11	36.2	27.2	28	OK
12	36.6	18.85	19	OK
13	38.2	22.25	23	OK
14	38.4	23.85	24	OK
15	41.4	23.3	24	OK
16	43	29.1	28	OK
17	43.6	22.6	23	OK
18	45.2	16.75	17	OK
19	45.4	11.4	12	OK
20	45.6	8.9	9	OK
21	46.2	11.7	12	OK
22	46.4	13.05	14	OK
23	47	7.8	8	OK
24	47.6	12.75	13	OK
25	49.2	40.75	39	OK
26	52.8	23.4	23	OK

Pada STA STA 24+800 dan 25+400 nilai TQI melebihi syarat dari -2 / +1 maka data hasil ukur manual tidak sama, tetapi nilai track quality indeks lebih bagus maka dapat dipastikan bahwa pada segmen tersebut sudah dilakukan perawatan. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui penyimpangan aktual dilokasi penelitian agar permodelan dengan simulasi finite elemen analisis lebih maksimal. Dalam permodelan di butuhkan data penyimpangan arah vertikal serta horizontal. Arah vertikal (angkatan dan pertinggian), serta arah horizontal (lebar spoor dan listringan). Pada arah vertikal dan horizontal dicari nilai terbesarnya pada setiap kategori penyimpangan. Kategori 1 $TQI < 15$, kategori 2 $15 < TQI < 25$, kategori 3 $25 < TQI < 40$, dan kategori 4 $TQI > 40$. Dari pengukuran di lapangan di dapatkan seperti grafik Gambar 4.11



Gambar 4.11 Hasil nilai track quality indeks dengan EM-120 dan hasil survey

Hasil dari track quality indeks dilapangan digunakan untuk dasar letak geometri permodelan struktural. Dengan hasil penyimpangan maksimal horizontal dan vertikal maksimum setiap kategori sebagai berikut:

1. $TQI < 15$ = Vertikal = 2 mm
= Horizontal = 2 mm
2. $15 < TQI < 25$ = Vertikal = 5 mm
= Horizontal = 6 mm
3. $25 < TQI < 40$ = Vertikal = 10 mm
= Horizontal = 10 mm
4. $TQI > 40$ = Tidak ditemukan

Hasil tersebut sebagai dasar perletakan beban roda setiap parameter penyimpangan. Karena pada kategori 4 tidak ditemukan maka perletakan beban dalam simulasi *finite elemen analisis* (FEM), dihitung sampai beban tidak mempunyai tumpuan lagi. Roda flange tidak menumpu pada rel (*derailment*). Untuk mengetahui kondisi tata letak tersebut, dalam penelitian ini setelah kondisi penyimpangan vertikal 10 mm dan horizontal 10 mm, penyimpangan ditambah 0.5 mm sampai pada titik beban bekerja tanpa tumpuan.

4.4. Perhitungan Kelas Jalan Berdasarkan Daya Angkut Tahunan (*Passing Tonage*)

Pada tahapan ini ditujukan untuk mengetahui beban aktual yang ada dalam lokasi penelitian. Kelas jalan digunakan untuk dasar pembebanan struktural. Rekap kereta api yang melintas baik kereta penumpang maupun barang. Untuk kereta barang seperti pada Tabel 4.9 dan untuk kereta penumpang seperti Tabel 4.10

Tabel 4.9 Daftar Kereta Barang yang melintas Surabaya – Mojokerto

No. KA	Nama KA.	STA		Jenis Lokomotif	Total Tempuh
		Dari	Ke		
2620A	BBM	17.361	57.358	CC 206	324.044
2619A	BBM	17.361	57.358	CC 206	104.127
2621F	BBM F.	17.361	57.358	CC 206	104.127
2636F	BBM F.	17.361	57.358	CC 206	732.664
2622F	BBM F.	17.361	57.358	CC 206	728.209
2635F	BBM F.	17.361	57.358	CC 206	732.664
2539F	KA.BARANG F.	17.361	57.358	CC 206	732.664
2540F	KA.BARANG F.	17.361	57.358	CC 206	732.664

Sumber : PT. Kereta Api Indonesia, 2019

Tabel 4.10 Daftar Kereta Penumpang yang melintas Surabaya – Mojokerto

No. KA	Nama KA.	STA		Jenis Lokomotif	Total Tempuh
		Dari	Ke		
5A	ARGO WILIS	17.361	57.358	CC 206	701.498
6B	ARGO WILIS	17.361	57.358	CC 206	701.498
56A	BANGUN KARTA	17.361	57.358	CC 206	807.181
55A	BANGUN KARTA	17.361	57.358	CC 206	807.181
44B	BIMA	17.361	57.358	CC 206	919.331
43C	BIMA	17.361	57.358	CC 206	919.331
174C	GAYA BARU MALAM	17.361	57.358	CC 203	823.909
173C	GAYA BARU MALAM	17.361	57.358	CC 203	823.909
7064C	JAYAKARTA P.	17.361	57.358	CC 204	1021.402
7063C	JAYAKARTA P.	17.361	57.358	CC 204	1021.402
285	JENGGALA	17.361	57.358	CC 201	350.488

292	JENGGALA	17.361	57.358	CC 201	350.488
293	JENGGALA	17.361	57.358	CC 201	350.488
298	JENGGALA	17.361	57.358	CC 201	350.488
448	KRD	17.361	57.358	CC 201	521.283
447	KRD	17.361	57.358	CC 201	521.283
450	KRD	17.361	57.358	CC 201	521.283
449	KRD	17.361	57.358	CC 201	521.283
187C	LOGAWA	17.361	57.358	CC 201	669.727
188C	LOGAWA	17.361	57.358	CC 201	669.727
112A	MUTIARA SELATAN	17.361	57.358	CC 206	790.119
111B	MUTIARA SELATAN	17.361	57.358	CC 206	790.119
179B	PASUNDAN	17.361	57.358	CC 203	695.508
180B	PASUNDAN	17.361	57.358	CC 203	695.508
101C	RANGGA JATI	17.361	57.358	CC 206	800.52
102C	RANGGA JATI	17.361	57.358	CC 206	800.52
419	RAPI DHOHO	17.361	57.358	CC 201	530.181
421	RAPI DHOHO	17.361	57.358	CC 201	530.181
420	RAPI DHOHO	17.361	57.358	CC 201	530.181
423	RAPI DHOHO	17.361	57.358	CC 201	530.181
422	RAPI DHOHO	17.361	57.358	CC 201	530.181
424	RAPI DHOHO	17.361	57.358	CC 201	530.181
425	RAPI DHOHO	17.361	57.358	CC 201	530.181
426	RAPI DHOHO	17.361	57.358	CC 201	530.181
83B	SANCAKA	17.361	57.358	CC 204	624.416
84B	SANCAKA	17.361	57.358	CC 204	624.416
85B	SANCAKA	17.361	57.358	CC 204	624.416
86B	SANCAKA	17.361	57.358	CC 204	624.416
194B	SRI TANJUNG	17.361	57.358	CC 201	613.753
193B	SRI TANJUNG	17.361	57.358	CC 201	613.753
50A	TURANGGA	17.361	57.358	CC 206	701.498
49A	TURANGGA	17.361	57.358	CC 206	701.498

Sumber : PT. Kereta Api Indonesia, 2019

Untuk rangkaian (stamformasi gerbong yang di tarik) pada penelitian ini didapatkan dari PT. Kereta Api Indonesia, 2019 Resor 8.13 Sepanjang dan di sajikan pada Tabel 4.11 untuk stamformasi kereta penumpang dan Tabel 4.12 untuk stamformasi kereta barang.

Tabel 4.11 Stamformasi kereta penumpang

Nama KA.	Jenis Lokomotif	RANGKAIAN POKOK									
		K1k	K1	KM1	M1	K2	KMP2	MP2	K3 Split	K3 NI	KMP3
ARGO WILIS	CC 206	16			2						
BANGUN KARTA	CC 206	16		2							
BIMA	CC 206	16			2						
GAYA BARU MALAM	CC 203								16		2
JAYAKARTA P.	CC 204					8	1				
JENGGALA	CC 201								5		1
KRD	CC 201								5		1
LOGAWA	CC 201								7		1
MUTIARA SELATAN	CC 206	4	2			8		2			
PASUNDAN	CC 203								12		2
RANGGA JATI	CC 206		8		2	8					
RAPI DHOHO	CC 201								5		1
SANCAKA	CC 204	5					1			3	
SRI TANJUNG	CC 201								6		1
TURANGGA	CC 206	12	2		2						

Sumber : PT. Kereta Api Indonesia, 2019

Tabel 4.12 Stamformasi kereta barang

Nama KA.	Jenis Lokomotif	SF	KEBUTUHAN GERBONG			
			GD 42 T	GD 54 T	GK 30 T	GK 40 T
BBM	CC 206	20			20	20
BBM	CC 206	20			40	
BBM F.	CC 206	20			40	
BBM F.	CC 206	20		40		
BBM F.	CC 206	30	60			
BBM F.	CC 206	30	60			
KA.BARANG F.	CC 206	30	60			
KA.BARANG F.	CC 206	30	60			

Sumber : PT. Kereta Api Indonesia, 2019

Untuk berat kereta satu kereta dari data sekunder PT. Kereta Api Indonesia, beban gandar = total berat / 2, beban as = beban gandar /2 untuk penamaan mengikuti standart perkeretaapian Indonesia yaitu :

- K = kereta penumpang biasa
- 1 = kelas eksekutif
- 2 = kelas bisnis
- 3 = kelas ekonomi
- M = kereta makan dan dapur
- P = pembangkit
- B = bagasi

Daftar beban kereta disajikan pada Tabel 4.13

Tabel 4.13 Beban gerbong penumpang yang melintas

Jenis Kereta	Berat		Beban	
	Kosong (Ton)	Isi (Ton)	Gandar (Ton)	Tiap As (Ton)
K1k	43	48	24	12
K1	43	48	24	12
KM1	41	46	23	11.5
M1	41	46	23	11.5
K2	37	42	21	10.5
KMP2	40	46	23	11.5
MP2	40	46	23	11.5
K3 Split	37	42	21	10.5
K3 NI	37	42	21	10.5
KMP3	36	42	21	10.5
B	36	48	24	12
P	43	50	25	12.5

Sumber : PT.Kereta Api Indonesia, 2019

Untuk gerbong barang yang melintas ada beberapa jenis yaitu dengan kode :

- GD = Gerbong datar
- GK = Gerbong tangki/silinder

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.14, angka di belakang menunjukkan beban setiap gerbong

Tabel 4.14 Beban gerbong barang yang melintas

Nama KA.	SF	KEBUTUHAN GERBONG			
		GD 42 T	GD 54 T	GK 30 T	GK 40 T
BBM	20			20	20
BBM	20			40	
BBM F.	20			40	
BBM F.	20		40		
BBM F.	30	60			
BBM F.	30	60			
KA.BARANG F.	30	60			
KA.BARANG F.	30	60			

Sumber : PT.Kereta Api Indonesia, 2019

Perhitungan beban lintas yang melewati jalan rel Surabaya – Mojokerto dapat dilihat pada contoh perhitungan berikut :

Perhitungan beban lintas jenis kereta api penumpang dengan nomer KA.5A dan 6B Argo Wilis lintas Surabaya – Mojokerto dengan panjang lintas = 39,997 km /± 40 km. Jenis gerbong yang ditarik (Tabel 4.11)

$$\begin{aligned}
 K_{Ik} &= 16 \times 48 \text{ ton} = 768 \text{ ton/hr} \\
 M_1 &= 2 \times 46 \text{ ton} = 92 \text{ ton/hr} \\
 P &= 2 \times 50 \text{ ton} = 100 \text{ ton/hr} \\
 CC206 &= 1 \times 52 \text{ ton} = 52 \text{ ton/hr} \\
 \hline
 \text{Total tonase / hari} &= 1.012 \text{ ton/hr}
 \end{aligned}$$

Untuk contoh perhitungan beban lintas kereta api barang dengan nomer KA.2539 F KA.Barang.F dengan stamformasi seperti Tabel 4.14

$$\begin{aligned}
 GD 42 T &= 60 \times 42 \text{ ton} = 2520 \text{ ton/hr} \\
 CC206 &= 2 \times 52 \text{ ton} = 104 \text{ ton/hr} \\
 \hline
 \text{Total tonase / hari} &= 2624 \text{ ton/hr}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi total tonase/hari pada keseluruhan kereta penumpang dan barang disajikan pada Tabel 4.15 dan 4.16 berikut

Tabel 4.15 Beban Lintas Harian Kereta Api Penumpang Lintas Surabaya - Mojokerto (Gapeka, 2018)

No.KA	Nama KA	Lokomotif	Stamformasi	Tonnage Gerbong (Ton)	Tonnage Lokomotif (Ton)	Tonnage Total (Ton)
5A	ARGO WILIS	CC 206	16 K1k + 2 M1 + 2 P	960	52	1012
6B	ARGO WILIS	CC 206	16 K1k + 2 M1 + 2 P	960	52	1012
56A	BANGUN KARTA	CC 206	16 K1k + 2 KM1 + 2B + 2 P	1056	52	1108
55A	BANGUN KARTA	CC 206	16 K1k + 2 KM1 + 2B + 2 P	1056	52	1108
44B	BIMA	CC 206	16 K1k + 2 M1 + 2 P	960	52	1012
43C	BIMA	CC 206	16 K1k + 2 M1 + 2 P	960	52	1012
174C	GAYA BARU MALAM	CC 203	16 K3split + 2 KMP3 + 2 B	852	50	902
173C	GAYA BARU MALAM	CC 203	16 K3split + 2 KMP3 + 2 B	852	50	902
7064C	JAYAKARTA P.	CC 204	8 K2 + 1 KMP2	382	52	434
7063C	JAYAKARTA P.	CC 204	8 K2 + 1 KMP2	382	52	434
285	JENGGALA	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
292	JENGGALA	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
293	JENGGALA	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
298	JENGGALA	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
448	KRD	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
447	KRD	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
450	KRD	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
449	KRD	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
187C	LOGAWA	CC 201	7 K3split + 1 KMP3 + 1 B	384	48	432
188C	LOGAWA	CC 201	7 K3split + 1 KMP3 + 1 B	384	48	432
112A	MUTIARA SELATAN	CC 206	4 K1k + 2 K1 + 8 K2 + 2 MP2 + 4 B	908	52	960

111B	MUTIARA SELATAN	CC 206	4 K1k + 2 K1 + 8 K2 + 2 MP2 + 4 B	908	52	960
179B	PASUNDAN	CC 203	12 K3split + 2 KMP3 + 2 B	684	50	734
180B	PASUNDAN	CC 203	12 K3split + 2 KMP3 + 2 B	684	50	734
101C	RANGGA JATI	CC 206	8 K1 + 2 M1 + 8 K2 + 2 P	912	52	964
102C	RANGGA JATI	CC 206	8 K1 + 2 M1 + 8 K2 + 2 P	912	52	964
419	RAPI DHOHO	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
421	RAPI DHOHO	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
420	RAPI DHOHO	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
423	RAPI DHOHO	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
422	RAPI DHOHO	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
424	RAPI DHOHO	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
425	RAPI DHOHO	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
426	RAPI DHOHO	CC 201	5 K3split + 1 KMP3	252	48	300
83B	SANCAKA	CC 204	5 K1k + 1 KMP2 + 3 KN1 + 1 P	462	52	514
84B	SANCAKA	CC 204	5 K1k + 1 KMP2 + 3 KN1 + 1 P	462	52	514
85B	SANCAKA	CC 204	5 K1k + 1 KMP2 + 3 KN1 + 1 P	462	52	514
86B	SANCAKA	CC 204	5 K1k + 1 KMP2 + 3 KN1 + 1 P	462	52	514
194B	SRI TANJUNG	CC 201	6 K3split + 1 KMP3 + 1 B	342	48	390
193B	SRI TANJUNG	CC 201	6 K3split + 1 KMP3 + 1 B	342	48	390
50A	TURANGGA	CC 206	12 K1k + 2 K1 + 2 M1 + 2 B + 2 P	960	52	1012
49A	TURANGGA	CC 206	12 K1k + 2 K1 + 2 M1 + 2 B + 2 P	960	52	1012

