



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, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019



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, LINGKUNGAN, DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019**

“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 :

Periode Wisuda :

Mengetahui / Menyetujui

1. **Ir.Hera Widyastuti.,M.T.,Ph.D** (Dosen Pembimbing I)
NIP : 196008281987012001

2. **Data Iranata, S.T.,M.T.,Ph.D** (Dosen Pembimbing II)
NIP : 198004302005011002

3. **Dr.Catur Arif P.S.T.,M.Eng** (Dosen Penguji I)
NIP : 197007081998021001

4. **Ir.Ervina Ahyudanari,ME.,Ph.D** (Dosen Penguji II)
NIP : 196902241995122001

**Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
(FTSLK)**

Dekan

I.D.A.A. Warmadewanthi, S.T.,M.T.,Ph.D

NIP : 197502121999032001

“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. Dalam penelitian ini, evaluasi kualitas geometri jalan rel dihitung dengan menggunakan standar perkeretaapian Indonesia yaitu Track quality indeks (TQI).

Hasil nilai track quality indeks terbesar pada tahun 2018 adalah 37,44 dengan analisa data sekunder dari hasil pembacaan KA.Galunggung, Nilai track quality indeks terbesar pada tahun 2019 adalah 40,75 dengan data sekunder dari hasil pembacaan KA.EM-120. Dari hasil analisa kedua data sekunder terdapat perbedaan tiap segmen data yang perbedaan datanya lebih dari 5 disurvey secara aktual dengan menggunakan alat ukur manual yaitu matisa untuk parameter lebar gauge dan pertinggian, serta meter listring untuk parameter listringan dan angkatan. Dari hasil survey manual di dapatkan nilai track quality indeks terbesar 40,00. Hasil dari pengukuran track quality di lapangan dijadikan dasar bentuk geometri 1 segmen pengukuran.

Permodelan struktural menggunakan program bantu ABAQUS dengan dimensi bantalan sesuai di lapangan 2000 x 250 x 215 mm dengan property material kuat tekan beton (F_c') = 54 Mpa dan kuat tarik wire prestressed (F_y) 1400 Mpa, tipe rel yaitu R.54 dan dan properti ballas sesuai PM.60 tahun 2012. Beban yang dimasukan adalah beban aksial dan *lateral displacement*. Dengan beban aksial 7% Pd, 23% Pd, 40% Pd, serta beban lateral 0,1 Pd dan 0,2 Pd. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh letak geometri track terhadap bantalan beton. Hasil FEA pada kondisi normal dengan perhitungan manual mempunyai perbedaan kurang dari 4,055 % maka korelasi input material sudah baik. Hasil dari modifikasi letak geometri menunjukkan perbedaan perilaku bantalan beton. Pada nilai penyimpangan geometri terbesar (TQI > 40), hasil tegangan tarik beton adalah 2,787 Mpa, tegangan tekan 8,192 Mpa serta *displacement* terbesar 0.00124 mm. Dari hasil tersebut dapat diartikan bahwa sampai penyimpangan terbesar geometri struktur atas masih dapat menumpu beban yang bekerja.

Kata Kunci : Track Quality Index (TQI), Tegangan, Bantalan Beton, Displacement

“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 railroad 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. In this study, the evaluation of the quality of the railroad geometry was calculated using the Indonesian railroad standard namely Track quality index (TQI).

The results of the largest track quality index value in 2018 was 37,44 with a secondary data analysis of the results of KA.Galunggung readings, the largest track quality index value in 2019 was 40,75 with secondary data from the results of KA.EM-120 readings. From the results of the analysis of the two secondary data there are differences in each data segment whose data differences are more than 5 actually surveyed using a manual measuring tool that is matisa for track gauge and x level parameters, and meter listring for alignment and profil. From the results of a manual survey get values The biggest track quality index is 40,00. the results of track quality measurements in the field are used as the basis for geometric shapes in 1 segment measurement.

Structural modeling uses the ABAQUS assistive program with concrete sleeper dimensions in the field 2000 x 250 x 215 mm with material properties of concrete compressive (F_c') = 54 Mpa and tensile strength of prestressed wire 1400 = Mpa, the rail type is R.54 and ballast property according to PM.60 of 2012. Load included is axial load and lateral displacement. With an axial load of 7% Pd, 23% Pd, 40% Pd, and lateral loads 0.1 Pd and 0.2 Pd. The purpose of this study was to determine the effect of the location of the track geometry on concrete bearings. FEA results in normal conditions with manual calculations have a difference of less than 4,055%, the correlation of material inputs is good. The results of the modification of the location of the geometry shows the differences in the behavior of concrete bearings. At the largest geometry deviation value ($TQI > 40$), the result of the concrete tensile stress is 2.787 MPa, compressive stress 8.19 MPa and the largest displacement of 0.0124 mm. From these results it can be interpreted that up to the greatest deviation the geometry of the upper structure can still support the work load.

Keywords: Track Quality Index (TQI), Concrete Sleeper, Stress, Displacement

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR ISI

COVER	I
LEMBAR PENGESAHAN	III
ABSTRAK	V
ABSTRACT	VII
DAFTAR ISI	IX
DAFTAR TABEL	XIII
DAFTAR GAMBAR	XV
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	20
2.4. Beban Angkut Tahunan (Passing Tonnage)	22
2.5. Rel	24

2.5.1. Bentuk dan Dimensi Rel di Indonesia	25
2.6. Bantalan.....	27
2.7. Pembebanan	28
2.7.1. Beban gandar	29
2.7.2. Kecepatan	30
2.7.3. Gaya Vertikal	31
2.7.4. Gaya Horisontal (Lateral).....	33
2.7.5. Gaya Horisontal (Longitudinal)	34
2.8. Penelitian Eksperimental.....	36
2.9. Permodelan Numerik Bantalan Beton Prestressed.....	37
2.10. Constitutive Material Equation	39
2.11. Concrete damage plasticity	40
BAB 3 METODOLOGI STUDI	45
3.1. Umum	45
3.2. Diagram Alir Penelitian	45
3.3. Langkah Penelitian.....	48
3.3.1. Tahap Persiapan	48
3.3.2. Tahap Identifikasi Masalah	49
3.3.3. Studi Pustaka	49
3.3.4. Pengumpulan Data	50
3.3.4.1. Data Primer	50
3.3.4.2. Data Sekunder	50
3.3.5. Analisis Data	51
3.3.5.1. Analisis Setiap Parameter Kerusakan	52
3.3.5.2. Perhitungan Track Quality Indeks (TQI)	53
3.3.5.3. Pengukuran Kondisi Eksisting	54
3.3.5.4. Penentuan Kelas Jalan Berdasarkan Daya Angkut Tahunan (Passing Tonnage).....	55

3.3.5.5. Perhitungan Perilaku struktur Bantalan Beton Pada Kondisi Ideal (Kategori Baik Sekali)	58
3.3.5.6. Validasi Hitungan Teoritis Dengan Penelitian Sebelumnya..	68
3.3.5.7. Permodelan Bantalan Beton type N-67	69
3.3.5.8. Validasi Permodelan Pada Kondisi Ideal	75
3.3.5.9. Permodelan Bantalan Beton type N-67 Dengan Hasil TQI Sesuai Kategori Kerusakan.....	75
3.3.6. Kesimpulan dan Saran	76
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	77
4.1. Umum	77
4.2. Pengolahan Data	77
4.2.1. Perhitungan Standart Deviasi Setiap Parameter Kerusakan.	99
4.3. Perhitungan Nilai Track Quality Indeks (TQI).....	102
4.3.1. Perhitungan Track Quality Indeks Berdasarkan Standart Perkeretaapian Indonesia.....	104
4.4. Pengukuran Parameter TQI Manual	109
4.4.1. Metode dan Hasil Pengukuran.....	110
4.5. Perhitungan Kelas Jalan Berdasarkan Daya Angkut Tahunan (Passing Tonage).....	113
4.5.1. Perhitungan beban eksisting	123
4.6. Pemodelan Dengan Program Bantu.....	124
4.6.1. Material Propertis.....	125
4.6.2. Permodelan Bantalan N-67	127
4.6.3. Pembebanan dan Perletakan	128
4.6.4. Study parameter beton akibat beban tekan	128
4.6.5. Study parameter beton akibat beban tarik.....	132
4.6.6. Study parameter tarik tulangan	134
4.6.7. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi baru (TQI < 15)	135

4.6.8. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi (TQI 15 -25).....	138
4.6.9. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi (TQI 25 - 40)....	140
4.6.10. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi (TQI > 40)	142
4.6.11. Perbandingan Hasil.....	146
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	151
5.1. Kesimpulan	151
5.2. Saran	152
DAFTAR PUSTAKA	155

DAFTAR 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	21
Tabel 2.4 Standar Nilai Track Quality Index (TQI).....	21
Tabel 2.5 Batasan (thresholds) Nilai Kerusakan Per Kategori.....	22
Tabel 2.6 Kelas Jalan.....	23
Tabel 2.7 Tipe Rel di Indonesia	26
Tabel 2.8 Panjang Minimum Rel Panjang.....	26
Tabel 2.9 Standart Gandar	30
Tabel 2.10 Data Mutu Material	37
Tabel 2.11 Tabulasi Penelitian Terdahulu.....	43
Tabel 2.11 Tabulasi Penelitian Terdahulu (Lanjutan 1).....	43
Tabel 3.1 Contoh Output Kereta Ukur	51
Tabel 3.2 Batasan (thresholds) Nilai Kerusakan per Kategori	53
Tabel 3.3 Daftar Kereta Yang Melintas	56
Tabel 3.4 Susunan Gerbong	56
Tabel 3.5 Beban Gerbong.....	56
Tabel 3.6 Tegangan Ijin.....	58
Tabel 3.7 Validasi Hitungan Teoritis	69
Tabel 4.1 Data bacaan KA Ukur pada KM.18 dalam 1 segmen (200 meter).....	78
Tabel 4.2 Contoh Perhitungan Standar Deviasi dengan Formula Ms. Excel	100
Tabel 4.3 Contoh Perhitungan Standar Deviasi dengan Secara Manual	101
Tabel 4.4 Ouput nilai track quality indeks (TQI) dengan <i>software</i> EM-120	103
Tabel 4.5 Nilai standar deviasi tiap parameter kerusakan KM 18+000 -18+200107	
Tabel 4.6 Hasil Survey Pendahuluan KM 18 + 000 -19 + 000	109
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Manual 200 m'	111
Tabel 4.8 Hasil analisa track quality indeks pengukuran manual	111
Tabel 4.9 Daftar Kereta Barang yang melintas Surabaya – Mojokerto	113
Tabel 4.10 Daftar Kereta Penumpang yang melintas Surabaya – Mojokerto	113
Tabel 4.11 Stamformasi kereta penumpang	115
Tabel 4.12 Stamformasi kereta barang.....	115
Tabel 4.13 Beban gerbong penumpang yang melintas.....	116
Tabel 4.14 Beban gerbong barang yang melintas	117
Tabel 4.15 Beban Lintas Harian Kereta Api Penumpang Lintas Surabaya - Mojokerto (Gapeka 2018).....	121
Tabel 4.16 Beban Lintas Harian Kereta Api Barang Lintas Surabaya - Mojokerto (Gapeka 2018).....	123
Tabel 4.17 Beban yang bekerja pada bantalan	124
Tabel 4.18 Properti Bantalan Beton	127
Tabel 4.19 Luas elemen tulangan.....	127
Tabel 4.20 Tegangan Yang Terjadi pada Struktur Atas Jalan Rel	144
Tabel 4.21 Perpindahan yang terjadi Pada struktur Atas Jalan Rel.....	145

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Panjang Lintas	9
Gambar 1.2 Lokasi Penelitian	10
Gambar 2.1 KA.Ukur EM-120	18
Gambar 2.2 KA.Ukur Galunggung.....	18
Gambar 2.3 Bagian Komponen Rel.....	25
Gambar 2.4 Kemiringan ($\text{tg } \alpha$) 1 : 40	27
Gambar 2.5 Pola Distribusi Pada Struktur Jalan Rel.....	29
Gambar 2.6 Beban Yang Bekerja Pada Lintasan	31
Gambar 2.7 Gaya Horizontal.....	34
Gambar 2.8 Distribusi Tekanan Temperatur CWR	36
Gambar 2.9 Pola Retak Momen Dudukan B	36
Gambar 2.10 Sketsa Pola Retak pada Pengujian Momen Dudukan B	37
Gambar 2.11 Monoblok tipe B70	37
Gambar 2.12 Permodelan Monoblock dengan ABAQUS.....	38
Gambar 2.13 Strain – stress beton $F_c = 60$	39
Gambar 2.14 Perilaku beton dengan gaya axial tekan dan tarik	40
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Penelitian	47
Gambar 3.2 Segmentasi Perhitungan Nilai TQI per 200 m.....	53
Gambar 3.3 Alat Ukur Manual	55
Gambar 3.4 Cara Kerja Alat Ukur Manual.....	55
Gambar 3.5 Dimensi Bantalan Beton	58
Gambar 3.6 Dimensi Rel	60
Gambar 3.7 Letak Beban.....	63
Gambar 3.8 Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Awal	65
Gambar 3.9 Kondisi Tegangan Tahap Pratekan Efektif.....	66
Gambar 3.10 Input data Geometri pada Abaqus	70
Gambar 3.11 Sketsa Bantalan N-67 C3D8R	70
Gambar 3.12 Sketsa rel type R.54 T2D3 pada Abaqus.....	71
Gambar 3.13 Input Data Material pada Abaqus	71
Gambar 3.14 Model numerik <i>assembly</i> bantalan beton N-67 dan Rel type 54 pada Abaqus.....	72
Gambar 3.15 Input <i>Step</i> pada Abaqus	73
Gambar 3.16 Input <i>Constraints</i> pada Abaqus.....	74
Gambar 3.17 <i>Meshing Model</i> pada Abaqus.....	74
Gambar 3.18 <i>Data Check</i> pada Abaqus.....	75
Gambar 3.19 Letak Beban Setelah Adanya Parameter Lebar Spor TQI	75
Gambar 3.20 Letak Beban Setelah Adanya Parameter Peninggian TQI	76
Gambar 4.1 Ouput KA ukur Format CSV	78
Gambar 4.2 Notifikasi eror membuka aplikasi format pnr.....	102
Gambar 4.3 Grafik track quality Indeks (TQI) 2018 dengan EM-120 dan 2019 dengan KA Galunggung.....	108
Gambar 4.4 Pengukuran 4 parameter TQI.....	110
Gambar 4.5 Hasil nilai track quality indeks dengan EM-120 dan hasil survey	112

Gambar 4.6 Ilustrasi beban pada segmen 3 meter	124
Gambar 4.7 Permodelan per 3m sesuai geometri	124
Gambar 4.8 Kurva tegangan – regangan model konstutif tekan beton $F_c' = 54$ Mpa.....	126
Gambar 4.9 Kurva tegangan – regangan model konstutif tarik beton	126
Gambar 4.10 Kurva tegangan – regangan model konstutif tarik tulangan	126
Gambar 4.11 Permodelan bantalan beton tipe N-67	128
Gambar 4.12 Model beton akibat beban tekan (<i>Bondary condition</i> tekan)	129
Gambar 4.13 Kurva <i>inelastic strain-yield compressive stress</i> f_c 54 Mpa	130
Gambar 4.14 Kurva <i>inelastic strain - damage parameter compressive stress</i> f_c 54 Mpa.....	130
Gambar 4.15 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan menggunakan nilai viskositas 0.001	131
Gambar 4.16 Model beton akibat beban tarik(<i>Bondary condition</i> tarik).....	132
Gambar 4.17 Kurva <i>inelastic strain-yield tensile stress</i> f_c 54 Mpa	132
Gambar 4.18 Kurva <i>inelastic strain-damage parameter</i> beton tarik F_c 54 Mpa	133
Gambar 4.19 Kurva tegangan-regangan beton akibat tarik menggunakan persamaan Attard dan Setunge (1996).....	133
Gambar 4.20 Kurva tegangan-regangan tulangan kuat leleh 1400 MPa akibat tarik menggunakan persamaan Mander (1983)	134
Gambar 4.21 Pembebanan dan tumpuan pada segmen 3 meter.....	135
Gambar 4.22 Pembebanan dan tumpuan pada 1 Bantalan.....	135
Gambar 4.23 Tegangan tarik (<i>Tensile stress</i>) Rel type 54 pada TQI > 15 mm .	136
Gambar 4.24 Tegangan (<i>Stress</i>) Bantalan beton Type N-67 dan Perpindahan (<i>Displacement</i>) pada TQI > 15 mm.....	137
Gambar 4.25 Tegangan (<i>Stress</i>) Wire Prestressed 713 Mpa (TQI > 15).....	137
Gambar 4.26 Tegangan tarik (<i>Tensile stress</i>) Rel type 54 pada TQI 15 – 25 mm	138
Gambar 4.27 Tegangan (<i>Stress</i>) Bantalan beton Type N-67 dan Perpindahan (<i>Displacement</i>) pada TQI 15 - 25 mm.....	139
Gambar 4.28 Tegangan (<i>Stress</i>) Wire Prestressed 713 Mpa (TQI 15 – 25)	139
Gambar 4.29 Tegangan tarik (<i>Tensile stress</i>) Rel type 54 pada TQI 25 – 40 mm	140
Gambar 4.30 Tegangan (<i>Stress</i>) Bantalan beton Type N-67 dan Perpindahan (<i>Displacement</i>) pada TQI 25 - 40 mm.....	141
Gambar 4.31 Tegangan (<i>Stress</i>) Wire Prestressed 713 Mpa (TQI 25 – 40)	141
Gambar 4.32 Tegangan tarik (<i>Tensile stress</i>) Rel type 54 pada TQI > 40 mm	142
Gambar 4.33 Tegangan (<i>Stress</i>) Bantalan beton Type N-67 dan Perpindahan (<i>Displacement</i>) pada TQI > 40 mm.....	143
Gambar 4.34 Tegangan (<i>Stress</i>) Wire Prestressed 713 Mpa (TQI > 40).....	143
Gambar 4.35 Korelasi Tegangan Tarik Bantalan Beton	146
Gambar 4.36 Korelasi Tegangan Tekan Bantalan Beton.....	147
Gambar 4.37 Korelasi Tegangan Tarik Tulangan.....	147
Gambar 4.38 Permodelan dengan nilai TQI = 52.5 mm.....	149

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Dengan mengucap 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 M.Januar Pratito,S.T dan Pak Bony selaku kepala resor 8.13 Sepanjang terima kasih atas bimbingan dilapangan dan motivasinya.
6. Teman-teman S-2 Prodi Teknik Manajemen Jalan Rel Departemen Teknik Sipil ITS 2018 lainnya, terima kasih atas semangat perjuangan yang telah diberikan.
7. 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, Desember 2019

Penulis

“Halaman Sengaja Dikосongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pulau Jawa merupakan salah satu Pulau dengan jaringan konektivitas perkeretapiian 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, Amah, Pasila, & Budiono, 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 dan 8.12 (Survey pendahuluan). Jalur ini termasuk dalam wilayah Daerah Operasi VIII Surabaya. Surabaya sendiri adalah pusat ekonomi Jawa Timur dimana efektifitas infrastruktur transportasi sangat penting untuk menjaga pertumbuhan ekonomi (Ravitharan et al. 2017).

Peranan jalur kereta api sendiri 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 penelitian Rosyidi pada tahun 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 sendiri dibagi menjadi dua bagian struktur yang terdiri dari beberapa kumpulan komponen – komponen yaitu struktur bagian atas dan struktur bagian bawah. Struktur jalan rel sendiri harus memenuhi beberapa persyaratan teknis yaitu kekakuan (*stiffness*), elastisitas (*elastic*), ketahanan terhadap deformasi tetap, stabilitas, dan kemudahan untuk pengaturan dan 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 (Rayhana, Ayi & Parikesit 2017) dalam (Simposium II -UNIID, 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 sendiri 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. 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 dari kereta ukur itu sendiri angka yang dapat memberikan informasi kualitas jalan rel yang dilewati pada suatu wilayah Daerah Operasi . Angka tersebut dibedakan menjadi 4 kategori yaitu kategori baik sekali, baik, sedang dan jelek. Metode pengukuran ini disebut *Track Quality Index (TQI)*. *Track Quality Index (TQI)* sendiri terdiri dari 4 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 segmen mewakili panjang 40 meter. Sedangkan untuk lebar spur 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 (Rayhana, Ayi &Parikesit 2017).

Penggantian komponen jalan rel biasanya diukur dari komponen terpasang dan umur layanan. Bantalan dan balas pada 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, daya angkut lalu lintas yang menggambarkan frekuensi gesekan antar roda kereta api dengan rel, dan jenis rel itu sendiri yang berkaitan (Rayhana, Ayi &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 ketidakrataan geometri 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 meter panjangnya, misalnya , tipe R 54 berarti rel memiliki berat sekitar 54 kg untuk setiap 1 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 yang diijinkan tergantung pada mutu rel yang digunakan. Untuk perencanaannya 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). Penelitian mengenai 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 benda uji, 2 benda uji dinyatakan memenuhi spesifikasi sedangkan 1 benda uji tidak memenuhi spesifikasi diakibatkan adanya retak struktural pada pengujian momen positif terhadap beban desain (Purwanto 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, Dwi & Djamaludin 2016).

1.2. Rumusan Masalah

Menurut Kurniawan pada tahun 2015 kereta ukur yang digunakan di lintas pulau jawa yaitu EM -120 yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi geometri rel secara keseluruhan, Sedangkan menurut Esveld pada tahun 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). Penelitian eksperimental tentang perilaku struktur bantalan beton di Indonesia pada kondisi ideal pernah diteliti (Puspasari et al.,2016) ,(Purwanto, 2008), dan (Rezaie, Bayat A., and Farnam 2016)

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 hasil analisa perbedaan hasil yang lebih dari satu centimeter nilai *Track Quality Index (TQI)* dengan KA Galunggung pada tahun 2018 dan EM-120 pada tahun 2019. Hasil nilai aktual akan dijadikan pedoman perletakan dalam perhitungan struktural. Sedangkan kondisi struktural pada kondisi ideal dihitung secara teoritis dan divalidasi dengan penelitian sebelumnya. Dengan diadakannya penelitian ini diharapkan dapat mengurangi permasalahan turunnya kualitas lintasan jalan rel dengan mengetahui nilai kualitas lintasan per segmen 200 meter untuk dasar penentuan kategori pemeliharaan dan

mengetahui perilaku struktur bantalan pada kondisi geometri secara horisontal dan vertikal sesuai dengan hasil analisis *Track Quality Index* (TQI) . Hasil yang diharapkan adalah untuk mengetahui perilaku struktur bantalan pada pada setiap kategori penentuan pemeliharaan.

Adapun rumusan masalah tersebut adalah :

1. Bagaimana hasil analisis *Track Quality Index* (TQI) pada 4 parameter penilaian berdasarkan standar perkeretaapian Indonesia ?.
2. Bagaimana perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori ($TQI \leq 15$) ?.
3. Bagaimana perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori ($15 \leq TQI \leq 25$) ?.
4. Bagaimana perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori ($25 \leq TQI \leq 40$) ?.
5. Bagaimana perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori ($TQI > 40$) ?.

1.3. Tujuan Penelitian

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

1. Mengetahui hasil analisis *Track Quality Index* (TQI) pada 4 parameter penilaian dengan menggunakan standar perkeretaapian Indonesia.
2. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori ($TQI \leq 15$) ?.
3. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori ($15 \leq TQI \leq 25$) ?.
4. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori ($25 \leq TQI \leq 40$) ?.
5. Mengetahui perilaku bantalan beton pada nilai *Track Quality Index* (TQI) kategori ($TQI > 40$) ?.

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 bantalan beton sesuai dengan nilai kategori kualitas.
3. 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 dan pertinggian.
8. Tidak memperhitungkan keausan rel di lapangan.

