

Study Perilaku Bantalan Beton Untuk Lebar Sepur 1067 mm dengan Variasi Nilai Track Quality Index (TQI)

Wawarisa Alnu Fistcar¹

¹Teknik Sipil

¹ Universitas Selamat Sri (UNISS)

Jl. Soekarno – Hatta, Km.03 Kendal, Jawa Tengah, Indonesia 51351

¹Wawarisaf@gmail.com

ABSTRACT

This research was conducted to determine the effect of geometric instability on the resistance railway structure, which is focused the upper structure railway. In assessing the value of the deviation of the path geometry using the calculation standard deviation in each measurement parameter, which is then processed into the track quality index (TQI). The measurement parameter data was obtained from the Galunggung measuring train. in the calculation value of railways quality (TQI) with parameter are used as a benchmark for determining the location of a manual survey using a measurement tool matisa and meter listring. The results of field geometry measurements are modeled with a program to help calculate structural strength. Model simulation by analyzing using Finite Element Method (FEM) for several conditions according to the geometry deviation category (TQI). The results of this study found that, concrete sleeper material properties, with concrete compressive (F_c) 54 MPa and 1400 MPa prestressed wire strength (F_y), rail type is R.54 and ballast property 100 MPa with a thickness of 30 Cm. The axial load is working at 16,241 kg and lateral load 0.1 P_{aksial} . From the analysis of the geometric deviation value category 3 ($25 < TQI < 40$), it was found that concrete sleeper specimen (B4) experienced compressive stress of 15,566 MPa and tensile stress of 5,178 MPa. Analysis of these conditions, concrete bearings can not rely on the required tensile force that is, 4,632 MPa ($0.32 F_c^{0.67}$).

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

ABSTRAK

Penelitian ini di lakukan untuk mengetahui pengaruh ketidakstabilan geometri terhadap ketahanan struktur jalan rel yang difokuskan pada struktur atas jalan rel. Dalam mengkaji nilai penyimpangan geometri lintasan menggunakan perhitungan standar deviasi pada setiap parameter pengukuran, yang selanjutnya diolah menjadi nilai track kualitas indeks (TQI). Data parameter pengukuran di dapatkan dari kereta ukur Galunggung. Hasil perhitungan nilai kualitas jalan rel (TQI) setiap kategori dijadikan patokan untuk penentuan lokasi survey manual dengan menggunakan alat ukur matisa dan meter listring. Hasil pengukuran geometri dilapangan dimodelkan dengan program bantu perhitungan kekuatan structural. Simulasi model dengan melakukan analisis menggunakan Finite Elemen Method (FEM) terhadap beberapa kondisi sesuai dengan kategori penyimpangan geometri (TQI). Hasil penelitian ini didapatkan bahwa, propertis material bantalan, dengan kuat tekan beton (F_c) 54 MPa dan kuat tarik tulangan (F_y) 1400 MPa, jenis rel adalah R.54, serta properti balas 100MPa dengan tebal 30 Cm. Beban aksial yang bekerja sebesar 16.241 Kg dan lateral load 0,1 P_{aksial} . Dari hasil perhitungan pada nilai penyimpangan geometri kategori 3 ($25 < TQI < 40$), didapatkan spesimen bantalan (B4) terjadi tegangan tekan 15.566 MPa dan tegangan tarik sebesar 5.178 MPa. Analisa kondisi tersebut, material beton tidak dapat menumpu gaya tarik yang dipersyaratkan yaitu, 4.632 MPa ($0.32 F_c^{0.67}$). Demikian terjadi juga, pada kondisi penyimpangan geometri kategori 4 ($TQI > 40$).

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

I. Pendahuluan

Arus lalu lintas kereta api akan terus meningkat sesuai dengan ekonomi. Sebab kereta api adalah moda transportasi darat yang hampir bisa dipastikan ketepatan headway dan waktunya. Kondisi tersebut dapat mempengaruhi keadaan geometri lintasan yang menyebabkan terjadinya penurunan kualitas lintasan sehingga perlu suatu pemeliharaan untuk mengukur suatu kondisi dan kualitas lintasan. Terkait dengan hal

ini, kecelakaan lalu lintas kereta api telah lama menjadi masalah sosial-ekonomi yang telah menyebabkan meningkatnya kekhawatiran masyarakat di seluruh dunia (Lasisi and Attoh-Okine 2018). Perlu diadakannya peningkatan keandalan kondisi dan analisa perbaikan jalan rel kereta api dengan metode pemeliharaan yang tepat sehingga kegagalan pada jalan rel dapat berkurang atau bahkan tidak terjadi. Hal tersebut sangat mungkin terjadi bila

struktur jalan rel yang lambat laun mengalami penurunan kualitas tidak dilakukan tindakan. Oleh karena itu, dilakukanlah pemeliharaan untuk mengontrol kinerja operasional kereta api. Namun pelaksanaan pemeliharaan sering terpengaruh dengan masalah biaya yang terbatas maupun terlambat dalam pencairannya, sehingga dana yang ada harus digunakan dengan bijak agar pengalokasiannya tepat sasaran (Aulia and Parikesit 2017) Namun, industri kereta api mencoba meningkatkan produktivitas tim pemeliharaan mereka melalui kontrol yang lebih efektif terhadap kerusakan jalur. 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 (Fistcar et al. 2020) Hasil pengukuran dari kereta ukur adalah angka yang dapat (Fistcar et al. 2020) memberikan informasi kualitas jalan rel yang dilewati pada suatu wilayah Daerah Operasi. Angka tersebut dibedakan menjadi 4 (empat) kategori yaitu, kategori baik sekali, baik, sedang dan jelek. Metode pengukuran ini disebut Track Quality Index (TQI). Track Quality Index (TQI) terdiri dari 4 (empat) parameter pengukuran lebar spur, angkatan, listringan dan pertinggian (Wantana et al. 2021) . Selain parameter tersebut, selama pengukuran juga dicatat kecepatan operasional pengukuran. Pengambilan data ukur dilakukan secara kontinyu sepanjang segmen (200 m). Untuk angkatan, listringan dan pertinggian satu segmen mewakili panjang 40 meter. Sedangkan untuk lebar spur 1 (satu) segmen mewakili panjang 20 meter. Namun industri kereta api terus melakukan peningkatan dalam kontrol perawatan kerusakan jalur agar lebih efektif. Beberapa pendekatan dan metodologi untuk mengevaluasi degradasi track untuk optimasi pemeliharaan track, telah dikembangkan selama beberapa tahun terakhir, dari model sederhana yang hanya terkonsentrasi pada satu komponen track individu hingga yang paling komprehensif yang merangkul semua faktor utama dalam penurunan kualitas lintasan. Ada dua aspek untuk memprediksi pemeliharaan track, yaitu degradasi struktural dan dagrasi geometri. Pada aspek pertama, melacak model degradasi didasarkan pada pertumbuhan kondisi struktur fisik. Parameter yang mempengaruhi degradasi track, termasuk tonase passage, kecepatan kereta api, karakteristik balas, jenis rel, jenis bantalan dll (Berawi et al. 2010) Sebaliknya, melacak model degradasi dalam aspek kedua menggunakan parameter geometri sebagai kriteria degradasi utama harus dilakukan. Karena kondisi geometri lintasan memainkan peran penting dalam memastikan