Beban Lintas Harian Kereta Api Penumpang (Ton/Hari) = 24.776

Tabel 4.16 Beban Lintas Harian Kereta Api Barang Lintas Surabaya - Mojokerto (Gapeka 2018)

No.KA	Nama KA	Lokomotif	Stamformasi	Tonnage Gerbong (Ton)	Tonnage Lokomotif (Ton)	Tonnage Total (Ton)
2620A	BBM	CC 206	20 GK 30 T + 20 GK 40 T + 2 Lokomotif	600	104	704
2619A	BBM	CC 206	40 GK 40 T + 2 Lokomotif	600	104	704
2621F	BBM F.	CC 206	40 GK 40 T + 2 Lokomotif	600	104	704
2636F	BBM F.	CC 206	40 GD 54 T + 2 Lokomotif	2160	104	2264
2622F	BBM F.	CC 206	60 GD 42 T + 2 Lokomotif	2520	104	2624
2635F	BBM F.	CC 206	60 GD 42 T + 2 Lokomotif	2520	104	2624
2539F	KA.BARANG F.	CC 206	60 GD 42 T + 2 Lokomotif	2520	104	2624
2540F	KA.BARANG F.	CC 206	60 GD 42 T + 2 Lokomotif	2520	104	2624

Beban Lintas Harian Kereta Api Barang (Ton/Hari) = 14.168

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

Setelah daya angkut lintas dari masing-masing kereta api baik kereta api penumpang ataupun kereta api barang diperoleh, kemudian dihitung daya angkut lintas tahunan jalan rel kereta api. Daya angkut lintas menggambarkan jenis serta jumlah beban total dan kecepatan kereta api yang disarankan pada lintas jalan rel yang akan dilewati. Berdasarkan perhitungan, total beban lintas harian kereta api penumpang lintas Surabaya - Mojokerto sebesar 24.776 ton/hr dan untuk Kereta Api barang sebesar 14.168 ton/hr. Dengan demikian, maka daya angkut lintas jalan rel Surabaya - Mojokerto sebagai berikut :

$$T = 360 \times S \times TE \quad (\text{Persamaan 3.3})$$

Dimana ,

$$TE = T_p + (K_b \times T_b) + (K_1 \times T_1) \quad (\text{Persamaan 3.4})$$

$$TE = 24.776 + (1.5 \times 14.168) + (1.4 \times 49.9)$$

$$TE = 46.097,86 \text{ ton/hr}$$

Maka daya angkut lintas tahunan jalan rel Surabaya – Mojokerto adalah :

$$T = 360 \times 1.1 \times 46.097,86$$

$$T = 18.254.753 \text{ ton/tahun}$$

Jadi menurut PM.60 Tahun 2012 Kelas Jalan (Tabel 2.6) daya angkut lintas Surabaya - Mojokerto adalah 18.254.753 Ton/tahun masuk dalam **Kelas Jalan 2** (10 jt - 20 jt Ton/Tahun), maka kecepatan maksimum yang diijinkan adalah 110 km/jam.

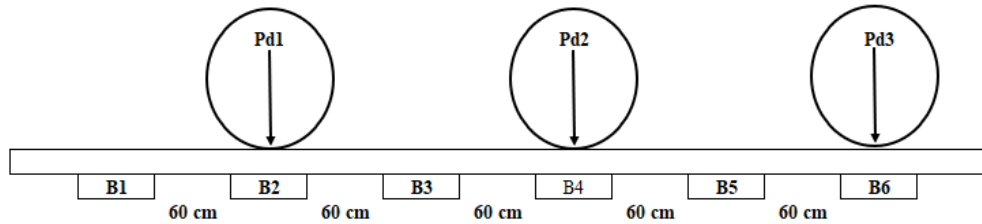
4.4.1. Perhitungan beban eksisting

Analisa Beban Dinamis Dengan Persamaan Talbot

(Formulasi Talbot)

$$\begin{aligned} Pd &= P_s \left[1 + 0.01 \left(\frac{V_{rencana}}{1.609} - 5 \right) \right] & V_{rencana} &= 1.25 \times V_{max} \\ &= 9000 \left[1 + 0.01 \left(\frac{137.5}{1.609} - 5 \right) \right] & &= 1.25 \times 110 \\ &= 9000 \left[1 + 0.01(88.225606) \right] & &= 137.5 \text{ km/jam} \\ &= 9000 \left[1 + 0.88225606 \right] \\ &= 9000 \left[1.88225606 \right] \\ &= 16.241 \text{ kg} / 16,241 \text{ ton} \end{aligned}$$

Maka distribusi beban ke bantalan seperti pada Gambar 4.12



Gambar 4.12 Ilustrasi beban pada segmen 3 meter (Profilidis, 2006)

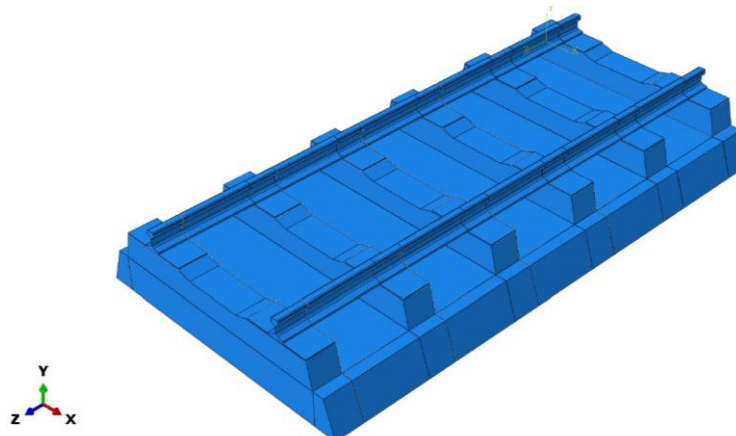
Dari hasil persamaan *Talbot* didapatkan beban dinamik yang bekerja pada lintas Surabaya - Mojokerto sebesar 16,241ton, maka dapat dihitung transfer beban seperti Tabel 4.17 berikut :

Tabel 4.17 Beban yang bekerja pada bantalan

Akibat	Distribusi Beban Aksial					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
P _{d1}	23%	40%	23%	7%	0%	0%
P _{d2}	0%	7%	23%	40%	23%	7%
P _{d3}	0%	0%	0%	7%	23%	40%
Total	23%	47%	46%	54%	46%	47%
Total beban (Kg)	3897	7962	7793	9148	7793	7962

4.5. Pemodelan Dengan Program Bantu

Dari hasil nilai geometri berdasarkan *Track Quality Indeks* (TQI), maka dapat di modelkan bentuk jalan kereta dengan program bantu *finite elemen analisis* (FEA), dalam satu segmen 3 m' sesuai dengan pengecekan dilapangan. Contoh permodelan pada KM 18+000 lintas Surabaya – Mojokerto bisa dilihat pada Gambar 4.13. Analisa difokuskan pada kekuatan beton pada bantalan N-67 saja.



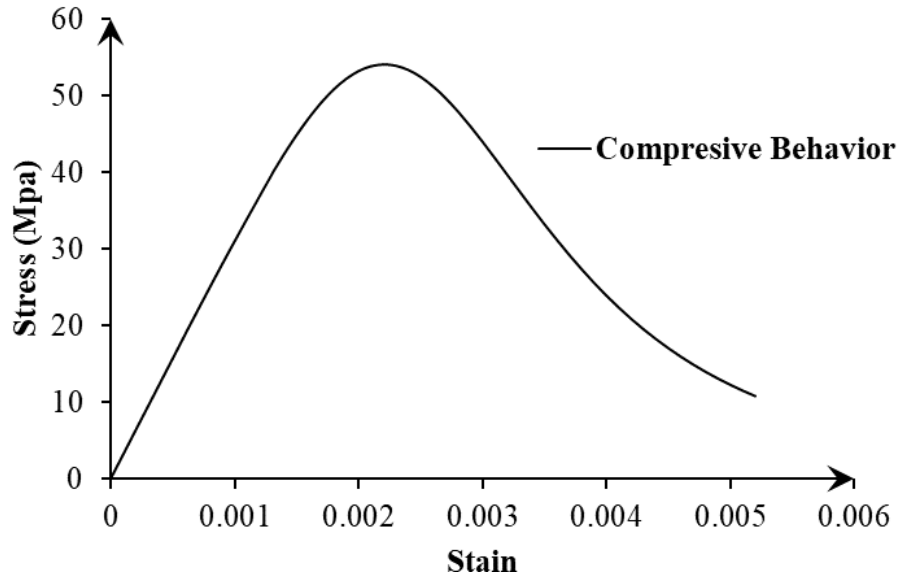
Gambar 4.13 Permodelan per 3m sesuai geometri

4.5.1. Material Propertis

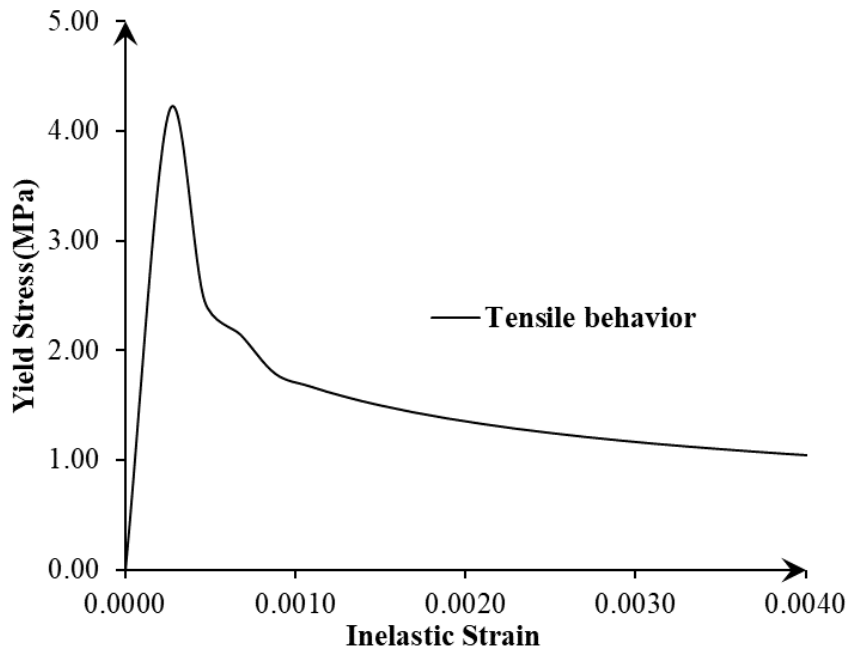
Hasil ahir dari penelitian ini adalah perilaku bantalan beton terhadap penyimpangan geometri arah vertikal serta horizontal. Untuk mengetahui perilaku struktural mencakup semua aspek yang ada dalam jalur kereta api (struktur atas). Karena keterbatasan data penelitian sebelumnya tentang bantalan type N-67 maka material dicari dengan persamaan empiris. Input properti material pada program bantu, didekati dengan persamaan empiris. Persamaan empiris digunakan untuk menentukan hubungan tegangan leleh terhadap regangan plastis pada tekan beton, tarik beton, dan tarik baja tulangan.

Perilaku plastis beton ditentukan dengan *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) pada program bantu. Input material beton pada program bantu terdiri dari *elastic behavior* dan *Concrete Damage Plasticity*. *Elastic behavior* berisi input modulus elastisitas dan poisson ratio. Hasil model konstitutif tekan beton menggunakan kuat tekan beton 54 MPa (PT.Wijaya Karya) ditunjukkan pada Gambar 4.14, didekati dengan persamaan Saatcioglu & Razvi (1999). Sedangkan hasil model konstitutif tarik beton 4,633 Mpa, di dekati dengan rumus split hasil silinder beton mutu biasa (*no silica foam*) Attard & Setunge (1996)/ $F_{sp} = 0.32(F_c)^{0.67}$ untuk beton *no silica fume* ditunjukkan pada Gambar 4.15. Hasil model konstitutif tarik tulangan menggunakan kuat leleh tarik 1400 MPa didekati dengan persamaan Mander, (1988) dapat dilihat pada Gambar 4.16. Parameter-parameter yang diinput ke definisi perilaku material, khususnya material beton pada program bantu dapat disajikan pada Tabel 4.18. Parameter - parameter tersebut diinputkan ke dalam perilaku *Concrete Damage Plasticity* pada beton. Parameter eksetrisitas, FB_0/FC_0 , dan K sesuai yang direkomendasikan oleh program bantu dan mengacu pada beberapa penelitian sebelumnya seperti yang mensyarkan dilation angel adalah $15^\circ - 50^\circ$ (Michał and Andrzej n.d.) dan penelitian (Ren et al. 2015). Parameter sudut dilatasi dan viskositas diasumsikan agar prediksi sesuai dengan hasil perhitungan manual. Parameter viskositas 0,001 diasumsikan tidak berbeda jauh terhadap hasil jika viskositas nol (Samani and Attard, 2012). Parameter yang mendefinisikan perilaku tarik tulangan disajikan pada Gambar 4.16. Perilaku tarik tulangan antara lain *density*, *elastic*, dan *plastic* yang diinputkan pada program

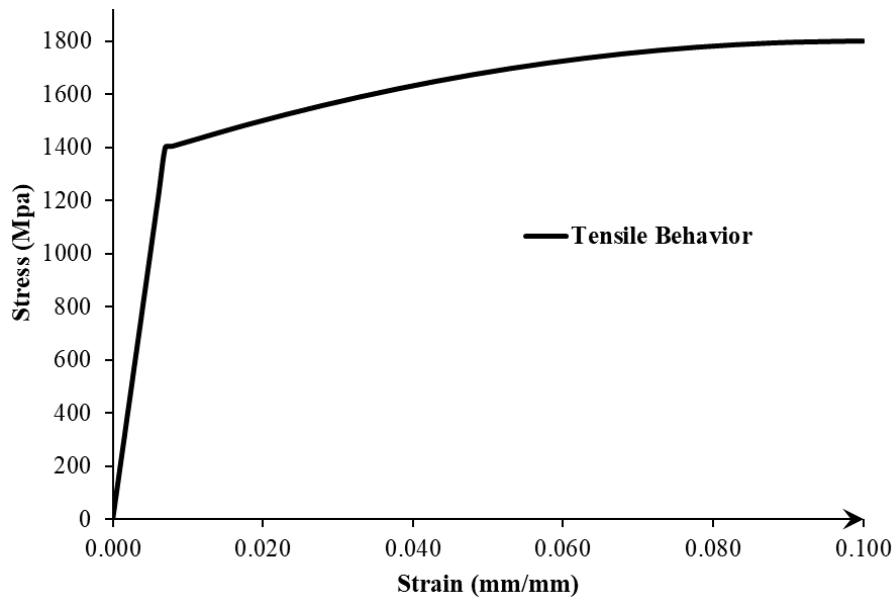
bantu. Perilaku elastis pada tulangan didefinisikan oleh nilai Modulus Young dan poisson ratio. Untuk data properti bantalan dapat dilihat pada Tabel 4.18 untuk perilaku beton $F_c' = 54 \text{ Mpa}$, untuk perilaku tulangan 1400 Mpa.



Gambar 4.14 Kurva tegangan – regangan model konstutif tekan beton $F_c' = 54 \text{ Mpa}$.



Gambar 4.15 Kurva tegangan – regangan model konstutif tarik beton



Gambar 4.16 Kurva tegangan – regangan model konstutif tarik tulangan $F_y = 1400$ MPa.