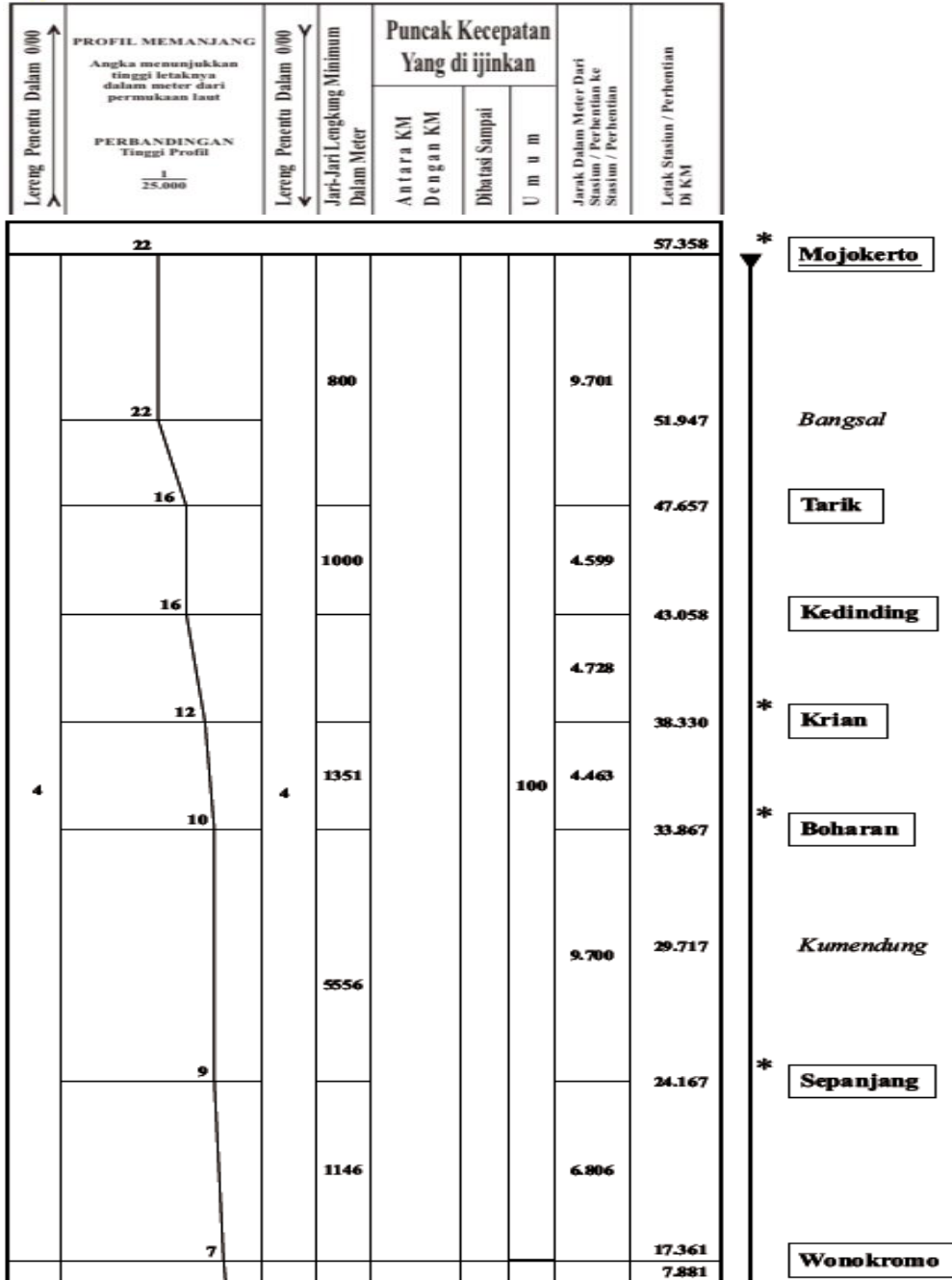
1.6. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah lintas stasiun Wonokromo – Stasiun Mojokerto meliputi 2 (Resor 8.13 Sepanjang dan Resor 8.14 Mojokerto) dengan panjang total 39.997 meter, yang di dapat dari grafik perjalanan kereta api tahun

2017 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.

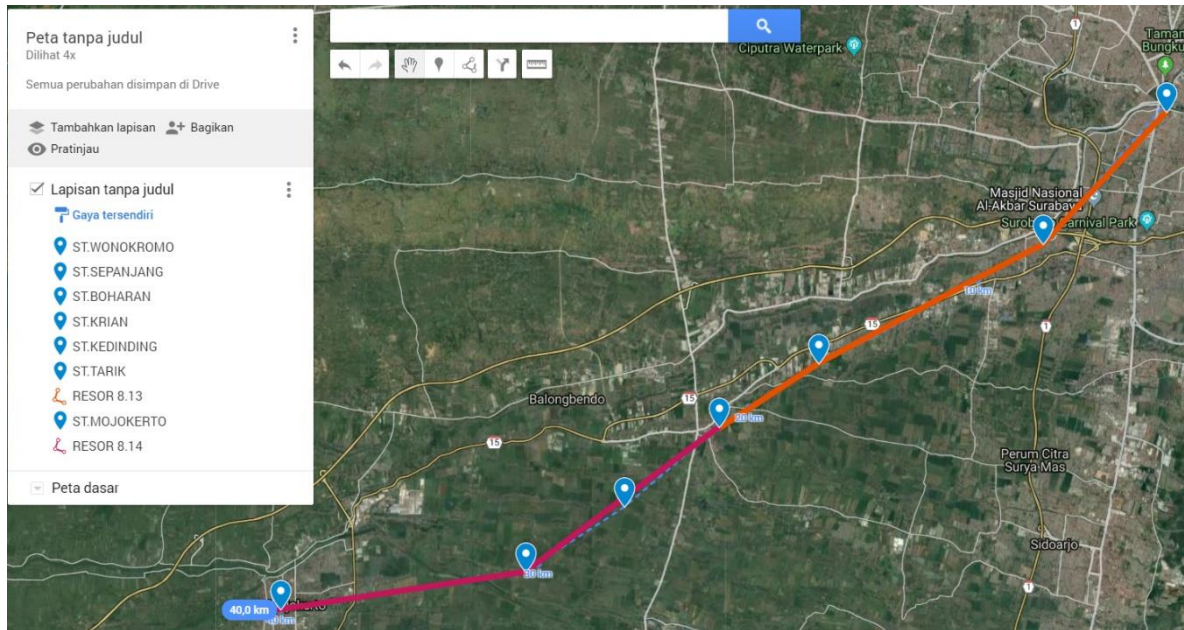


LAMPIRAN I
KEPUTUSAN DIREKTUR JENDERAL PERKERETAAPIAN
NOMOR : KA.407/SK.332/DJKA/12/16
TANGGAL : 29 Desember 2016



Gambar 1.1 Panjang Lintas

(Sumber : PT.Kereta Api Indonesia, 2017)



Gambar 1.2 Lokasi Penelitian

(Sumber : <https://www.google.com/maps/d/edit/mid>, Diakses tanggal 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 dari kereta ukur itu sendiri angka yang dapat memberikan informasi kualitas jalan rel yang dilewati pada suatu wilayah daerah operasi. Angka tersebut dibedakan menjadi 4 kategori yaitu kategori baik sekali, baik, sedang dan jelek. Metode pengukuran ini disebut *Track Quality Index (TQI)*. *Track Quality Index (TQI)* sendiri terdiri dari 4 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 segmen mewakili panjang 40 meter. Sedangkan untuk lebar spur satu segmen mewakili panjang 20 meter. Menurut Esveld pada tahun 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) 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. KAI 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 track di lintas Jawa, yang digunakan untuk mengukur kondisi geometri rel secara keseluruhan seperti : lebar spur (jarak antar kepala rel terluar), pertinggian, angkatan dan listringan dengan hasil pembacaan dalam satuan panjang yaitu millimeter (Kurniawan 2015). Bentuk dari kereta ukur EM-120 dapat dilihat pada Gambar 2.1. Dirjen Perkeretaapian juga mempunyai KA ukur yaitu KA.Galunggung Seperti Gambar 2.2

2.3.1. Kereta Ukur Jalan Rel

Kereta ukur yang dimiliki PT. Kereta Api Indonesia (Persero) adalah kereta ukur EM120 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 Kereta ini digunakan untuk mengukur kondisi geometri jalan rel secara keseluruhan seperti (angkatan, listringan, skilu, pertinggian, lebar spur) dengan waktu yang telah ditentukan. Kereta ini berjalan 1 tahun sekali tiap bulan Juni (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 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) bogi yang masing-masing terdiri dan 2 (dua) gandar dan satu gandar pengukur. Gandar pengukur ini dihubungkan pada bogi dengan batang teleskopis longitudinal. Gandar pengukur ini dapat diangkat bila tidak mengukur.
2. Rangka
Rangka terbuat dari batang dan pdat baja yang dilas dan dirancang untuk dapat melewati lengkung dengan radius minimal 140 m.
3. Roda Penggerak
Dari ketiga bogi 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 dua tahap yaitu suspensi primer dengan per chevron type 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 elektronk dan udara tekan dipasang pada kedua ujung kereta. Alarm pada meja operator untuk memberi peringatan hilangnya tekanan pada roda pengukur, juga bila 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 dlgabungkan dengan mesin memasok tekanan udara sampai 7 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 meliputi kesiapan kereta, kesiapan personil dan kesiapan alat ukur. Kesiapan kereta meliputi pemeriksaan mesin disel, generator, BBM, pelumas, peralatan komputer, mekanik, elektronik dan pneumatic serta semboyan yang harus dibawa dalam perjalanan. Kesiapan personil adalah kesiapan operator masing-masing peralatan yang beroperasi di kereta. Sedang 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

Walaupun 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 selalu 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 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 dan angka. Ini berlaku untuk parameter angkatan, listringan dan lebar sepur, sedang untuk pertinggian dan skilu sinyal yang berasal dari inclinometer dikirim ke ADC terus 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.

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 lokalnya. Hasil yang berupa angka terbagi merupakan hasil dari *Track Quality Index* (TQI).

1. Grafik

Pada Grafik ditampilkan 10 lajur, yaitu :

a. 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

b. Lajur kedua dan ketiga adalah grafik kerusakan angkatan rel kiri dan rel kanan (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.

c. Lajur keempat adalah grafik kerusakan lebar sepur

- d. 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.
- e. Lajur keenam adalah grafik kerusakan pertinggian dengan skala 1:4
- f. Lajur ketujuh dan kedelapan adalah grafik kerusakan listringan kiri dan listringan kanan
- g. Lajur kesembilan adalah grafik goyangan vertical badan kereta (tidak berpengaruh terhadap hasil pengukuran) CBMV = Car Body Motion Vertical
- h. 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 :

- a. letak kerusakan
- b. jenis kerusakan
- c. panjang kerusakan, dan
- d. 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

(Sumber : www.picdov.com/tag/KUJR/Aksarasundana, Diakses tanggal 05 Mei 2019)



Gambar 2.2 KA.Galunggung

(Sumber : <https://stalktr.net/tag/kaurgalunggung>, Diakses tanggal 05 Mei 2019)

2.3.2. Parameter Pengukuran

Berdasarkan Standar Perkeretaapian Indonesia, terdapat 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 sepur dihitung 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 dihitung standard deviasinya untuk setiap jarak 40 meter. Nilai TQI 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 menunjukkan 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 seperti yang 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 dengan kecepatan 60 s.d. 100 km/jam adalah seperti yang ditabelkan 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 vektomya 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 Daerah Operasi 8 Surabaya yaitu :grafik perjalanan kereta api / daftar kereta api yang melintas pada ruas Surabaya – Sidoarjo, susunan kereta serta berat gerbong.

Lintas kereta api direncanakan untuk melewati berbagai jumlah angkutan barang dan/ atau penumpang dalam suatu jangka waktu tertentu. Perencanaan konstruksi jalan rel harus direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat dipertanggungjawabkan 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. a) Untuk perencanaan struktur jalan rel. $V_{rencana} = 1,25 \times V_{maks}$. Kecepatan Maksimum Kecepatan maksimum adalah kecepatan tertinggi yang diijinkan untuk operasi suatu rangkaian kereta pada lintas tertentu. Kecepatan Komersil 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

Klasifikasi Jalan KA	Pasing Ton Tahunan (Juta Ton)	Perencanaan Kecepatan KA Maksimum V_{max} (km/jam)	Tekanan Gandar P max (ton)	Tipe Rel	Tipe dari Bantalan Jarak Bantalan (mm)	Tipe Alat Penambat	Tebal balas dibawah Bantalan (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
1	> 20	120	18	R60 / R54	<u>Beton</u> 600	EG	30	50
2	10 – 20	110	18	R54 / R50	<u>Beton/Kayu</u> 600	EG	30	50
3	5 – 10	100	18	R54/ R50/ R42	<u>Beton/Kayu/Baja</u> 600	EG	30	40
4	2,5 – 5	90	18	R54/ R50/ R42	<u>Beton/Kayu/Baja</u> 600	EG/ET	25	40
4	< 2,5	80	18	R42	<u>Kayu/Baja</u> 600	ET	25	35

(Sumber :Peraturan Dinas No.10, 1986)

2.5. Rel

Rel merupakan struktur balok menerus yang diletakkan di atas tumpuan bantalan yang berfungsi sebagai penuntun/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 itu, harus memiliki nilai kekakuan balok tertentu sehingga perpindahan beban titik roda dapat menyebar secara baik pada tumpuan di bantalan.

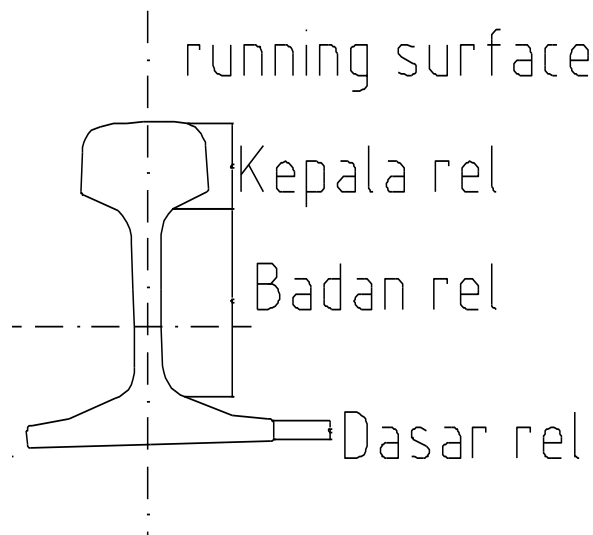
Rel juga berfungsi sebagai struktur pengikat dalam pembentukan struktur jalan reling kokoh. Oleh sebab itu, bentuk dan geometrik rel dirancang sedemikian sehingga dapat berfungsi sebagai penahan gaya akibat pergerakan dan beban kereta api. Pertimbangan yang diperluakan dalam membuat geometrik rel adalah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

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.

Pada Gambar 2.3 menerangkan 4 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

(Sumber : Esveld, 2001)

Ukuran/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 :

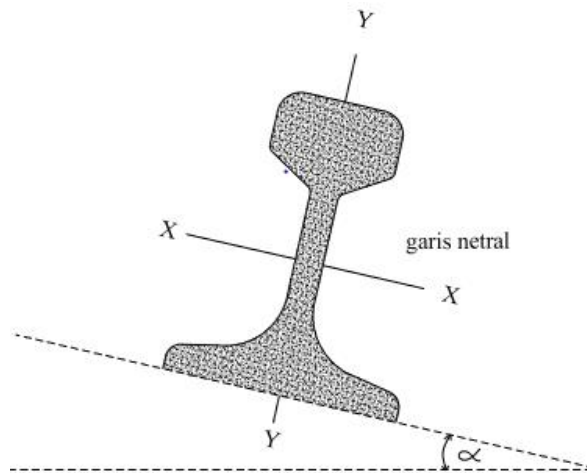
- 1) Rel standar adalah rel yang panjangnya 25 meter.
- 2) Rel pendek adalah rel yang panjangnya maksimal 100 m
- 3) Rel panjang adalah rel yang panjang tercantum minimumnya pada Tabel 2.8

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 emplasemen 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

(Sumber : 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.

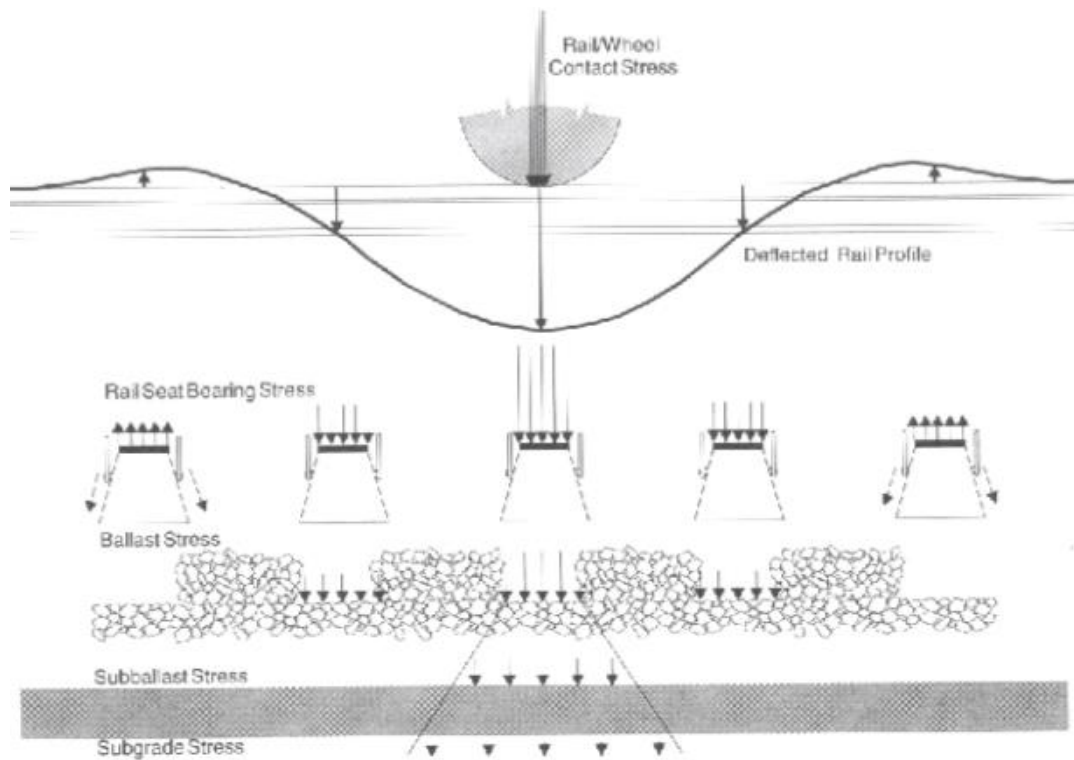
2. Diperlukan konstruksi penambat arah melintang supaya jarak antar bantalan tetap terpelihara dengan baik.
3. Bahan konstruksi yang tepat untuk bantalan membujur adalah konstruksi beton mengingat pertimbangan praktis dan teknisnya.

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 2.5 Pola Distribusi Pada Struktur Jalan Rel

(Sumber: 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 Standart 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 = minimum wheel diameter (m)

P_c = maximum axle load with wheels of diameter D (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

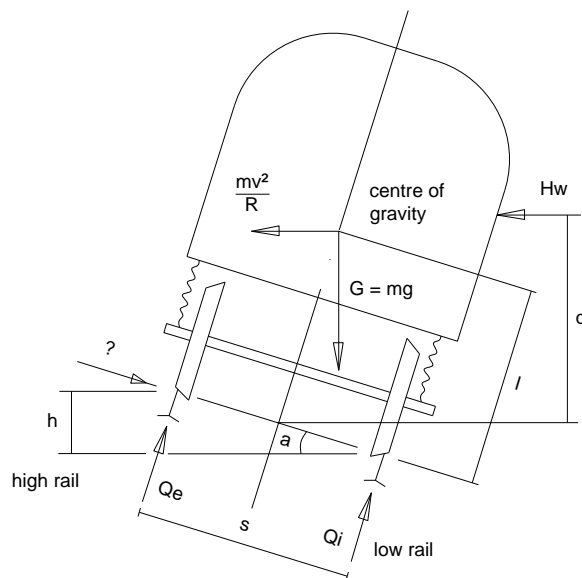
Rekor DB ICE dunia yang dibangun 1 mei 1988 dapat melaju dengan kecepatan 406.9 km/jam

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 2.6 Beban Yang Bekerja Pada Lintasan

(Sumber: 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.

a. Gaya Lokomotif (*locomotive*), Jenis lokomotif akan menentukan jumlah bogie dan gandar yang akan mempengaruhi berat beban gandar di atas rel yang dihasilkannya.

b. 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.

c. 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 = 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

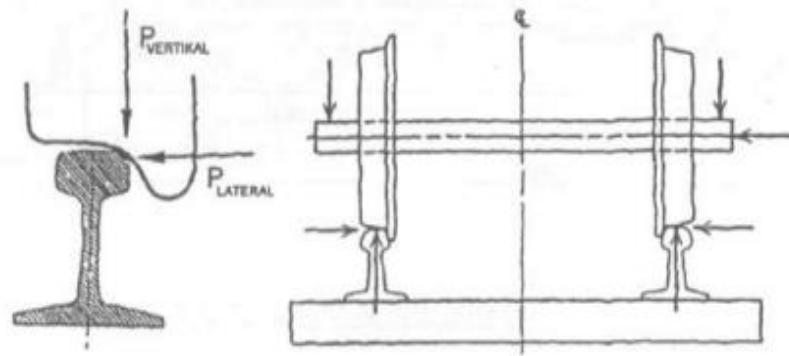
Y_{centr} = Gaya lateral akibat gaya sentrifugal

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 2.7 Gaya Horizontal

(Sumber: 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 untk 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

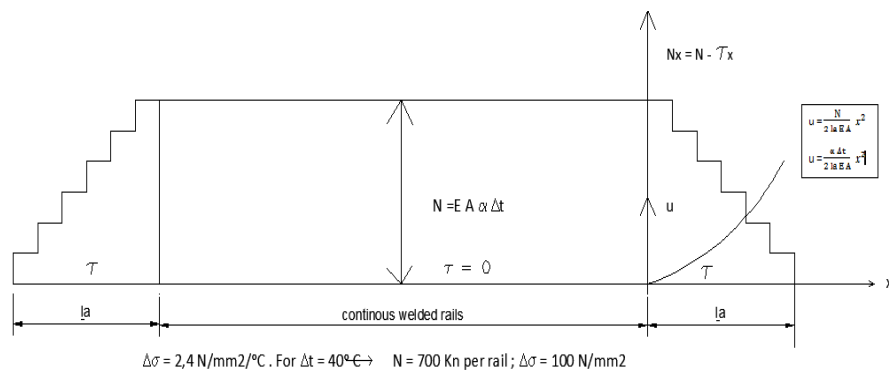
A = luas penampang rel

2. Rangkai pada lintasan

Rangkai pada lintasan dapat disebabkan oleh : peningkatan kekuatan CWR, terlalu besar atau terlalu kecil sela pada sambungan (*join*) lintasan, ketidakteraturan rangkai 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.

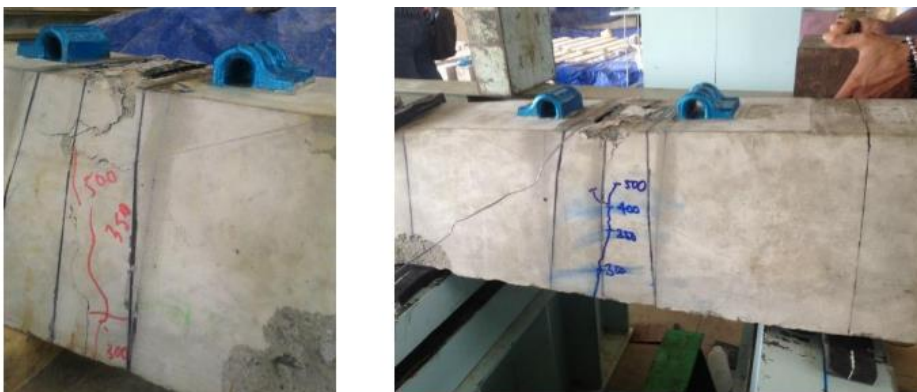


Gambar 2.8 Distribusi Tekanan Temperatur CWR

(Sumber: Esveld, 2001)

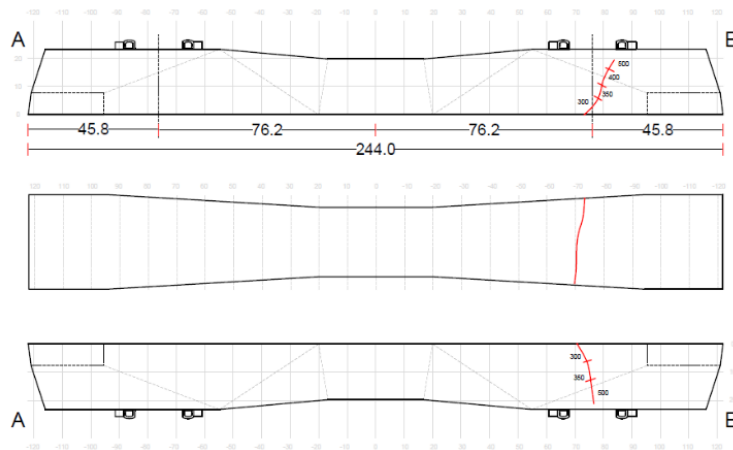
2.8. Penelitian Eksperimental

Dilakukan oleh (Puspasari, Dwi & Djamaludin 2016) yang menghasilkan nilai lendutan 0.681 mm pada posisi dukungan 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 dukungan 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 2.9 Pola Retak Momen Dudukan B

(Sumber : Puspasari, Dwi & Djamaludin, 2016)



Gambar 2.10 Sketsa Pola Retak pada Pengujian Momen Dudukan B
(Sumber : Puspasari, Dwi & Djamaludin, 2016)

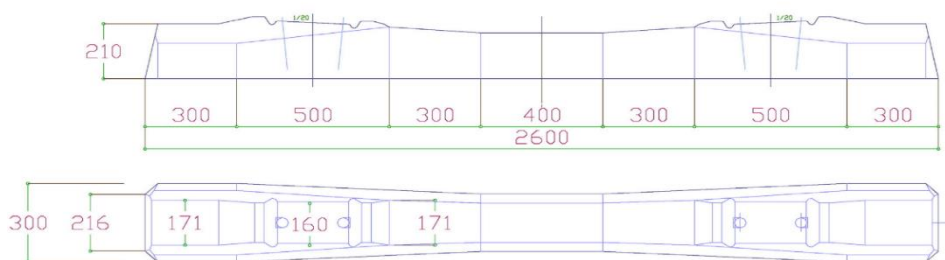
2.9. Permodelan Numerik Bantalan Beton Prestressed

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

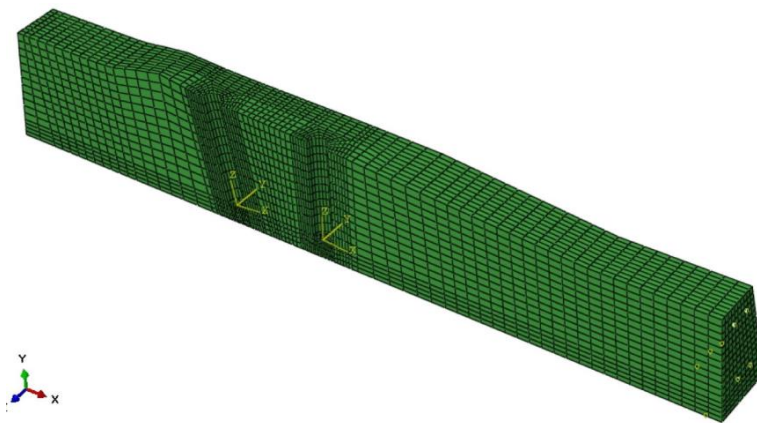
(Sumber : Rezaie et al., 2016)



Gambar 2.11 Monoblok tipe B70

(Sumber : 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.