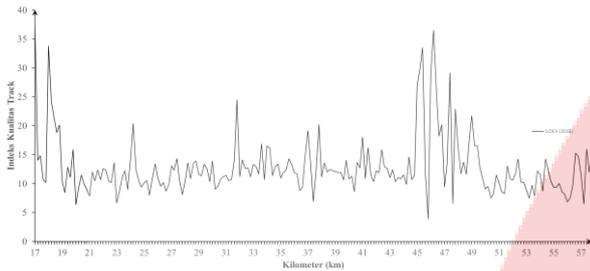
keselamatan perjalanan kereta dan kenyamanan penumpang (Aulia and Parikesit 2017). Penggantian komponen jalan rel biasanya diukur dari komponen terpasang dan umur layanan. Bantalan dan balas sudah memiliki ketetapan umur layan pada masing-masing jenisnya. Banyaknya penggantian komponen bergantung dengan jumlah komponen yang terpasang di lapangan. Berbeda dengan rel yang meskipun dengan jenis rel yang sama, umur layannya belum tentu sama. Hal ini dikarenakan oleh lamanya umur layan rel yang dipengaruhi beberapa faktor, yaitu nilai koefisien keausan rel yang berhubungan dengan lengkung tempat dimana kerap terjadi (Liu et al. 2015), daya angkut lalu lintas yang menggambarkan frekuensi gesekan antar roda kereta api dengan rel, dan jenis rel itu sendiri yang berkaitan (Aulia and Parikesit 2017). Dari pernyataan tersebut umur layanan dan kekuatan ijin dari rel sendiri dipengaruhi oleh beberapa aspek dan tidak bisa diprediksi. Pembebanan dan pergerakan kereta api di atas struktur jalan rel menimbulkan berbagai gaya pada rel. Gaya-gaya tersebut diantaranya gaya vertikal, gaya transversal (lateral) dan gaya longitudinal. Gaya vertikal menyebabkan terjadinya defleksi vertikal yang merupakan indikator terbaik untuk penentuan kualitas, kekuatan dan umur jalan rel. Secara global, besarnya gaya vertikal dipengaruhi oleh pembebanan oleh lokomotif, kereta maupun gerbong. Selain itu dipengaruhi oleh ketidakratahan geomtri jalan rel yang bekerja pada titik yang tidak sama dengan gaya vertikal. Gaya ini dapat menyebabkan tercabutnya penambat akibat gaya angkat (uplift force), pergeseran pelat andas dan memungkinkan terjadinya derailment (anjlog atau keluarnya roda kereta dari rel) (Esveld 2001) Pada literatur *modern railway track Delft University of Technology*, mengatakan bahwa tegangan pada rel sangat bervariasi tergantung jarak antar bantalan, letak gaya yang bekerja pada struktur rel serta besarnya gaya yang bekerja pada struktur rel

II. Metode

A. Umum

Permodelan dilakukan dalam segmen per 3 meter agar mendapatkan hasil yang maksimal. Permodelan dilakukan dengan program bantu ABAQUS (Fistcar et al. 2020). Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan perilaku bantalan sesuai dengan nilai Track Quality Index (TQI) untuk batas kerusakan perkategori dapat dilihat Pada **Tabel 1**. Output hasil pengukuran dengan KA. Galunggung pada lintas Surabaya –

Mojokerto dapat dilihat pada **Gambar 1**. Dihitung dengan standar deviasi



Gambar 1 Hasil pengukuran Track Quality Index (TQI) dengan menggunakan KA.Galunggung

Tabel 1. Batasan Nilai Kerusakan Per Kategori

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

B. Lokasi dan Waktu Pemilihan

Penelitian ini berlokasi di DAOP 7 Surabaya pada lintas Surabaya – Mojokerto.

Survey eksisting dilakukan dengan secara manual agar mengetahui posisi dan jarak antar bantalan. Pengukuran eksisting seperti pada **Gambar 2**



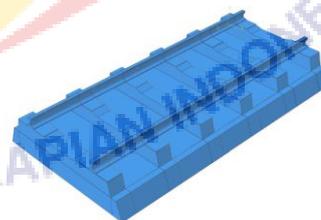
Gambar 2 Survey eksisting

III. Hasil dan Pembahasan

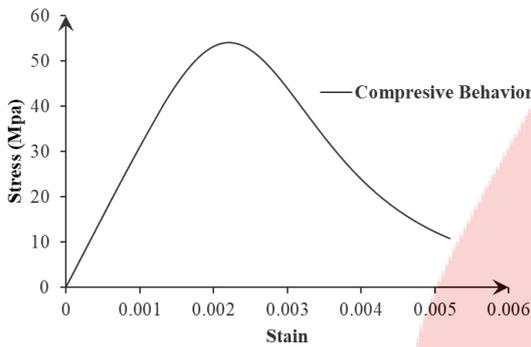
A. Permodelan dengan program Bantu

Permodelan bentuk jalan kereta menggunakan program bantu (FEA) Finite elemn analisis yang sesuai dengan penyimpangan track quality indeks. (Fistcar et al. 2020), Visualisasi bentuk dapat dilihat pada **Gambar 3**. Hasil ahir dari penelitian ini adalah perilaku bantalan beton terhadap penyimpangan geometri arah vertikal serta horizontal. Untuk mengetahui perilaku struktural mencakup semua aspek yang ada dalam jalur kereta api (struktur atas). Karena keterbatasan data penelitian sebelumnya tentang bantalan type N-67 maka material dicari dengan persamaan empiris. Pengisian properti

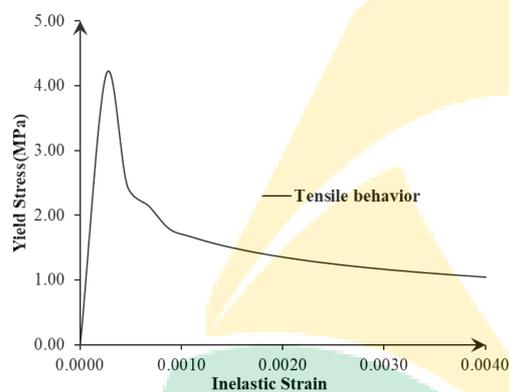
material pada program bantu, didekati dengan persamaan empiris yang di hitung secara manual. Persamaan empiris digunakan untuk menentukan hubungan regangan plastis terhadap tegngan leleh, pada kuat tekan beton, kuat tarik beton, dan kuat tarik baja tulangan. Perilaku tegangan dan regangan plastis beton ditentukan dengan perilaku *Concrete Damaged Plasticity* (CDP) pada program bantu perhitungan finite elemen analisis (FEA). Input material beton pada program bantu terdiri dari *tensile behavior*, *elastic behavior* dan *Concrete Damage Plasticity* (CDP) . Input elastis behavior berisi angka rasio dan modulus elastisitas. Hasil analisa model tekan beton menggunakan kuat tekan beton 54 MPa (Wijaya Karya, 2016) ditunjukkan pada **Gambar 4** serta divalidasi dengan pendekatan persamaan (Murat Saatcioglu & Razvi Salim, 1999). Sedangkan hasil model tarik beton 4,633 Mpa, divalidasi dengan pendekatan rumus split hasil silinder beton mutu biasa (no silica foam) (Attard and Setunge, 1996) $F_{sp} = 0.32(F_c)^{0.67}$ untuk beton no silica fume ditunjukkan pada **Gambar 5**. Hasil model tarik tulangan menggunakan kuat leleh tarik 1400 MPa divalidasi dengan pendekatan persamaan (Mander, 1989) dapat dilihat pada **Gambar 6**. Parameter-parameter yang diisikan ke definisi perilaku material, khususnya property material beton pada program bantu dapat disajikan pada **Tabel 2**, parameter material beton harus menggunakan input damage plastisi pada program bantu . Parameter eksetrisitas, FB_0/FC_0 , dan K sesuai yang direkomendasikan oleh program bantu dan mengacu pada beberapa penelitian sebelumnya seperti yang mensyarkan dilation angel adalah $15^\circ - 50^\circ$ (Michał and Andrzej n.d.) dan penelitian (Ren et al. 2015) Parameter sudut dilatasi dan viskositas diasumsikan agar prediksi sesuai dengan hasil perhitungan manual. Parameter viskositas 0,001 diasumsikan agar nilai mendekati nol (Samani and Attard 2012). Input material tarik tulangan yang diinputkan pada program bantu adalah elastisiti, plastisiti, serta density. Perilaku plastisiti pada tarik tulangan di definisikan dengan poisson rasion serta modulus young dan untuk elastisiti diinputkan sesuai modulus elastisitas tarik tulangan.