Tabel 4.18 Properti Bantalan Beton

Properti	Nilai
Material Beton $F_c' 54$ MPa	
Density (ton/mm ³)	0.0000000024
Modulus Elastisitas, E_c (MPa)	35459.71989
Poison Rasio, ν	0.2
Dilation Angle, ψ	40
Eccentricity, ϵ	0.1
F_{Bo} / F_{Co}	1.16
Yield surface parameter, K	0.667
Viscosity Parameter, μ	0.001
Yeild Strength (Tekan)	54
Yeild Strength (Tarik)	4.19
Properti	Nilai
Material Baja Tulangan $F_y 1400$ MPa	
Density (ton/mm ³)	0.0000000078
Modulus Elastisitas, E_c (MPa)	200000
Poison Rasio, ν	0.3
Yeild Strength (Leleh)	1400
Yeild Strength (Ultimate)	1800

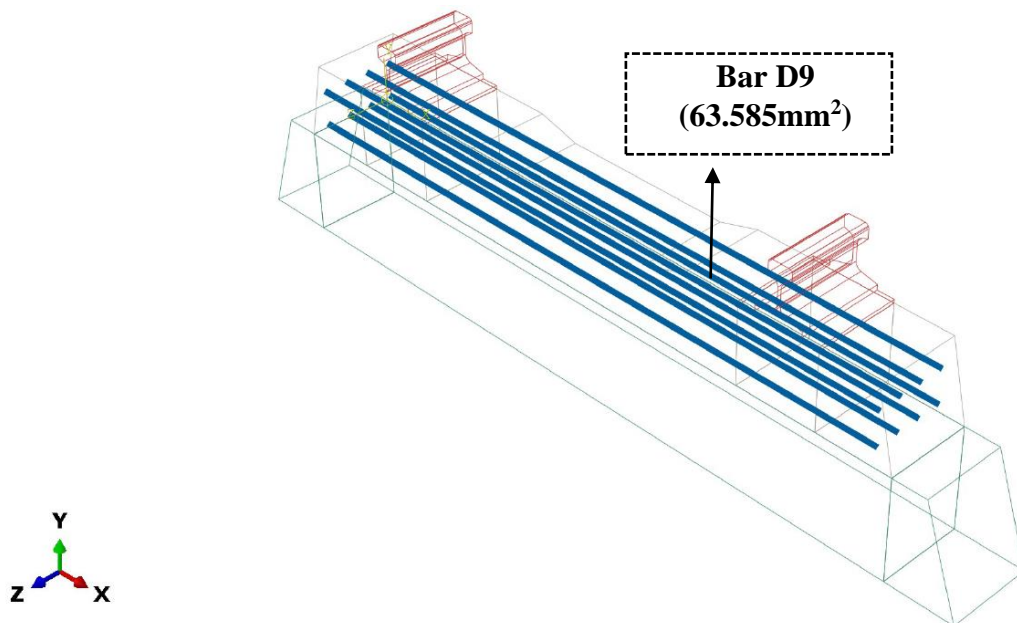
4.5.2. Permodelan Bantalan N-67

Permodelan pada bantalan beton tipe N-67 terdiri dari 3 part yaitu beton menggunakan elemen solid CD38R, bar atas dan bawah menggunakan elemen truss T3D2 diberikan gaya tekan. Pada elemen T3D2 input yang diberikan pada program bantu adalah luas penampang $A = \text{mm}^2$ seperti pada Tabel 4.19

Tabel 4.19 Luas elemen tulangan

Elemen	Luas (mm^2)
Bar Atas 2-2 (D9)	63.585
Bar Bawah 4 (D9)	63.585

Permodelan pada bantalan beton tipe N-67 dapat dilihat pada Gambar 4.17 yang menunjukkan setiap material



Gambar 4.17 Permodelan bantalan beton tipe N-67

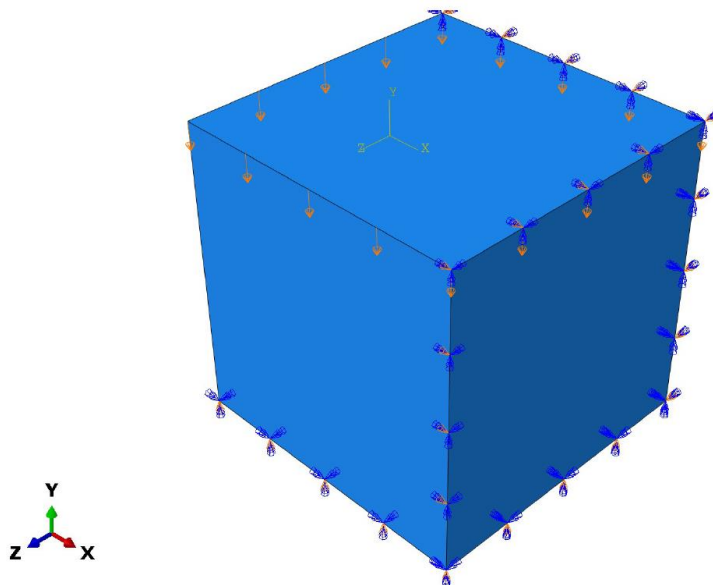
4.5.3. Pembebanan dan Perletakan

Step pada pembebanan dan perletakan ada 2 step yaitu initial untuk perletakan, dan axial load untuk beban axial konstan, Pembebanan pada semua spesimen bantalan adalah axial load dari beban yang bekerja pada Tabel 4.17. Beban axial didefinisikan pada program bantu sebagai beban *pressure* sebagai

uniform load, sesuai dengan letak pada parameter track quality indeks (TQI). Beban axial ditetapkan secara konstan. Untuk beban lateral didefinisikan dengan momen yang bekerja pada setiap parameter penyimpangan. Untuk memastikan kevalidan data input, pada program bantu dilakukan studi parameter pada setiap material bantalan beton tipe N-67.

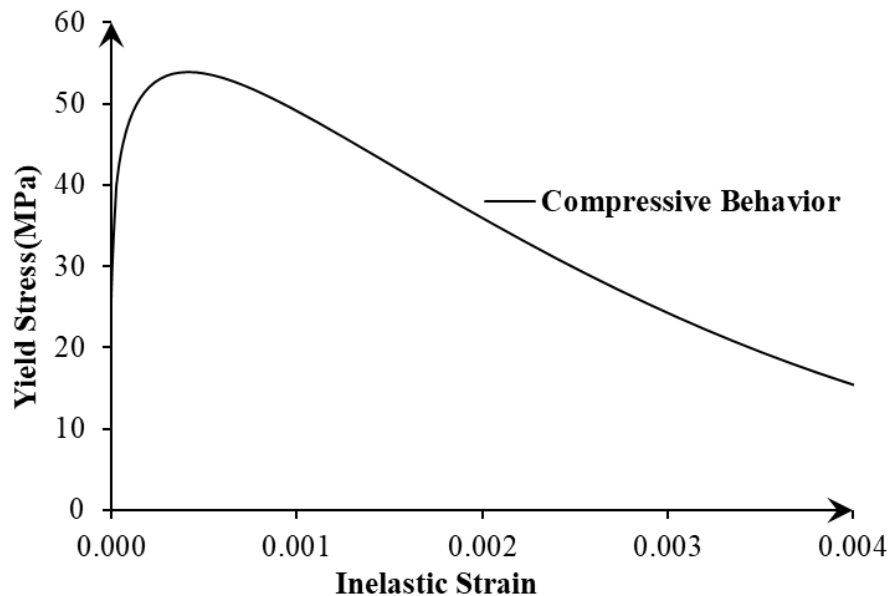
4.5.4. Study parameter beton akibat beban tekan

Studi input parameter tekan beton dilakukan sebagai verifikasi hasil hubungan tegangan dan regangan beton akibat tekan. Hubungan tegangan dan regangan beton hasil metode elemen hingga (program bantu), akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan Saatcioglu & Razvi (1999). Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter beton pada program bantu, sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan beton yang diharapkan. Beton dimodelkan sebagai kubus dengan ukuran $100 \times 100 \text{ mm}^2$ kemudian dibebani titik pada sudut elemen kubus dengan displacement sesuai dengan rumus split hasil silinder beton mutu biasa Attard & Setunge (1996) $F_{sp} = 0.32(F_c)^{0.67}$, yaitu 4.16 MPa untuk beton *no silica fume* pada *boundary condition* berdasarkan tegangan maksimal (F_t) dan regangan pada kurva hubungan tegangan-regangan beton. Pemodelan elemen kubus beton ditunjukkan Gambar 4.18.

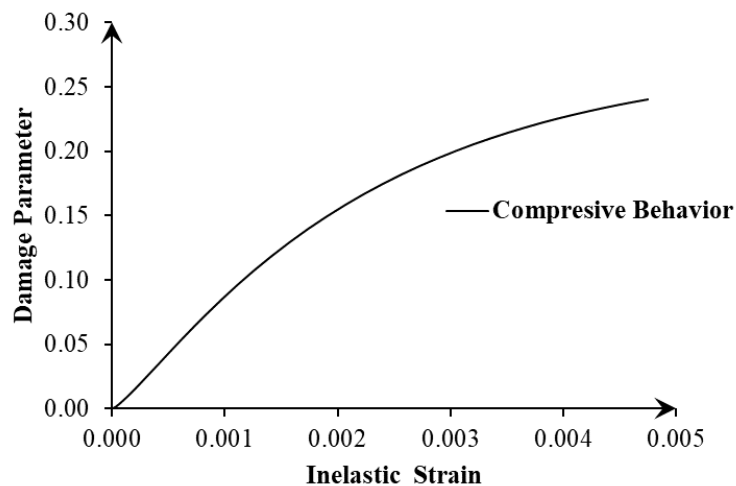


Gambar 4.18 Model beton akibat beban tekan (*Boundary condition* tekan)

Data input untuk material tekan (*Compressive behaviour*) adalah *inelastic strain*. *Yeild stress* dan *damage parameter* di tunjukan pada Gambar 4.19, Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 data – data tersebut didapatkan dari analisis kurva tegangan regangan akibat beban tekan. *Yeild stress* tegangan plastis beton dimulai dari persamaan $F_{pl} = \frac{F_{cc} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_1}\right)^r}{r-1+\left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_1}\right)^r}$ dengan hasil = 24.971 MPa, atau biasanya = $0.45 F_c$. *Inelastic strain* merupakan selisih regangan saat kondisi plastis 24,971 MPa, dengan regangan *elastic damage*. *Damage parameter* menunjukkan tingkat penurunan modulus elastisitas beton akibat beban tekan. Parameter ini bernilai nol hingga satu. Pada beton terkekang adanya residual yang menyebabkan *damage parameter* tekan saat kondisi ultimit beton terkekang tidak bernilai satu yang berarti beton masih mampu memikul beban tekan. Sedangkan dalam penelitian ini bantalan type N-67 adalah beton tidak terkekang (*Unconfined*) maka $F_r = 0$ MPa saat kondisi ultimit *damage parameter* tekan bernilai satu yang berarti beton telah hancur dan tidak memiliki kekuatan lagi.

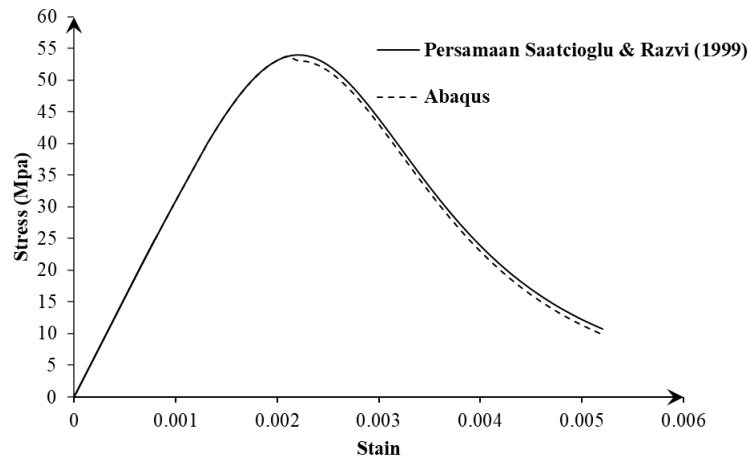


Gambar 4.19 Kurva *inelastic strain-yield compressive stress* F_c 54 MPa.



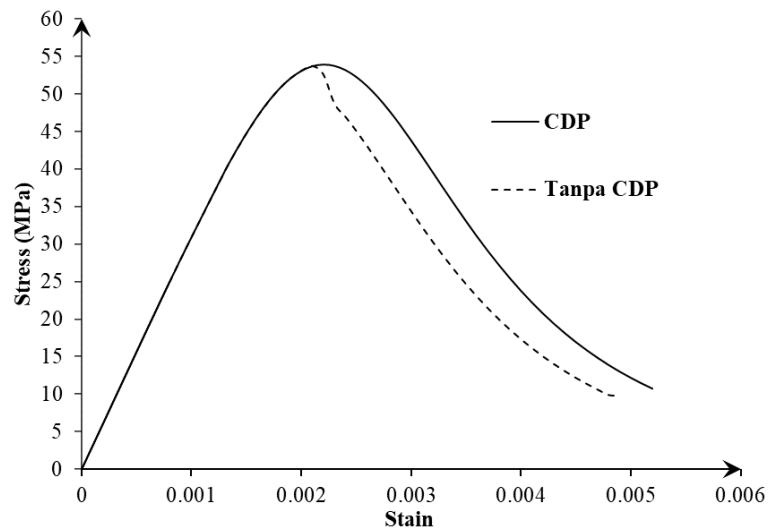
Gambar 4.20 Kurva *inelastic strain* - damage parameter *compressive stress* F_c 54 MPa.

Data yang diinput pada *compressive behavior* program bantu didapatkan dari persamaan *fracture energy*. Data yang diinput tersebut ditunjukkan dalam bentuk kurva pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22. Hasil *damage parameter* untuk beton mutu biasa (*no silica foam*) pada saat puncak bernilai kecil, supaya regangan plastis pada kurva tegangan regangan beton tidak bernilai negatif. Hasil output stress ultimit pada uji axial kubus tekan untuk spesimen bantalan beton tipe N-67 pada pemodelan *finite element* (program bantu), didapatkan sebesar 53,118 MPa yang mempunyai silisih 0,881% dari *stress ultimit* manual yang ditunjukkan pada Gambar 4.21. Memperlihatkan hasil permodelan program bantu, dan hasil manual pendekatan Razvi dan Saatcioglu (1999), sudah menunjukkan kemiripan. Dengan input coba – coba sesuai dengan parameter yang disyaratkan oleh program bantu yaitu: dilation angle = 40, eccentricitas = 0,1, $F_b/f_c = 1.16$, $K = 0.667$, Viskositas = 0.001. Pada parameter viskositas semakin mendekati 0 maka grafik tegangan regangan mendekati dengan perhitungan manual 0.001 adalah angka terkecil pada cara coba – coba (Ren et al., 2015).



Gambar 4.21 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan menggunakan nilai viskositas 0.001

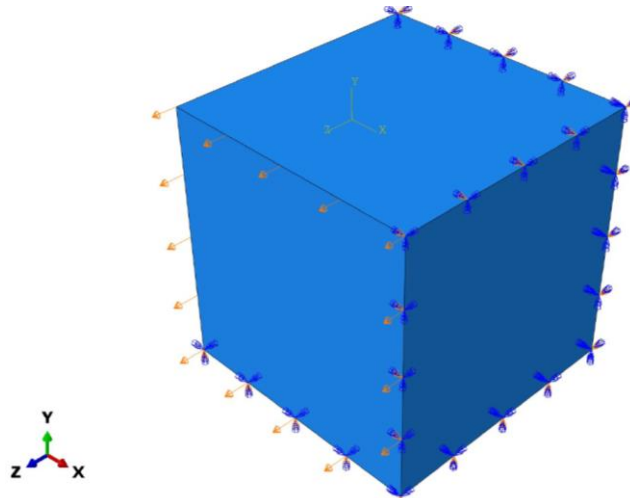
Damage parameter pada input material beton tekan pada program bantu, menentukan hasil output kurva tegangan regangan yang didapatkan. Hal ini terlihat dari perilaku softening yang lebih baik ditunjukkan dengan adanya input *damage parameter*. Hasil output kurva tegangan regangan tanpa menggunakan damage parameter menghasilkan kurva yang lebih tajam pada bagian softening. Perbedaan dengan input parameter CDP (*Concrete damage plasticity*) ditunjukkan pada Gambar 4.22.