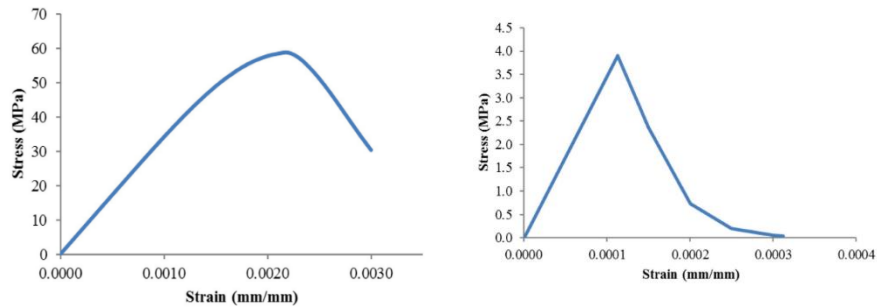
Gambar 2.12 Permodelan Monoblock dengan ABAQUS

(Sumber : Rezaie 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 kontinu 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* $f_c' = 60$ Mpa pada Gambar 2.12



Gambar 2.13 Strain – stress beton $f_c = 60$

(Sumber : 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 :

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

$$\sigma_r = f_{cr} (\epsilon_{cr} / \epsilon_r)^{0,4} \text{ untuk } \epsilon_r > \epsilon_{cr}$$

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)

$$\sigma_{st} = f_u + (f_y - f_u) (\epsilon_u - \epsilon_{st} / \epsilon_u - \epsilon_{sh})^P \text{ untuk } \epsilon_{sh} < \epsilon_{st} \leq \epsilon_u .$$

dan

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

Dimana :

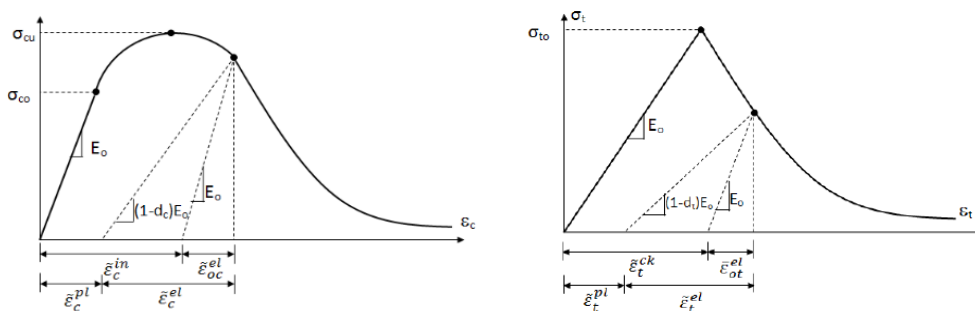
f_u = Kuat tarik ultimit

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 2.14 Perilaku beton dengan gaya axial tekan dan tarik

(Sumber : Saatcioglu & Razvi, 1999)

Gambar 2.12 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 $\psi=40\%$ dan $\nu=0.001$.

“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 1.12 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 : Angkatan, 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 : Angkatan, 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

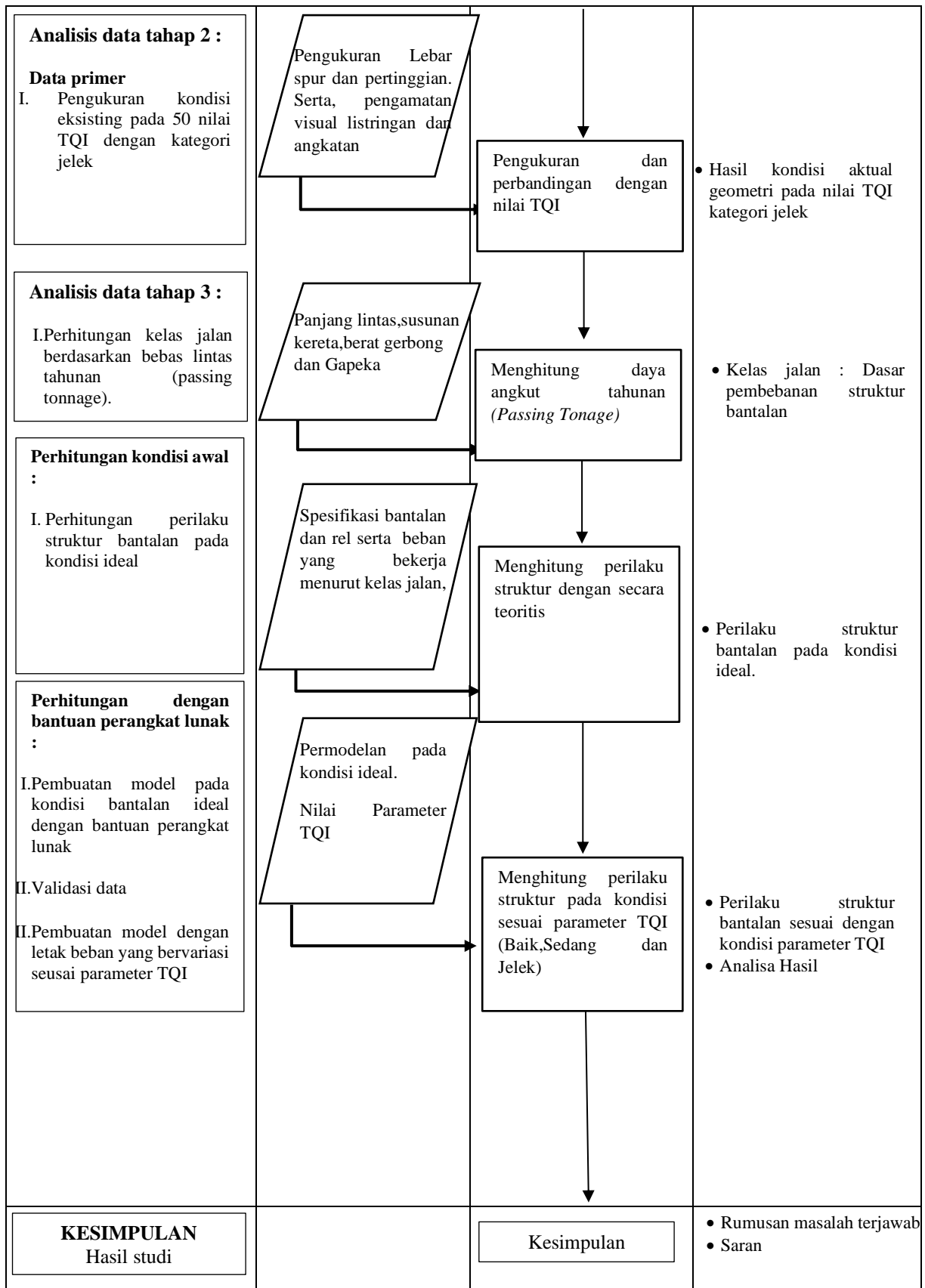
3.1. Umum

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.

<i>Tahapan</i>	<i>Input</i>	<i>Proses</i>	<i>Output</i>
<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 subgraph Input I1[/Data hasil pengukuran dengan Kereta Ukur EM -120/] I2[/Nilai pada setiap parameter hasil pengukuran/] I3[/Nilai parameter setiap segmen/] end subgraph Proses P1[Pengolahan data] --> P2[Parameter Pengukuran TQI] P2 --> P3[Pengelompokan data hasil pengukuran setiap segmen 200 m] P3 --> P4[Perhitungan nilai setiap parameter dengan standart deviasi] end I1 --> P1 I2 --> P1 I3 --> P4 </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*), standart 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 Daerah Operasi 8 Surabaya selaku pengelola stasiun 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). Apabila peneliti tidak mendapatkan ijin dalam pengukuran dilapangan ,maka data primer ini akan menjadi data sekunder yang di dapatkan dari hasil pengukuran sebelumnya yang di dapat dari PT.Kereta Api Indonesia (Persero).

3.3.4.2. Data Sekunder

Dalam menyusun penelitian ini diperlukan data sekunder sebagai data pendukung dari suatu analisis. Data sekunder dalam penulisan 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 (km)	MPFT (m)	LPROF (40m)	RPROF (40m)	total	LALIGN	RALIGN	total	GAUGE	XLEVEL
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.

Track Quality Index (TQI) sendiri terdiri dari 4 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 vektomya berbeda. Standar nilai TQI yang digunakan PT. Kereta Api Indonesia (Persero).

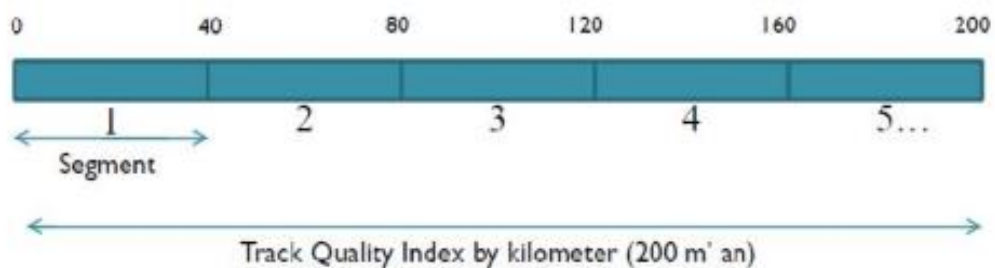
Tabel 3.2 Batasan (thresholds) Nilai Kerusakan per Kategori

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

(Sumber : 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) dengan nilai kategori jelek. Pada lokasi terjelek akan dilakukan pengukuran kondisi geometri dengan bantuan alat ukur manual yang dapat mengukur beda tinggi dan jarak. Dari hasil pengukuran manual akan didapatkan nilai parameter lebar spur eksisting dan pertinggian eksisting. Untuk parameter listringan dan angkatan hanya dilihat secara visual karena nilai parameter listringan berkaitan dengan lebar spur dan nilai parameter angkatan berkaitan dengan pertinggian.

Contoh hasil dari kereta ukur menunjukkan :

L.Align = 20 mm

R.Align = 17 mm

Maka prediksi hasil pembacaan L.Gauge = 37 mm / 3 mm / - 3 mm jika menyimpang dari nilai tersebut maka kondisi rel bergeser. Untuk mengetahui pasti kondisi tersebut maka harus dilakukan pengamatan secara visual. Contoh alat akur yang dapat digunakan seperti pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4



Gambar 3.3 Alat Ukur Manual

(Sumber : <https://indonesian.alibaba.com/g/rail-gauge.html> ,Diakses tanggal 8 Agustus 2019)



Gambar 3.4 Cara Kerja Alat Ukur Manual

(Sumber : 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 Daerah Operasi 8 Surabaya yaitu :grafik perjalanan kereta api / 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 & 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 & 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 & 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 :

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

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

dimana ;

T = Kapasitas angkut lintas (ton/tahun),

T_E = Tonase ekivalen (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*).

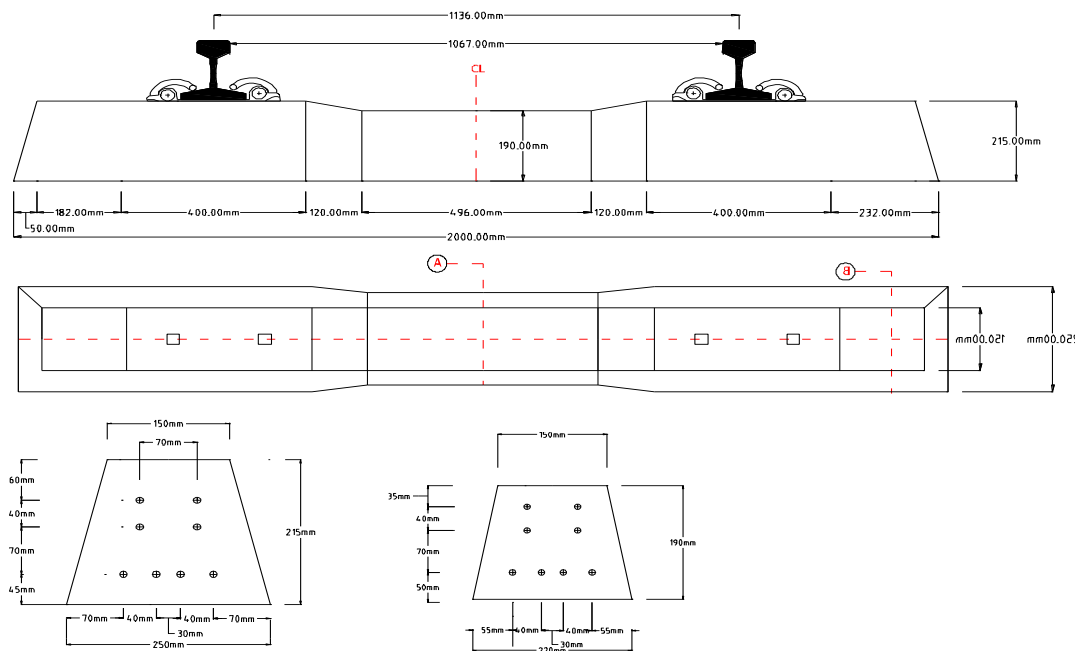
Tabel 3.6 Tegangan Ijin

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.



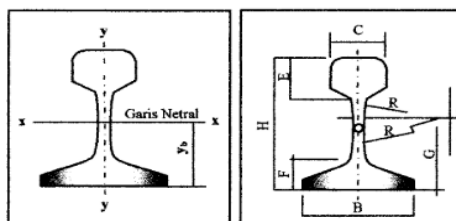
Gambar 3.5 Dimensi Bantalan Beton

(Sumber : WIKA, 2016)

Data Perencanaan :

- I Bantalan N-67 Wika Beton
- 1 Ukuran Balok = 2000 mm x 250 mm x 215 mm
 - 2 Tulangan Tarik (PC Wire) = 8 ϕ 9
 - 3 Kuat Tekan Beton (F_c') = 52 Mpa / K.600 (Koefisien 0.83)
 - 4 Kuat Leleh Baja (F_y) = 1400 Mpa
 - 5 Elastistas Beton Normal (E_c) = $4700 \times \sqrt{F_c}$
= 33892.183 Mpa
 - 6 Modulus Elastistas Baja (E_s) = 200000 Mpa
 - 7 Modulus Keruntuhan (F_r) = $0.7 \times F_c'^{0.5}$
= $0.7 \times 52^{0.5}$
= 5.04778
 - 8 Berat Jenis Beton (γ_c) = 2400 kg/cm³
 - 9 Luas Tulangan Prategang (A_{ps}) = 8 ϕ 9
= $(3.14 \times 9 \times 9) \times 8$
= 508.68 mm²
 - 10 Kuat TarikTendon (F_{pu}) = 14460 kg/cm²
= 1446 N/mm²
 - 11 Angka Ekuivalensi Beton Baja (n)
= E_s / E_c
= 5.90106
 - 12 **Dimensi Bawah Rel**
Luas Penampang (A_1) = 430 cm²
Momen Inersia (I_{X-1}) = 15139.09 cm⁴
Momen Tahanan Atas ($W_{1(a)}$) = 1460.60 cm³
Momen Tahanan Bawah ($W_{1(b)}$) = 1571.26 cm³
 - 13 **Dimensi Tengah Bantalan**
Luas Penampang (A_2) = 351.5 cm²
Momen Inersia (I_{X-2}) = 10190.02 cm⁴
Momen Tahanan Atas ($W_{2(a)}$) = 1125.35 cm³
Momen Tahanan Bawah ($W_{2(b)}$) = 1206.63 cm³

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

(Sumber: Peraturan Dinas No.10, 1986)

II Rel Tipe R.54

Tipe Rel yang digunakan pada Lintas **Surabaya - Mojokerto R.54**

- 1 Kecepatan Maksimum (V_{maks}) = 120 km/jam
- 2 Kecepatan Rencana ($V_{rencana}$) = $1.25 \times V_{rencana}$
= 150 km/jam
- 3 Tekanan Gandar = 18 Ton (*PD.10 1986*) kelas I
- 4 Jenis Rel = R.54
- 5 Momen Inersia (I_x) = 2346 cm^4
- 6 Luas Penampang (A) = 69.34 cm^2
- 7 Jarak Tepi Bawah Garis Netral (I_y) / Y_b
= 76.2 mm
- 8 Modulus Kekakuan Rel (K) = 180 kg/cm^2 (*PD.10 1986*)
- 9 Panjang Rel Per Batang = 24 m
- 10 Modulus Elastisitas Rel (E) = 210000 Mpa

III Perhitungan Kondisi Ideal

1 Analisa Beban Dinamis Dengan Persamaan Talbot

(Formulasi Talbot)

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

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

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

2 Perhitungan Dumping Faktor Rel (Reduksi / Pengurangan)

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

3 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

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

4 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 $127.1337089 < 1176.80$

Dimana, Tegangan Ijin R.54

$$\sigma_{\text{ijin}} = 1325 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{base}} = 1176.8 \text{ kg/cm}^2 \quad (PD.10 1986)$$

[OK .!]

5 Beban yang diterima Bantalan

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

Analisa Nilai Modulus Elastisitas Berdasarkan Fc'u

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

6 Perhitungan Dumping Faktor Bantalan(Reduksi / Pengurangan)

Bawah Rel

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

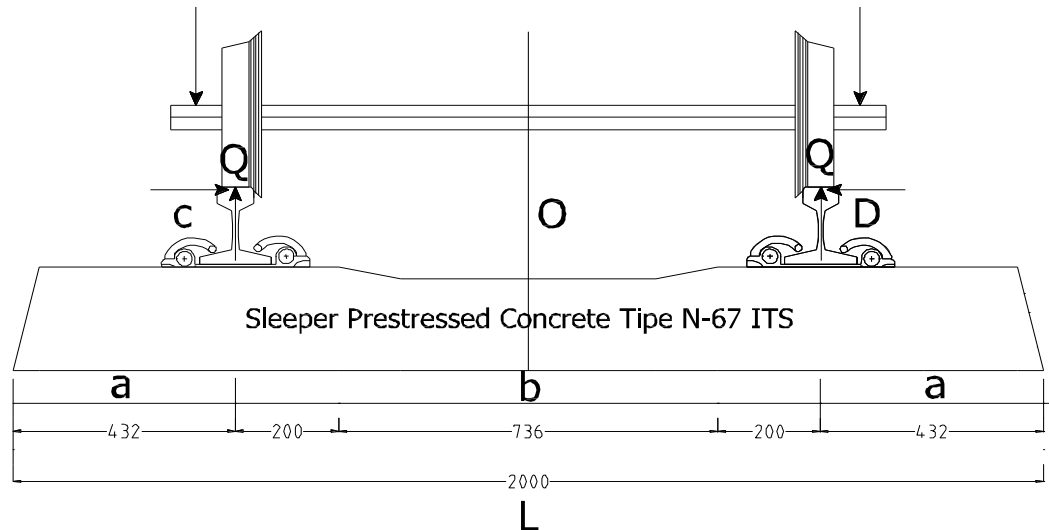
Tengah Bantalan

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

$$= 0.01295524 \text{ cm}$$

7 Perhitungan Momen

Letak beban yang pada bantalan beton dapat dilihat pada Gambar 3.7



Gambar 3.7 Letak Beban

$$\begin{aligned} M_{\text{desain}} &= 150000 \text{ kg/cm} + \\ &= 75000 \text{ kg/cm} - \\ &= 66000 \text{ kg/cm} + \\ &= 93000 \text{ kg/cm} - \end{aligned}$$

(PT. Wijaya Karya, 2016)

Momen yang bekerja pada titik C dan D

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

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

Momen yang bekerja pada titik O

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

Maka momen yang bekerja pada titik O $50572.43 < 75000$

[OK !]

8 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, $\sigma_{ijin} = 0.4 F_c$

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

$$= \frac{514885.896}{430} + \frac{514885.896 \times 0.135}{1571.26}$$

$$= 1149.819306 \text{ N/cm}^2$$

$$= 114.98 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{[OK !]}$$

2 Bawah Rel (Sisi Bawah)

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

$$= \frac{514885.896}{430} + \frac{514885.896 \times 0.135}{1571.26}$$

$$= 1241.647185 \text{ N/cm}^2$$

$$= 124.16 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{[OK !]}$$

3 Tengah Bantalan (Sisi Atas)

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

$$= \frac{514885.896}{351.5} + \frac{514885.896 \times 1.055}{11125.35}$$

$$= 1947.523118 \text{ N/cm}^2$$

$$= 194.75 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{[OK !]}$$

4 Tengah Bantalan (Sisi Bawah)

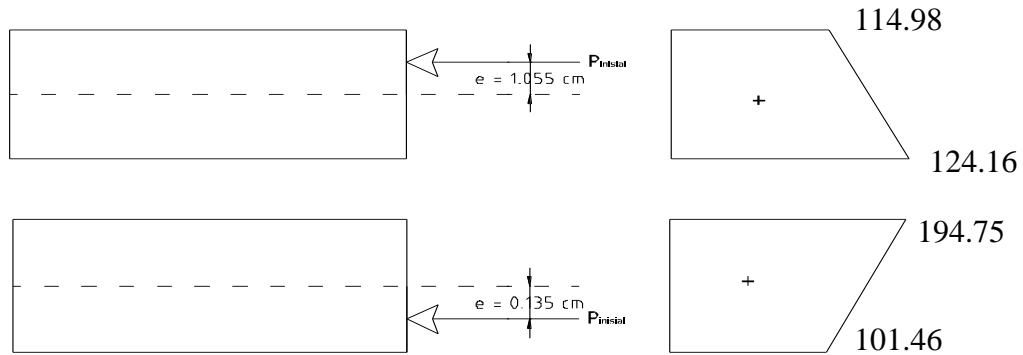
$$\sigma = \frac{P_{inisial}}{A} - \frac{P_{inisial} \cdot e}{W}$$

$$= \frac{514885.896}{351.5} - \frac{514885.896 \times 1.055}{11125.35}$$

$$= 1014.641485 \text{ N/cm}^2$$

$$= 101.46 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2 \quad [\text{OK .!}]$$

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

1 Bawah Rel (Sisi Atas)

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

$$= \frac{411908.7168}{430} - \frac{411908.7168 \times 0.135}{1460.60} + \frac{102123.2}{1460.60}$$

$$= 1325.370009 \text{ N/cm}^2$$

$$= 132.54 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2 \quad [\text{OK .!}]$$

2 Bawah Rel (Sisi Bawah)

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

$$= \frac{411908.7168}{430} + \frac{411908.7168 \times 0.135}{1571.26} - \frac{102123.2}{1571.26}$$

$$= 1169.502988 \text{ N/cm}^2$$

$$= 116.95 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2 \quad [\text{OK .!}]$$

3 Tengah Bantalan (Sisi Atas)

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

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

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

$$= 830.640 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2 \quad [\text{OK .!}]$$

4 Tengah Bantalan (Sisi Bawah)

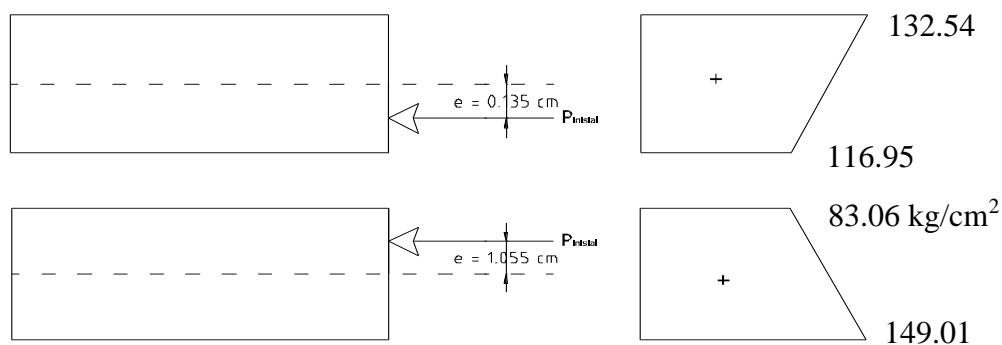
$$\sigma = \frac{P \text{ efektif}}{A} - \frac{P \text{ efektif} \cdot e}{W} + \frac{Mc/d}{W}$$

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

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

$$= 149.01 \text{ kg/cm}^2 < 240 \text{ kg/cm}^2 \quad [\text{OK .!}]$$

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

9 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

1 Bawah Rel (Sisi Atas)

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

$$= \frac{132.54}{156767.3}$$

$$= 0.000845457$$

$$= 845.347 \times 10^{-6}$$

$$= 0.085\%$$

2 Bawah Rel (Sisi Bawah)

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

3 Tengah Bantalan (Sisi Atas)

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

4 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%

10 Analisa Lendutan

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

Dimana,

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

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

$$\Delta l = \varepsilon \times l_0$$

1. Bawah Rel (Sisi Atas)

$$\begin{aligned}\Delta l &= \varepsilon \times l_0 \\ &= 845.457 \times 10^{-6} \times 752\end{aligned}$$

$$= 0.636 \text{ mm}$$

2. Bawah Rel (Sisi Bawah)

$$\begin{aligned}\Delta_l &= \xi \times l_0 \\ &= 746.01 \times 10^{-6} \times 752 \\ &= 0.561 \text{ mm}\end{aligned}$$