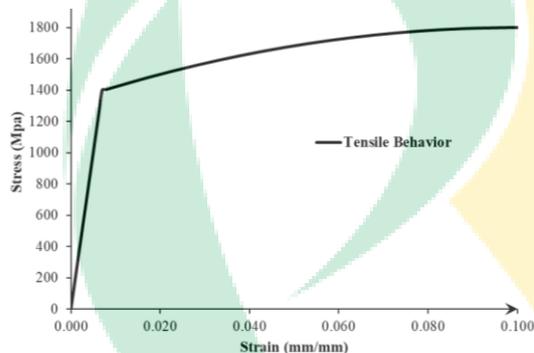
Gambar 3 Visualisasi Permodelan dalam Satu Segmen.



Gambar 3 Kurva Tegangan Regangan Model Konstitutif Tekan Beton



Gambar 4 Kurva Tegangan Regangan Model Konstitutif Tarik Beton



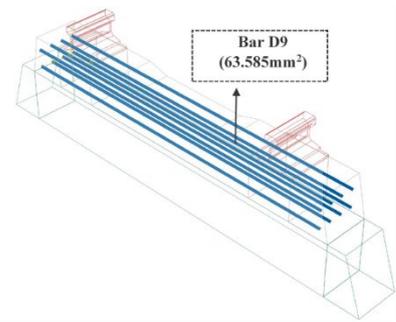
Gambar 5 Kurva Tegangan Regangan Model Konstitutif Tarik Tulangan $F_y = 1400$ MPa.

Material ballast menggunakan 100 Mpa, dengan tebal 30 Cm.

B. Permodelan Bantalan Type N67 (PT.Wijaya Karya)

Permodelan pada bantalan beton tipe N-67 terdiri dari 3 part yaitu beton menggunakan elemen solid dengan kode CDR, bar atas dan bawah menggunakan elemen solid T3D2 diberikan gaya tekan. Pada elemen T3D2 input yang diberikan pada program bantu adalah luas penampang $A =$

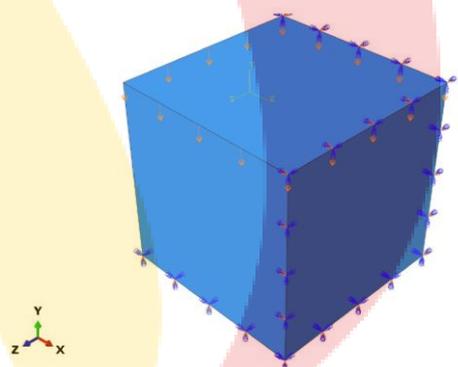
mm^2 . Permodelan pada bantalan beton tipe N-67 dapat dilihat pada **Gambar 6**



Gambar 6 Bantalan Beton tipe N-67

C. Study Parameter Beton Akibat Beton Tekan

Hasil studi parameter tekan beton dengan metode elemen hingga pada program bantu akan diverifikasi dengan pendekatan empiris hubungan tegangan dan regangan (Murat Saatcioglu & Razvi Salim 1999). Studi parameter beton tekan dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter beton pada program bantu, sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan mendekati hasil valid.. Beton dimodelkan dengan part extruction sebagai kubus dengan ukuran 100 x 100 mm² kemudian dibebani titik pada pusat massa model dengan displacement kearah negatif sesuai dengan rumus split hasil silinder beton mutu biasa (Attard and 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 7**



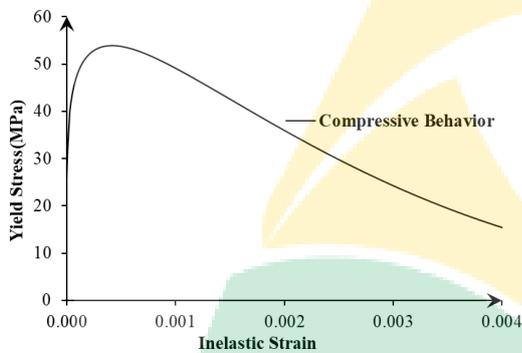
Gambar 7 Metode Beton Akibat Beban Tekan (Bondary Condition Tekan)

Data input untuk material tekan (*Compressive behaviour*) adalah *inelastic stain*. *Yeild stress* dan *damage* parameter di tunjukan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9** data – data tersebut didapatkan dari analisis regangan akibat beban

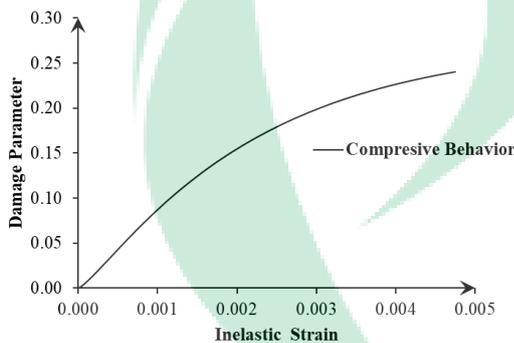
$$F_{pl} = \frac{F_{cc} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_1} \right)^r}{r - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_1} \right)^r}$$

tekan. Yeild stress tegangan plastis beton dimulai dari persamaan :

dengan hasil = 24.971 MPa, atau biasanya = 0.45 F_c' . *Inelastic strain* merupakan selisih regangan saat kondisi plastis 24,971 MPa, dengan regangan elastic damage. Damage parameter menunjukkan tingkat penurunan modulus elastisitas beton akibat beban tekan. Parameter ini bernilai nol hingga satu. Pada beton terkekang adanya residual yang menyebabkan damage parameter tekan saat kondisi ultimit beton terkekang tidak bernilai satu yang berarti beton masih mampu memikul beban tekan. Sedangkan dalam penelitian ini bantalan tipe 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.



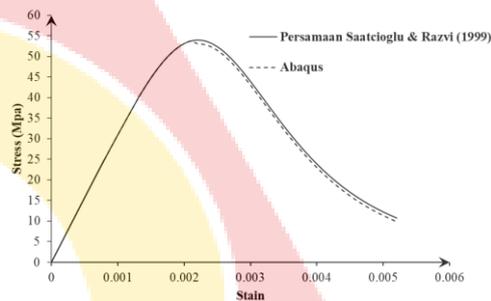
Gambar 8 Kurva *inelastic strain -Yeild compressive stress* F_c 54 MPa



Gambar 9 Kurva inelastic strain - damage parameter compressive stress F_c 54 MPa.