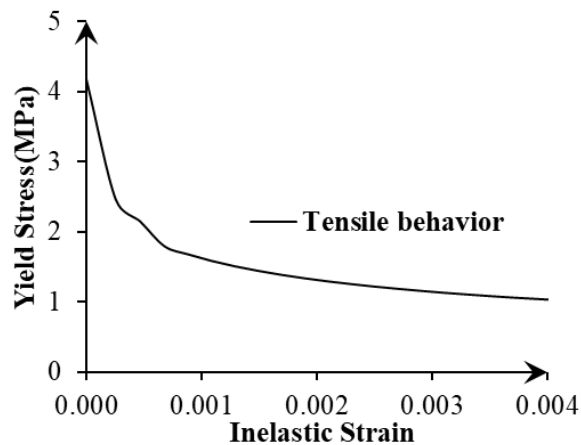
Gambar 4.22 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan input CDP dan tidak dengan CDP

4.5.5. Study parameter beton akibat beban tarik

Studi input parameter tarik beton dilakukan sebagai verifikasi hasil hubungan tegangan dan regangan beton akibat tarik. Hubungan tegangan dan regangan beton hasil metode elemen hingga (program bantu) akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan empiris. Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter beton pada program bantu, sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan tarik beton yang diharapkan. Beton dimodelkan sebagai kubus dengan ukuran $100 \times 100 \text{ mm}^2$ kemudian dibebani tarik titik pada sudut elemen kubus dengan displacement sebesar 1 mm pada *boundary condition*. Properti plastiS yang tepat didefinisikan dan dianalisis untuk mendapatkan respons nonlinier pada sistem struktural (Iranata, Wahyuni, and Soegihardjo, 2010). Pengujian di tunjukan pada Gambar 4.23.

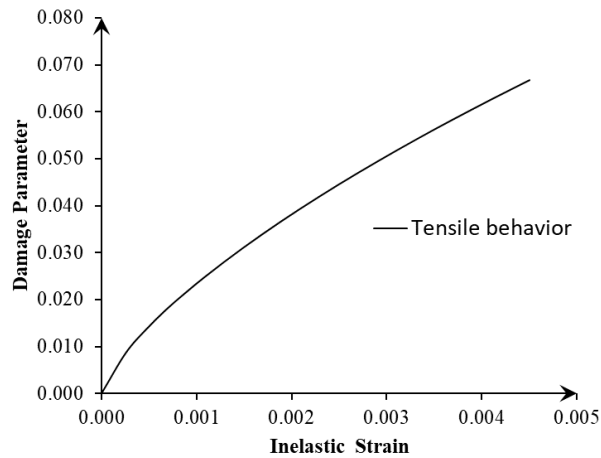


Gambar 4.23 Model beton akibat beban Tarik (*Boundary condition*)



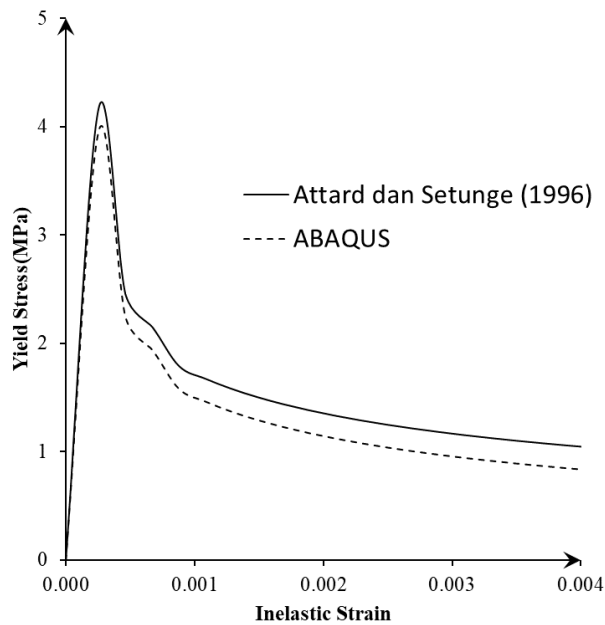
Gambar 4.24 Kurva inelastic strain-yield tensile stress F_c 54 MPa.

Berdasarkan regangan maksimal pada kurva hubungan tegangan-regangan beton yang ditunjukkan pada Gambar 4.24 dan Gambar 4.25, dengan pendekatan persamaan dengan rumus split hasil silinder beton mutu biasa Attard & Setunge (1996) $F_{sp} = 0.32(F_c)^{0.67}$ untuk beton *no silica fume* = 4.162 Mpa



Gambar 4.25 Kurva inelastic strain-damage parameter beton tarik F_c 54 Mpa

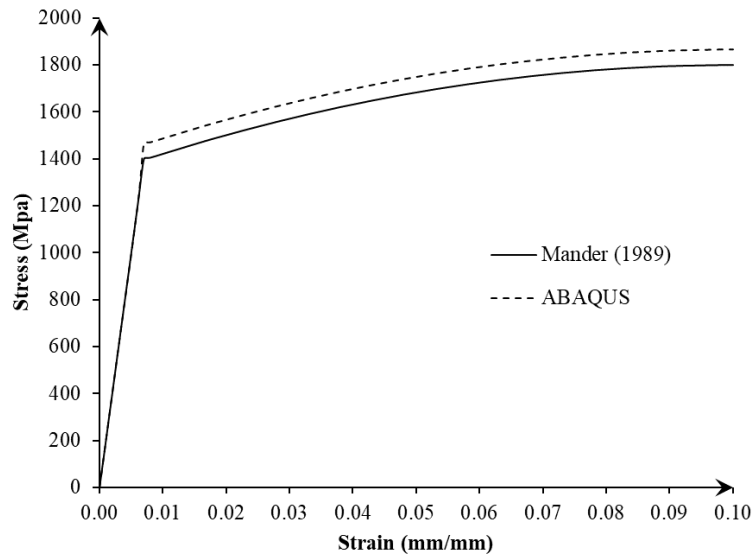
Hasil damage parameter untuk beton mutu tinggi pada saat puncak bernilai kecil supaya regangan plastis pada kurva tegangan regangan beton tidak bernilai negatif. Pada pemodelan spesimen bantalan pada program bantu, dikarenakan model yang lebih kompleks viskositas tidak dapat diinput sebesar 0 namun harus mendekati 0. Oleh karena itu dalam pemodelan bantalan beton menggunakan viskositas 0,001 pada CDP beton program bantu. Hasil output *stress ultimit* pada uji axial tarik kubus untuk spesimen bantalan type N-67 pada pemodelan *finite element* (program bantu) didapatkan sebesar 3,9596 MPa yang mempunyai silisih 2,1 % dari stress ultimit pendekatan attard dan setunge yang ditunjukkan pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26 Kurva tegangan-regangan beton akibat tarik menggunakan persamaan Attard dan Setunge (1996).

4.5.6. Study parameter tarik tulangan

Studi input tarik tulangan dilakukan sebagai verifikasi hasil hubungan tegangan dan regangan tulangan akibat tarik. Hubungan tegangan dan regangan tulangan hasil metode elemen hingga dengan program bantu, akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan empiris. Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter tulangan pada program bantu sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan tulangan yang diharapkan. Tulangan D9 dimodelkan wire tipe truss (TD32) dengan ukuran 100 mm, kemudian dibebani tarik titik pada ujung dengan displacement sebesar 1 mm pada *boundary condition*, berdasarkan regangan maksimal pada kurva hubungan tegangan-regangan tulangan yang ditunjukkan pada Gambar 4.20. Hasil *output stress* ultimit pada uji axial tarik tulangan untuk spesimen bantalan type N-67 pada pemodelan *finite element* (program bantu), didapatkan sebesar 1465 MPa pada strain 0,02 yang mempunyai silisih 0,065% dari *stress* ultimit manual dari pendekatan Mander (1989), yang ditunjukkan pada Gambar 4.27.

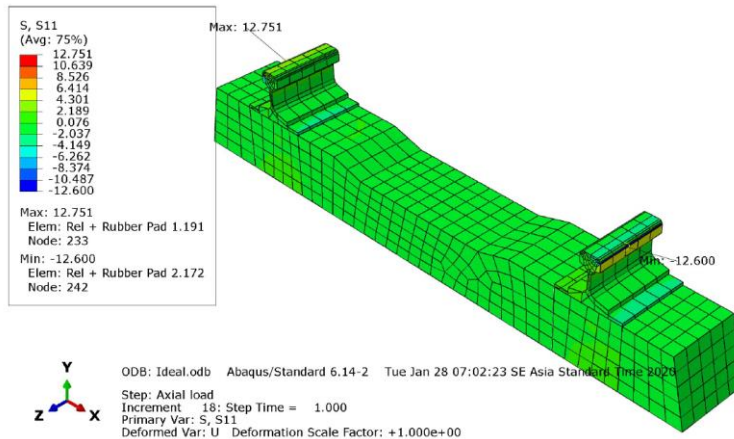


Gambar 4.27 Kurva tegangan-regangan tulangan kuat leleh 1400 MPa akibat tarik menggunakan persamaan Mander (1989)

Dari hasil pemodelan tulangan menggunakan elemen Truss kode T3D2 pada ABAQUS, memperlihatkan kemiripan dengan hasil perhitungan manual dengan menggunakan persamaan (Mander 1989). Hal ini menunjukkan bahwa *Finite Element Analysis* (FEA), dengan program bantu (ABAQUS), mempunyai prediksi yang baik pada studi input parameter beton mutu 54 MPa (*no silica foam*) dan baja mutu tinggi (*wire prestressed*).

4.5.7. Validasi permodelan dengan penelitian sebelumnya

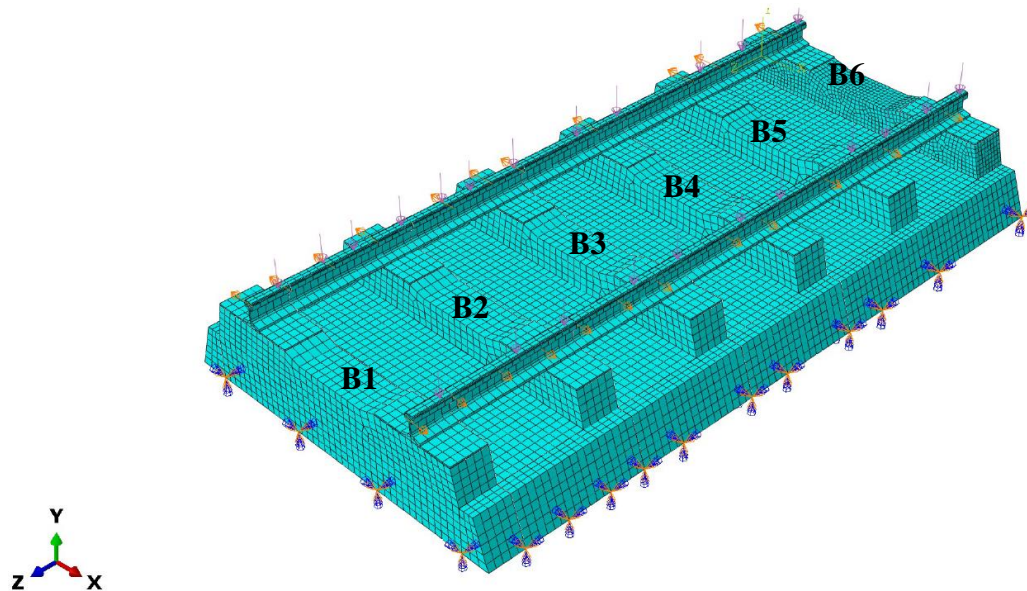
Permodelan di bebani dengan beban seperti pada Sub - bab 3.3.5.5, pada kondisi beban ideal, tegangan pada rel R.54 adalah sebesar 12.711 MPa, sedangkan pada FEA adalah 12.751 MPa selisih 0.04%, maka hasil korelasi antara persamaan empiris setiap material, serta penelitian sebelumnya adalah valid. Hasil output program bantu hasil tegangan pada rel type R.54 dapat dilihat pada Gambar 4.28



Gambar 4.28 Tegangan pada rel type R.54

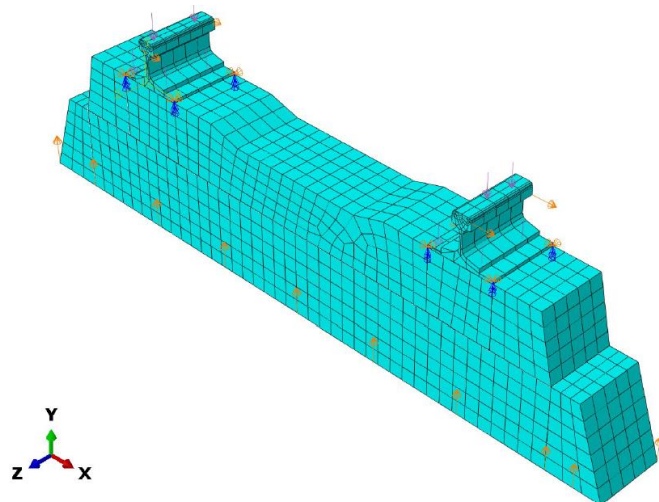
4.5.8. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi 1 ($TQI < 15$)

Untuk mengetahui perilaku struktur atas yaitu pada bantalan beton, tulangan dan rel, analisa struktur harus dilakukan pada setiap modul pengukuran geometri yaitu 3 m' (6 Bantalan) dengan beban yang sudah di jelaskan pada Tabel 4.21. yang dapat dilihat pada Gambar 4.29 dibawah ini.



Gambar 4.29 Pembebanan dan tumpuan pada segmen 3 meter

Tetapi karena keterbatasan program bantu untuk *student version* (ABAQUS) maksimum peningkatan (Increment Step adalah 100.000) maka permodelan harus di pecah pada setiap bantalan yang di dapat dilihat pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30 Pembebanan dan tumpuan pada 1 Bantalan

Akibat ada perbedaan letak geometri secara horizontal dan vertikal, serta kondisi *spring stiffness* suatu tanah, maka momen yang bekerja pada struktur atas jalan rel berbeda. Besar *spring stiffness* megacu pada penelitian (Bowles, 1997) yang disajikan pada Tabel 4.20. Karena dalam penelitian ini kondisi tanah aktual tidak dibahas maka menggunakan data sekunder.