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

3. Bawah Rel (Sisi Bawah)

$$\begin{aligned}\Delta_l &= \xi \times l_0 \\ &= 529.83 \times 10^{-6} \times 496 \\ &= 0.561 \text{ mm}\end{aligned}$$

4. Bawah Rel (Sisi Bawah)

$$\begin{aligned}\Delta_l &= \xi \times l_0 \\ &= 950.52 \times 10^{-6} \times 496 \\ &= 0.471 \text{ mm}\end{aligned}$$

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/cm^2 pada tengah bantalan Untuk lebih jelasnya validasi data hitungan teoritis disajikan pada Tabel 3.7

Tabel 3.7 Validasi Hitungan Teoritis

No		Lendutan (Δ_{max})		Regangan (ξ_{max})		Tegangan (σ_{max})	
		Hasil (mm)	Letak	Hasil	Letak	Hasil (kg.cm ²)	Letak
1	Puspasari, 2016	0.651	Bawah Rel	0.000837211	Bawah Rel	-	.-
2	Jaya, 2018	-	-	-	-	140.28	Tengah Bantalan
3	Teoritis	0.636	Bawah Rel	0.000845327	Bawah Rel	149.21	Tengah Bantalan
4	Perangkat Lunak	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

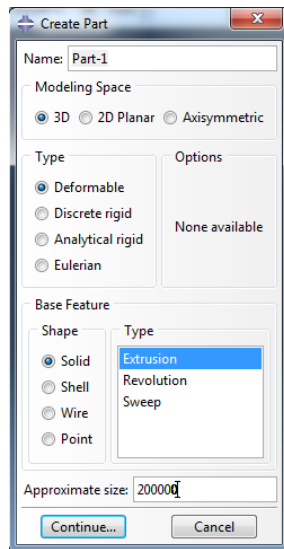
Pada tahap ini dilakukan pemodelan Bantalan type N-67 dengan menggunakan software Abaqus. Data - data properti dan geometri bantalan beton diinput ke dalam software Abaqus. Pemodelan *finite elemen* menggunakan software abaqus dilakukan dengan tahapan-tahapan tertentu antara lain:

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

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

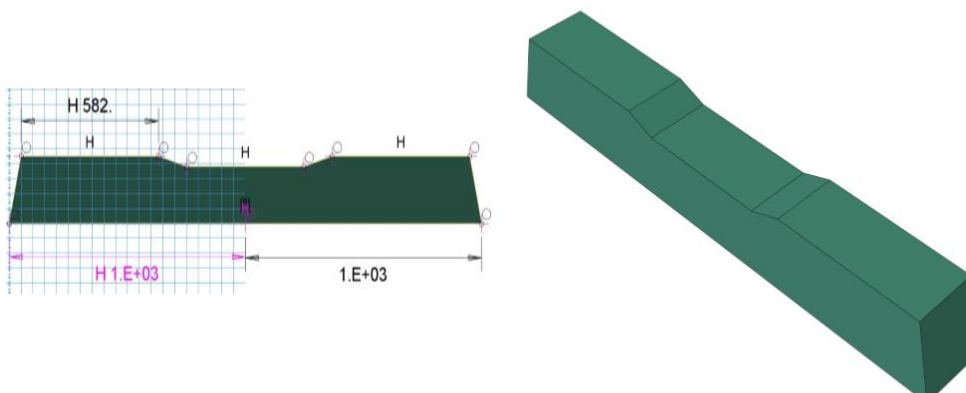
Dimana :

σ^f = Tegangan material

$\delta \varepsilon^f$ = Regangan material

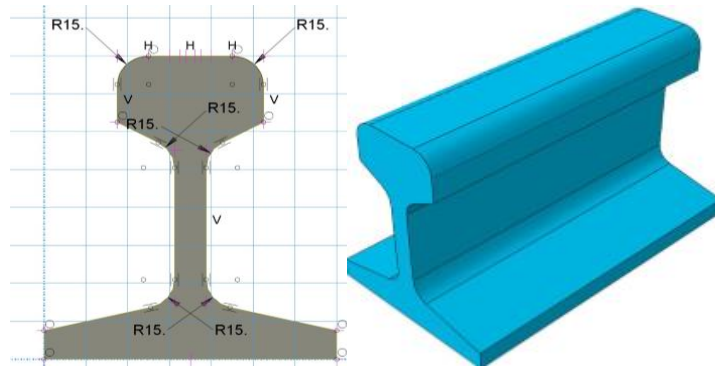
L^f = Panjang serat

Penampang part balok solid beton C3D8R seperti pada Gambar 3.9



Gambar 3.11 Sketsa Bantalan N-67 C3D8R

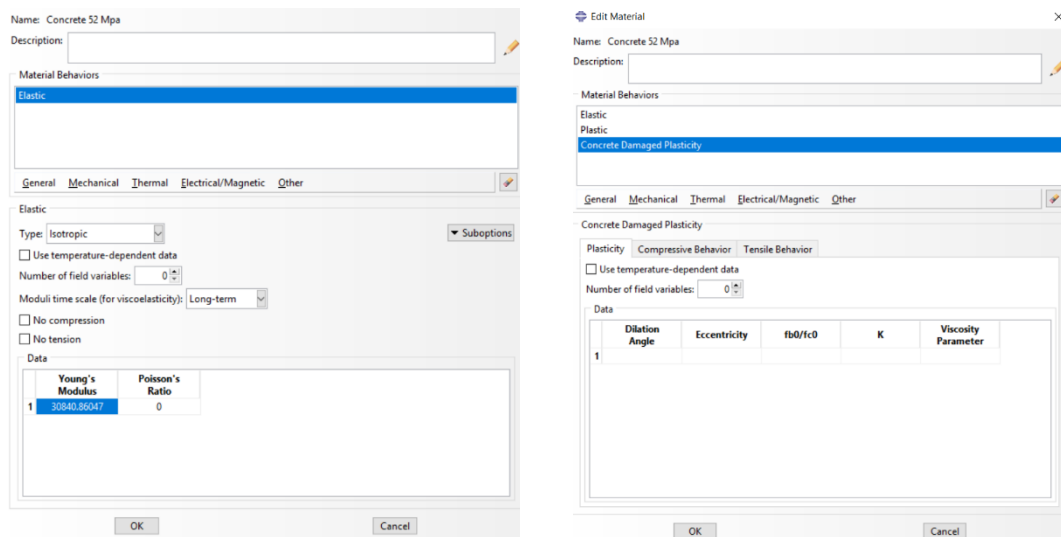
Permodelan Rel type R.54 didekati dengan elemen truss (T2D3) dengan luas penampang sesuai dengan PD 10 tahun 1986 seperti pada Gambar 3.12



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.

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

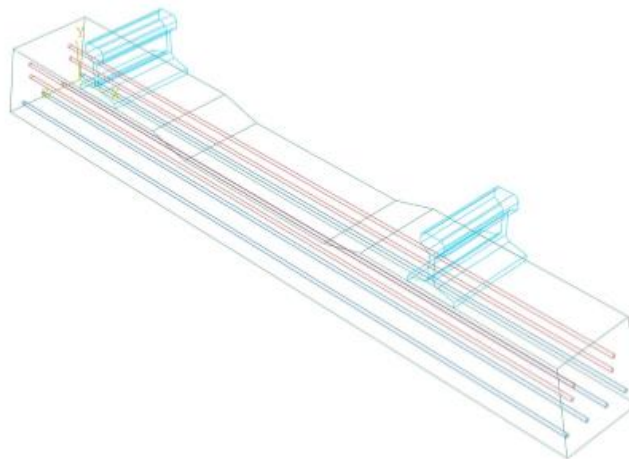
D_0 = Initial (undamaged) elastic stiffness

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

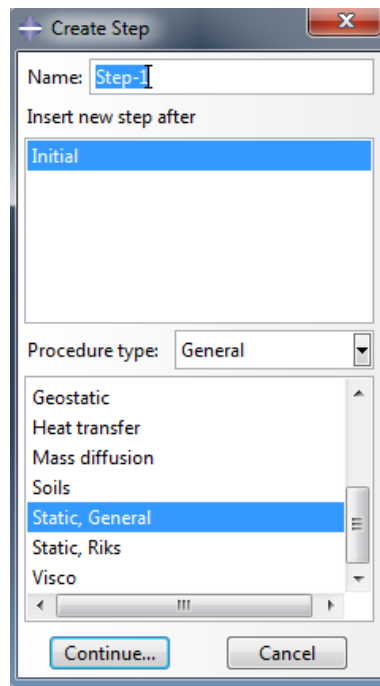
d. Menentukan *step* dan permintaan output

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

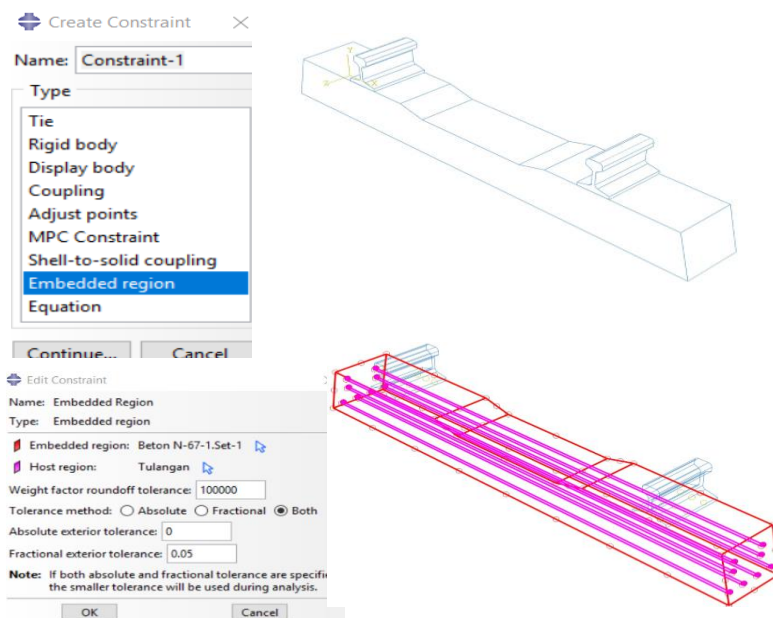
beban dinamis dengan persamaan Talbot sudah dihitung pada sub bab 3.3.5.4. sedangkan yang di inputkan adalah $= 60 \% \times P_d$. Untuk lebih jelasnya dilihat pada Gambar 3.15



Gambar 3.15 Input *Step* pada Abaqus

f. Constraints

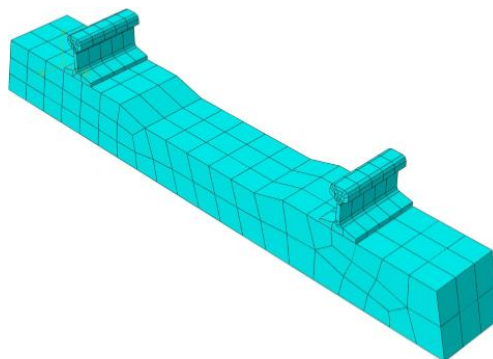
Pendefinisian *bonding* antar permukaan elemen ditetapkan pada langkah ini pada ABAQUS. *Constraints* yang digunakan pada pemodelan kolom monolits dan pracetak mutu tinggi adalah *embedded constraints* dan *tie constraints*. Seperti pada Gambar 3.16. ABAQUS 6.14 menyediakan teknik elemen *embedded* sebagai 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*

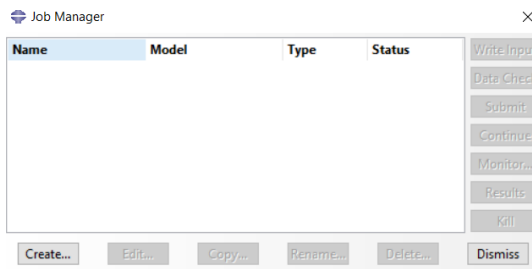
Meshing bertujuan untuk membagi setiap elemen menjadi potongan-potongan lebih kecil sehingga dapat dianalisis oleh abaqus dan didapatkan output dari nodal yang terbentuk. *Meshing* seperti pada Gambar 3.17



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

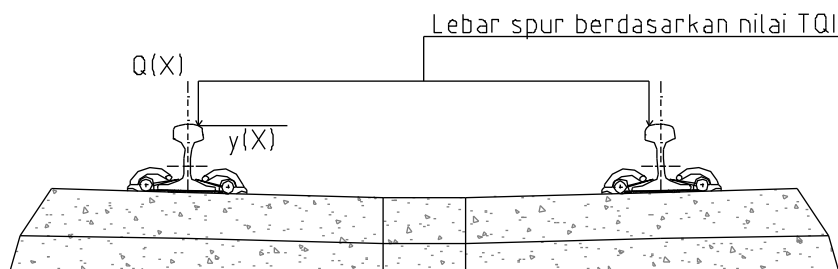
Setelah *running* model maka dipilih output yang akan dikeluarkan yaitu tegangan, regangan dan lendutan.

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.

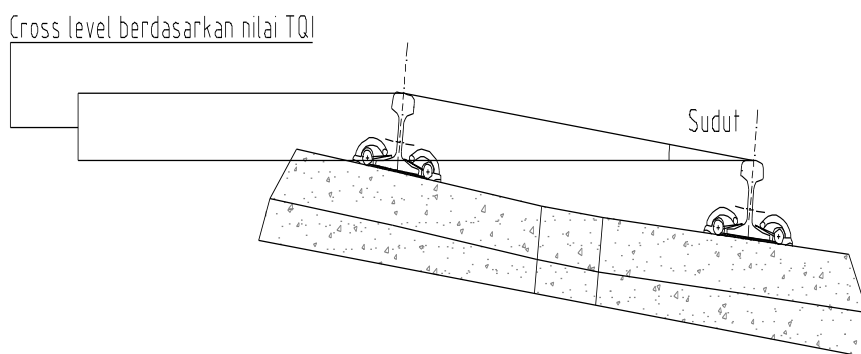
3.3.5.9. Permodelan Bantalan Beton type N-67 Dengan Hasil TQI Sesuai Kategori Kerusakan

Setelah parameter TQI didapatkan maka permodelan dengan abaqus kembali proses e menetapkan tumpuan dan aply load. Dengan dasar penelitan 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 Setelah Adanya Parameter Lebar Spor TQI

Penggelinciran 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. Dalam hal ini *flange* bisa terangkat menjauhi rel sehingga kereta dapat tergelincir. Untuk menghitung keseimbangan pendekia flens dapat menggunakan persamaan berikut: $\frac{Y}{Q} > tg(\beta + \emptyset)$ (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 Setelah Adanya Parameter Peninggian TQI

Setelah itu di running kembali pada masing – masing sesuai dengan nilai parameter TQI. Terdapat 4 kategori dalam penilaian kerusakan yaitu :

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

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 *kTrack Quality Indeks* (TQI) pada masing-masing kategori kerusakan.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Di dalam pembahasan ini, akan 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.

4.2. Pengolahan Data

Lokasi penelitian ini berada pada Lintas Selatan Jawa yaitu Surabaya – Mojokerto Resor 8.13 (Sepanjang) dan Resor 8.14 (Mojokerto) pada KM 17 – KM 57. Data bacaan kereta ukur diperoleh dari Dirjen Perkeretaapian. Data yang digunakan dalam perhitungan TQI 1 segmen adalah sepanjang 200 m ($200 \text{ m} = 800 \text{ data (M/4)}$). Berikut merupakan sebagian data bacaan dari kereta ukur K.A Galunggung pada KM 18+00 – 18+20 (1 segmen) yang disajikan dalam Gambar 4.1 yang masih berupa file asli dengan format *comma separated value* (CSV) harus di *delimited* pada ms.exel agar dapat dibaca. Hasil data yang sudah didelimited dapat dilihat pada Tabel 4.1. Untuk keseluruhan data dilampirkan pada lampiran.

```

DATE,RUN_ID,TQI_LPROF,TQI_RPROF,TQI_LALIGN,TQI_RALIGN,TQI_XLEVEL,TQI_GAGE,TQI_WARP,TQI_AVG_GAUGE_MEAN_SEGMENT_LEN,CTS,POSTED_SPEED,SPEEDMPH,POSTED_CLASS,ACTUAL_C
2018-09-18,2018091812,23.8,61.0,0.0,0.128,46.134,27.377,24.103,54.1065,7,100,T,0,17,1,0,0,0,99,0,0,0,0,-7.459607,112.520642,0,0,0,1363863475,1363863475,
2018-09-18,2018091812,78.74,52.68,0.0,0.107,9.502,5.239,79.140,23.1069,85,100,T,0,22,1,0,0,99,0,199,-7.459607,112.520642,-7.459495,112.521542,0,400,0,800,1363863475,1363863475,
2018-09-18,2018091812,65.13,34.54,0.0,0.085,09.83,6,141,93,58,61,1069,04,100,T,0,22,1,0,0,199,0,299,-7.459495,112.521542,-7.459415,112.522446,0,800,0,1200,1363863491,1363863507,
2018-09-18,2018091812,11.85,7.36,2.18,1.5,12.43,15.55,22.44,10.47,1069.62,100,T,0,24,1,1,0,299,0,399,-7.459415,112.522446,-7.459283,112.523343,0,1200,0,1600,1363863507,1363863522,
2018-09-18,2018091812,3.34,3.51,5.24,2.24,22.5,07,10,61,11,78,6,25,1069,06,100,C,0,32,1,1,0,399,0,499,-7.459283,112.523343,-7.45906,112.524224,0,1600,0,2000,1363863522,1363863533,
2018-09-18,2018091812,21.56,8.86,8.16,5.73,25.98,8,79,42,85,17,42,1069,24,100,C,0,39,1,1,0,499,0,599,-7.45906,112.524224,-7.458749,112.525077,0,2000,1,400,1363863533,1363863542,
2018-09-18,2018091812,3.94,1.99,10.31,6.13,5.3,11.05,8.84,6.79,1069,74,100,C,0,44,1,1,0,599,0,699,-7.458749,112.525077,-7.458355,112.525894,1,400,1,800,1363863542,1363863550,
2018-09-18,2018091812,5.2,4.43,7.44,4.52,11.47,9.19,22.51,9.25,1069,67,100,C,0,50,1,1,0,699,0,799,-7.458355,112.525894,-7.457877,112.526667,1,800,1,1200,1363863550,1363863557,
2018-09-18,2018091812,9.33,6.35,13.61,12.95,18.74,11.4,24.59,13.85,1068.46,100,T,0,54,1,1,0,799,0,899,-7.457877,112.526667,-7.45733,112.527393,1,1200,1,1600,1363863557,1363863564,
2018-09-18,2018091812,4.2,3.85,7.2,7.1,8.76,1.92,14.69,5.55,1065.35,100,T,0,58,1,1,0,899,1,0,-7.45733,112.527393,-7.456761,112.528101,1,1600,1,2000,1363863564,1363863570,
2018-09-18,2018091812,6.53,5.92,5.88,5.44,6.15,3.43,12.37,6.53,1064.98,100,T,0,61,1,1,1,0,1100,-7.456761,112.528101,-7.456191,112.528807,1,2000,2,400,1363863570,1363863576,
2018-09-18,2018091812,15.71,23.83,7.6,7.6,15.67,6.28,34.41,16.06,1064.59,100,T,0,64,1,1,1,1,100,2,000,-7.456191,112.528807,-7.455621,112.529514,2,400,2,800,1363863576,1363863581,
2018-09-18,2018091812,3.62,5.73,5.17,4.86,4.85,2.95,10.01,5.31,1065.05,100,T,0,67,1,1,1,200,1,300,-7.455621,112.529514,-7.455051,112.53022,2,800,2,1200,1363863581,1363863587,
2018-09-18,2018091812,4.53,5.78,5.54,8.22,8.44,3.65,14.81,7.85,1064.77,100,T,0,70,1,1,1,300,1,400,-7.455051,112.53022,-7.454482,112.530926,2,1200,2,1600,1363863587,1363863592,
2018-09-18,2018091812,2.23,2.6,5.45,4.17,3.97,3.71,7.11,4.32,1065.72,100,T,0,72,1,1,1,400,1,500,-7.454482,112.530926,-7.453915,112.531633,2,1600,2,2000,1363863592,1363863597,
2018-09-18,2018091812,2.4,2.38,7.15,9.58,3.63,3.96,6.59,5.1,1065.44,100,T,0,75,1,1,1,500,46,67,-7.453915,112.531633,-7.453346,112.532339,2,2000,3,400,1363863597,1363863601,
2018-09-18,2018091812,5.52,6.48,10.35,11.82,6.87,3.5,17.6,8.88,1064.36,100,T,0,78,1,1,46,67,46,167,-7.453346,112.532339,-7.452778,112.533045,3,400,3,800,1363863601,1363863606,
2018-09-18,2018091812,3.24,4.01,5.44,5.17,4.11,7.7,8.01,4.54,1065.67,100,T,0,80,1,1,46,167,46,267,-7.452778,112.533045,-7.452208,112.533751,3,800,3,1200,1363863606,1363863610,
2018-09-18,2018091812,2.06,3.51,9.63,8.21,5.27,2.88,10.49,6.01,1065.72,100,T,0,83,1,1,46,267,46,367,-7.452208,112.533751,-7.451641,112.534457,3,1200,3,1600,1363863610,1363863615,
2018-09-18,2018091812,15.42,13.56,11.71,11.12,10.13,48.17,89,11.9,1065.42,100,T,0,85,1,1,46,367,46,467,-7.451641,112.534457,-7.451071,112.535165,3,1600,3,2000,1363863615,1363863619,
2018-09-18,2018091812,7.12,5.46,18.31,15.21,6.8,2.95,13.44,9.88,1065.15,100,T,0,87,1,1,46,467,46,567,-7.451071,112.535165,-7.450501,112.53587,3,2000,4,400,1363863619,1363863623,
2018-09-18,2018091812,3.64,5.39,7.02,7.36,8.5,3.29,11.57,7.19,1064.8,100,T,0,90,1,1,46,567,46,667,-7.450501,112.53587,-7.449934,112.536575,4,400,4,800,1363863623,1363863627,
2018-09-18,2018091812,6.74,6.71,11.75,11.86,6.58,2.72,11.26,8.24,1065.29,100,T,0,91,1,1,46,667,46,767,-7.449934,112.536575,-7.449364,112.537283,4,800,4,1200,1363863627,1363863631,
2018-09-18,2018091812,4.82,7.39,12.12,10.35,3.64,7.8,9.17,6.6,1065.3,100,T,0,93,1,1,46,767,46,867,-7.449364,112.537283,-7.448795,112.53799,4,1200,4,1600,1363863631,1363863635,
2018-09-18,2018091812,2.62,6.17,10.39,10.35,9.55,2.97,19.35,8.77,1065.37,100,T,0,93,1,1,46,867,46,967,-7.448795,112.53799,-7.448226,112.538697,4,1600,4,2000,1363863635,1363863639,
2018-09-18,2018091812,15.35,16.05,11.18,11.98,14.0,3.0,25.98,13.93,1065.33,100,T,0,94,1,1,46,967,45,67,-7.448226,112.538697,-7.447657,112.539403,4,2000,5,400,1363863639,1363863642,
2018-09-18,2018091812,1.96,2.01,13.22,13.71,4.41,3.99,8.84,6.88,1065.4,100,T,0,94,1,1,45,67,45,167,-7.447657,112.539403,-7.44709,112.540111,5,400,5,800,1363863642,1363863646,
2018-09-18,2018091812,6.67,6.43,12.11,11.76,5.99,4.85,10.14,8.28,1065.21,100,T,0,94,1,1,45,167,45,267,-7.44709,112.540111,-7.446523,112.540817,5,800,5,1200,1363863646,1363863650,
2018-09-18,2018091812,9.17,5.12,15.85,12.69,13.71,2.33,22.53,11.63,1065.1,100,T,0,94,1,1,45,267,45,367,-7.446523,112.540817,-7.445955,112.541523,5,1200,5,1600,1363863650,1363863654,

```

Convert Text to Columns Wizard - Step 1 of 3

The Text Wizard has determined that your data is Delimited.

If this is correct, choose Next, or choose the data type that best describes your data.

Original data type

Choose the file type that best describes your data:

Delimited - Characters such as commas or tabs separate each field.

Fixed width - Fields are aligned in columns with spaces between each field.

Preview of selected data:

```

1 | DATE,RUN_ID,TQI_LPROF,TQI_RPROF,TQI_LALIGN,TQI_RALIGN,TQI_XLEVEL,TQI_GAGE,TQI_WARP,T
2 | 2018-09-18,2018091812,23.8,61.0,0.0,0.128,46.134,27.377,24.103,54.1065,7,100,T,0,
3 | 2018-09-18,2018091812,78.74,52.68,0.0,0.107,9.502,5.239,79.140,23.1069,85,100,T,0,
4 | 2018-09-18,2018091812,65.13,34.54,0.0,0.085,09.83,6,141,93,58,61,1069,04,100,T,0,2
5 | 2018-09-18,2018091812,11.85,7.36,2.18,1.5,12.43,15.55,22.44,10.47,1069.62,100,T,0,2
6 | 2018-09-18,2018091812,3.34,3.51,5.24,2.24,22.5,07,10,61,11,78,6,25,1069,06,100,C,0,32,

```

Cancel < Back Next > Finish

Gambar 4.1 Ouput KA ukur Format CSV

(Sumber :Dirjen Perkeretaapian Indonesia, 2018)

Tabel 4.1 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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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

MP (km)	M/4 0.25 m	L.PROF 124	R.PROF 124	L.ALIGN 124	R.ALIGN 124	GAUGE	X.LEVEL
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
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 Indonesia, 2018)

Keterangan :

MP = Kilometer jalan rel

M/4 = Titik pengambilan data ukur per ft. (1 seg = 200 m (800 data) (0.25 m))

X.LEVEL = pertinggian

L.PROF 124 = angkatan rel kiri

R.PROF 124 = angkatan rel kanan

L.ALGN 124 = listringan rel kiri

R.ALGN 124 = listringan rel kanan

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*).