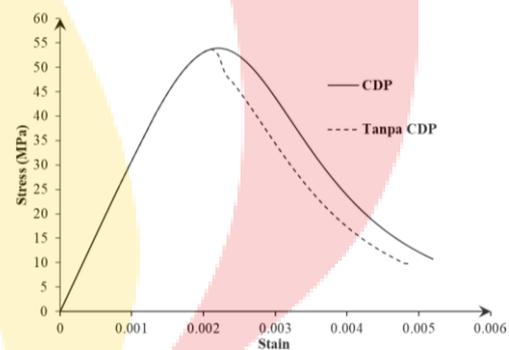
Data yang diinput pada *compressive behavior* program bantu didapatkan dari persamaan *fracture energy*. Data yang diinput tersebut ditunjukkan dalam bentuk kurva pada **Gambar 10** dan **Gambar 11** Hasil damage parameter untuk beton mutu biasa (**no silica foam**) pada saat puncak bernilai kecil, supaya 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 (program bantu), didapatkan sebesar 53,118 MPa yang mempunyai silisih 0,881% dari stress ultimit manual yang ditunjukkan pada **Gambar 11** Memperlihatkan hasil permodelan program bantu, dan hasil manual pendekatan (Murat Saatcioglu & Razvi Salim 1999) sudah menunjukkan kemiripan. Dengan input coba – coba sesuai dengan parameter yang disyaratkan oleh program bantu yaitu: dilation angle = 40, eccentricitas = 0,1, $F_b/f_c = 1.16$, $K = 0.667$, 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 (Ren et al. 2015)



Gambar 10 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan menggunakan nilai viskositas 0.001

Damage parameter pada input material beton tekan pada program bantu, menentukan hasil output kurva tegangan regangan yang didapatkan. Hal ini terlihat dari perilaku softening yang lebih baik ditunjukkan dengan adanya input damage parameter. Hasil output kurva tegangan regangan tanpa menggunakan damage parameter menghasilkan kurva yang lebih tajam pada bagian softening. Perbedaan dengan input parameter CDP (*Concrete damage plasticity*) ditunjukkan pada **Gambar 11**

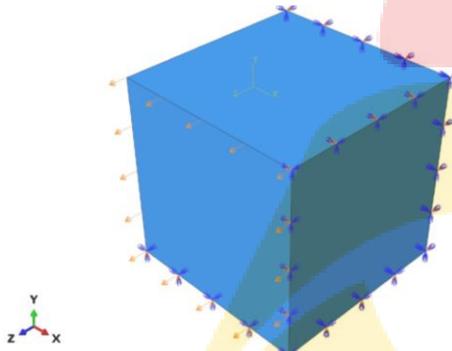


Gambar 11 Kurva tegangan-regangan beton akibat tekan input CDP dan tidak dengan CDP

D. Study Parameter Beton Akibat Beban Tarik

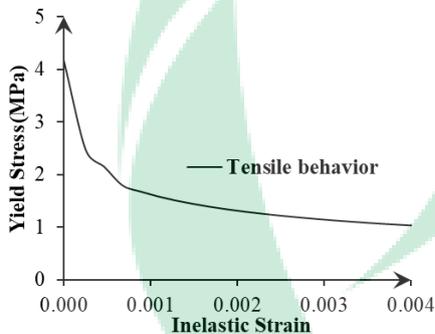
Studi input parameter tarik beton dilakukan sebagai verifikasi hasil hubungan tegangan dan regangan beton akibat tarik. Hubungan tegangan dan regangan beton hasil metode elemen hingga (program bantu) akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan

empiris. Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter beton pada program bantu, sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan tarik beton yang diharapkan. Beton dimodelkan sebagai kubus dengan ukuran 100 x 100 mm² kemudian dibebani tarik titik pada sudut elemen kubus dengan displacement sebesar 1 mm pada *boundary condition*. Properti plastis yang tepat didefinisikan dan dianalisis untuk mendapatkan respons nonlinier pada sistem struktural (Iranata, Wahyuni, and Soegihardjo 2010). Pengujian di tunjukan pada **Gambar 12**

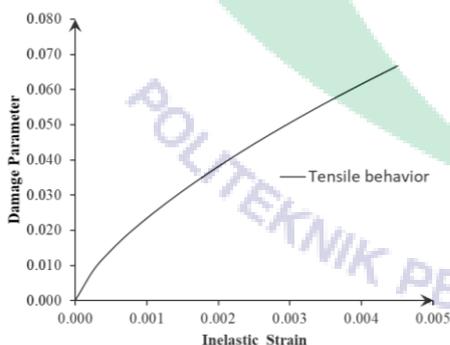


Gambar 12 Metode Beton Akibat Beban Tarik (Bondari Condition)

Berdasarkan regangan maksimal pada kurva hubungan tegangan-regangan beton yang ditunjukkan pada **Gambar 13** dan **Gambar 14** dengan pendekatan persamaan dengan rumus split hasil silinder beton mutu biasa (Attard and Setunge 1996) $F_{sp} = 0.32(F_c)^{0.67}$ untuk beton *no silica fume* = 4.162 MPa

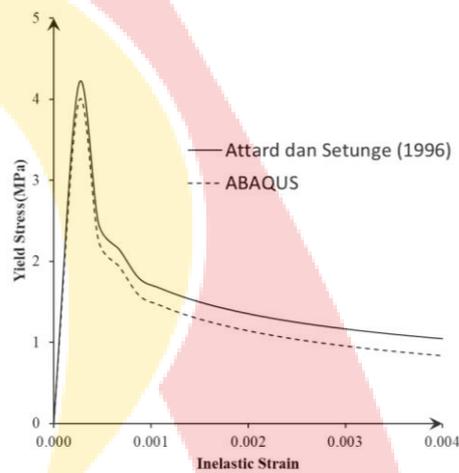


Gambar 13 Kurva inelastic strain-yeild tensile stress F_c 54 MPa



Gambar 14 Kurva inelastic strain-damage parameter beton tarik F_c 54 MPa

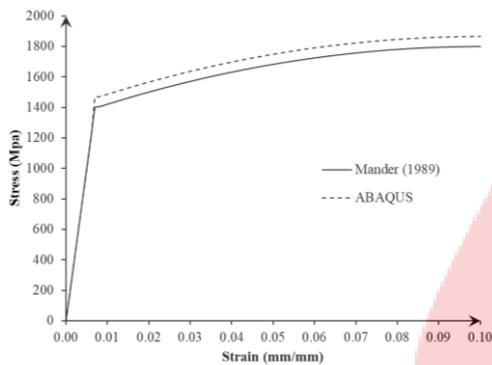
Hasil damage parameter untuk beton mutu tinggi pada saat puncak bernilai kecil supaya regangan plastis pada kurva tegangan regangan beton tidak bernilai negatif. Pada pemodelan spesimen bantalan pada program bantu, dikarenakan model yang lebih kompleks viskositas tidak dapat diinput sebesar 0 namun harus mendekati 0. Oleh karena itu dalam pemodelan bantalan beton menggunakan viskositas 0,001 pada CDP beton program bantu. Hasil output *stress ultimit* pada uji axial tarik kubus untuk spesimen bantalan type N-67 pada pemodelan *finite element* (progam bantu) didapatkan sebesar 3,9596 MPa yang mempunyai silisih 2,1 % dari stress ultimit pendekatan attard dan setunge yang ditunjukkan pada **Gambar 15**



Gambar 15 Kurva tegangan-regangan beton akibat tarik menggunakan persamaan Attard dan Setunge (1996).