Tabel 4.20 Nilai *Spring Stiffness* Tanah

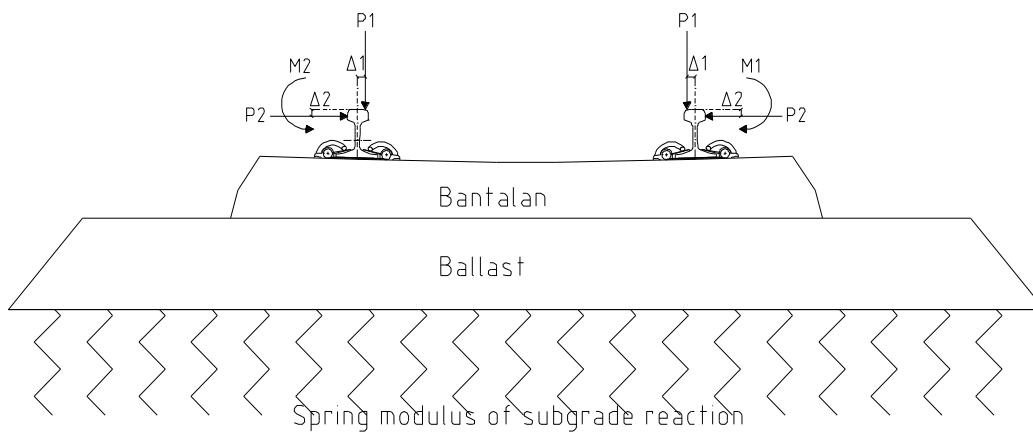
Sand	Ksv (Kn/m ³)		
Loose	4800	-	16000
Medium	9600	-	80000
Dense	64000	-	128000
Clayey Sand	32000	-	80000
Silty Sand	24000	-	48000
Clay			
qa<200kpa	12000	-	24000
200kpa<qa<800kpa	24000	-	48000
qa>800	48000	>	

Sumber : Bowles, 1997

Pada penelitian ini tidak semua jenis tanah di pakai dalam simulasi perhitungan *Finite Elemen Method* (FEM). Karena pada PM. 60 Tahun 2012 persyaratan tanah dasar harus mempunyai nilai CBR > 6%, serta mempunyai kepadatan 95 % maka di pilih 3 jenis tanah yang di jadikan sampel yaitu sebagai berikut :

1. Tanah bagus (*Sand dense*) = 128.000 Kn/m³
2. Tanah sedang (*silty sand*) = 48.000 Kn/m³
3. Tanah jelek (*Clay*) = 24.000 Kn/m³

Untuk besar momen yang bekerja di ilustrasikan pada Gambar 4.31 besarnya $P = 16.241$ Kg (Hasil persamaan Talbot pada halaman 125), beban di dapatkan dari *passing tonnage* pada lintas Surabaya – Mojokerto. Dari hasil distribusi beban aksial pada setiap bantalan yang di sajikan pada Tabel 4.17 halaman 125 di dapatkan beban maksimum adalah pada bantalan kode B4 yaitu $54\% P_{\text{dinamis}} = 0.54 \times 16.241 = 9.148$ Kg, sedangkan besarnya P_{lateral} dihitung menurut momen maksimum yang bekerja.



Gambar 4.31 Momen akibat penyimpangan parameter TQI

Besarnya momen yang bekerja pada pada TQI kategori 1 ($TQI < 15$ mm) adalah :

$$\sum M = 0$$

$$M_1 = P_1 \cdot \Delta_1 + P_2 \cdot \Delta_2$$

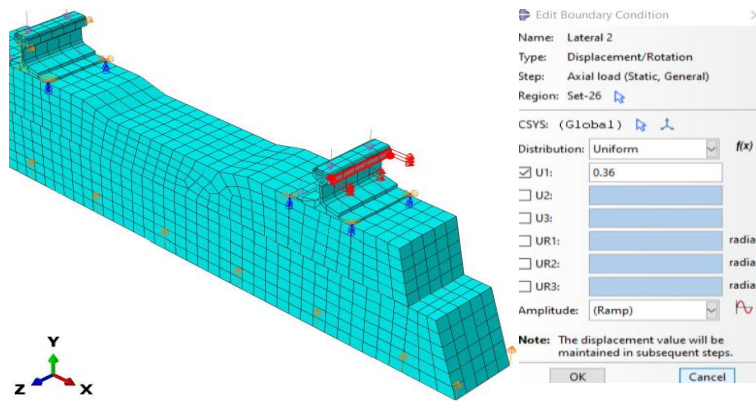
$$M_1 = (9.148 \times TQI \text{ 1 arah vertikal}) + (9.148 \times \text{arah horizontal}).$$

Ket = Penyimpangan arah vertikal adalah angkatan dan pertinggian

= Penyimpangan arah horizontal adalah listringan dan lebar spoor.

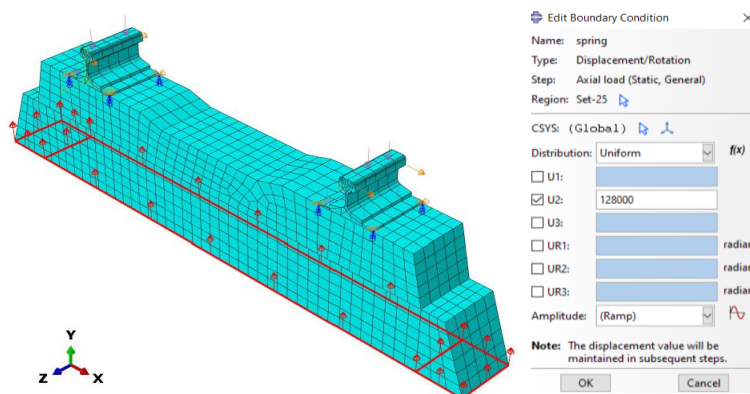
$$\begin{aligned} M_{1 \text{ TQI 1}} &= 9.148 \times 2 + 9.148 \times 2 \\ &= 36.592 \text{ Kg.mm} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan momen pada penyimpangan TQI diinputkan pada ABAQUS menu *load boundary condition* dengan tipe beban *displacement/rotation* kearah kepala rel yang di dapat dilihat pada Gambar 4.32.



Gambar 4.32 Lateral pada ujung kepala rel

Untuk input kondisi tanah juga sesuai dengan *spring stiffness* dari bowles 1997 yang di inputkan pada permukaan bawah ballas. Dengan arah berlawanan dengan arah beban yang bekerja yang dapat dilihat pada Gambar 4.33.



Gambar 4.33 Input Spring Stiffness pada ABAQUS.

Dari simulasi *Finite Elemen Method (FEM)* didapatkan perilaku bantalan beton tipe N-67 dengan batas kekuatan sesuai ketetapan Attard and Setunge (1996) dalam ACI material journal.

- a. Kekuatan tekan beton (*Compressive strength*) adalah $0.85F_c' = 0.85 \times 54 = 45.9 \text{ MPa}$.

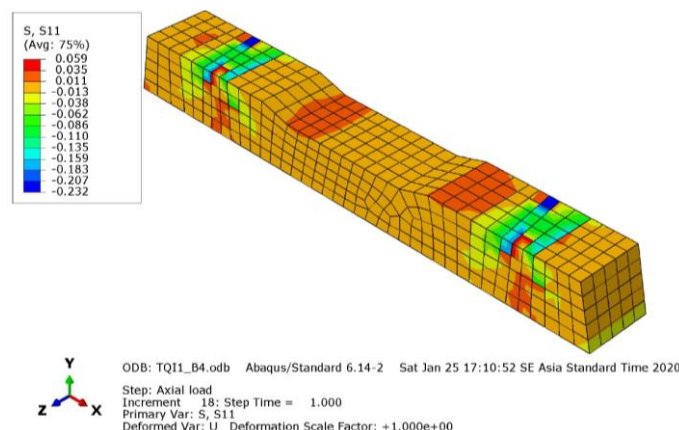
- b. Kekuatan tarik beton (*Tensile strength*) adalah $0.32 F_c^{0.67}$ (beton *no silica foam*). $0.32 \times 54^{0.67} = 4.6329$ MPa.

Hasil analisa akibat penyimpangan pada kategori 1 (satu), yaitu dengan penyimpangan vertikal adalah 2 (dua) mm dan penyimpangan horizontal 2 (dua) mm di dapatkan perilaku struktur sebagai berikut :

1. $B1 = (3897 \times 2) + (3897 \times 2) = 15588$ Kg.mm
2. $B2 = (7793 \times 2) + (7793 \times 2) = 31172$ Kg.mm
3. $B3 = (7962 \times 2) + (7962 \times 2) = 31848$ Kg.mm
4. $B4 = (9148 \times 2) + (9148 \times 2) = 36592$ Kg.mm
5. $B5 = (7962 \times 2) + (7962 \times 2) = 31848$ Kg.mm

Perhitungan momen setiap bantalan pada 1 (satu) segmen penelitian, dalam 3 (tiga) meter pengukuran momen yang terjadi akibat batas penyimpangan kategori satu, nilai maksimum adalah 36.592 Kg.mm. Hasil seluruh bantalan di tampilkan dalam bentuk grafik dibawah, contoh hasil kondisi bantalan dengan penyimpangan kategori 1 (satu) seperti dibawah :

1. Pada kondisi tanah bagus (*sand dense*) tegangan tekan (*compressive stress*) adalah 2.587 MPa dan tegangan tarik (*Tensile stress*) adalah 0.601 MPa yang dapat dilihat pada hasil program pada Gambar 4.34 pada gambar berwarna merah menunjukkan beton tertarik sedangkan yang berwarna biru adalah beton tertekan.



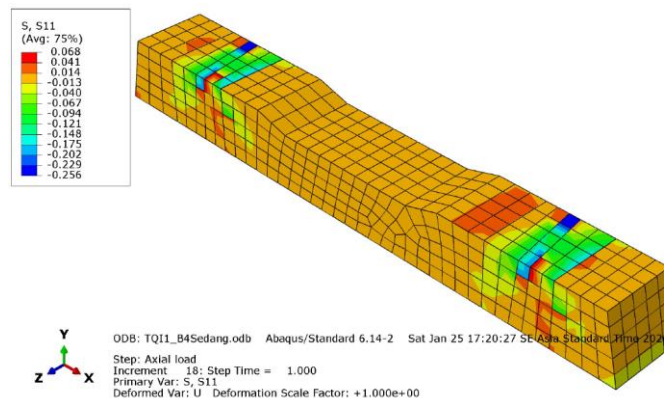
Gambar 4.34 Perilaku beton pada kondisi tanah bagus (*sand dense*) dengan penyimpangan TQI 1

Kelemahan program bantu (ABAQUS), adalah satuan harus menentukan sendiri, input beban adalah dalam satuan berat yaitu Kg dan input panjang dengan satuan panjang mm. Maka hasil analisa program adalah tegangan tarik (*tensile stress*), adalah 0.0538 Kg/cm^2 dan tegangan tekan (*compressive stress*), adalah 0.2536 Kg/cm^2 , agar satuan sama dengan batas maksimum maka hasil harus di konfersi dalam MPa (megapascal). $1 \text{ MPa} = (100/9.81) \text{ Kg/cm}^2$, gravitasi = 9.81 m/s^2 . Maka semua hasil analisa harus dikalikan 10.1937 agar antara hasil dan batas kekuatan mempunyai satuan yang sama.

$$\begin{aligned} \text{Tegangan tarik} &= 0.059 \times 10.1937 \\ &= 0.60143 \text{ MPa} \\ \text{Tegangan tekan} &= 0.232 \times 10.1937 \\ &= 2.587 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama untuk menganalisa pada masing – masing kategori penyimpangan (TQI), dengan variasi kondisi tanah.

2. Pada kondisi tanah sedang (*silty sand*) di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 0.693 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 2.609 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.35.

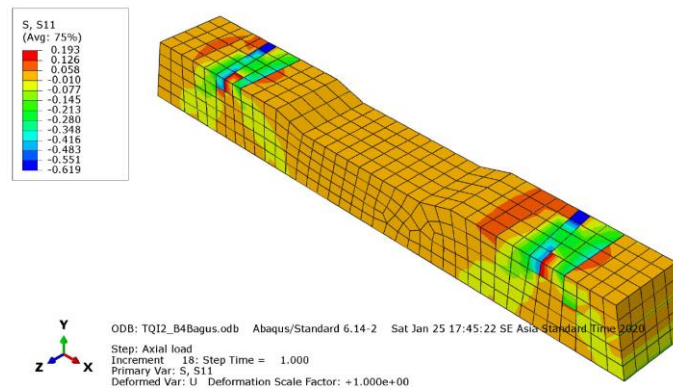


Gambar 4.35 Perilaku beton pada kondisi tanah sedang (*silty sand*) dengan penyimpangan TQI 1.

3. Pada kondisi tanah jelek (*clay*) di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 0.795 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 2.915 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.36.

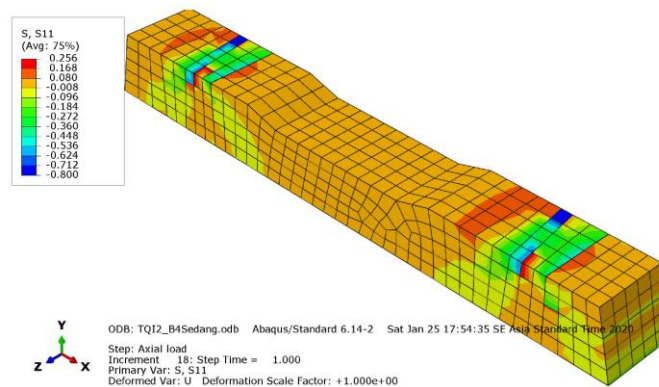
nilai maksimum adalah 100.628 Kg.mm. Hasil seluruh bantalan di tampilkan dalam bentuk grafik dibawah, contoh hasil kondisi bantalan dengan penyimpangan kategori 2 (dua) seperti dibawah :

1. Pada kondisi tanah bagus (*sand dense*) di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 1.967 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 6.309 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.37.



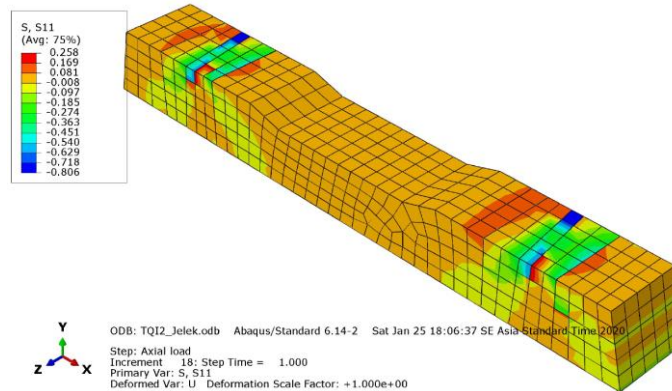
Gambar 4.37 Perilaku beton pada kondisi tanah bagus (*sand dense*) dengan penyimpangan TQI 2.

2. Pada kondisi tanah sedang (*silty sand*) di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 2.609 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 8.154 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.38.



Gambar 4.38 Perilaku beton pada kondisi tanah sedang (*silty sand*) dengan penyimpangan TQI 2.

3. Pada kondisi tanah jelek (*clay*) di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 2.692 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 8.216 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.39.



Gambar 4.39 Perilaku beton pada kondisi tanah jelek (*clay*) dengan penyimpangan TQI 2.

Dari hasil analisa pada penyimpangan TQI kategori 2 pada ketiga kondisi tanah hasil maksimum tegangan tekan adalah = 9.747 MPa < 45.9 MPa dan tegangan tarik = 1.424 MPa < 4.632 MPa, maka pada kondisi TQI 2 bantalan beton masih mampu bekerja dengan optimal di buktikan dengan hasil diatas.