4.2.1. Perhitungan Standart Deviasi Setiap Parameter Kerusakan.

Pada perhitungan ini akan diperoleh standar deviasi dari setiap parameter berdasarkan data yang didapat Direktorat Jenderal Perkeretaapian karena output datnya 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 4.2 menjelaskan metode perhitungan standar deviasi dengan Ms. Excel tanpa menggunakan rumus sedangkan Tabel 4.3 menjelaskan metode perhitungan dengan menggunakan rumus (secara manual).

Tabel 4.2 Contoh Perhitungan Standar Deviasi dengan Formula Ms. Excel

MF (km)	M4	SPEED	LPROF124	RPROF124	Total Profil	S.dev
18	771	62	1.67	15.21	16.88	
18	772	62	3.04	-0.39	2.65	
18	773	62	2.61	-1.56	1.05	
18	774	62	-0.34	14.26	13.92	
18	775	62	-4.5	36.58	32.08	
18	776	62	-6.11	38.86	32.75	
18	777	62	-5.85	27.67	21.82	
18	778	62	-5.41	16.33	10.92	
18	779	62	-5.09	8.04	2.95	
18	780	62	-5.02	3.13	-1.89	
18	781	62	-5.21	1.68	-3.53	
18	782	63	-5.14	1.98	-3.16	
18	783	63	-4.5	1.23	-3.27	
18	784	63	-4.13	0.43	-3.7	
18	785	63	-4.64	1.49	-3.15	
18	786	63	-5.48	2.95	-2.53	
18	787	63	-5.93	3.06	-2.87	
18	788	63	-6.02	1.12	-4.9	
18	789	63	-5.46	-4.06	-9.52	
18	790	62	-4.91	-6.21	-11.12	
18	791	62	-6.54	8.91	2.37	
18	792	62	-10.29	41.05	30.76	
18	793	62	-10.33	42.01	31.68	
18	794	62	-5.4	7.79	2.39	
18	795	62	1.44	-38.51	-37.07	
18	796	62	3.14	-46.85	-43.71	
18	797	62	2	-35.47	-33.47	
18	798	62	1.52	-30.07	-28.55	
18	799	62	1.39	-28.18	-26.79	
18	800	62	1.06	-24.67	-23.61	11.885095

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 4.3 Contoh Perhitungan Standar Deviasi dengan Secara Manual

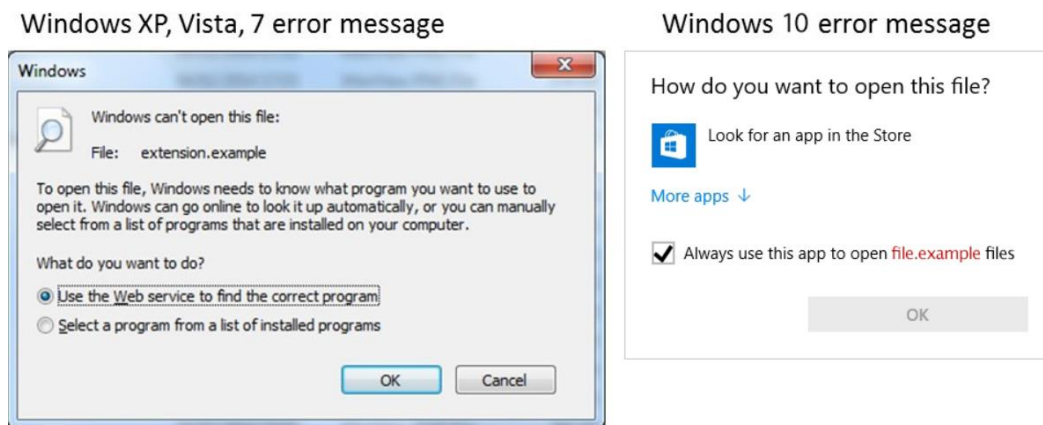
MP (km)	M/4 (m)	L.PROF 124	R.PROF 124	Total (Xi)	Xi ²
18	0	-14.53	-5.3	-19.83	393.23
18	1	-13.74	-4.94	-18.68	348.942
18	2	-12.47	-5.12	-17.59	309.408
18	3	-10.88	-5.12	-16	256
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
18	798	1.52	-30.07	-28.55	815.103
18	799	1.39	-28.18	-26.79	717.704
18	800	1.06	-24.67	-23.61	557.432
Σ				285.93	113596
Xi²				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.

4.3. Perhitungan Nilai *Track Quality Indeks* (TQI)

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 peringgian, angkatan, listrangan, 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 perrecord data untuk lebih jelasnya seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 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 kebeberapa 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 Bandung. Bentuk data offboard dari EM-120 pada KM 18 dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Output 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 terus 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.

Untuk total nilai *track quality indeks* (TQI) dari kereta ukur EM-120 terbesar pada KM 49+200 = 40.75 maka menurut standar perkeretapian Indonesia trak tersebut baik karena tidak ada nilai $TQI \geq 50$. Data lengkap disajikan pada lampiran.

4.3.1. Perhitungan Track Quality Indeks Berdasarkan Standart Perkeretaapian Indonesia

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 penjumlahan 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

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	

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

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 :

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

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

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

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

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

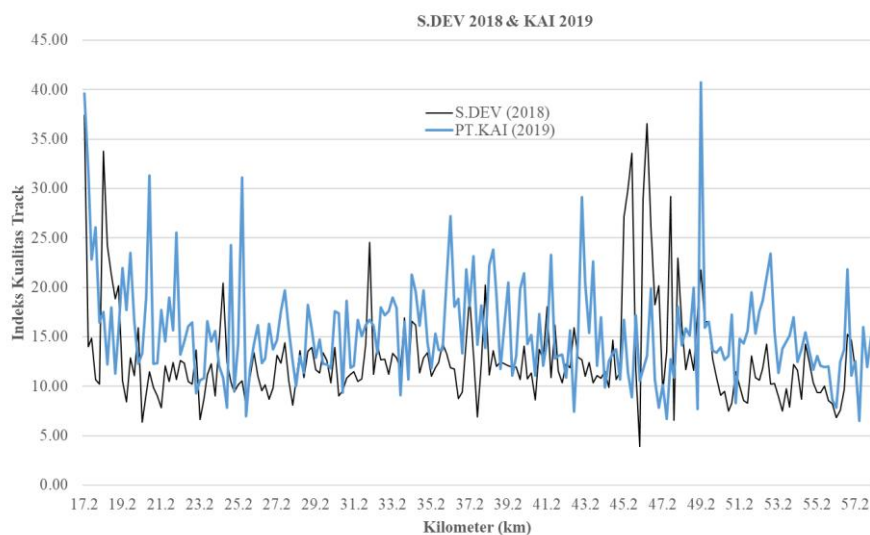
$$= 13,500$$

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

$$\begin{aligned} \text{TQI} &= \text{SD angkatan} + \text{SD listringan} + \text{SD lebar sepur} + \text{SD pertinggian} \\ &= 11,88509 + 6,12352 + 2,65085 + 13,500 \\ &= \mathbf{33,80864} \end{aligned}$$

Dari perhitungan didapatkan hasil TQI sebesar 33,80864 yang menunjukkan bahwa kualitas indeks rel masuk dalam kategori $\text{TQI} \leq 40$ Secara keseluruhan, nilai TQI dari KM 17 + 000 sampai dengan km 57 + 000 menunjukkan bahwa prosentase tertinggi yaitu 37.44 pada KM 17. Hasil rekap perhitungan terlampir pada lampiran.

Hasil nilai track quality indeks EM-120 dan KA Galunggung tidak dapat dibandingkan karena data terakhir yang di dapatkan dari departemen 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 4.3.



Gambar 4.3 Grafik track quality Indeks (TQI) 2018 dengan EM-120 dan 2019 dengan KA Galunggung

4.4. Pengukuran Parameter TQI Manual

Seperti dijelaskan pada Sub – Bab 3.3.5.3 pengukuran dilakukan pada nilai track quality eksisting terjelek dengan alat ukur manual. Diukur dengan menggunakan alat matisa pada parameter lebar spur dan pertinggian, sedangkan alat ukur listringan dan angkatan menggunakan center benang. Disurvey pada KM untuk pendahuluan 18 + 000 – 19 + 000. Survey pendahuluan didapatkan seperti Tabel 4.6

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

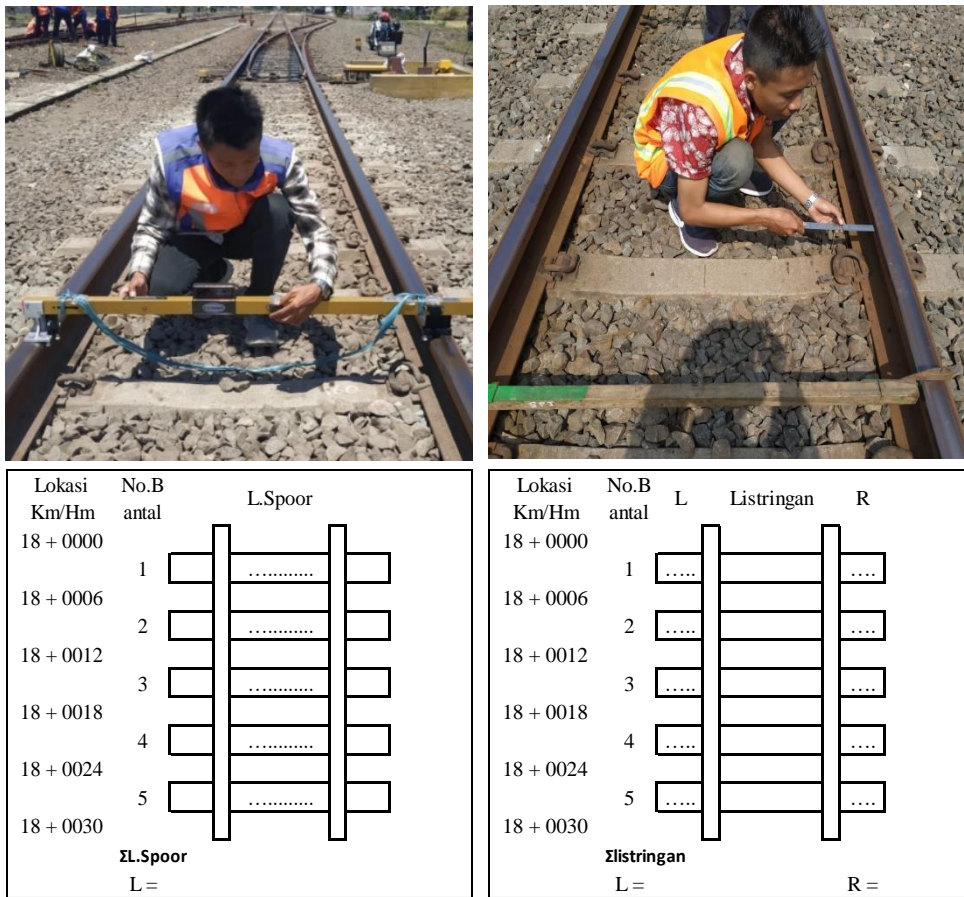
Listringan = 1 Pengukuran

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 pengukuran dan form pengukuran dijelaskan pada Sub-bab 4.4.1

4.4.1. Metode dan Hasil Pengukuran Manual

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 4.4.



Gambar 4.4 Pengukuran 4 parameter TQI manual

Dari hasil pengukuran didapatkan data sebaran didapatkan 201 data setiap 200 m contoh data sebaran 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
19.2	150	7.3	5.7	13.0		-4.9	-5.5	-10.3		1067.7	0.7		8.7	
19.2	153	8.8	5.0	13.8		-4.7	-5.2	-9.9		1067.6	0.6		7.3	
19.2	156	9.8	4.6	14.4		-4.4	-4.8	-9.1		1067.5	0.5		6.3	
19.2	159	10.5	4.9	15.4		-4.1	-3.8	-7.8		1067.3	0.3		5.4	
19.2	162	11.1	2.7	13.8		-3.6	-1.9	-5.5		1067.3	0.3		4.3	
19.2	165	11.3	1.6	12.9		-3.3	-2.1	-5.4		1067.1	0.1		3.4	
19.2	168	11.0	0.9	11.9		-3.3	-2.2	-5.5		1066.9	0.1		2.8	
19.2	171	10.6	0.2	10.7		-3.2	-1.8	-5.0		1066.8	0.2		2.1	
19.2	174	9.8	-0.7	9.1		-3.1	-1.4	-4.5		1066.9	0.1		1.6	
19.2	177	8.9	-1.6	7.3		-3.0	-1.3	-4.3		1067.1	0.1		1.1	
19.2	180	8.2	-2.7	5.5		-3.1	-1.4	-4.5		1067.3	0.3		0.6	
19.2	183	6.9	-3.8	3.1		-3.4	-2.4	-5.8		1067.6	0.6		0.2	
19.2	186	5.9	-4.3	1.6		-3.0	-2.3	-5.2		1067.8	0.8		-0.3	
19.2	189	5.1	-4.4	0.6		-2.5	-1.1	-3.7		1068.0	1.0		-0.7	
19.2	192	4.5	-7.4	-2.9		-2.0	0.6	-1.4		1067.9	0.9		-1.1	
19.2	195	3.8	-7.8	-4.0		-1.4	0.4	-1.0		1067.9	0.9		-1.5	
19.2	198	3.2	-8.3	-5.1		-0.6	0.5	-0.2		1067.9	0.9		-0.1	
19.2	201	2.6	-8.5	-5.9		0.0	0.8	0.8		1067.9	0.8		-2.3	
0	2.3	-8.4	-6.1	7.7	0.4	1.5	2.0	9.3	1067.7	0.7	0.4	-5.3	4.4	21.8
19.6	0	1.7	-7.3	-5.6		1.0	1.9	2.9	1067.4	0.4		-3.3		

KAI
21.95

Setelah didapatkan data aktual dilapangan maka di hitung dengan cara standart deviasi agar mendapatkan nilai *track quality indeks* aktual dilapangan.

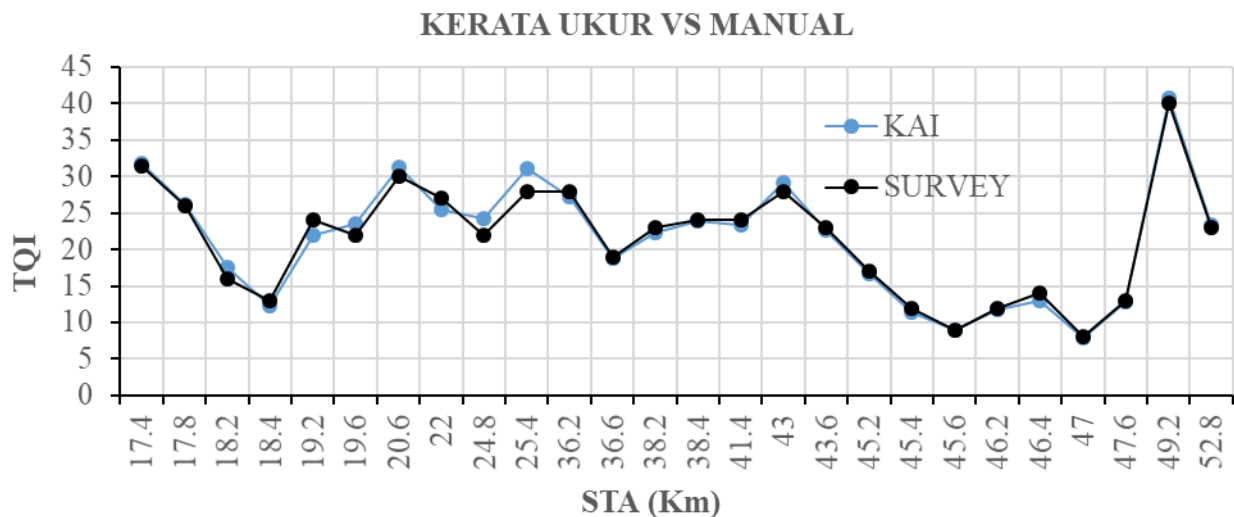
Data hasil pengukuran di bandingkan dengan nilai dari EM-120 milik PT.Kereta api Indonesia. Dengan factor kecocokan data -2 / +1 seperti syarat kategori track quality indeks kategori 1 data tersebut disajikan pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.5 yang di sajikan dengan grafik.

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	40	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 pada lintas tersebut sudah dilakukan perawatan.



Gambar 4.5 Hasil nilai track quality indeks dengan EM-120 dan hasil survey

Hasil dari track quality indeks lapangan digunakan untuk dasar letak geometri permodelan struktural.

4.5. Perhitungan Kelas Jalan Berdasarkan Daya Angkut Tahunan

(*Passing Tonage*)

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 tangka/ 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)

$$K_{1k} = 16 \times 48 \text{ ton} = 768 \text{ ton/hr}$$

$$M_1 = 2 \times 46 \text{ ton} = 92 \text{ ton/hr}$$

$$P = 2 \times 50 \text{ ton} = 100 \text{ ton/hr}$$

$$CC206 = 1 \times 52 \text{ ton} = 52 \text{ ton/hr}$$

$$\text{Total tonase / hari} = 1.012 \text{ ton/hr}$$

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

$$GD 42 T = 60 \times 42 \text{ ton} = 2520 \text{ ton/hr}$$

$$CC206 = 2 \times 52 \text{ ton} = 104 \text{ ton/hr}$$

$$\text{Total tonase / hari} = 2624 \text{ ton/hr}$$

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

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

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

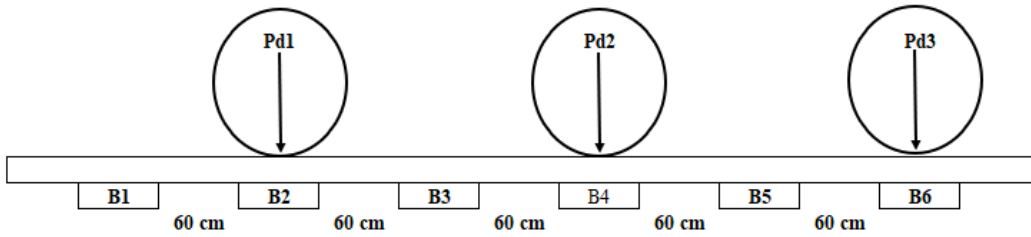
4.5.1. Perhitungan beban eksisting

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 4.6



Gambar 4.6 Ilustrasi beban pada segmen 3 meter

Sumber : Profilidis,2006

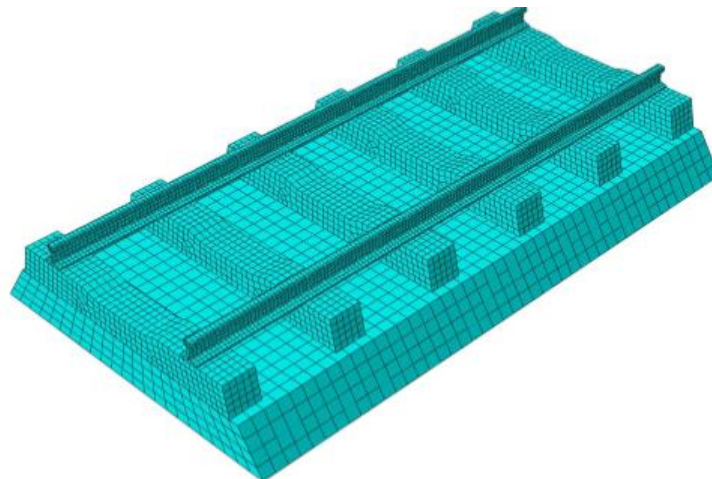
Dari hasil persamaan *Talbot* didapatkan beban dinamik yang bekerja pada lintas Surabaya - Mojokerto sebesar 16,241ton maka dapat dihitung transfer beban seperti Tabel 4.17 berikut :

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

4.6. Pemodelan Dengan Program Bantu

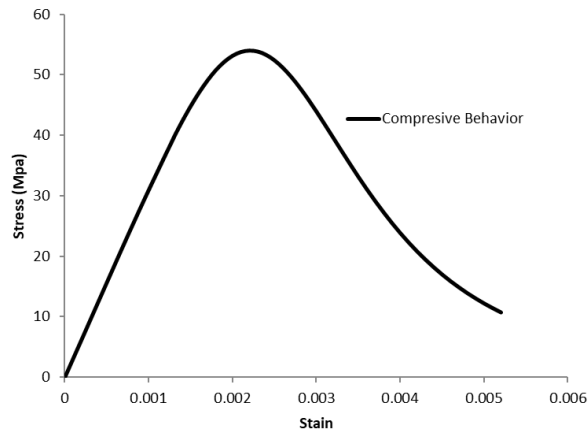
Dari hasil nilai geometri berdasarkan *Track Quality Indeks* (TQI) maka dapat di modelkan bentuk jalan kereta dengan program bantu ABAQUS dalam satu segmen 3 m' sesuai dengan pengecekan dilapangan. Contoh permodelan pada KM 18+000 lintas Surabaya – Mojokerto bisa dilihat pada Gambar 4.7



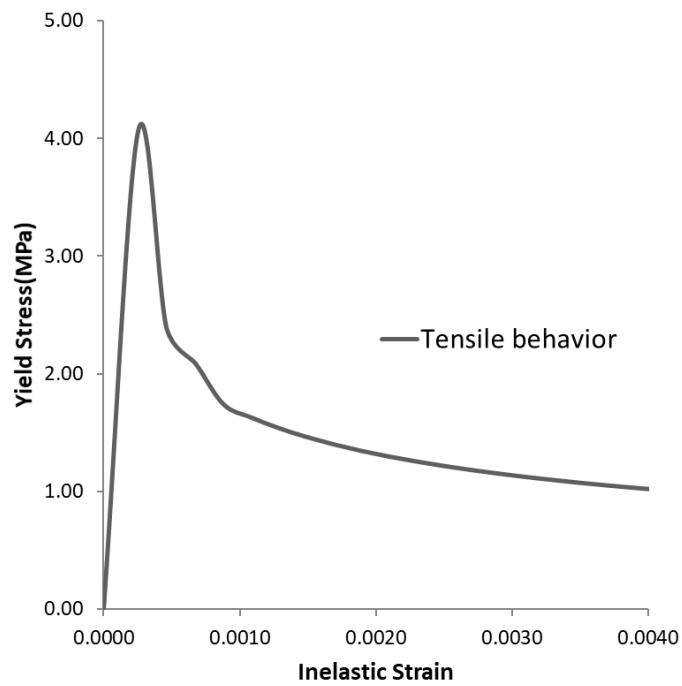
Gambar 4.7 Permodelan per 3m sesuai geometri

4.6.1. Material Propertis

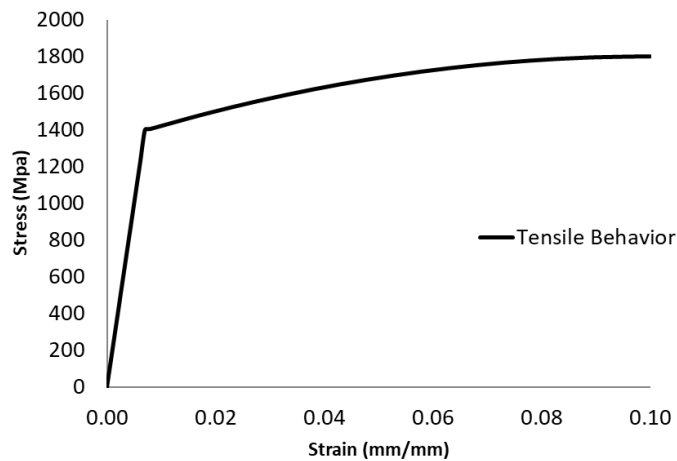
Input properti material pada ABAQUS didekati dengan persamaan empiris. Persamaan empiris digunakan untuk menentukan hubungan tegangan leleh terhadap regangan plastis pada tekan beton, tarik beton, dan tarik baja tulangan. Perilaku plastis beton ditentukan dengan *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) pada ABAQUS. Input material beton pada ABAQUS 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 ditunjukkan pada Gambar 4.8 didekati dengan persamaan Saatcioglu & Razvi (1999). Hasil model konstitutif tarik beton 4,16 Mpa didekati dengan persamaan Hsu and Zhang (1996) dengan rumus split hasil silinder beton mutu biasa Attard & Setunge (1996) $f_{sp} = 0.32(f_c)^{0.67}$ untuk beton no silika fume ditunjukkan pada Gambar 4.9. Hasil model konstitutif tarik tulangan menggunakan kuat leleh tarik 1400 Mpa didekati dengan persamaan Mander, (1988) dapat dilihat pada Gambar 4.10. Parameter-parameter yang diinput ke definisi perilaku material khususnya material beton pada ABAQUS 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 ABAQUS. 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. Parameter yang mendefinisikan perilaku tarik tulangan disajikan pada Gambar 4.8. Perilaku tarik tulangan antara lain *density*, *elastic*, dan *plastic* yang diinputkan pada ABAQUS. 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 $f_c' = 54$ Mpa, untuk perilaku tulangan 1400 Mpa, untuk perilaku Rel tipe R.54 dan untuk material ballas tidak ikut dimodelkan



