

Analisis Perilaku Struktur Bantalan Jalur Kereta Api dengan Metode Elemen Hingga

Muhammad Adib K¹, adib@api.ac.id

Dimas Adi P², dimas@ppi.ac.id

Arinda L³, arinda@ppi.ac.id

Teknologi Bangunan dan Jalur Perkeretaapian¹, Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun¹

ABSTRAK

Bantalan kereta api di Indonesia rata - rata terbuat dari material beton bertulang, dalam Peraturan Menteri Perhubungan nomor 60 Tahun 2012 disebutkan bahwa salah satu persyaratan material bantalan beton merupakan bantalan beton dengan struktur prategang. Metode Elemen Hingga (MEH) merupakan salah satu analisa numerik yang banyak digunakan untuk memecahkan masalah perhitungan struktur. Penggunaan MEH dengan aplikasi membantu mempermudah engineering untuk melakukan iterasi perhitungan, sehingga didapatkan hasil pendekatan yang menyerupai kondisi struktur sesungguhnya. Model bantalan beton kereta api yang digunakan adalah untuk lebar spoor 1067 mm dengan tipe N-67 produksi PT WIKA. Benda Uji dimodelkan sebagai Elemen Hingga pada aplikasi MEH dan kemudian dilakukan analisis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa perilaku struktur dari Bantalan Beton KA menggunakan MEH. Spesifikasi bantalan beton prategang dengan kuat tekan beton $f_c' = 54$ Mpa dan kuat tarik tulangan baja $f_y = 1400$ Mpa. Properti material untuk memodelkan bantalan beton merujuk pada penelitian [1]. Berdasarkan hasil analisa menggunakan software MEH didapatkan nilai tegangan tekan (*compressive stress*) bantalan beton sebesar 11,706 Mpa dan tegangan tarik (*Tensile stress*) bantalan beton sebesar 4,326 Mpa, selanjutnya untuk nilai lendutan (*displacement*) didapatkan hasil 0,083 mm terletak di tengah bantalan. Disimpulkan pula berdasarkan hasil evaluasi pada persamaan (Attard and Setunge, 1996) bahwa model benda uji bantalan beton dapat menumpu beban yang dipersyaratkan.

Kata Kunci: Kereta Api, Bantalan Kereta Api, Prategang, Metode Elemen Hingga (MEH)

ABSTRACT

*Railway sleepers in Indonesia are generally made of reinforced concrete material, in the Minister of Transportation Regulation number 60 of 2012 it is stated that one of the requirements for the concrete sleeper material is a concrete sleeper with a prestressed structure. Finite Element Method (FEM) is one of the most widely used numerical analysis to solve structural calculation problems. The use of FEM with the application helps make it easier for engineering to perform calculation iterations, so that the approximate results are obtained that resemble the actual structural conditions. The model of the railway concrete cushion used is for the spoor width of 1067 mm with the N-67 type produced by PT WIKA. The test object is modeled as a finite element in the FEM application and then analyzed. This study aims to analyze the structural behavior of KA Concrete Sleepers using FEM. Specifications for prestressed concrete sleepers with concrete compressive strength $f_c' = 54$ Mpa and tensile strength of steel reinforcement $f_y = 1400$ Mpa. Material properties for modeling concrete sleepers refer to research (Fistcar, 2019). Based on the results of the analysis using FEM software, the compressive stress value of the concrete sleeper is 11.706 Mpa and the tensile stress (*Tensile stress*) of the concrete sleeper is 4.326 Mpa, then for the displacement value, the result is 0.083 mm located in the middle of the sleeper. It was also concluded based on the evaluation results in the equation (Attard and Setunge, 1996) that the concrete sleeper test object model can support the required load.*

Keywords: Railway, Sleepers, Prestress, Finite Element Methode (FEM)

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang dan Studi Pustaka

Masa pandemi Covid 19 memaksa sektor Pendidikan untuk berinovasi, karena pembatasan tatap muka langsung sebagai upaya pencegahan penularan virus maka pembelajaran dilakukan dengan sistem daring [2]. Tidak hanya dalam pembelajaran para peneliti juga

dituntut berinovasi dalam melakukan penelitian. Sebagai contoh terkendalanya pengujian suatu struktur akibat dari beberapa laboratorium pengujian yang tutup dan terjadi antrian sebagai akibat berkurangnya tenaga laboratorium. Beberapa metode untuk mendapatkan hasil yang akurat dan dengan tuntutan waktu yang harus terpenuhi dalam sebuah analisa struktur diantaranya dengan pendekatan analisa numerik manual dan analisa numerik menggunakan aplikasi.