4.5.10. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi 3 (25 < TQI < 40)

Besarnya momen yang bekerja pada pada TQI kategori 3 (25 < TQI < 40 mm) adalah :

$$\begin{aligned} \sum M &= 0 \\ M_1 &= P_1 \cdot \Delta_1 + P_2 \cdot \Delta_2 \\ M_{1 \text{ TQI } 3} &= 9.148 \times 9 + 9.148 \times 10 \\ &= 173.812 \text{ Kg.mm} \end{aligned}$$

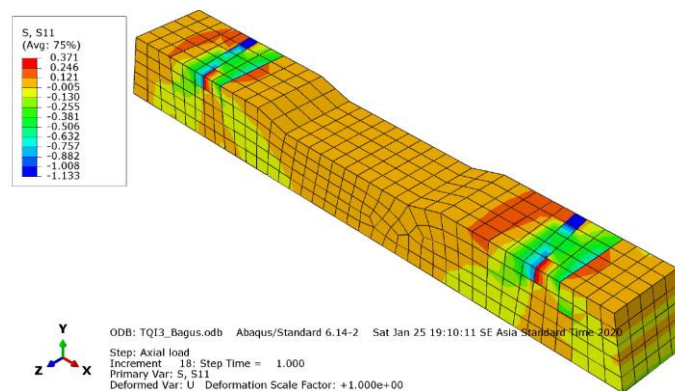
Momen yang terjadi pada setiap bantalan pada segmen pengukuran (5 bantalan), sebagai berikut :

1. B1 = (3897 x 9) + (3897 x 10) = 74043 Kg.mm
2. B2 = (7793 x 9) + (7793 x 10) = 148067 Kg.mm
3. B3 = (7962 x 9) + (7962 x 10) = 151278 Kg.mm

4. $B4 = (9148 \times 9) + (9148 \times 10) = 173812 \text{ Kg.mm}$
5. $B5 = (7962 \times 9) + (7962 \times 10) = 151278 \text{ Kg.mm}$

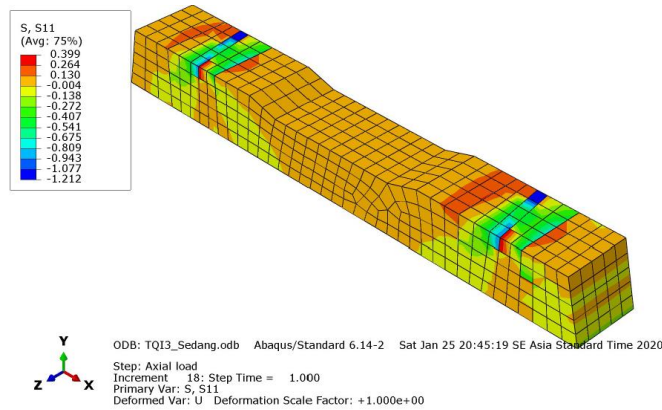
Perhitungan momen setiap bantalan pada 1 (satu) segmen penelitian, dalam 3 (tiga) meter pengukuran momen yang terjadi akibat batas penyimpangan kategori tiga, nilai maksimum adalah 173.812 Kg.mm. Hasil seluruh bantalan di tampilkan dalam bentuk grafik dibawah, contoh hasil kondisi bantalan dengan penyimpangan kategori 3 (tiga) seperti dibawah :

1. Pada kondisi tanah bagus (*sand dense*) di dapatkan tegangan tarik (tensile stress) = 3.781 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 11.518 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.40.



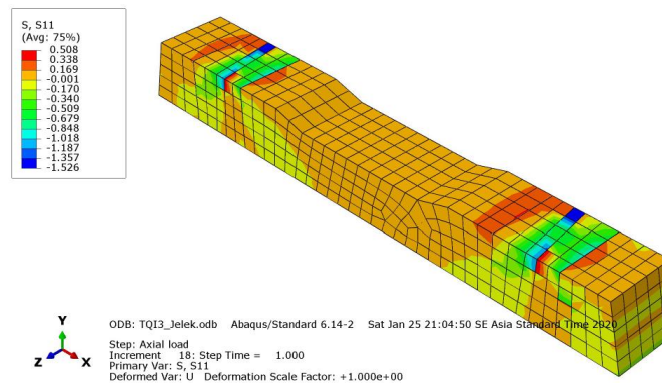
Gambar 4.40 Perilaku beton pada kondisi tanah bagus (*sand dense*) dengan penyimpangan TQI 3.

2. Pada kondisi tanah sedang (*silty sand*) di dapatkan tegangan tarik (tensile stress) = 4.067 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 12.355 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.41.



Gambar 4.41 Perilaku beton pada kondisi tanah sedang (*silty sand*) dengan penyimpangan TQI 3.

3. Pada kondisi tanah jelek (*clay*) di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 5.178 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 15.556 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.42



Gambar 4.42 Perilaku beton pada kondisi tanah jelek (*clay*) dengan penyimpangan TQI 3.

Dari hasil analisa pada penyimpangan TQI kategori 3 (tiga) pada ketiga kondisi tanah hasil maksimum tegangan tekan adalah = 15.556 MPa < 45.9 MPa dan tegangan tarik = 5.178 MPa > 4.632 MPa, maka pada kondisi TQI 3 bantalan beton **tidak mampu** menahan gaya tarik yang disebabkan oleh momen yang bekerja akibat penyimpangan kategori 3 (tiga) di buktikan dengan hasil diatas.

4.5.11. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi 4 (TQI > 40)

Besarnya momen yang bekerja pada pada TQI kategori 4 (TQI > 40 mm) adalah :

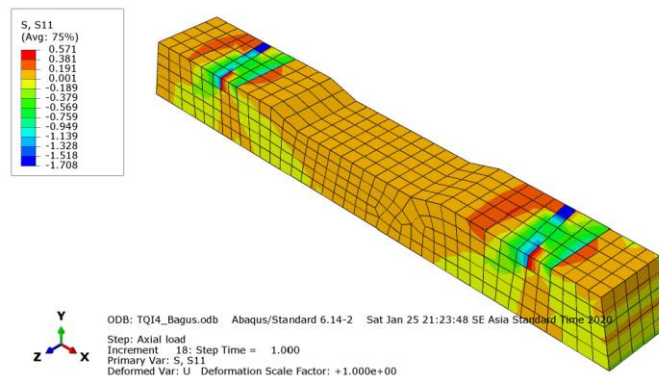
$$\begin{aligned}\sum M &= 0 \\ M_1 &= P_1 \cdot \Delta_1 + P_2 \cdot \Delta_2 \\ M_{1 \text{ TQI4}} &= 9.148 \times 10 + 9.148 \times 15 \\ &= 274.440 \text{ Kg.mm}\end{aligned}$$

Momen yang terjadi pada setiap bantalan pada segmen pengukuran (5 bantalan), sebagai berikut :

1. $B1 = (3897 \times 10) + (3897 \times 15) = 97425 \text{ Kg.mm}$
2. $B2 = (7793 \times 10) + (7793 \times 15) = 194825 \text{ Kg.mm}$
3. $B3 = (7962 \times 10) + (7962 \times 15) = 199050 \text{ Kg.mm}$
4. $B4 = (9148 \times 10) + (9148 \times 15) = 228700 \text{ Kg.mm}$
5. $B5 = (7962 \times 10) + (7962 \times 15) = 199050 \text{ Kg.mm}$

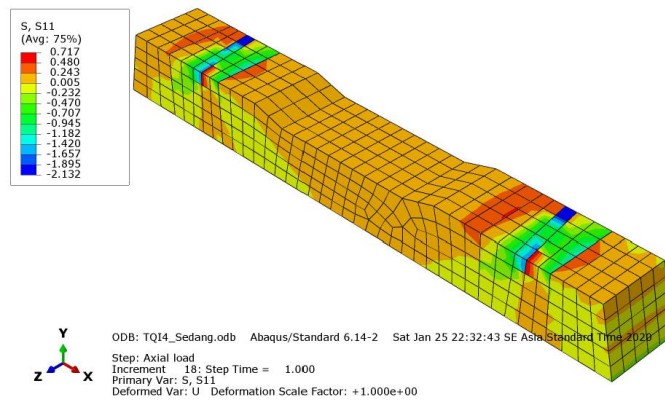
Dari hasil analisa yang diakibatkan penyimpangan pada kategori 3 (tiga), bantalan sudah tidak bisa menahan beban tarik (*tensile*) yang bekerja, maka dipastikan bahwa kategori 4 (empat), juga tidak dapat menahan beban tarik karena beban tarik yang bekerja pada kategori 4 (empat) lebih besar. Agar mengetahui besar tegangan pada bantalan akibat penyimpangan kategori 4 (empat), maka penelitian tetap dilakukan.

1. Pada kondisi tanah bagus (*sand dense*) di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 5.821 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 17.418 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.43.



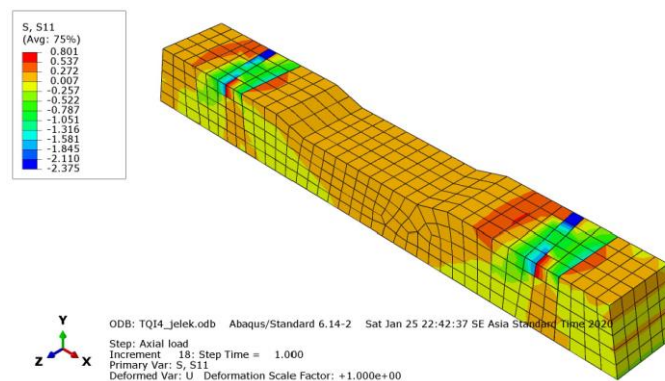
Gambar 4.43 Perilaku beton pada kondisi tanah bagus (*sand dense*) dengan penyimpangan TQI 4.

2. Pada kondisi tanah sedang (*silty sand*) di dapatkan tegangan tarik (tensile stress) = 7.309 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 21.733 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.44.



Gambar 4.44 Perilaku beton pada kondisi tanah sedang (*silty sand*) dengan penyimpangan TQI 4.

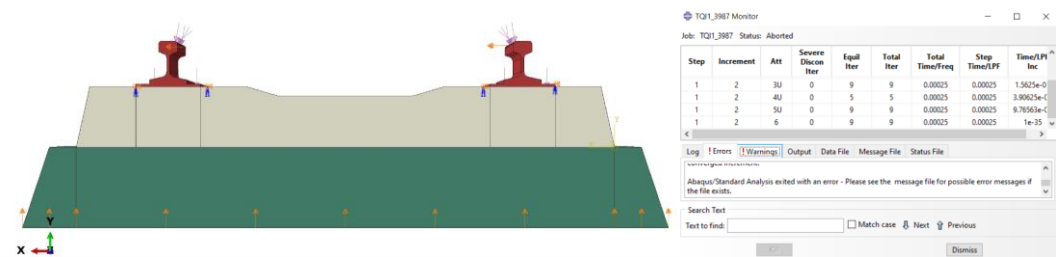
3. Pada kondisi tanah jelek (*clay*) di dapatkan tegangan tarik (tensile stress) = 8.165 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 24.21 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada Gambar 4.45



Gambar 4.45 perilaku beton pada kondisi tanah jelek (*clay*) dengan penyimpangan TQI 4.

Dari hasil analisa pada penyimpangan TQI kategori 4 pada ketiga kondisi tanah hasil maksimum tegangan tekan (*compressive stress*) adalah = 24.21 MPa <

45.9 MPa, sudah mendekati nilai batas tekan. Sedangkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 8.165 MPa > 4.632 MPa, maka pada kondisi TQI 4 bantalan beton **tidak mampu** menahan gaya tarik yang disebabkan oleh momen yang bekerja akibat penyimpangan kategori 4 di buktikan dengan hasil diatas. Penelitain ini dilanjutkan sampai mengetahui penyimpangan hingga beban tidak jatuh pada rel dengan penambahan penyimpangan 0.5 mm. Pada Gambar 4.46 program tidak dapat dijalankan karena beban tidak jatuh pada node.



Gambar 4.46 Permodelan dengan nilai TQI = 52.5 mm

Dari hasil analisa menyatakan pada nilai penyimpangan geometri 40 mm, ditambah sampai beban aksial dan lateral tidak menumpu pada rel dengan penambahan 0.5 mm. Pada nilai TQI = 52.5 mm, *Flange* roda lokomotif tidak menumpu diatas kepala rel atau dapat dikatakan bahwa terjadi anjlokkan (*Derailment*). Hal tersebut mengakibatkan hasil perilaku struktur tidak dapat dianalisa dalam program atau biasa disebut dalam program, adalah model aborted.

4.5.12. Rekapitulasi Hasil

Hasil analisa setiap kondisi disajikan dalam bentuk grafik dan tabel. Tabel 4.21 adalah, hasil dari kondisi kekuatan bantalan pada nilai TQI kategori 1 ($15 > \text{TQI}$), serta disajikan dalam bentuk grafik, yang dapat dilihat pada Gambar 4.47. Hasil tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum adalah 0.795 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum 2.915 MPa. Tabel 4.22 adalah, hasil dari kondisi kekuatan bantalan pada nilai TQI kategori 2 ($15 < \text{TQI} < 25$), serta disajikan dalam bentuk grafik, yang dapat dilihat pada Gambar 4.48. Hasil tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum adalah 2.630 MPa dan tegangan tekan (*compressive*

stress) maksimum 8.216 MPa. Tabel 4.23 adalah hasil dari kondisi kekuatan bantalan pada nilai TQI kategori 3 ($25 < \text{TQI} < 40$), serta disajikan dalam bentuk grafik, yang dapat dilihat pada Gambar 4.49. Hasil tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum adalah 5.178 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum 15.556 MPa, pada kondisi penyimpangan kategori 3 (tiga), terdapat spesimen bantalan yang putus akibat sudah melebihi beban tarik ijin beton yang disyaratkan oleh M.Attard dan Setunge (1996). Tabel 4.24 adalah hasil dari kondisi kekuatan bantalan pada nilai TQI kategori 4 ($\text{TQI} > 40$), penelitian ini mengambil spesimen dengan penyimpangan 40 mm – 50 mm. Hasil kekuatan disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.50.

Namun demikian analisa ini, hanya meneliti kemampuan beton tekan serta tarik beton, terhadap gaya aksial tekan dan lateral dengan adanya persimpangan geometri. Bila kondisi di tambah dengan material *wire prestressed* dengan kuat tarik bantalan $N-67 = F_y$ 1400 MPa, maka bantalan beton lebih kuat untuk menahan beban tarik.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

Tabel 4.21. Rekapitulasi kondisi bantalan beton N-67 pada kondisi TQI 1 (satu)

Kategori Satu		Koefisien Stiffness Vertikal (Ksv) KN/m ³	Momen Max Yang Bekerja (Kg.mm)	Tegangan Max.		Batas Kekuatan (M.Attard & Setunge, 1996)	
				Tekan (MPa)	Tarik (MPa)	Tekan (0.85 F _c)	Tarik (0.32(F _c) ^{0.67})
Bantalan 1 P_{aksial} = 3897 Kg		(Bowles,1996)	15588			45.9000	4.6329
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		1.009	0.275	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		1.030	0.296	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		1.233	0.357	KUAT	KUAT
Bantalan 2 P_{aksial} = 7793 Kg			31172				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		2.080	0.571	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		2.151	0.622	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		2.253	0.734	KUAT	KUAT
Bantalan 3 P_{aksial} = 7962 Kg			31848				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		2.130	0.581	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		2.192	0.632	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		2.406	0.744	KUAT	KUAT
Bantalan 4 P_{aksial} = 9148 Kg			36592				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		2.365	0.601	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		2.610	0.693	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		2.915	0.795	KUAT	KUAT
Bantalan 5 P_{aksial} = 7962 Kg			31848				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		2.130	0.581	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		2.192	0.632	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		2.406	0.744	KUAT	KUAT

Tabel 4.22. Rekapitulasi kondisi bantalan beton N-67 pada kondisi TQI 2 (dua)