Gambar 4.8 Kurva tegangan – regangan model konstutif tekan beton $F_c' = 54 \text{ Mpa}$



Gambar 4.9 Kurva tegangan – regangan model konstutif tarik beton



Gambar 4.10 Kurva tegangan – regangan model konstutif tarik tulangan

Tabel 4.18 Properti Bantalan Beton

Properti	Nilai
Material Beton Fc' 52 Mpa	
Density (ton/mm ³)	0.0000000024
Modulus Elastisitas, Ec (Mpa)	35459.71989
Poison Rasio, ν	0.2
Dilation Angle, ψ	40
Eccentricity, ϵ	0.1
FB _o / FCo	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 Fy 1400 Mpa	
Density (ton/mm ³)	0.0000000078
Modulus Elastisitas, Ec (Mpa)	200000
Poison Rasio, ν	0.3
Yeild Strength (Leleh)	1400
Yeild Strength (Ultimate)	1800

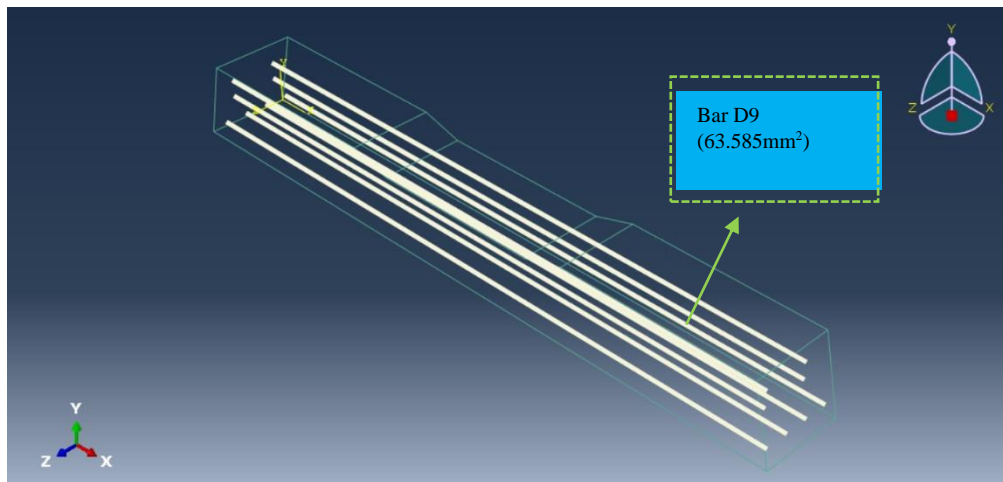
4.6.2. Permodelan Bantalan N-67

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 ABAQUS adalah luas penampang $A = \text{mm}^2$ seperti pada Tabel 4.19

Tabel 4.19 Luas elemen tulangan

Elemen	Luas (mm²)
Bar Atas 2-2 (D9)	63.585
Bar Bawah 4 (D9)	63.585

Permodelan pada bantalan beton tipe N-67 dapat dilihat pada Gambar 4.11 yang menunjukkan setiap material



Gambar 4.11 Permodelan bantalan beton tipe N-67

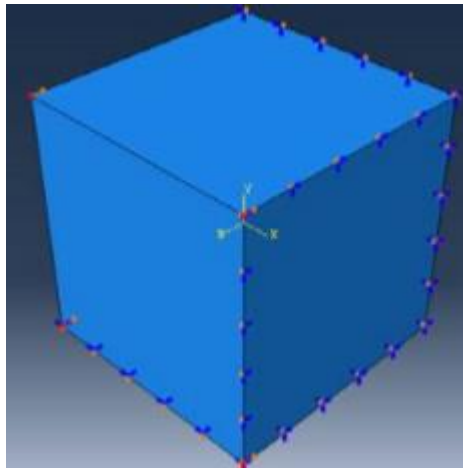
4.6.3. Pembebanan dan Perletakan

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 ABAQUS sebagai beban *pressure* sebagai *uniform load*, sesuai dengan letak pada parameter track quality indeks (TQI). Beban axial ditetapkan secara konstan.

4.6.4. Study parameter beton akibat beban tekan

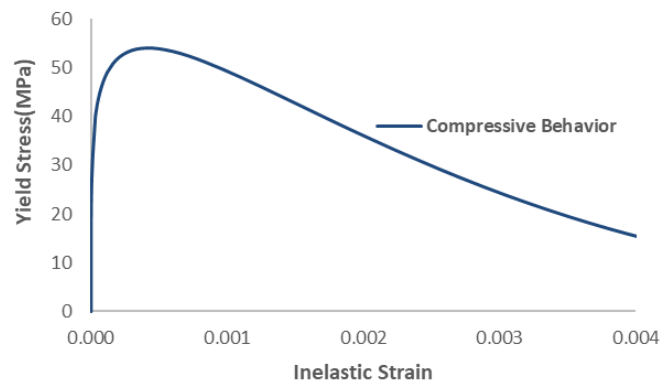
Studi input parameter tekan beton dilakukan sebagai verifikasi hasil hubungan tegangan dan regangan beton akibat tekan. Hubungan tegangan dan regangan beton hasil metode elemen hingga (ABAQUS) akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan Saatcioglu & Razvi (1999) Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter beton pada ABAQUS 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 4.12

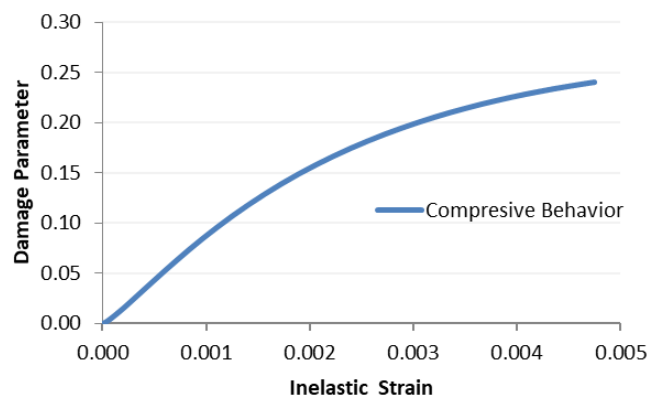


Gambar 4.12 Model beton akibat beban tekan (*Bondary condition* tekan)

Data input untuk material tekan (*Compressive behaviour*) adalah *inelastic strain* ,*Yeild stress* dan *damage parameter* di tunjukan pada Gambar 4.13, Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 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) 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.



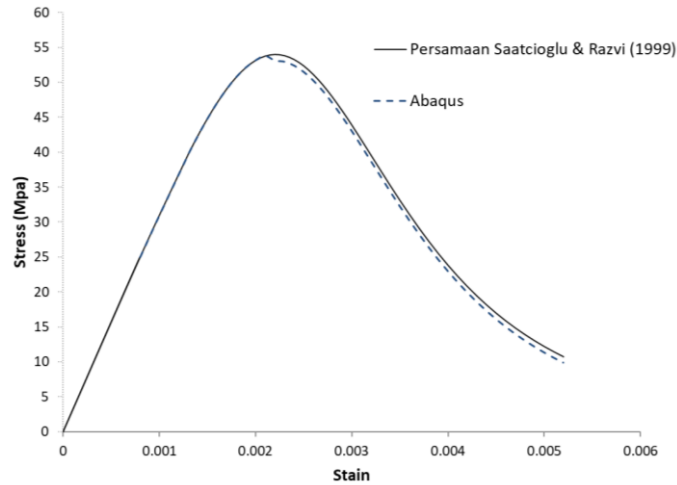
Gambar 4.13 Kurva *inelastic strain-yield compressive stress* f_c 54 Mpa



Gambar 4.14 Kurva *inelastic strain - damage parameter compressive stress* f_c 54 Mpa

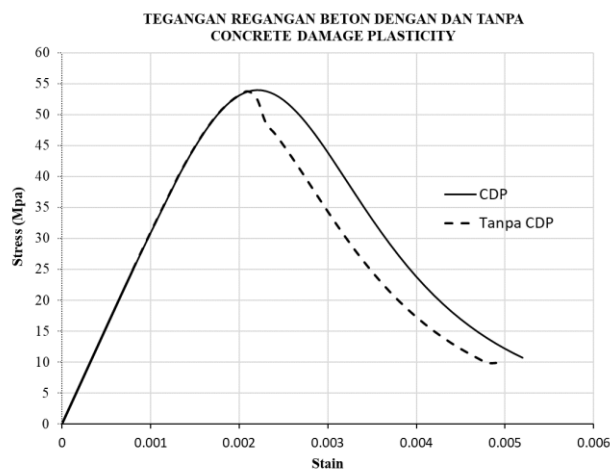
Data yang diinput pada *compressive behavior* ABAQUS didapatkan dari persamaan *fracture energy*. Data yang diinput tersebut ditunjukkan dalam bentuk kurva pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11. Hasil *damage parameter* untuk beton mutu biasa (*no silica foam*) pada saat puncak bernilai kecil supaya regangan 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 (ABAQUS) didapatkan sebesar 53,118 MPa yang mempunyai silisih 0,881% dari stress ultimit manual yang ditunjukkan pada Gambar 4.10. Pada Gambar 4.12 memperlihatkan hasil permodelan ABAQUS dan hasil manual pendekatan Razvi dan Saatcioglu (1999) sudah menunjukkan kemiripan dengan input coba – coba sesuai dengan parameter yang disyaratkan oleh ABAQUS yaitu: $dilation\ angle = 40$, $eccentricitas = 0,1$, $F_b/f_c = 1.16$, $K = 0.667$, $Viscositas = 0.001$.

Pada parameter viskositas semakin mendekati 0 maka grafik tegangan regangan mendekati dengan perhitungan manual 0.001 adalah angka terkecil pada cara coba – coba



Gambar 4.15 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan menggunakan nilai viskositas 0.001

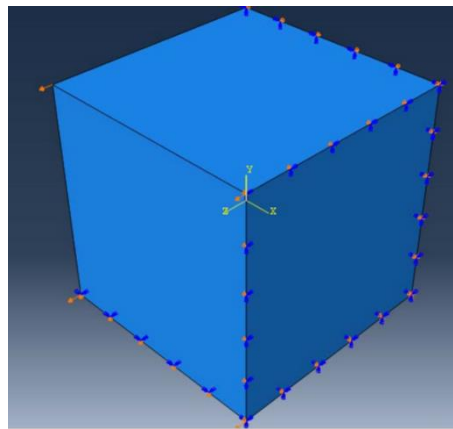
Damage parameter pada input material beton tekan pada ABAQUS menentukan hasil output kurva tegangan regangan yang didapatkan. Hal ini terlihat dari perilaku softening yang lebih baik ditunjukkan dengan adanya input *damage parameter*. Hasil output kurva tegangan regangan tanpa menggunakan damage parameter menghasilkan kurva yang lebih tajam pada bagian softening. Perbedaan dengan input parameter CDP (*Concrete damage plasticity*) ditunjukkan pada Gambar 4.16



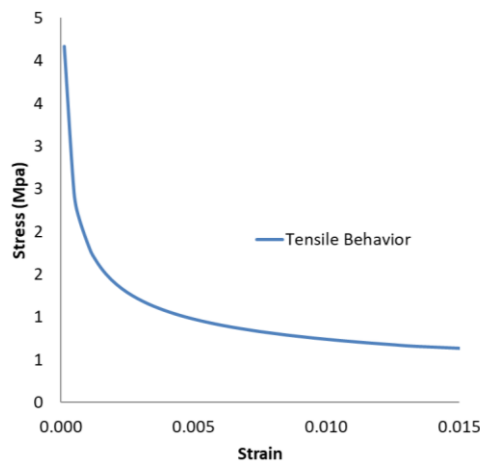
Gambar 4.16 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan input CDP dan tidak dengan CDP

4.6.5. 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 (ABAQUS) akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan empiris. Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter beton pada ABAQUS 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*

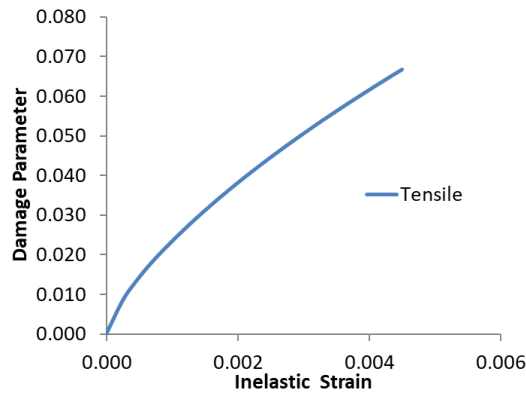


Gambar 4.17 Model beton akibat beban tarik (*Boundary condition* tarik)



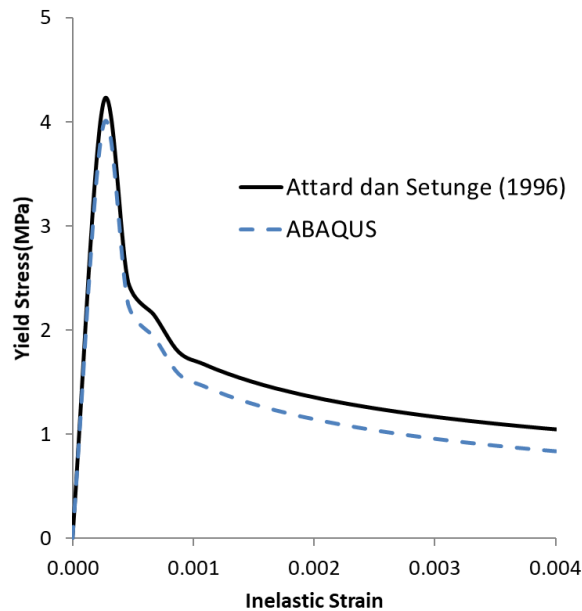
Gambar 4.18 Kurva inelastic strain-yield tensile stress f_c 54 Mpa

Berdasarkan regangan maksimal pada kurva hubungan tegangan-regangan beton yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 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 4.19 Kurva inelastic strain-damage parameter beton tarik F_c 54 Mpa

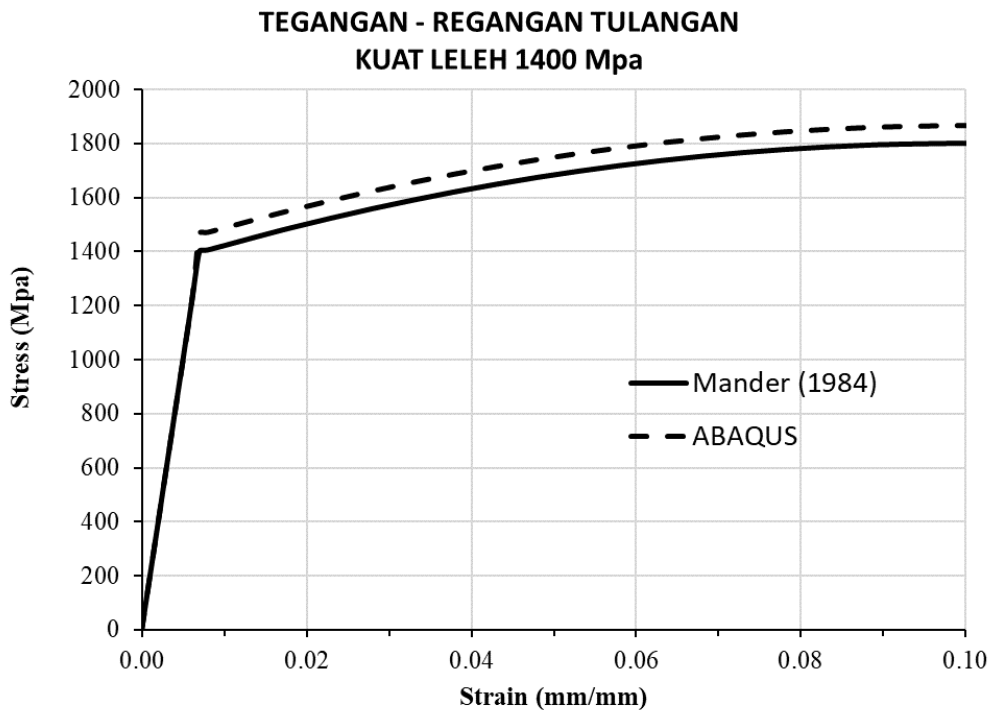
Hasil damage parameter untuk beton mutu tinggi pada saat puncak bernilai kecil supaya regangan plastis pada kurva tegangan regangan beton tidak bernilai negatif. Pada pemodelan spesimen bantalan pada ABAQUS dikarenakan model yang lebih kompleks viskositas tidak dapat diinput sebesar 0 namun harus mendekati 0. Oleh karena itu dalam pemodelan bantalan beton menggunakan viskositas 0,001 pada CDP beton ABAQUS. Hasil output *stress ultimit* pada uji axial tarik kubus untuk spesimen bantalan type N-67 pada pemodelan finite element (ABAQUS) didapatkan sebesar 3,9596 MPa yang mempunyai silisih 2,1 % dari stress ultimit pendektan attard dan setunge yang ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.20 Kurva tegangan-regangan beton akibat tarik menggunakan persamaan Attard dan Setunge (1996)

4.6.6. 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 (ABAQUS) akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan empiris. Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter tulangan pada ABAQUS sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan tulangan yang diharapkan. Tulangan D25 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 4.14. Hasil output stress ultimit pada uji axial tarik tulangan untuk spesimen bantalan type N-67 pada pemodelan finite element (ABAQUS) didapatkan sebesar 1465 MPa pada strain 0,02 yang mempunyai silisih 0,065 % dari stress ultimit manual dari pendekatan mander yang ditunjukkan pada Gambar 4.20.

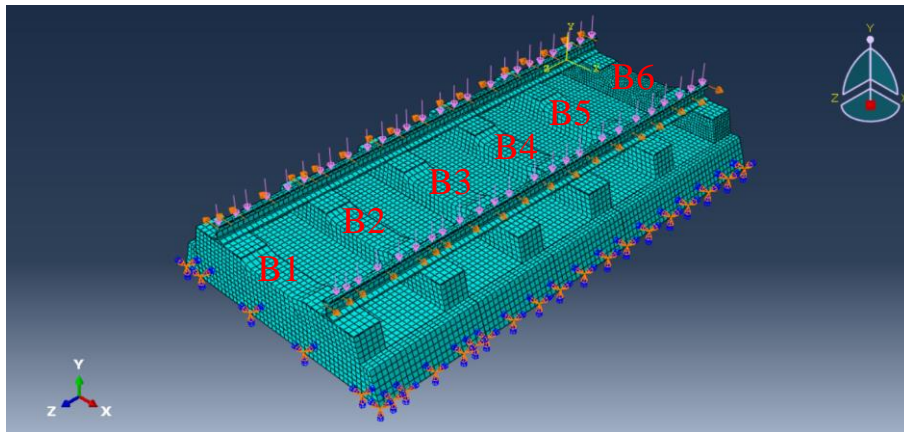


Gambar 4.21 Kurva tegangan-regangan tulangan kuat leleh 1400 MPa akibat tarik menggunakan persamaan Mander (1983)

Ini berarti pemodelan tulangan menggunakan elemen Truss kode T3D2 pada ABAQUS memperlihatkan kemiripan dengan hasil perhitungan manual dengan menggunakan persamaan Mander (1984). Hal ini menunjukkan bahwa FEA dengan program ABAQUS mempunyai prediksi yang baik pada studi input parameter beton dan baja mutu tinggi.

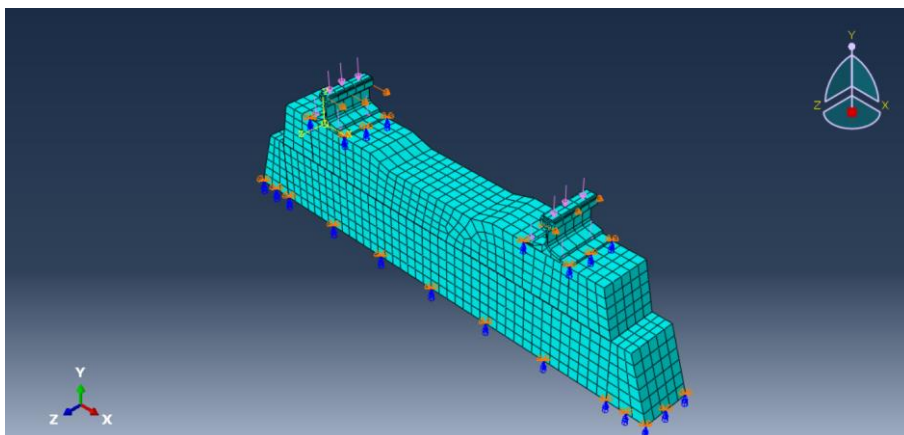
4.6.7. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi baru ($TQI < 15$)

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 4.22 dibawah ini.



Gambar 4.22 Pembebanan dan tumpuan pada segmen 3 meter

Tetapi karena keterbatasan perangkat lunak untuk *student version* ABAQUS maksimum peningkatan (Increment Step adalah 10.000) maka pemodelan harus di pecah pada setiap bantalan yang di dapat dilihat pada Gambar 4.22.

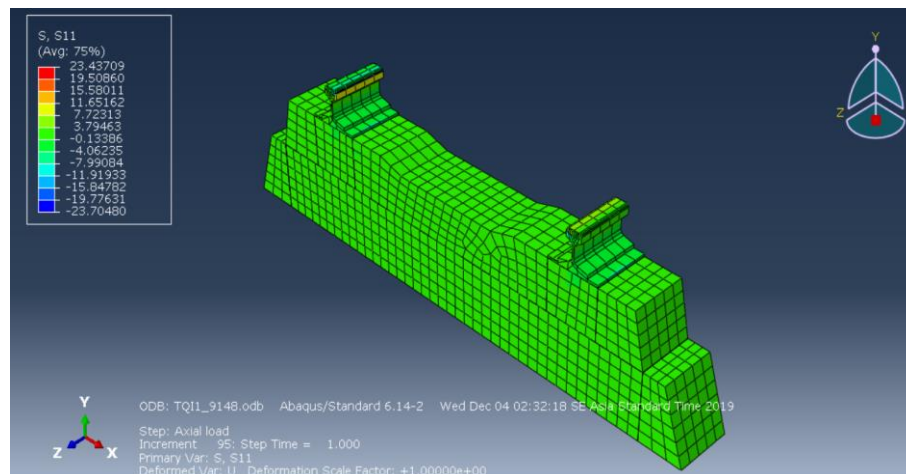


Gambar 4.23 Pembebanan dan tumpuan pada 1 Bantalan

Hasil yang akan di analisa pada step output adalah Tegangan (*Stress*) dan Perpindahan (*Displacement*) yang letaknya disesuaikan pada geometri yang ada dan disajikan dalam bentuk grafik trendline pada masing – masing Batasan track quality indeks (TQI). Hasil perilaku struktur pada masing – masing bantalan berbeda karena beban yang di terima pada 6 Bantalan setiap modul adalah berbeda yang besarnya sesuai dengan Tabel 4.17 beban terbesar yang bekerja pada modul per 3 meter adalah bantalan nomer 4 (B4) yang letaknya di tunjukan pada Gambar 4.18. Hasil dari perilaku struktur atas rel pada beban maksimum (9148 Kg) dengan kondisi penyimpangan geometri < 15 mm dari ke 4 parameter (listringan,angkatan,lebar spur dan pertinggian) adalah sebagai berikut :

1. Rel type 54

Tegangan tarik (*Tensile stress*) = $23.437 \times 10.197 = 238.998$ Mpa (Syarat pada PM.60 2012 halaman 31 adalah minimal kuat tarik rel adalah 1175 Mpa) maka Rel type 54 pada kondisi track quality indeks (TQI > 15) masih aman dalam keandalan struktur. Hasil permodelan dilihat pada Gambar 4.23



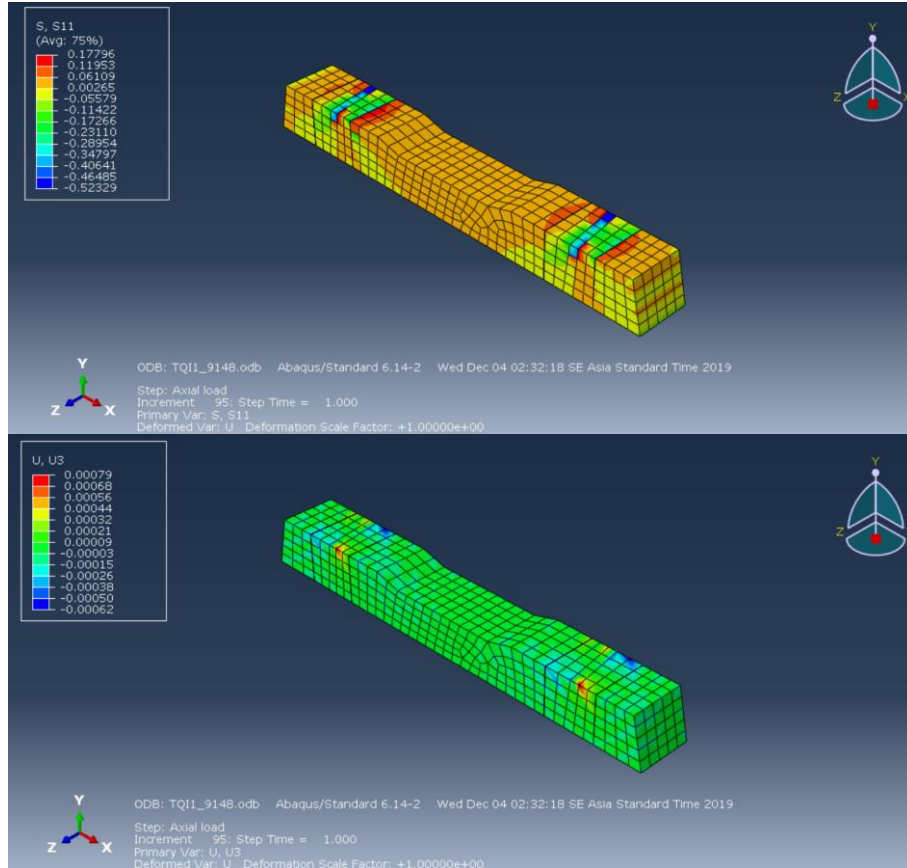
Gambar 4.24 Tegangan tarik (*Tensile stress*) Rel type 54 pada TQI > 15 mm

2. Bantalan Beton N-67

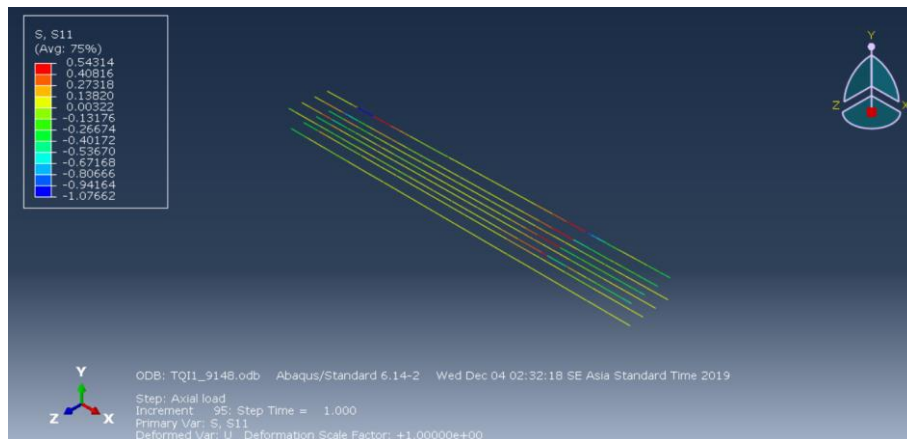
Tegangan tarik (*Tensile Stress*) = $0.17796 \times 10.197 = 1.8146$ Mpa (Syarat maksimum tarik beton adalah $= 0.32 (F_c)^{0.67} = 0.32 (54)^{0.67} = 4.639$ Mpa). Tegangan tekan (*Compressive stress*) = $0.52329 \times 10.197 = 5.3359$ Mpa (Syarat maksimum tekan beton adalah $= 0.85 F_c$ (Tidak terkekang) = 45.9 Mpa). Perpindahan (*Displacement*) = 0.000806 mm. Hasil permodelan bisa dilihat pada Gambar 4.24.