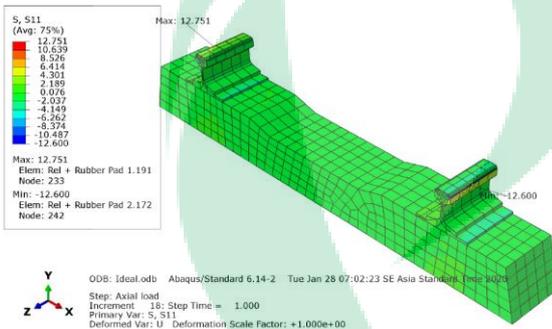
E. Study Parameter Tarik Tulangan

Studi input tarik tulangan dilakukan sebagai verifikasi hasil hubungan tegangan dan regangan tulangan akibat tarik. Hubungan tegangan dan regangan tulangan hasil metode elemen hingga dengan progam bantu, akan diverifikasi terhadap hasil pendekatan empiris. Hal ini dilakukan untuk membuktikan bahwa input parameter tulangan pada progam bantu sudah sesuai dengan hasil tegangan-regangan tulangan yang diharapkan. Tulangan D9 dimodelkan wire tipe truss (TD32) dengan ukuran 100 mm, kemudian dibebani tarik titik pada ujung dengan displacement sebesar 1 mm pada *boundary condition*, berdasarkan regangan maksimal pada kurva hubungan tegangan-regangan tulangan yang ditunjukkan pada **Gambar 4.20**. Hasil *output stress* ultimit pada uji axial tarik tulangan untuk spesimen bantalan type N-67 pada pemodelan *finite element* (progam bantu), didapatkan sebesar 1465 MPa pada strain 0,02 yang mempunyai silisih 0,065% dari *stress* ultimit manual dari pendekatan Mander (1989), yang ditunjukkan pada **Gambar 16**



Gambar 16 Kurva tegangan-regangan tulangan kuat leleh 1400 MPa akibat tarik menggunakan persamaan Mander (1989)

Dari hasil pemodelan tulangan menggunakan elemen Truss kode T3D2 pada ABAQUS, memperlihatkan kemiripan dengan hasil perhitungan manual dengan menggunakan persamaan (Mander 1989). Hal ini menunjukkan bahwa Finite Elemen Analisis (FEA), dengan program bantu (ABAQUS), mempunyai prediksi yang baik pada studi input parameter beton mutu 54 MPa (*no silica foam*) dan baja mutu tinggi (*wire prestressed*). Pada kondisi beban ideal, tegangan pada rel R.54 adalah sebesar 12.711 MPa, sedangkan pada FEA adalah 12.751 MPa selisih 0.04%, maka hasil korelasi antara persamaan empiris setiap material, serta penelitian sebelumnya adalah valid. Hasil output program bantu hasil tegangan pada rel type R.54 dapat dilihat pada **Gambar 17**



Gambar 17 Tegangan Pada Rel Type 54

Akibat ada perbedaan letak geometri secara horizontal dan vertikal, serta kondisi spring stiffness suatu tanah, maka momen yang bekerja pada struktur atas jalan rel berbeda. Besar spring stiffness megacu pada penelitian (Bowles 1997) yang disajikan pada **Tabel 2** Karena dalam penelitian ini kondisi tanah aktual tidak dibahas maka menggunakan data sekunder.

Tabel 2. Nilai Spring stiffness tanah

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

Penelitian ini menggunakan 3 jenis tanah yaitu tanah yang mempunyai nilai CBR . 6 % dan mempunyai kepadatan 95% sesuai dengan Peraturan Menteri No.60 tahun 2012, maka dipilih 3 tanah pasir, lempung dan lanau.

Hasil perhitungan momen pada penyimpanan TQI diinputkan pada ABAQUS menu *load boundary condition* dengan tipe beban *displacement/rotation* kearah kepala rel. Untuk input kondisi tanah juga sesuai dengan *spring stiffnes* dari bowles 1997 yang di inputkan pada permukaan bawah ballas. Dengan arah berlawanan dengan arah beban yang bekerja yang . Dari simulasi Finite Elemen Method (FEM) didapatkan perilaku bantalan beton tipe N-67 dengan batas kekuatan sesuai ketetapan Attard and Setunge (1996) dalam ACI material journal :

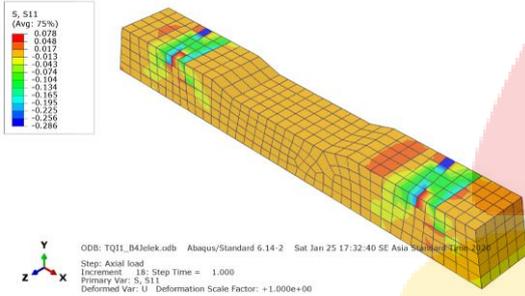
- Kekuatan tekan beton (Compressive strength) adalah $0.85F_c' = 0.85 \times 54 = 45.9$ MPa.
- Kekuatan tarik beton (Tensile strength) adalah $0.32 F_c'^{0.67}$ (beton tanpa bahan pengikat). $0.32 \times 54^{0.67} = 4.6329$ MPa.

F. Track Quality Indeks (TQI) Kategori 1

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

- $B_1 = (3897 \times 2) + (3897 \times 2) = 15588$ Kg.mm
- $B_2 = (7793 \times 2) + (7793 \times 2) = 31172$ Kg.mm
- $B_3 = (7962 \times 2) + (7962 \times 2) = 31848$ Kg.mm
- $B_4 = (9148 \times 2) + (9148 \times 2) = 36592$ Kg.mm
- $B_5 = (7962 \times 2) + (7962 \times 2) = 31848$ Kg.mm

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



1. Pada kondisi tanah pasir tegangan tekan (*compressive stress*) adalah 2.587 MPa dan tegangan tarik (*Tensile stress*) adalah 0.601 MPa yang dapat dilihat pada hasil program pada **Gambar 18** pada gambar berwarna merah menunjukkan beton tertarik sedangkan yang berwarna biru adalah beton tertekan.

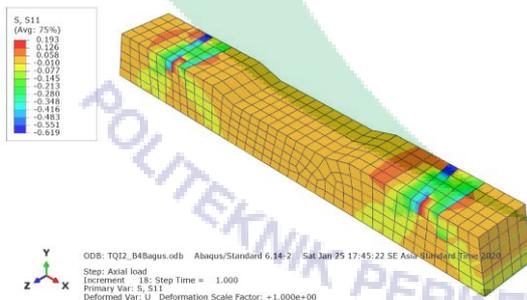
Gambar 18 Perilaku Beton TQI 1 Tanah *Sand dens*

Kelemahan program bantu (ABAQUS), tidak mempunyai standart satuan, jadi kita harus mengasumsikan sendiri standart yang akan di pakai proses perhitungan pada program bantu. Hasil dari analisa tegangan tarik 0.059 dan tegangan tekan 0.232, agar satuan jadi MPa maka harus dikonfersi dengan 10.1937.