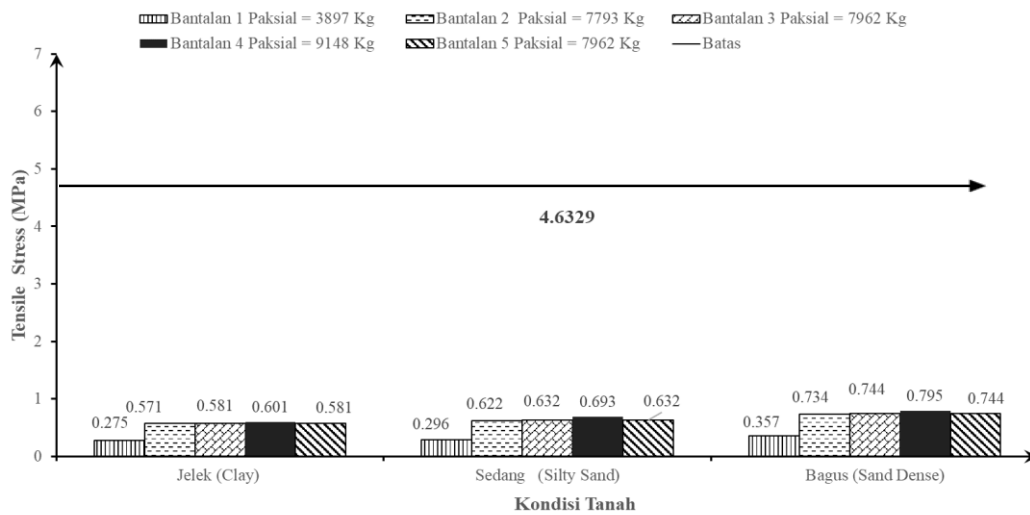
Kategori Dua		Koefisien Stiffness Vertikal (Ksv) KN/m ³	Momen Max Yang Bekerja (Kg.mm)	Tegangan Max.		Batas Kekuatan (M.Attard & Setunge, 1996)	
				Tekan (MPa)	Tarik (MPa)	Tekan (0.85 F _c)	Tarik 0.32(F _c) ^{0.67}
Bantalan 1 P_{aksial} = 3897 Kg		(Bowles,1996)	42867			45.9000	4.6329
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		2.722	0.866	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		2.742	0.928	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		2.762	1.070	KUAT	KUAT
Bantalan 2 P_{aksial} = 7793 Kg			85723				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		5.443	1.733	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		5.464	1.753	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		5.678	1.845	KUAT	KUAT
Bantalan 3 P_{aksial} = 7962 Kg			87582				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		5.566	1.774	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		5.770	1.794	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		5.821	1.906	KUAT	KUAT
Bantalan 4 P_{aksial} = 9148 Kg			100628				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		6.310	1.967	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		8.155	2.610	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		8.216	2.630	KUAT	KUAT
Bantalan 5 P_{aksial} = 7962 Kg			87582				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		5.566	1.774	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		5.770	1.794	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		5.821	1.906	KUAT	KUAT

Tabel 4.23. Rekapitulasi kondisi bantalan beton N-67 pada kondisi TQI 3 (tiga)

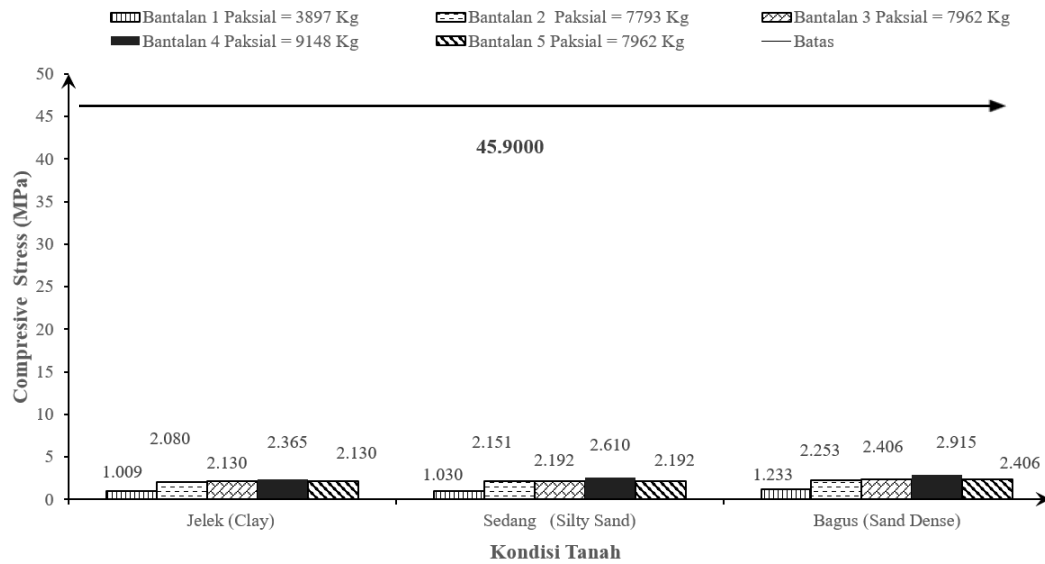
Kategori Tiga		Koefisien Stiffness Vertikal (Ksv) KN/m ³	Momen Max Yang Bekerja (Kg.mm)	Tegangan Max.		Batas Kekuatan (M.Attard & Setunge, 1996)	
				Tekan (MPa)	Tarik (MPa)	Tekan (0.85 F _c)	Tarik (0.32(F _c) ^{0.67})
Bantalan 1 P_{aksial} = 3897 Kg		(Bowles,1996)	74043			45.9000	4.6329
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		4.638	1.529	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		4.954	1.580	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		5.056	1.621	KUAT	KUAT
Bantalan 2 P_{aksial} = 7793 Kg			148067				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		9.286	3.058	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		9.388	3.109	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		9.501	3.170	KUAT	KUAT
Bantalan 3 P_{aksial} = 7962 Kg			151278				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		9.490	3.129	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		9.735	3.323	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		10.204	3.354	KUAT	KUAT
Bantalan 4 P_{aksial} = 9148 Kg			173812				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		11.519	3.782	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		12.355	4.067	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		15.556	5.178	KUAT	PUTUS
Bantalan 5 P_{aksial} = 7962 Kg			151278				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		9.490	3.129	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		9.735	3.323	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		10.204	3.354	KUAT	KUAT

Tabel 4.24. Rekapitulasi kondisi bantalan beton N-67 pada kondisi TQI 4 (empat)

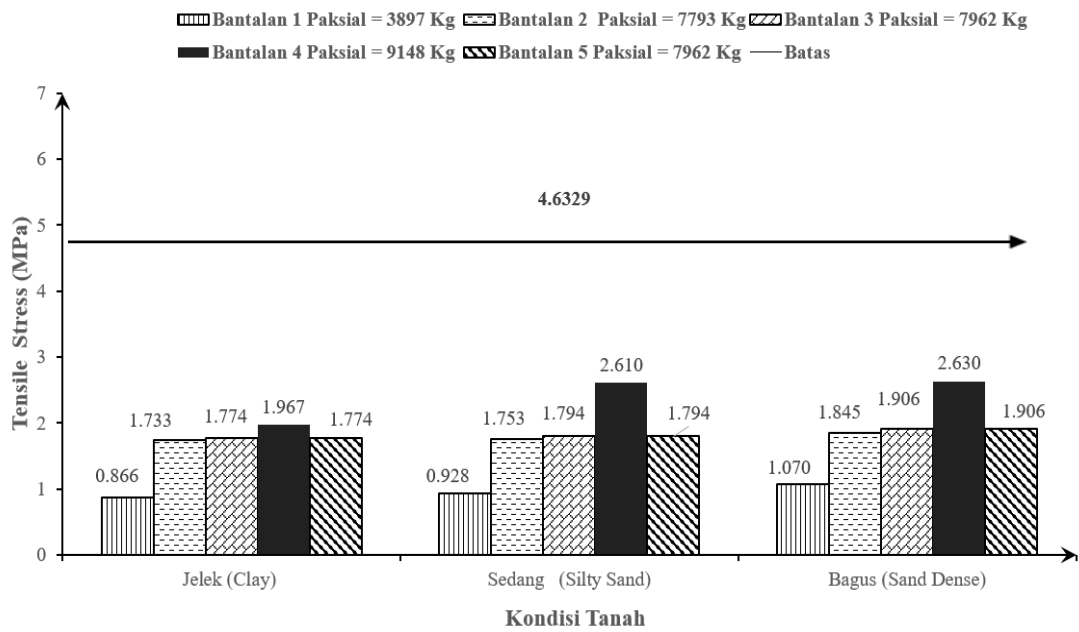
Kategori Empat		Koefisien Stiffness Vertikal (Ksv) KN/m ³	Momen Max Yang Bekerja (Kg.mm)	Tegangan Max.		Batas Kekuatan (M.Attard & Setunge, 1996)	
				Tekan (MPa)	Tarik (MPa)	Tekan (0.85 Fc)	Tarik (0.32(Fc) ^{0.67})
Bantalan 1 P_{aksial} = 3897 Kg		(Bowles,1996)	97425			45.9000	4.6329
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		6.086	2.029	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		6.228	2.253	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		6.453	2.334	KUAT	KUAT
Bantalan 2 P_{aksial} = 7793 Kg			194825				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		12.171	4.057	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		12.487	4.200	KUAT	KUAT
	Jelek (Clay)	128000		13.364	4.343	KUAT	KUAT
Bantalan 3 P_{aksial} = 7962 Kg			199050				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		15.637	4.577	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		16.932	4.781	KUAT	PUTUS
	Jelek (Clay)	128000		17.482	4.801	KUAT	PUTUS
Bantalan 4 P_{aksial} = 9148 Kg			228700				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		17.411	5.821	KUAT	PUTUS
	Sedang (Silty Sand)	48000		21.733	7.309	KUAT	PUTUS
	Jelek (Clay)	128000		24.210	8.165	KUAT	PUTUS
Bantalan 5 P_{aksial} = 7962 Kg			199050				
Kondisi Tanah	Bagus (Sand Dense)	24000		15.637	4.577	KUAT	KUAT
	Sedang (Silty Sand)	48000		16.932	4.781	KUAT	PUTUS
	Jelek (Clay)	128000		17.482	4.801	KUAT	PUTUS



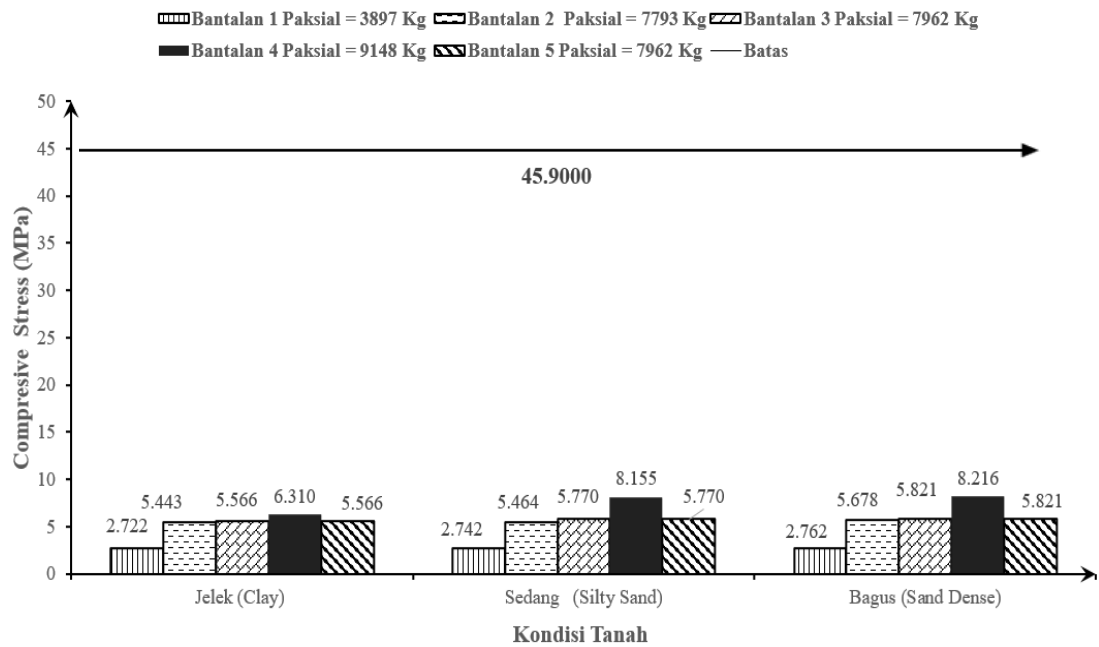
Gambar 4.47 Tegangan tarik (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 1 (satu)



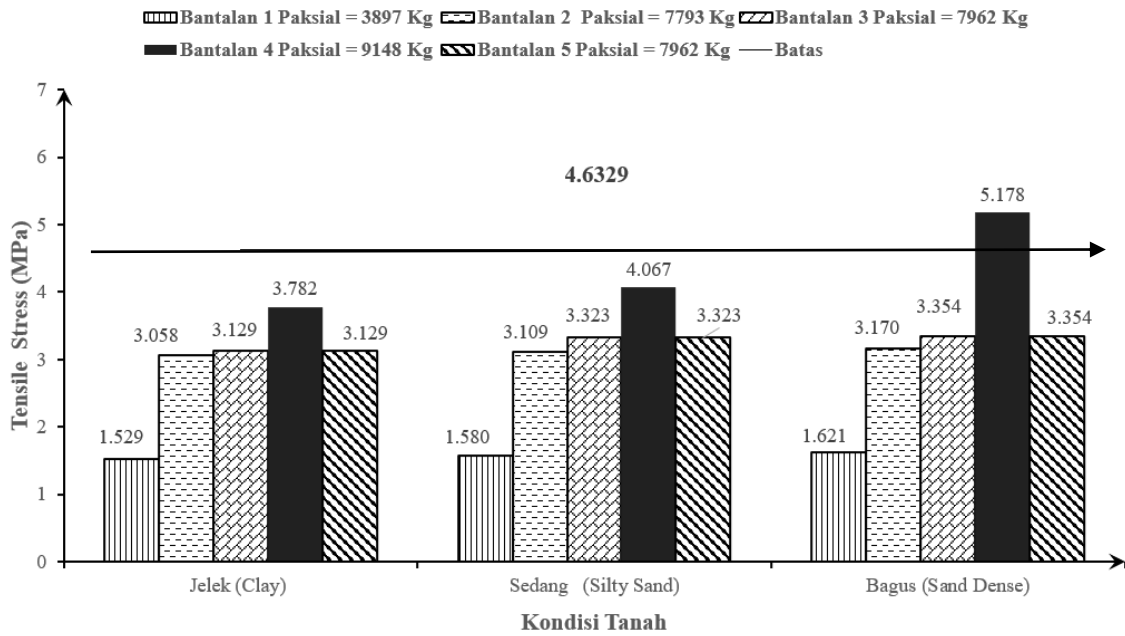
Gambar 4.48 Tegangan tekan (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 1 (satu)



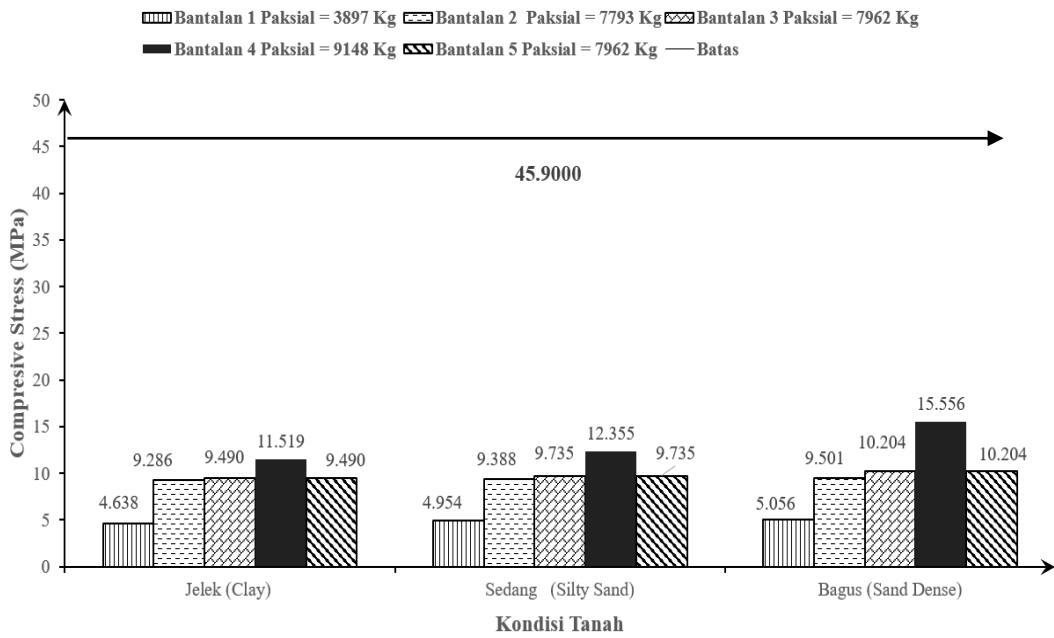
Gambar 4.49 Tegangan tarik (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 2 (dua).