3. Tulangan wire prestressed 713 Mpa

Tegangan tarik (*Tensile stress*) = $0.54314 \times 10.197 = 5.538$ Mpa dan Tegangan tekan (*Compressive stress*) = $1.067 \times 10.197 = 10.974$ Mpa hasil dari permodelan dapat dilihat pada Gambar 4.25



Gambar 4.25 Tegangan (*Stress*) Bantalan beton Type N-67 dan Perpindahan (*Displacement*) pada TQI > 15 mm



Gambar 4.26 Tegangan (*Stress*) Wire Prestressed 713 Mpa (TQI > 15)

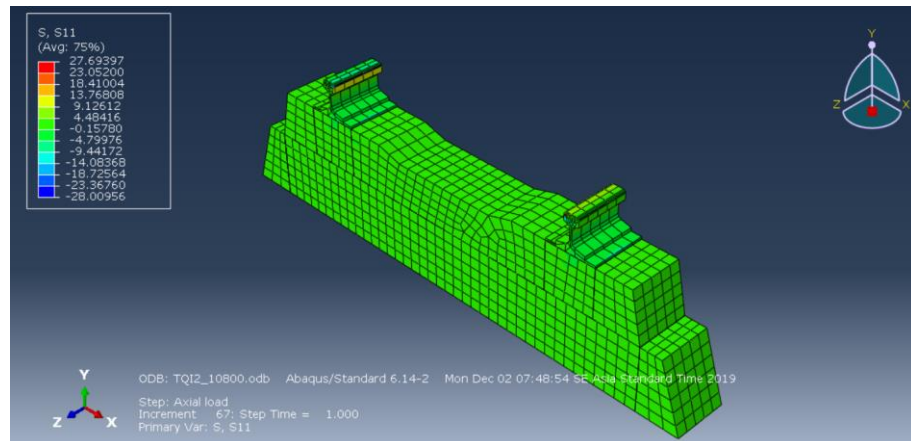
Maka persyaratan perilaku struktur atas (Rel, Bantalan Beton, dan Tulangan) memenuhi persyaratan keandalan struktur jika di pasang ideal pada nilai persimpangan geometri > 15 mm.

4.6.8. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi (TQI 15 -25)

Hasil dari perilaku struktur atas rel pada beban maksimum (9148 Kg) dengan kondisi penyimpangan geometri 15 – 25 mm dari ke 4 parameter (listringan, angkatan, lebar spur dan pertinggian) adalah sebagai berikut :

1. Rel type 54

Tegangan tarik (*Tensile stress*) = $27.693 \times 10.197 = 282.395$ Mpa (Syarat pada PM.60 2012 halaman 31 adalah minimal kuat tarik rel adalah 1175 Mpa) maka Rel type 54 pada kondisi track quality indeks (TQI 15 -25) masih aman dalam keandalan struktur. Hasil permodelan dilihat pada Gambar 4.26



Gambar 4.27 Tegangan tarik (*Tensile stress*) Rel type 54 pada TQI 15 – 25 mm

2. Bantalan Beton N-67

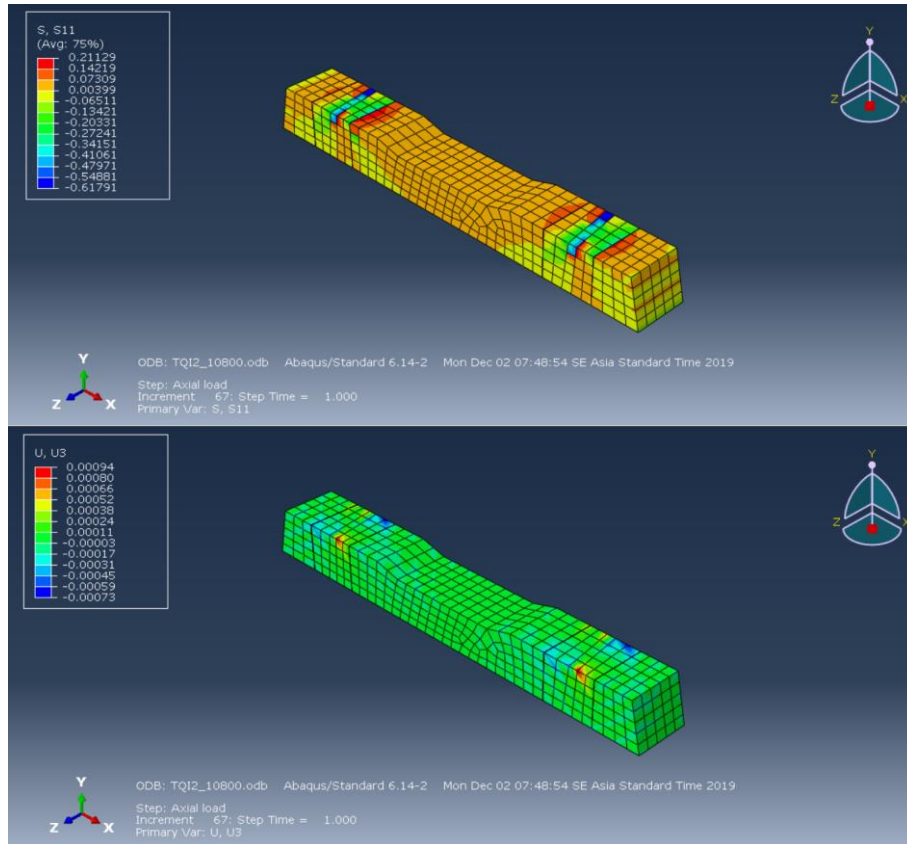
Tegangan tarik (*Tensile Stress*) = $0.21129 \times 10.197 = 2.1545$ Mpa (Syarat maksimum tarik beton adalah $= 0.32 (F_c)^{0.67} = 0.32 (54)^{0.67} = 4.639$ Mpa). Tegangan tekan (*Compressive stress*) = $0.61717 \times 10.197 = 6.2925$ Mpa (Syarat maksimum tekan beton adalah $= 0.85 F_c$ (Tidak terkekang) = 45.9 Mpa). Perpindahan (*Displacement*) = 0.000959 mm. Hasil permodelan bisa dilihat pada Gambar 4.27.

3. Tulangan wire prestressed 713 Mpa

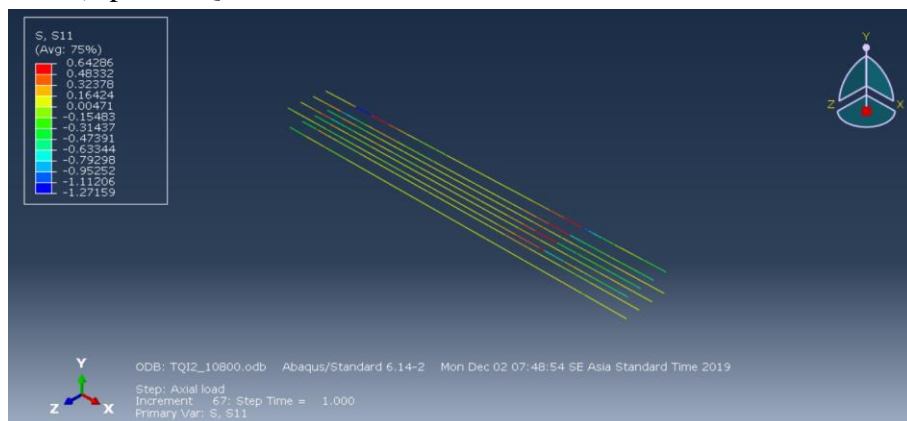
Tegangan tarik (*Tensile stress*) = $0.64286 \times 10.197 = 6.5546$ Mpa dan

Tegangan tekan (*Compressive stress*) = $1.27159 \times 10.197 = 12.9603$ Mpa

hasil dari permodelan dapat dilihat pada Gambar 4.28



Gambar 4.28 Tegangan (*Stress*) Bantalan beton Type N-67 dan Perpindahan (*Displacement*) pada TQI 15 - 25 mm



Gambar 4.29 Tegangan (*Stress*) Wire Prestressed 713 Mpa (TQI 15 – 25)

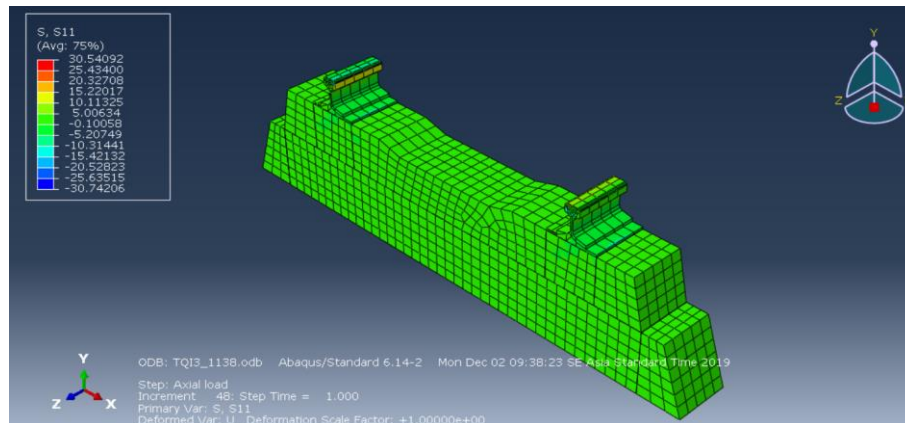
Maka persyaratan perilaku struktur atas (Rel, Bantalan Beton, dan Tulangan) memenuhi persyaratan keandalan struktur jika di pasang ideal pada nilai persimpangan geometri 15 – 25 mm.

4.6.9. Hasil Perilaku Bantalan Sesuai Nilai TQI Kondisi (TQI 25 - 40)

Hasil dari perilaku struktur atas rel pada beban maksimum (9148 Kg) dengan kondisi penyimpangan geometri 25 – 40 mm dari ke 4 parameter (listringan, angkatan, lebar spur dan pertinggian) adalah sebagai berikut :

1. Rel type 54

Tegangan tarik (*Tensile stress*) = $30.5409 \times 10.197 = 311.4257$ Mpa (Syarat pada PM.60 2012 halaman 31 adalah minimal kuat tarik rel adalah 1175 Mpa) maka Rel type 54 pada kondisi track quality indeks (TQI 25 - 40) masih aman dalam keandalan struktur. Hasil permodelan dilihat pada Gambar 4.29



Gambar 4.30 Tegangan tarik (*Tensile stress*) Rel type 54 pada TQI 25 – 40 mm

2. Bantalan Beton N-67

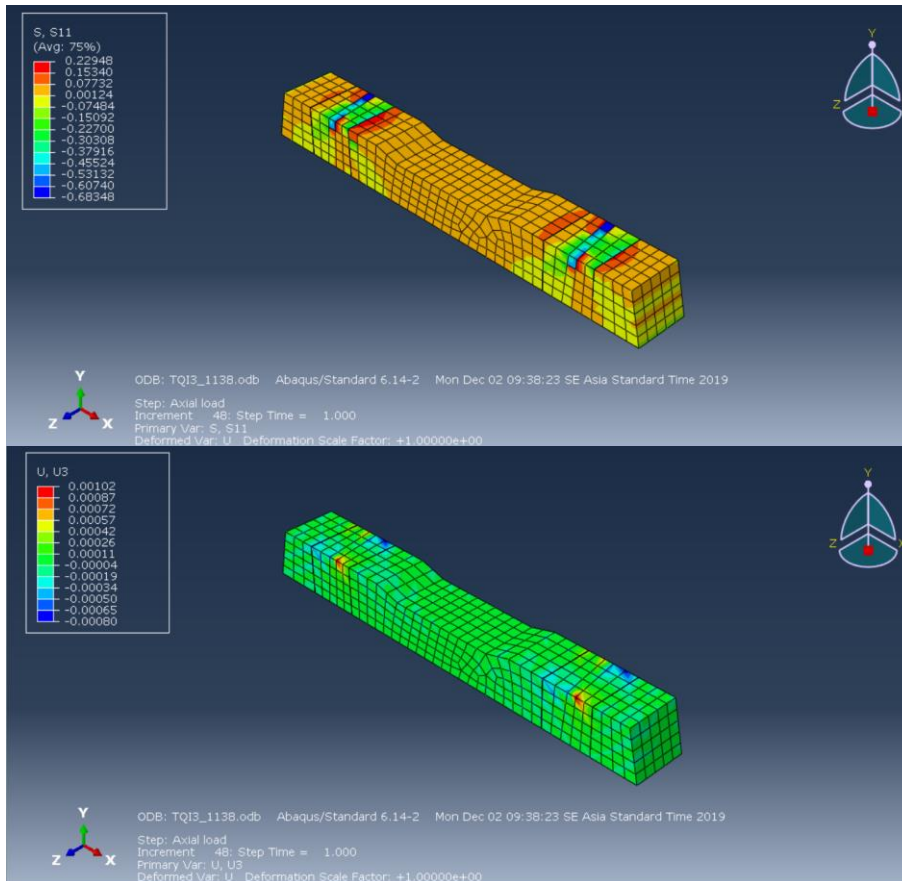
Tegangan tarik (*Tensile Stress*) = $0.22948 \times 10.197 = 2.34001$ Mpa (Syarat maksimum tarik beton adalah $= 0.32 (F_c)^{0.67} = 0.32 (54)^{0.67} = 4.639$ Mpa). Tegangan tekan (*Compressive stress*) = $0.68348 \times 10.197 = 6.9695$ Mpa (Syarat maksimum tekan beton adalah $= 0.85 F_c$ (Tidak terkekang) = 45.9 Mpa). Perpindahan (*Displacement*) = 0.00104 mm. Hasil permodelan bisa dilihat pada Gambar 4.30.

3. Tulangan wire prestressed 713 Mpa

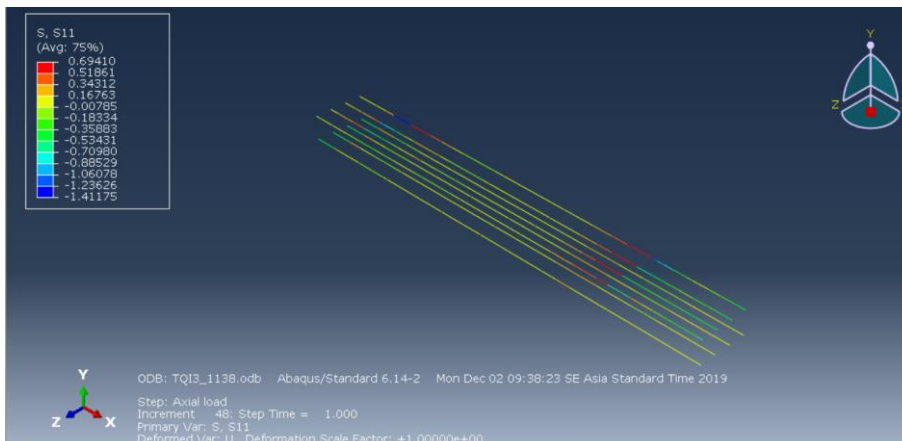
Tegangan tarik (*Tensile stress*) = $0.6941 \times 10.197 = 7.0774$ Mpa dan

Tegangan tekan (*Compressive stress*) = $1.4117 \times 10.197 = 14.3959$ Mpa

hasil dari permodelan dapat dilihat pada Gambar 4.31.



Gambar 4.31 Tegangan (*Stress*) Bantalan beton Type N-67 dan Perpindahan (*Displacement*) pada TQI 25 - 40 mm



Gambar 4.32 Tegangan (*Stress*) Wire Prestressed 713 Mpa (TQI 25 – 40)

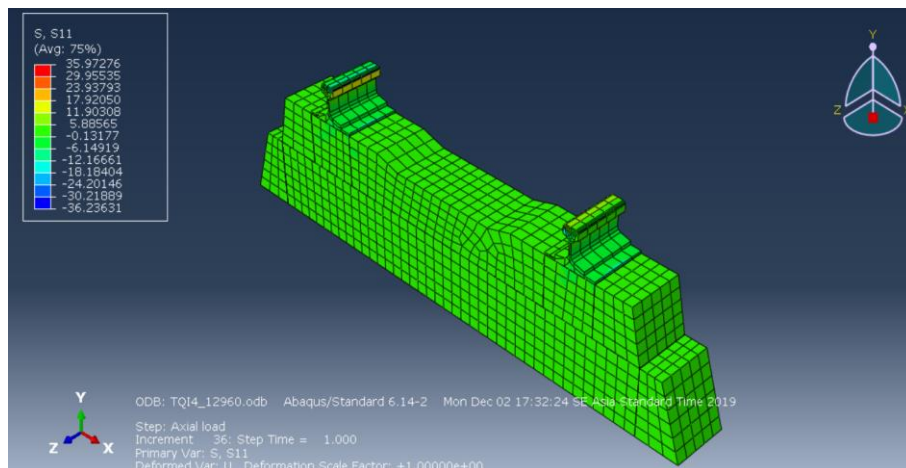
Maka persyaratan perilaku struktur atas (Rel, Bantalan Beton, dan Tulangan) memenuhi persyaratan keandalan struktur jika di pasang ideal pada nilai persimpangan geometri 25 – 40 mm.

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

Hasil dari perilaku struktur atas rel pada beban maksimum (9148 Kg) dengan kondisi penyimpangan geometri > 40 mm dari ke 4 parameter (listringan, angkatan, lebar spur dan pertinggian) adalah sebagai berikut :

1. Rel type 54

Tegangan tarik (*Tensile stress*) = $35.9727 \times 10.197 = 366.8142$ Mpa (Syarat pada PM.60 2012 halaman 31 adalah minimal kuat tarik rel adalah 1175 Mpa) maka Rel type 54 pada kondisi track quality indeks (TQI > 40) masih aman dalam keandalan struktur. Hasil permodelan dilihat pada Gambar 4.32



Gambar 4.33 Tegangan tarik (*Tensile stress*) Rel type 54 pada TQI > 40 mm

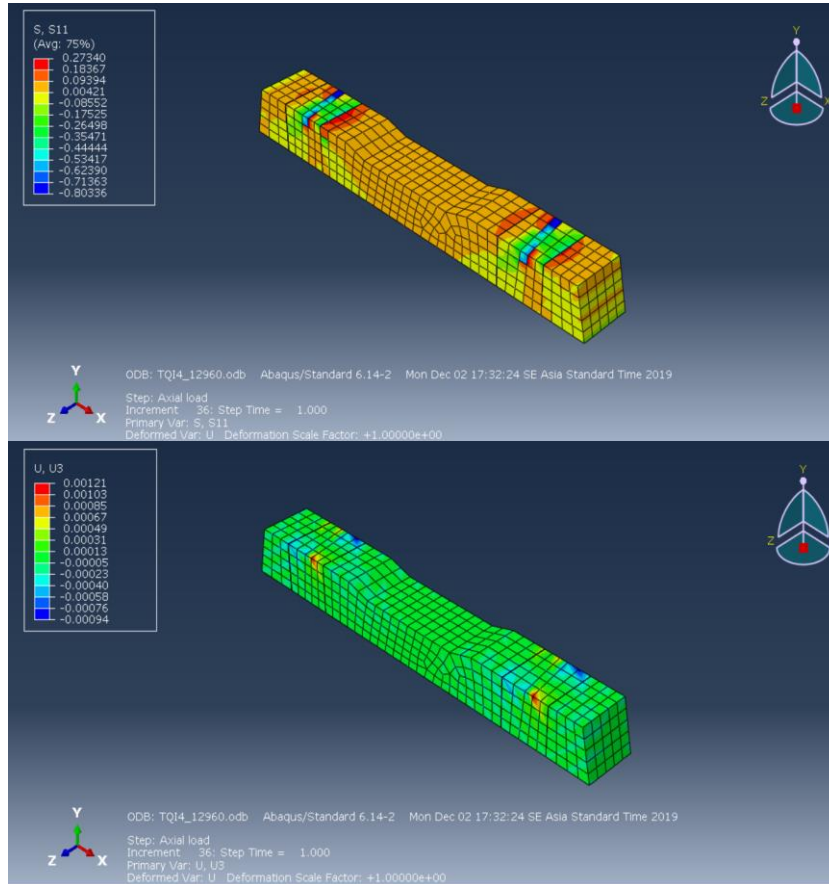
2. Bantalan Beton N-67

Tegangan tarik (*Tensile Stress*) = $0.2734 \times 10.197 = 2.7878$ Mpa (Syarat maksimum tarik beton adalah $= 0.32 (F_c)^{0.67} = 0.32 (54)^{0.67} = 4.639$ Mpa).

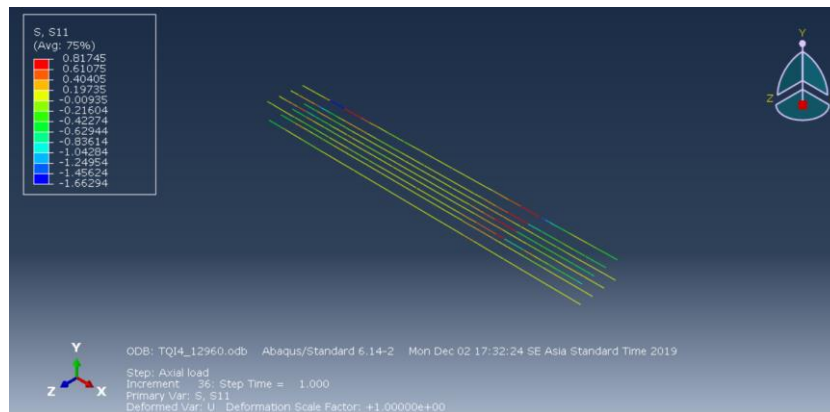
Tegangan tekan (*Compressive stress*) = $0.80336 \times 10.197 = 8.1918$ Mpa (Syarat maksimum tekan beton adalah $= 0.85 F_c$ (Tidak terkekang) = 45.9 Mpa). Perpindahan (*Displacement*) = 0.00124 mm. Hasil permodelan bisa dilihat pada Gambar 4.33.

3. Tulangan wire prestressed 713 Mpa

Tegangan tarik (*Tensile stress*) = $0.81745 \times 10.197 = 8.33554$ Mpa dan Tegangan tekan (*Compressive stress*) = $1.6629 \times 10.197 = 16.957$ Mpa hasil dari permodelan dapat dilihat pada Gambar 4.34.