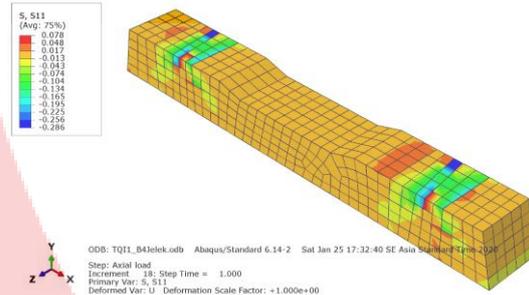
$$\begin{aligned} \text{Tegangan Tarik} &= 0.059 \times 10.1937 \\ &= 0.60143 \text{ MPa} \\ \text{Tegangan tekan} &= 0.232 \times 10.1937 \\ &= 2.587 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

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

2. Pada kondisi tanah lanau di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 0.693 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 2.609 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 19**



Gambar 19 Perilaku Beton TQI 1 Tanah *Silty Sand*



3. Pada kondisi tanah lempung di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 0.795 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 2.915 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 20**

Gambar 20 Perilaku Beton TQI 1 Tanah Clay

Analisa dihasilkan nilai tegangan tekan pada semua kondisi tanah sebesar 2.915 MPa < 45.9 MPa serta, tegangan tegangan tarik sebesar 0.795 MPa < 4.632 MPa, bantalan beton masih bekerja optimal untuk menumpu beban tekan serta tarik pada kondisi penyimpangan nilai track quality indeks 1. Nilai track quality indek pada penyimpangan 1 dapat menahan beban tarik dan tekan.

G. Track Quality Indeks (TQI) Kategori 2

Besarnya momen yang bekerja pada pada TQI kategori 2 adalah :

$$\begin{aligned} \sum \text{Momen} &= 0 \\ M_1 &= P_1 \cdot \Delta_1 + P_2 \cdot \Delta_2 \\ M1_{TQI2} &= 9.148 \times 6 + 9.148 \times 5 \\ &= 100.628 \text{ Kg.mm} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} 1.B1 &= (3897 \times 5) + (3897 \times 6) = 42867 \text{ Kg.mm} \\ 2.B2 &= (7793 \times 5) + (7793 \times 6) = 85723 \text{ Kg.mm} \\ 3.B3 &= (7962 \times 5) + (7962 \times 6) = 87582 \text{ Kg.mm} \\ 4.B4 &= (9148 \times 5) + (9148 \times 6) = 100628 \text{ Kg.mm} \\ 5.B5 &= (7962 \times 5) + (7962 \times 6) = 87582 \text{ Kg.mm} \end{aligned}$$

Perhitungan momen setiap bantalan pada 1 (satu) segmen penelitian, dalam 3 (tiga) meter pengukuran momen yang terjadi akibat batas penyimpangan kategori tiga, nilai maksimum adalah 100.628 Kg.mm. Hasil seluruh bantalan di tampilan dalam bentuk grafik dibawah, contoh hasil kondisi bantalan dengan penyimpangan kategori 2 (dua) seperti dibawah :

1. Pada kondisi tanah pasir di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 1.967 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 6.309 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 21**

untuk menumpu beban tekan serta tarik pada kondisi penyimpangan nilai track quality indeks 2. Nilai track quality indeks pada penyimpangan 2 dapat menahan beban tarik dan tekan.

H. Track Quality Indeks (TQI) Kategori 3

Besarnya momen yang bekerja pada pada TQI kategori 3 adalah :

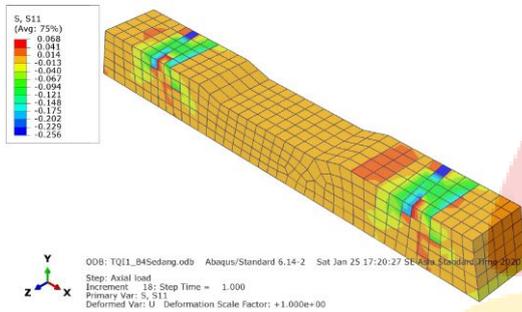
$$\begin{aligned} \sum \text{Momen} &= 0 \\ M_1 &= P_1 \cdot \Delta_1 + P_2 \cdot \Delta_2 \\ M_{1 \text{ TQI } 3} &= 9.148 \times 9 + 9.148 \times 10 \\ &= 173.812 \text{ Kg.mm} \end{aligned}$$

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

1. B1 = (3897 x 9) + (3897 x 10) = 74043 Kg.mm
2. B2 = (7793 x 9) + (7793 x 10) = 148067 Kg.mm
3. B3 = (7962 x 9) + (7962 x 10) = 151278 Kg.mm
4. B4 = (9148 x 9) + (9148 x 10) = 173812 Kg.mm
5. B5 = (7962 x 9) + (7962 x 10) = 151278 Kg.mm

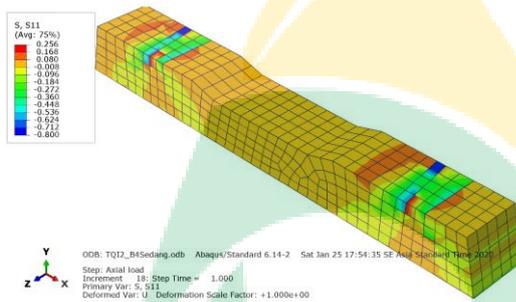
Perhitungan momen setiap bantalan pada 1 (satu) segmen penelitian, dalam 3 (tiga) meter pengukuran momen yang terjadi akibat batas penyimpangan kategori tiga, nilai maksimum adalah 173.812 Kg.mm. Hasil seluruh bantalan di tampilkan dalam bentuk grafik dibawah, contoh hasil kondisi bantalan dengan penyimpangan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

1. Pada kondisi pasir di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 3.781 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 11.518 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 24**



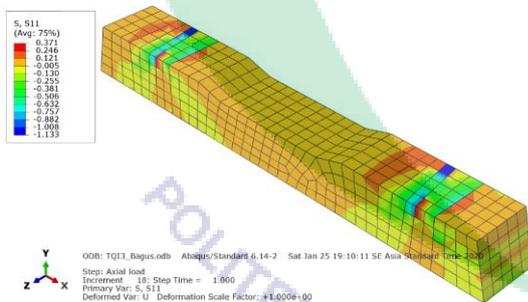
Gambar 21 Perilaku Beton TQI 2 Tanah pasir

2. Pada kondisi tanah lanau di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 2.609 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 8.154 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 22**



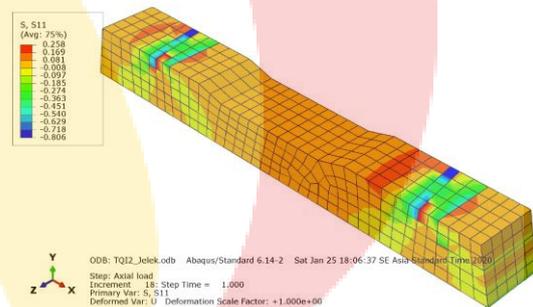
Gambar 22 Perilaku Beton TQI 2 Tanah lanau

3. Pada kondisi tanah lempung di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 2.692 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 8.216 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 23**



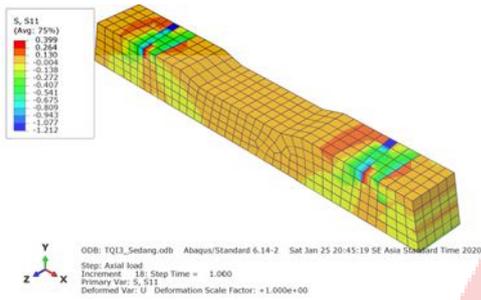
Gambar 23 Perilaku Beton TQI 2 Tanah lempung

Analisa dihasilkan nilai tegangan tekan pada semua kondisi tanah sebesar 9.747 MPa < 45.9 MPa serta, tegangan tegangan tarik sebesar 1.424 MPa < 4.632 MPa, bantalan beton masih bekerja optimal