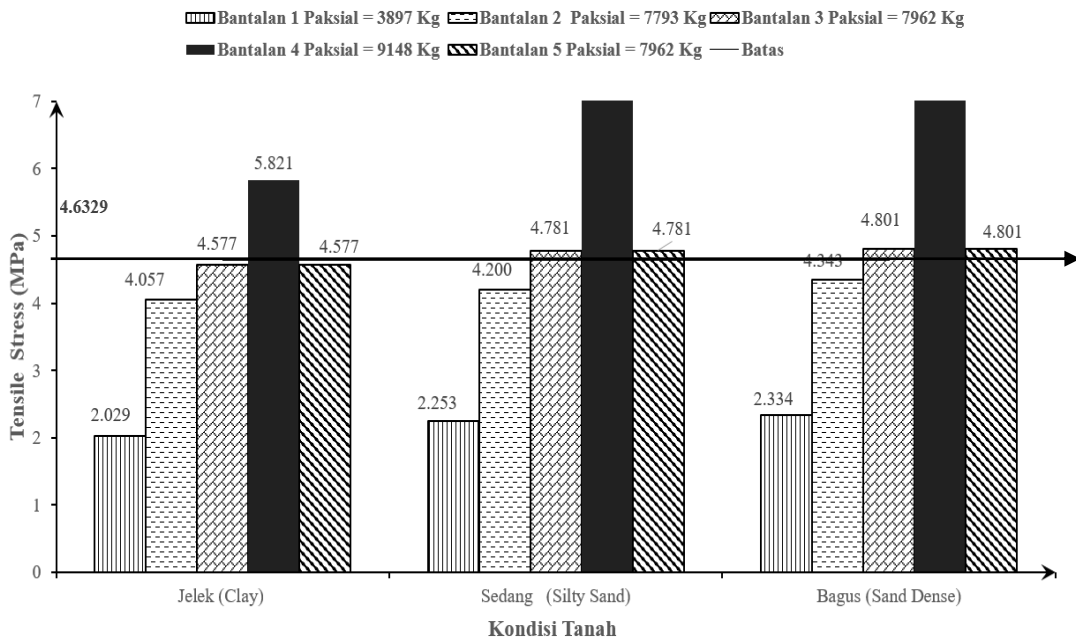
Gambar 4.50 Tegangan tekan (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 2 (dua).



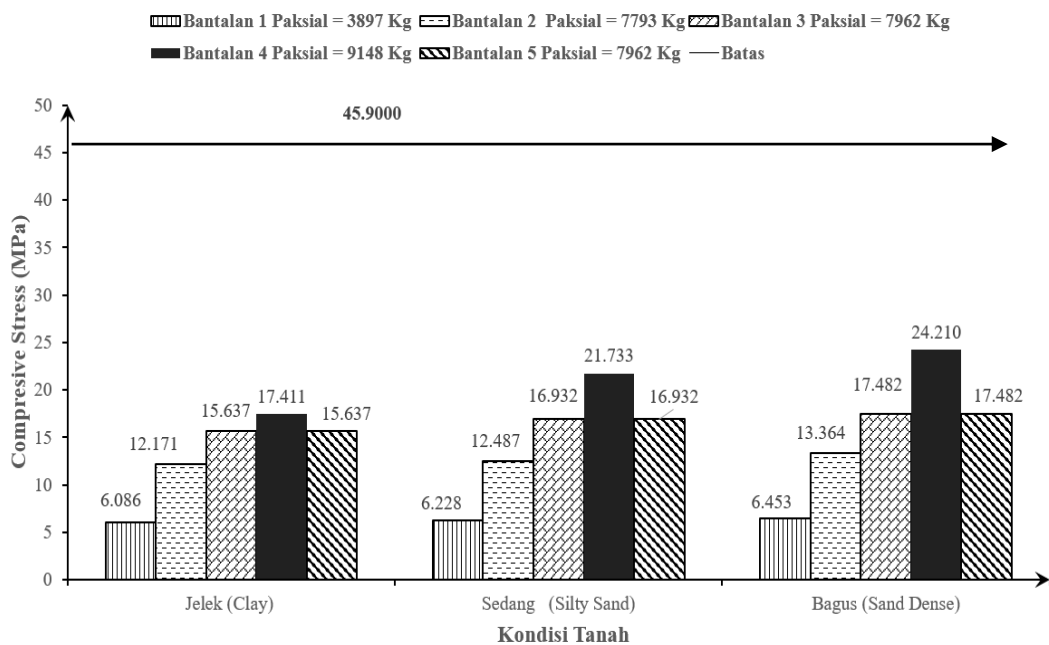
Gambar 4.51 Tegangan tarik (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 3 (tiga).



Gambar 4.52 Tegangan tekan (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 3 (tiga).



Gambar 4.53 Tegangan tarik (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 4 (empat).



Gambar 4.54 Tegangan tekan (MPa) bantalan beton kondisi penyimpangan TQI kategori 4 (empat)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa nilai *track quality index* (TQI) dan permodelan numerik dengan program bantu, pada lintas Surabaya – Mojokerto didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil dari analisa perilaku bantalan beton pada semua kondisi penyimpangan geometri kategori 1 dengan nilai $TQI < 15$, bantalan masih dapat bekerja dengan optimal, dibuktikan dengan hasil analisa tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum sebesar, $0.795 \text{ MPa} < 4.6329 \text{ MPa}$ dan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum $2.915 \text{ MPa} < 45.9 \text{ MPa}$.
2. Hasil dari analisa perilaku bantalan beton pada semua kondisi penyimpangan geometri kategori 2 dengan nilai $15 < TQI < 25$, bantalan masih dapat bekerja dengan optimal, dibuktikan dengan hasil analisa tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum sebesar, $2.630 \text{ MPa} < 4.6329 \text{ MPa}$ dan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum sebesar $8.216 \text{ MPa} < 45.9 \text{ MPa}$.
3. Hasil dari analisa perilaku bantalan beton pada kondisi penyimpangan geometri kategori 3 dengan nilai $25 < TQI < 40$, terdapat satu spesimen bantalan tidak kuat menahan beban tarik yang bekerja, dibuktikan dengan hasil analisa tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum melebihi persyaratan tegangan tarik maksimum pada mutu beton 54 MPa yaitu sebesar 4.6329 MPa . Hasil tegangan tarik maksimum $5.178 \text{ MPa} > 4.6329 \text{ MPa}$. Pada semua simulasi *finite element analysis*, dengan penyimpangan geometri kategori 3, kondisi beton masih memenuhi persyaratan tekan yaitu nilai tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum adalah $15.556 \text{ MPa} < 45.9 \text{ MPa}$.
4. Hasil dari analisa perilaku bantalan beton pada kondisi penyimpangan geometri kategori 4 dengan nilai $TQI > 40$ mm, terdapat beberapa spesimen tidak mampu menahan beban tarik yang bekerja akibat kondisi penyimpangan. Tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum terjadi pada bantalan 4 dengan beban aksial (P_{aksial}) sebesar 9,14 ton, dengan kondisi tanah

jelek (*clay*) nilai tegangan tarik mencapai 8.165 MPa > 4.6329 MPa. Sedangkan pada kondisi kekuatan tekan sampai penyimpangan geometri kategori 4, tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum sebesar 24.210 MPa masih dibawah syarat maksimum tekan beton (F_{c54}) yaitu, 45.9 MPa. Dari hasil analisa struktur bantalan beton kuat menahan beban tekan (*compressive*), tetapi lemah dalam menahan beban tarik (*tensile*).

5.2. Saran

Dari beberapa kesimpulan diatas penulis menyarankan beberapa saran yaitu :

1. Untuk mengetahui dan membandingkan nilai *Track Quality indeks* sebaiknya mencari data dengan kondisi tahun yang sama. Karena keterbatasan data maka dilakukan analisa dengan tahun yang berbeda
2. Dalam permodelan nonlinier dengan program bantu disarankan menggunakan software asli, karena hasil dari analisa akan lebih optimal.
3. Pengujian struktural sebaiknya di verifikasi dengan eksperimental, agar hasil dari analisa kekuatan struktural lebih valid .
4. Dalam pemeliharaan jalan rel khususnya struktur atas, agar lebih teliti dalam memasang rel, bantalan maupun penambat, kondisi geometri harus dimawas dengan benar sampai nilai TQI = 0 mm, karena dalam struktur jalan kereta api 1 cm sudah berpengaruh terhadap keamanan jalan rel, Terutama pada lebar *Point off Protection* pada wesel, serta lebar siar pada wesel.
5. Perlu adanya inovasi bantalan beton yang mempunyai kekuatan tekan dan tarik lebih bagus (beton daktail).

DAFTAR PUSTAKA

- Attard, M. M., and S. Setunge. 1996. "Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete." *ACI Materials Journal* 93(5): 432–42.
- Attard, Mario M., and S. Setunge. 1996. "Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete." *ACI Materials Journal* 93(5): 432–42.
- Aulia, Rayhana., and Danang Parikesit. 2017. "Perencanaan Pemeliharaan Jalan Reldaop vi Yogyakarta." *Prosiding Simposium II – UNIID 2017* (September): 978–79.
- Berawi, Abdur Rohim Boy, Raimundo Delgado, Rui Calçada, and Cecilia Vale. 2010. "Evaluating Track Geometrical Quality through Different Methodologies." *International Journal of Technology* 1(1): 38–47.
- Bowles, Josep E. 1997. *20 Engineering Geology Foundation Analysis and Design Fifth Edition*.
- Esveld, C. 2001. Delft university of technologi *Modern Railway Track*. Second.
- Iranata, Data, Endah Wahyuni, and Hidayat Soegihardjo. 2010. "Ductile Design of Beam-Column Connection for Earthquake Resistant Precast Concrete House." (October).
- Jaya, Fery Hendi. 2018. "Evaluasi Struktur Atas Komponen Jalan Rel Berdasarkan Passing Tonnage (Studi Kasus : Jalan Rel Lintas Tanjung Karang – Bekri)." *Tapak Vol. 8 No. 1* 8(1): 33–45.
- Kaewunruen, Sakdirat, Eroscha Kahawatta Gamage, and Alex M. Remennikov. 2016. "Modelling Railway Prestressed Concrete Sleepers (Crossties) with Holes and Web Openings." *Procedia Engineering* 161: 1240–46.
- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, Direktorat Jenderal Perkeretaapian. 1986. "Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api." *Jaringan Dokumentasi dan informasi hukum kementerian perhubungan*: 58.
- Kurniawan, Wahyu. 2015. "Tinjauan Volume Pemeliharaan Tahunan Jalan Rel Berdasarkan (TQI)." *Jurnal Rekayasa Sipil ASTONJADRO* 4(1067 mm): 1–17.
- Lasisi, Ahmed, and Nii Attoh-Okine. 2018. "Principal Components Analysis and Track Quality Index: A Machine Learning Approach." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 91(March 2018): 230–48. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.04.001>.
- Liu, Reng-Kui et al. 2015. "Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro." *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2015: 1–9.
- Mander, John Barrie. 1983. *Seismic Desain Of Bridge Piers*.

- Michał, Szczecina, and Winnicki Andrzej. "Calibration of the CDP Model Parameters in Abaqus."
- Ministry of Defence United Kingdom Railways. 2009. *MOD UK Railways Permanent Way Design and Maintenance Policy and Standards Issue 4*.
- Murat Saatcioglu & Razvi Salim. 1999. "Strength and Ductility of Hybrid FRP-Concrete." *J. Struct. Eng.*, 9445(October): 281–289.
- Panjaitan, Herbet, and Sembiring. 2011. "Evaluasi Komponen Jalan Rel Berdasarkan Passing Tonnage Dan Analisis Kebutuhan Pemeliharaan Tahunan Jalan Rel Dengan Analisa Jo Tahun 2011." *Jurnal Teknik Sipil ITP Vol. 4 No.2 Juli 2017* 2011.
- Purwanto, Dwi. 2008. "Pengujian Bantalan Beton Untuk Track Jalan Kereta Api Sepur 1435 Mm Menggunakan Standar Uji Arema." : 11–18.
- Puspasari, Dwi., Rudi. Djamaludin, and Rita Irmawati. 2016. "Kajian Kapasitas Lentur Dudukan Bantalan Rel Kereta Type Bt25 S35 E36."
- Ravitharan, Ravi, Andrew Labrooy, Hera Widyastuti, and Wing Kong Chiu. 2017. "Rail Infrastructure in Port City - Surabaya, Indonesia." *Procedia Engineering* 188: 486–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.512>.
- Ren, Wei, Lesley H. Sneed, Yang Yang, and Ruili He. 2015. "Numerical Simulation of Prestressed Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Damage Plasticity Model." *International Journal of Concrete Structures and Materials* 9(1): 45–54.
- Rezaie, F., M. Bayat A., and S. M. Farnam. 2016. "Sensitivity Analysis of Pre-Stressed Concrete Sleepers for Longitudinal Crack Prorogation Effective Factors." *Engineering Failure Analysis* 66: 385–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.04.015>.
- Roghani, Alireza, Renato Macciotta, and Michael Hendry. 2015. "Combining Track Quality and Performance Measures to Assess Track Maintenance Requirements." *proceedings of the 2015 joint rail conference* (April): V001T01A009.
- Rosyidi. 2015. Lembaga Penelitian, Publikasi dan Pengabdian Masyarakat Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (LP3M UMY) 2015 *Rekayasa Jalan Kereta Api*.
- Samani, Ali Khajeh, and Mario M. Attard. 2012. "A Stress-Strain Model for Uniaxial and Confined Concrete under Compression." *Engineering Structures* 41: 335–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.027>.
- Umbu, Aditya, Tana Amah, Felix Pasila, and Indra Budiono. 2013. "Simulasi Sistem Penjadwalan Kereta : Studi Kasus Daop Viii Jawa Timur." : 101–6.
- Yi, Sirong. 2017. Principles of Railway Location and Design *Railway Transport Capacity and Construction Standards*.

BIODATA PENULIS



Nama Wawarisa Alnu Fistcar lahir di Kendal, 12 Desember 1993, merupakan putra sulung dari 2 (dua) bersaudara, dari keluarga sederhana, profesi ayah adalah tukang kayu dan ibu rumah tangga. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 01 Gondang, SMP N 2 Kendal, SMA N 1 Kendal. Penulis melanjutkan pendidikan perguruan tinggi Program Diploma Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang tahun 2011. Penulis menempuh pendidikan program Diploma dengan masa studi 2 Tahun 9 Bulan. Setelah lulus pada tahun 2014, penulis di terima bekerja di PDAM Surya Sembada Kota Surabaya sebagai Staff. Perencanaan Kendali Oprasi dan Pemeliharaan Sipil (PKO). Dalam waktu yang sama penulis melanjutkan studi di Program Studi S-1 Lintas Jalur Jurusan Teknik Sipil (FTSP) Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya lulus pada tahun 2016, dengan masa studi 2 tahun. Setelah lulus dari program Sarjana, penulis diterima pada Program Pelatihan Calon Pegawai PPCP PT.Wijaya Karya (Persero) Batch 71. Selama bekerja penulis di tempatkan pada proyek Akses Toll Road Cilincing – Jampea Jakarta, Road Rehabilitation, Soibada, Timor Leste serta New Steel Bridge JCT - Fatucmanaun, Manatuto, Timor Leste. Pada tahun 2018 penulis melanjutkan studi Pasca Sarjana (S-2), dengan biaya beasiswa *fresh graduate* ITS mengambil bidang konsentrasi Teknik dan Manajemen Jalan Rel (TMJR) dengan NRP.03111850080001, serta berhasil melakukan sidang terbuka tesis pada semester ke 3 (tiga).

Apabila ingin berkorespondensi dengan penulis dapat melalui :

Email: wawarisf@gmail.com
wawarisf@yahoo.com

Motto hidup ” *Keteguhan Akan Mengubah Rintangan, Menjadi Kesempatan* ”

“Halaman Sengaja Dikosongkan”