Gambar 4.34 Tegangan (*Stress*) Bantalan beton Type N-67 dan Perpindahan (*Displacement*) pada TQI > 40 mm



Gambar 4.35 Tegangan (*Stress*) Wire Prestressed 713 Mpa (TQI > 40)

Maka persyaratan perilaku struktur atas (Rel, Bantalan Beton, dan Tulangan) memenuhi persyaratan keandalan struktur jika di pasang ideal pada nilai persimpangan geometri > 40 mm. Tabel 4.20 adalah hasil dari tegangan dan Tabel 4.21 adalah hasil dari perpindahan.

Tabel 4.20 Tegangan Yang Terjadi pada Struktur Atas Jalan Rel

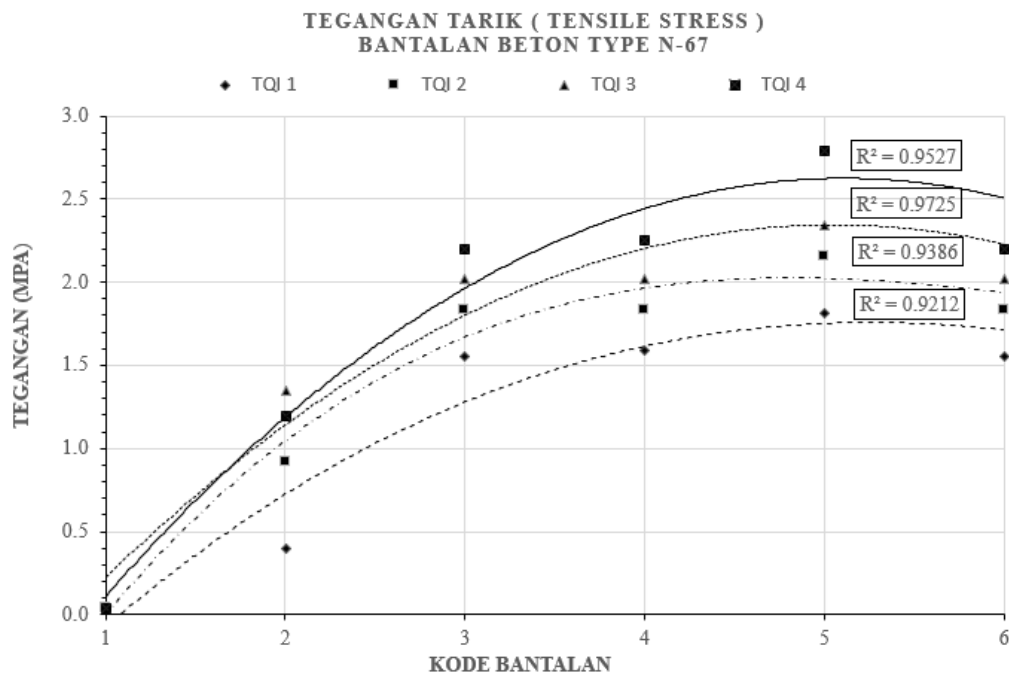
Geometri	P (Axial)		Lateral Load		Tegangan (S11) Mpa					
					+	-	+	-	+	-
					Rel		Beton		Tulangan	
TQI 1 < 15	0	Kg	200	Kg	5.23310	-5.28816	0.03936	-0.01145	0.11910	-0.24167
	3897	Kg	389.7	Kg	52.58103	-52.62733	0.39615	-1.17541	1.19111	-2.42791
	7793	Kg	1168.95	Kg	203.70955	-206.01193	1.55372	-4.54378	4.72804	-9.35208
	7962	Kg	1194.3	Kg	208.15340	-210.51401	1.58777	-4.64341	4.83124	-9.55612
	9148	Kg	1829.6	Kg	238.98801	-241.71785	1.81466	-5.33599	5.53840	-10.97401
	7793	Kg	1168.95	Kg	203.70955	-206.01193	1.55372	-4.54378	4.72804	-9.35208
	7962	Kg	1194.3	Kg	208.15340	-210.51401	1.58777	-4.64341	4.83124	-9.55612
TQI 2 = 15 - 25	0	Kg	200	Kg	5.23310	-5.28816	0.03936	-0.01145	0.11910	-0.24167
	3897	Kg	389.7	Kg	120.30421	-121.65021	0.91804	-2.68793	2.79224	-5.52127
	7793	Kg	1168.95	Kg	240.56762	-243.30042	1.83526	-5.36729	5.57776	-11.04335
	7962	Kg	1194.3	Kg	246.26775	-248.15419	1.83036	-5.52219	5.62426	-11.39209
	9148	Kg	1829.6	Kg	282.39541	-285.61287	2.15452	-6.29257	6.55463	-12.96039
	7793	Kg	1168.95	Kg	240.56762	-243.30042	1.83526	-5.36729	5.57776	-11.04335
	7962	Kg	1194.3	Kg	246.26775	-248.15419	1.83036	-5.52219	5.62426	-11.39209
TQI 3 = 25 - 40	0	Kg	200	Kg	5.23310	-5.28816	0.03936	-0.01145	0.11910	-0.24167
	3897	Kg	389.7	Kg	183.15342	-185.12959	1.34437	-4.12326	4.25205	-8.48798
	7793	Kg	1168.95	Kg	264.62031	-267.63046	2.01880	-5.90396	6.14237	-12.14983
	7962	Kg	1194.3	Kg	266.50369	-269.88400	2.01931	-5.95750	6.16358	-12.26291
	9148	Kg	1829.6	Kg	311.42576	-313.47679	2.34001	-6.96945	7.07774	-14.39561
	7793	Kg	1168.95	Kg	264.62031	-267.63046	2.01880	-5.90396	6.14237	-12.14983
	7962	Kg	1194.3	Kg	266.50369	-269.88400	2.01931	-5.95750	6.16358	-12.26291
TQI 4 > 40	0	Kg	200	Kg	5.23310	-5.28816	0.03936	-0.01145	0.11910	-0.24167
	3897	Kg	389.7	Kg	157.24039	-158.37348	1.19499	-3.50930	3.57262	-7.26587
	7793	Kg	1168.95	Kg	288.66881	-291.95969	2.20245	-6.44094	6.70086	-13.25467
	7962	Kg	1194.3	Kg	294.93905	-298.30304	2.25038	-6.58104	6.84647	-13.54264
	9148	Kg	1829.6	Kg	366.81423	-369.50165	2.78786	-8.19186	8.33554	-16.95700
	7793	Kg	1168.95	Kg	288.66881	-291.95969	2.20245	-6.44094	6.70086	-13.25467
	7962	Kg	1194.3	Kg	294.93905	-298.30304	2.25038	-6.58104	6.84647	-13.54264

Tabel 4.21 Perpindahan yang terjadi Pada struktur Atas Jalan Rel

Geometri	P (Axial)		Lateral Load		Displacement (U3) mm					
					+	-	+	-	+	-
					Rel		Beton		Tulangan	
TQI 1 < 15	0	Kg	200	Kg	0.00031	-0.0002039	0.000204	-0.00010	0.00002	-0.00003
	3897	Kg	389.7	Kg	0.00286	-0.00255	0.00173	-0.00133	0.00020	-0.00031
	7793	Kg	1168.95	Kg	0.01091	-0.00979	0.01937	-0.00540	0.00082	-0.00133
	7962	Kg	1194.3	Kg	0.01122	-0.00999	0.00704	-0.00551	0.00092	-0.00133
	9148	Kg	1829.6	Kg	0.01285	-0.01152	0.00806	-0.00632	0.00102	-0.00153
	7793	Kg	1168.95	Kg	0.01091	-0.00979	0.01937	-0.00540	0.00082	-0.00133
	7962	Kg	1194.3	Kg	0.01122	-0.00999	0.00704	-0.00551	0.00092	-0.00133
TQI 2 = 15 - 25	0	Kg	200	Kg	0.00031	-0.00020	0.00020	-0.00010	0.00002	-0.00003
	3897	Kg	389.7	Kg	0.00642	-0.00581	0.00408	-0.00316	0.00051	-0.00071
	7793	Kg	1168.95	Kg	0.01295	-0.01152	0.00816	-0.00632	0.00102	-0.00153
	7962	Kg	1194.3	Kg	0.01326	-0.01183	0.00826	-0.00642	0.00102	-0.00163
	9148	Kg	1829.6	Kg	0.01519	-0.01356	0.00959	-0.00744	0.00122	-0.00173
	7793	Kg	1168.95	Kg	0.01295	-0.01152	0.00816	-0.00632	0.00102	-0.00153
	7962	Kg	1194.3	Kg	0.01326	-0.01183	0.00826	-0.00642	0.00102	-0.00163
TQI 3 = 25 - 40	0	Kg	200	Kg	0.00031	-0.00020	0.00020	-0.00010	0.00002	-0.00003
	3897	Kg	389.7	Kg	0.00979	-0.00877	0.00612	-0.00479	0.00082	-0.00122
	7793	Kg	1168.95	Kg	0.01417	-0.01275	0.00897	-0.00693	0.00112	-0.00163
	7962	Kg	1194.3	Kg	0.01438	-0.01285	0.00908	-0.00704	0.00112	-0.00173
	9148	Kg	1829.6	Kg	0.01672	-0.01499	0.01040	-0.00816	0.00133	-0.00204
	7793	Kg	1168.95	Kg	0.01417	-0.01275	0.00897	-0.00693	0.00112	-0.00163
	7962	Kg	1194.3	Kg	0.01438	-0.01285	0.00908	-0.00704	0.00112	-0.00173
TQI 4 > 40	0	Kg	200	Kg	0.00031	-0.00020	0.00020	-0.00010	0.00002	-0.00003
	3897	Kg	389.7	Kg	0.00846	-0.00755	0.00530	-0.00408	0.00071	-0.00102
	7793	Kg	1168.95	Kg	0.01550	-0.01387	0.00979	-0.00755	0.00122	-0.00184
	7962	Kg	1194.3	Kg	0.01581	-0.01417	0.00999	-0.00775	0.00122	-0.00184
	9148	Kg	1829.6	Kg	0.01968	-0.01764	0.01234	-0.00959	0.00153	-0.00235
	7793	Kg	1168.95	Kg	0.01550	-0.01387	0.00979	-0.00755	0.00122	-0.00184
	7962	Kg	1194.3	Kg	0.01581	-0.01417	0.00999	-0.00775	0.00122	-0.00184

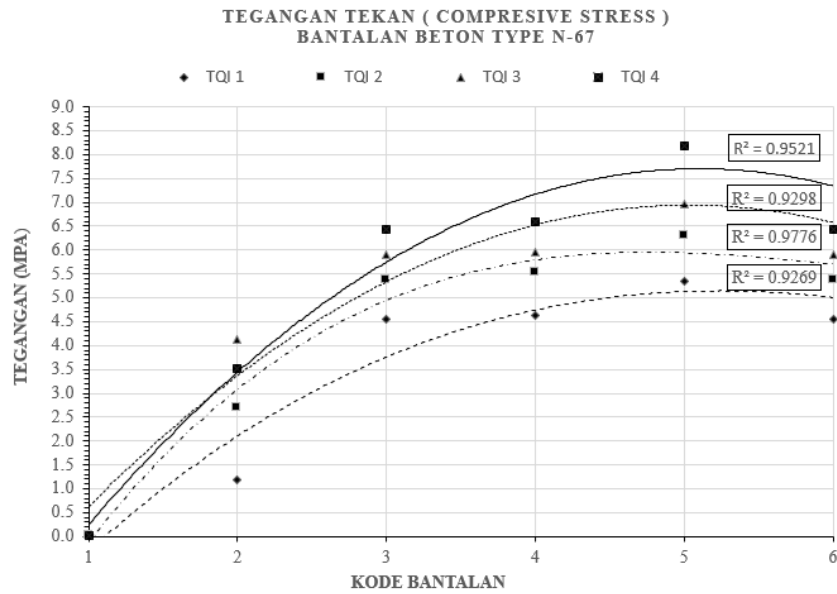
4.6.11. Perbandingan Hasil

Semakin besar nilai dari keempat parameter pengukuran geometri (TQI) kondisi struktural semakin jelek tetapi sampai batas maksimum geometri pada persyaratan di perkeretaapian Indonesia struktur atas masih kuat menumpu beban yang bekerja baik pada Rel, Bantalan ataupun tulangan. Korelasi hasil disajikan pada trendline (Polinomial) karena memilih R^2 yang mendekati nilai 1. Gambar 4.35 menunjukkan korelasi Tegangan Tarik (*Tensile Stress*) pada bantalan tipe N-67 pada masing – masing penyimpangan gemetri nilai terbesar adalah 2.787 mpa < 4.639 Mpa ($0.32 F_c^{0.67}$) maka studi tegangan tarik masih dalam batas aman.



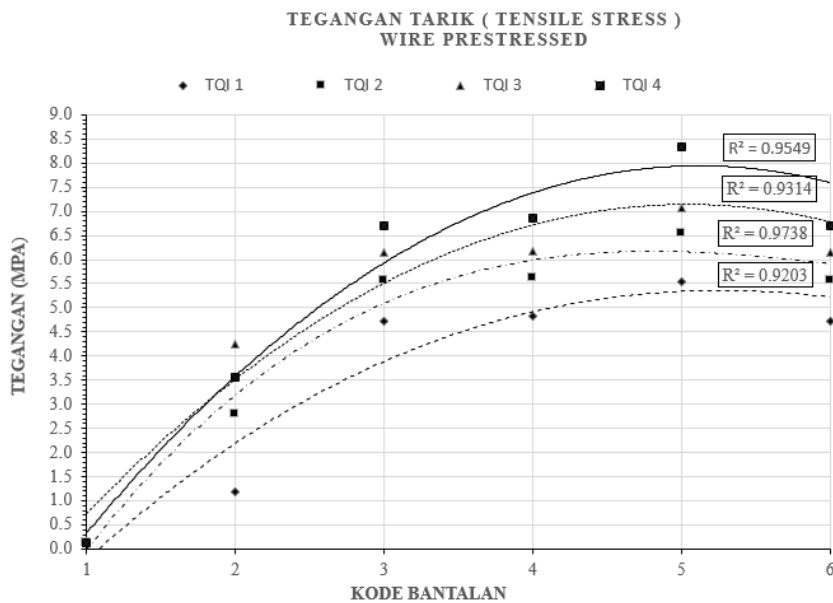
Gambar 4.36 Korelasi Tegangan Tarik Bantalan Beton

Gambar 4.36 menunjukkan korelasi tegangan tekan bantalan beton tipe N-67 dengan $F_c = 54$ Mpa dan Tulangan *Wire Prestressed* dengan kuat tarik 713 Mpa pada masing – masing penyimpangan geometri dengan hasil tegangan tekan beton (*Compressive stress*) maximum yang terjadi akibat beban yang bekerja adalah 8.191 Mpa < 45.9 Mpa ($0.85 F_c$). maka studi tegangan beton masih dalam batas aman



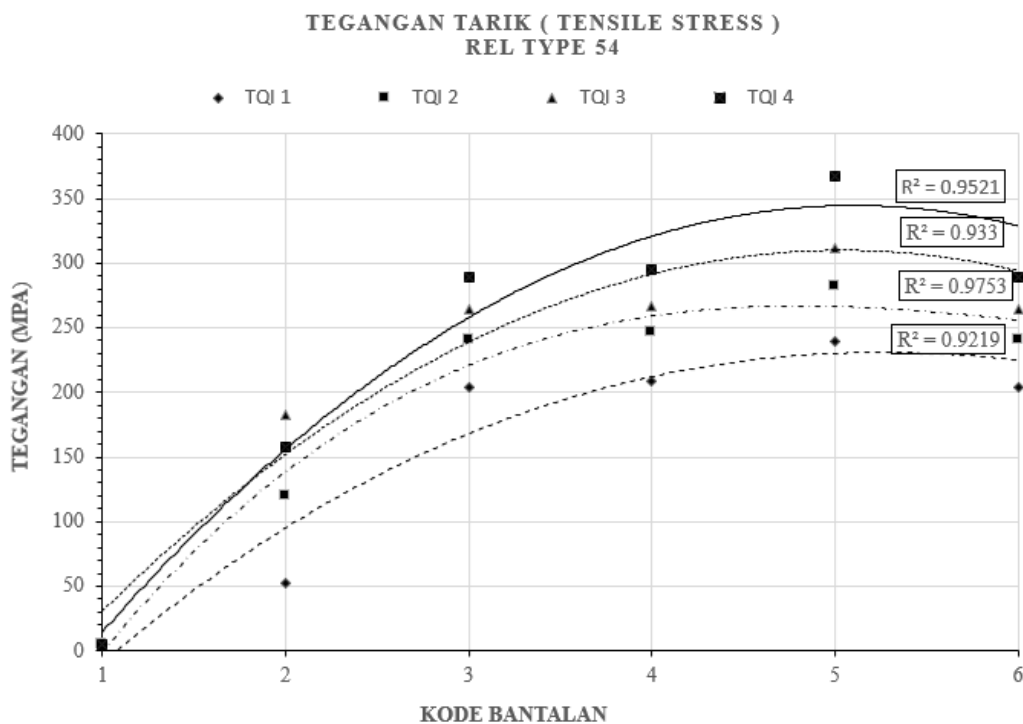
Gambar 4.37 Korelasi Tegangan Tekan Bantalan Beton

Gambar 4.37 menunjukkan korelasi tegangan tekan bantalan beton tipe N-67 dengan $F_c = 54 \text{ Mpa}$ dan Tulangan *Wire Prestressed* dengan kuat tarik 713 Mpa pada masing – masing penyimpangan geometri dengan hasil tegangan tarik (*Tensile Stress*) pada tulangan maximum yang terjadi akibat beban yang bekerja adalah $8.335 \text{ Mpa} < 713 \text{ Mpa}$.maka studi tarik tulangan masih dalam batas aman



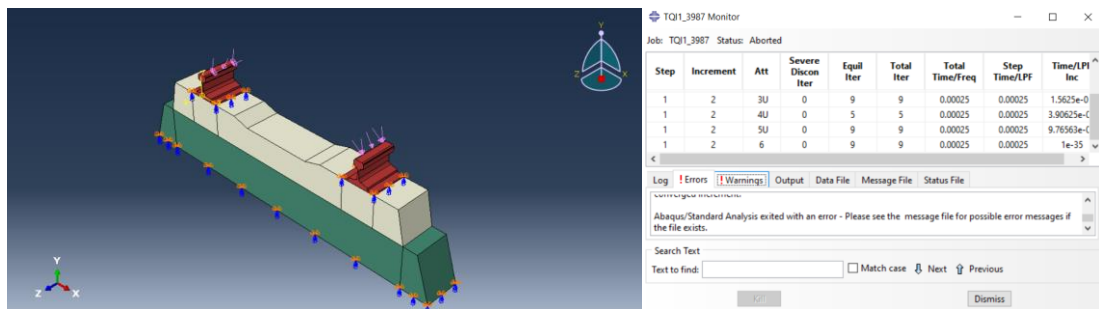
Gambar 4.38 Korelasi Tegangan Tarik Tulangan.

Maka bantalan beton masih kuat menumpu semua beban yang letaknya terjadi penyimpangan sesuai dengan nilai TQI maksimum ,sedangkan perpindahan (*Displacement*) maksimum yang terjadi pada bantalan beton adalah 0.00124 mm. Studi tarik tegangan Rel Tipe R-54 mengacu pada PM.60 tahun 2012 yaitu minimal tegangan tarik dijadikan acuan 1175 Mpa. Pada Gambar 4.35 menunjukkan korelasi tegangan tarik (*Tensile Stress*) yang terjadi pada R.54 akibat penyimpangan geometri dengan nilai maksimum adalah 366.814 Mpa < 1175 Mpa maka Rel masih batas aman, hasil semua penyimpangan geometri di lihat pada Gambar 4.38 dan displacement maksimum yang terjadi adalah 0.00196 mm.



Gambar 4.39 Tegangan tarik Rel type 54

Jadi dari studi parameter keandalan struktur atas jalan rel (Rel, Bantalan, serta Tulangan) akibat penyimpangan geometri sampai nilai maksimum 4 parameter pengukuran yaitu TQI = 40 mm struktur masih kuat menumpu beban yang bekerja. Tetapi jika nilai TQI dibuat 52.5 mm maka beban yang bekerja tidak dapat di analisa pada software ABAQUS karena beban yang bekerja menyimpang dari atas Rel yang di gambarkan pada Gambar 4.39



Gambar 4.40 Permodelan dengan nilai TQI = 52.5 mm

Dari hasil analisa menyatakan jika nilai TQI = 50 mm Flange lokomotif tidak menumpu pada atas rel (*Derailment*). Maka hasil perilaku struktur tidak dapat dianalisa dalam ABAQUS (model aborted).

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

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

1. Nilai Track Quality Indeks (TQI) dengan menggunakan cara standar deviasi didapatkan nilai maksimum = 37.44 pada tahun 2018, sedangkan data terbaru dari PT.Kereta Api Indonesia adalah 40.95 tahun 2019 terjadi peningkatan nilai TQI dari hal tersebut maka harus dilakukan pemeliharaan. Survey dengan alat ukur manual (matisa dan meter listring) diambil setelah adanya pemeliharaan maka di dapatkan pada KM + 18 – 200 -18 - 400 nilai TQI dari 33.80 pada tahun 2018 saat dilakukan pengukuran manual pada bulan Agustus 2019 menjadi 16 mm.
2. Hasil dari analisa perilaku Struktur atas jalan rel pada kondisi penyimpangan geometri dengan nilai $TQI < 15$ adalah sebagai berikut:
Pada perilaku Rel type 54 tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum adalah 238.998 Mpa, perilaku bantalan beton type N-67 tegangan tarik maksimum adalah 1.8146 Mpa, sedangkan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum 5.3359 Mpa dengan perpindahan (*displacement*) 0.000806 mm. Kondisi tegangan *wire prestressed* (Tulangan) pada bantalan adalah pada tekan 5.538 Mpa serta tarik 10.947 Mpa.
3. Hasil dari analisa perilaku Struktur atas jalan rel pada kondisi penyimpangan geometri dengan nilai $15 \leq TQI \leq 25$ adalah sebagai berikut:
Pada perilaku Rel type 54 tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum adalah 282.395 Mpa, perilaku bantalan beton type N-67 tegangan tarik maksimum adalah 2.1545 Mpa, sedangkan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum 6.2925 Mpa dengan perpindahan (*displacement*) 0.000959 mm. Kondisi tegangan *wire prestressed* (Tulangan) pada bantalan adalah pada tekan 6.4236 Mpa serta tarik 12.906 Mpa.

4. Hasil dari analisa perilaku Struktur atas jalan rel pada kondisi penyimpangan geometri dengan nilai $25 \leq TQI \leq 40$ adalah sebagai berikut:

Pada perilaku Rel type 54 tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum adalah 311.4257 Mpa, perilaku bantalan beton type N-67 tegangan tarik maksimum adalah 2.34001 Mpa, sedangkan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum 6.9695 Mpa dengan perpindahan (*displacement*) 0.00104 mm. Kondisi tegangan *wire prestressed* (Tulangan) pada bantalan adalah pada tekan 7.0774 Mpa serta tarik 14.3959 Mpa.

5. Hasil dari analisa perilaku Struktur atas jalan rel pada kondisi penyimpangan geometri dengan nilai $TQI > 40$ adalah sebagai berikut:

Pada perilaku Rel type 54 tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum adalah 366.8142 Mpa, perilaku bantalan beton type N-67 tegangan tarik maksimum adalah 2.7878 Mpa, sedangkan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum 8.1918 Mpa dengan perpindahan (*displacement*) 0.00124 mm. Kondisi tegangan *wire prestressed* (Tulangan) pada bantalan adalah pada tekan 8.33554 Mpa serta tarik 16.957 Mpa.

Dari hasil kesimpulan pada poin 2-5 struktur atas masih bisa menumpu beban yang bekerja sampai penyimpangan geometri > 40 mm, dibuktikan dengan hasil tegangan tarik Rel < 1175 Mpa, tegangan tarik beton < 4.639 , tegangan tekan beton < 45.9 dan tegangan tarik baja prestressed < 713 Mpa. Sedangkan pada permodelan dengan nilai penyimpangan geometri 52.5 mm analisa tidak dapat dilakukan karena beban yang bekerja tidak pada rel. Analisa ini dilakukan pada kondisi ideal dengan kata lain rel, bantalan, balas dan penambat pada kondisi letak dan kekuatan optimum

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 cocokkan dengan eksperimental agar hasil dari analisa struktural optimal.
4. Dalam pemeliharaan jalan rel kususnya struktur atas agar lebih teliti dalam memasang rel, bantalan maupun penambat 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.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Attard, M. M., and S. Setunge. 1996. "Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete." *ACI Materials Journal* 93(5): 432–42.
- 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.
- Esveld, C. 2001. Delft university of technology *Modern Railway Track*. Second.
- 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.
- 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 Attah-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>.
- Mander, John Barrie. 1983. *Seismic Desain Of Bridge Piers*.
- 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 & Djamaludin, Rudi. 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>.
- Rayhana, Ayi & Parikesit, Danang. 2017. "Perencanaan Pemeliharaan Jalan Reldaop vi Yogyakarta." *Prosiding Simposium II – UNIID 2017* (September): 978–79.

- Rezaie, F., M. Bayat A., and S. M. Farnam. 2016. "Sensitivity Analysis of Prestressed Concrete Sleepers for Longitudinal Crack Propagation 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*.
- Umbu, Aditya, Tana Amah, Felix Pasila, and Indra Budiono. 2013. "Simulasi Sistem Penjadwalan Kereta : Studi Kasus Daop Viii Jawa Timur." : 101–6.
- WIKA, Beton. 2016. "Railway Sleeper Prestressed Wijaya Karya Beton."
- Yi, Sirong. 2017. Principles of Railway Location and Design *Railway Transport Capacity and Construction Standards*.