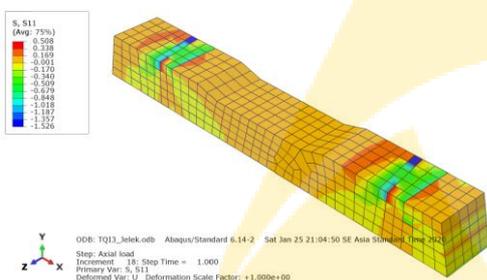
Gambar 24 Perilaku Beton TQI 3 Tanah Sand dance

2. Pada kondisi tanah lanau di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 4.067 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 12.355 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 25**



Gambar 25 Perilaku Beton TQI 3 Tanah *Silty Sand*

3. Pada kondisi tanah lempung di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 5.178 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 15.556 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 26**



Gambar 26 Perilaku Beton TQI 3 Tanah *Clay*

Analisa dihasilkan nilai tegangan tekan pada semua kondisi tanah sebesar 15.556 MPa < 45.9 MPa serta, tegangan tegangan tarik sebesar 5.178 MPa < 4.632 MPa, bantalan beton masih bekerja optimal untuk menumpu beban tekan serta tarik pada kondisi penyimpangan nilai track quality indeks 3. Akan tetapi jika kondisi tanah jelek pada penyimpangan nilai track quality indeks 3 pada specimen bantalan 4 beban tarik melebihi syarat dari persamaan beban tarik $0.32 \times 54^{0.67} = 4.6329$ MPa.

I. Track Quality Indeks (TQI) Kategori 4

Besarnya momen yang bekerja pada pada TQI kategori 4

$$\begin{aligned} \sum \text{Momen} &= 0 \\ M_1 &= P_1 \cdot \Delta_1 + P_2 \cdot \Delta_2 \\ M1_{TQI4} &= 9.148 \times 10 + 9.148 \times 15 \\ &= 274.440 \text{ Kg.mm} \end{aligned}$$

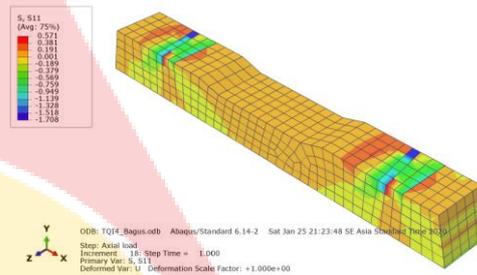
Momen yang terjadi pada setiap bantalan pada segmen pengukuran (5 bantalan), sebagai berikut :

- 1.B1 = (3897 x 10) + (3897 x 15) = 97425 Kg.mm
- 2.B2 = (7793 x 10) + (7793 x 15) = 194825 Kg.mm
- 3.B3 = (7962 x 10) + (7962 x 15) = 199050 Kg.mm
- 4.B4 = (9148 x 10) + (9148 x 15) = 228700 Kg.mm
- 5.B5 = (7962 x 10) + (7962 x 15) = 199050 Kg.mm

Dari hasil analisa yang diakibatkan penyimpangan pada kategori 3 (tiga), bantalan sudah tidak bisa menahan beban tarik (tensile) yang bekerja, maka

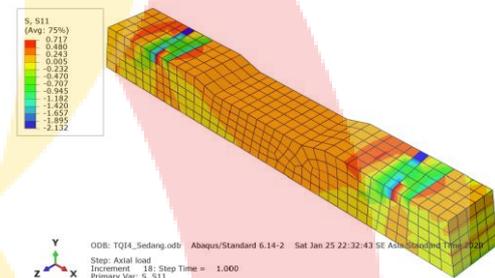
dipastikan bahwa kategori 4 (empat), juga tidak dapat menahan beban tarik karena beban tarik yang bekerja pada kategori 4 (empat) lebih besar. Agar mengetahui besar tegangan pada bantalan akibat penyimpangan kategori 4 (empat), maka penelitian tetap dilakukan.

1. Pada kondisi tanah pasir di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 5.821 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 17.418 MPa. Hasil output



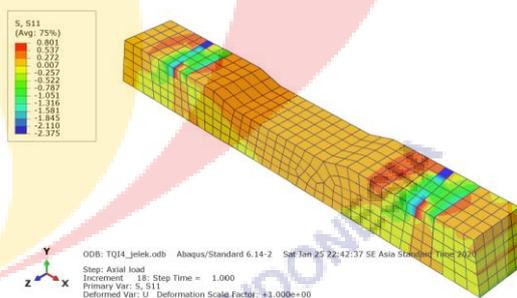
program dapat dilihat pada **Gambar 27**
Gambar 27 Perilaku Beton TQI 4 Tanah *Sand Dence*

2. Pada kondisi tanah lanau di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 7.309 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 21.733 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 28**



Gambar 28 Perilaku Beton TQI 4 Tanah *Silty Sand*

3. Pada kondisi tanah lempung di dapatkan tegangan tarik (*tensile stress*) = 8.165 MPa dan tegangan tekan (*compressive stress*) = 24.21 MPa. Hasil output program dapat dilihat pada **Gambar 29**



Gambar 29 Perilaku Beton TQI 4 Tanah *Sand dance*

Analisa dihasilkan nilai tegangan tekan pada semua kondisi tanah sebesar $24.241 \text{ MPa} < 45.9 \text{ MPa}$ serta, tegangan tegangan tarik sebesar $8.165 \text{ MPa} < 4.632 \text{ MPa}$, bantalan beton masih bekerja optimal untuk menumpu beban tekan serta tarik pada kondisi penyimpangan nilai track quality indeks 4. Akan tetapi jika kondisi tanah jelek pada penyimpangan nilai track quality indeks 4 pada specimen bantalan 2,3 dan 4 beban tarik melebihi syarat dari persamaan beban tarik $0.32 \times 540.67 = 4.6329 \text{ MPa}$. di buktikan dengan hasil diatas. Penelitain ini dilanjutkan sampai mengetahui penyimpangan hingga beban tidak jatuh pada rel dengan penambahan penyimpangan 0.5 mm. Pada **Gambar 30** program tidak dapat dijalankan karena



beban tidak jatuh pada node.

Gambar 30 TQI = 52,5 mm

Dari hasil analisa menyatakan pada nilai penyimpangan geometri 40 mm, ditambah sampai beban aksial dan lateral tidak menumpu pada rel dengan penambahan 0.5 mm. Pada nilai TQI = 52.5 mm, Flange roda lokomotif tidak menumpu diatas kepala rel atau dapat dikatakan bahwa terjadi anjlokkan (*Derailment*). Hal tersebut mengakibatkan hasil perilaku struktur tidak dapat dianalisa dalam program atau biasa disebut dalam program, adalah model aborted. Jadi pada kategori Track Quality Index (TQI) Tidak mampu untuk menahan beban Tarik yang di sajikan dalam **Diagram 1**

Pada kategori 3, bantalan ke 4 melebihi kuat Tarik yang di syaratkan

III. Kesimpulan

Hasil dari analisa perilaku bantalan beton pada kategori 1 dengan nilai TQI < 15, bantalan masih dapat bekerja dengan optimal, tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum sebesar, $0.795 \text{ MPa} < 4.6329 \text{ MPa}$ dan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum $2.915 \text{ MPa} < 45.9 \text{ MPa}$. Hasil dari analisa perilaku bantalan pada kategori 2 dengan nilai $15 < \text{TQI} < 25$, bantalan masih dapat bekerja dengan optimal, tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum sebesar, $2.630 \text{ MPa} < 4.6329 \text{ MPa}$ dan tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum sebesar $8.216 \text{ MPa} < 45.9 \text{ MPa}$. Hasil dari analisa perilaku bantalan beton pada kategori 3 dengan nilai $25 < \text{TQI} < 40$, terdapat satu spesimen bantalan tidak kuat menahan beban tarik yang bekerja, tegangan tarik (*tensile stress*) maksimum melebihi persyaratan tegangan tarik maksimum pada mutu beton 54 MPa yaitu sebesar 4.6329 MPa . Hasil

tegangan tarik maksimum $5.178 \text{ MPa} > 4.6329 \text{ MPa}$. Pada semua simulasi finite elemen analysys, dengan penyimpangan geometri kategori 3, kondisi beton masih memenuhi persyaratan tekan yaitu nilai tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum adalah $15.556 \text{ MPa} < 45.9 \text{ Mpa}$. Hasil dari analisa perilaku bantalan beton pada kondisi penyimpangan geometri kategori 4, terdapat beberapa specimen yaitu bantalan 2,3 serta 4 tidak mampu menahan beban tarik yang bekerja akibat kondisi penyimpangan. Nilai tegangan tarik mencapai $8.165 \text{ MPa} > 4.6329 \text{ MPa}$. Sedangkan pada kondisi kekuatan tekan sampai penyimpangan geometri kategori 4, tegangan tekan (*compressive stress*) maksimum sebesar 24.210 MPa masih dibawah syarat maksimum sekan beton (F_{c54}) yaitu, 45.9 MPa . Dari hasil analisa struktur bantalan beton kuat menahan beban tekan (*compressive*), tetapi lemah dalam menahan beban tarik (*tensile*).

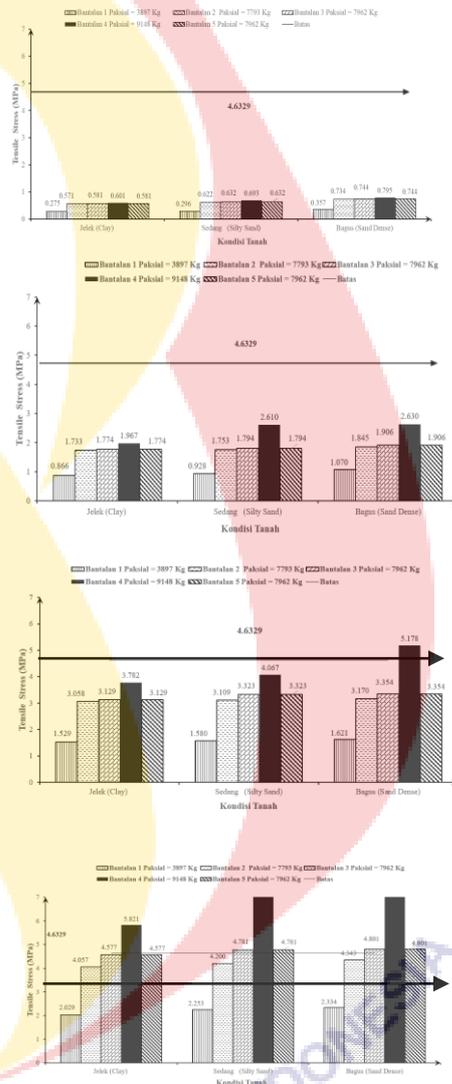


Diagram 1. Hasil tegangan Tarik pada TQI pada setiap kategori

IV. Saran

Dari beberapa kesimpulan diatas penulis menyarankan beberapa saran yaitu :

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. Dalam permodelan nonlinier dengan program bantu disarankan menggunakan software asli, karena hasil dari analisa akan lebih optimal. Pengujian struktural sebaiknya di verifikasi dengan eksperimental, agar hasil dari analisa kekuatan struktural lebih valid . Dalam pemeliharaan jalan rel kususnya struktur atas, agar lebih teliti dalam memasang rel, bantalan maupun penambat, kondisi geometri harus dimawas dengan benar sampai nilai TQI = 0 mm, karena dalam struktur jalan kereta api 1 cm sudah berpengaruh terhadap keamanan jalan rel, Terutama pada lebar Point off Protection pada wesel, serta lebar siar pada wesel. Perlu adanya inovasi bantalan beton yang mempunyai kekuatan tekan dan tarik lebih bagus (beton daktail).

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung dalam hal penyediaan data yaitu Kementrian Perhubungan, PT KAI, PT. Wijaya Karya dan Institusi Pendidikan Universitas Selamat Sri (UNISS)

Daftar Pustaka

- Attard, M. M., and S. Setunge. 1996. "Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete." *ACI Materials Journal* 93(5): 432–42.
- Aulia, Rayhana., and Danang Parikesit. 2017. "Perencanaan Pemeliharaan Jalan Reldaoop vi Yogyakarta." *Prosiding Simposium II – UNIID 2017* (September): 978–79.
- Berawi, Abdur Rohim Boy, Raimundo Delgado, Rui Calçada, and Cecilia Vale. 2010. "Evaluating Track Geometrical Quality through Different Methodologies." *International Journal of Technology* 1(1): 38–47.
- Bowles, Josep E. 1997. *20 Engineering Geology Foundation Analysis and Design Fifth Edition.*
- Esveld, C. 2001. *Delft university of technologi Modern Railway Track.* Second.
- Fistcar, Wawarisa Alnu, Hera Widyastuti, Data Iranata, and Catur Arif Prastyanto. 2020. "Pengaruh Parameter Track Quality Indeks (Tqi) Terhadap Perilaku Bantalan Beton." *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* 18(1): 131.
- Iranata, Data, Endah Wahyuni, and Hidayat Soegihardjo. 2010. "Ductile Design of Beam-Column Connection for Earthquake Resistant Precast Concrete House." (October).
- Lasisi, Ahmed, and Nii Attoh-Okine. 2018. "Principal Components Analysis and Track Quality Index: A Machine Learning Approach." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 91(March 2018): 230–48. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.04.001>.
- Liu, Reng-Kui et al. 2015. "Establishment of Track Quality Index Standard Recommendations for Beijing Metro." *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2015: 1–9.
- Mander, John Barrie. 1989. "Conducted Providing the Stress-Strain Relation for the Concrete and Steel Are- Known . The Moments and Curvatures Associated with Increasing Flexural Deformations of the Column May Be Computed for Various Column Axial Loads by Incrementing the Curvature A." 114(8): 1804–26.
- Michał, Szczecina, and Winnicki Andrzej. "Calibration of the CDP Model Parameters in Abaqus."
- Murat Saatcioglu & Razvi Salim. 1999. "Strength and Ductility of Hybrid FRP-Concrete." *J. Struct. Eng.*, 9445(October): 281–289.
- Ren, Wei, Lesley H. Sneed, Yang Yang, and Ruili He. 2015. "Numerical Simulation of Prestressed Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Damage Plasticity Model." *International Journal of Concrete Structures and Materials* 9(1): 45–54.
- Samani, Ali Khajeh, and Mario M. Attard. 2012. "A Stress-Strain Model for Uniaxial and Confined Concrete under Compression." *Engineering Structures* 41: 335–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.027>.
- Wantana Havino, Arisma, Hera Widyastuti, and Catur Prasetyanto. 2021. "Jurnal Penelitian Transportasi Darat." *Journal of Chemical Information and Modeling* 53(9): 1689–99. http://ppid.dephub.go.id/files/datalitbang/JURNAL_DARAT_2015.pdf.
- Wijaya Karya. 2016. "Railway Sleeper Prestressed Wijaya Karya Beton."