Tabel 1 Kriteria Bantalan Beton

No.	Bantalan Beton	Kuat Tekan (fc')	Tegangan Putus	Kapabilitas memikul momen	
				Dudukan rel	Tengah Bantalan
1	1067	500 kg/cm ²	1.655 MPa	+1500 kg m	-930 kg m
2	1435	600 kg/cm ²	1.655 MPa	Sesuai desain beban gandar & kecepatan	

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa perilaku struktur dari bantalan beton kereta api menggunakan analisa numerik menggunakan aplikasi berbasis Metode Elemen Hingga (MEH) sebagai upaya alternatif analisa struktur selain pengujian langsung dalam laboratorium.

Sleeper atau bantalan kereta api merupakan salah satu komponen jalan rel, bantalan memiliki fungsi meredam dan meneruskan beban – beban yang berada diatasnya untuk diteruskan ke balas dan mempertahankan lebar jalan rel serta mempertahankan kestabilan ke arah luar jalan rel [3], [4].

Berdasarkan PM 60 Tahun 2012 bantalan dibagi menjadi tiga yaitu bantalan kayu, bantalan baja dan bantalan beton [5]–[8]. Pemilihan jenis bantalan didasarkan pada kelas dan kondisi lapangan akan ketersediaan bahan baku [6]. Bantalan beton yang digunakan harus berupa bantalan beton prategang [9]. Spesifikasi bantalan beton dibagi menjadi dua yaitu untuk bantalan beton yang dipergunakan pada lebar jalan rel 1067 mm dan untuk lebar jalan rel 1435 mm [8].

Metode Elemen Hingga (MEH) dikembangkan oleh Boeing dan Bell Aerospace pada tahun 1950 untuk industri pesawat terbang [10]. Namun artikel jurnal pertama yang menggunakan metode ini sudah diperkenalkan oleh Turner et.al tetapi belum menyebutkan penggunaan istilah *finite element methode* (FEM) [9], [11]. Istilah *finite element methode* (metode elemen hingga) pertama kali digunakan Clough pada tahun 1960 lewat tulisan tentang elastisitas [12].

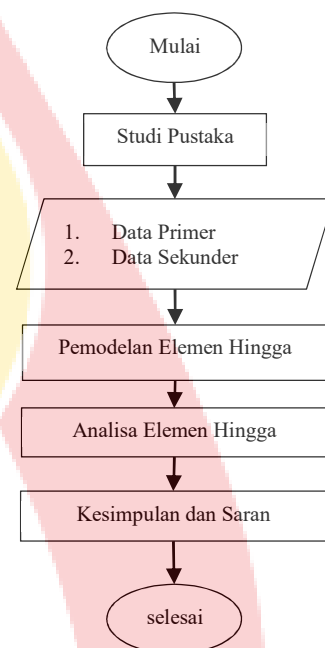
2 METODE PENELITIAN

2.1 Metode Penelitian

Secara garis besar metode yang digunakan dalam penelitian ini terurai dalam diagram alir Gambar 1. Penelitian ini menggunakan jenis penelitian eksperimen simulasi yaitu penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari suatu perlakuan yang secara sadar ditambahkan oleh peneliti melalui *software* simulasi analisis. Penelitian ini ditujukan untuk mendapatkan nilai tegangan dan regangan

bantalan beton kereta api serta nilai momen maksimum yang dapat dipikul bantalan.

Langkah penelitian yang dilakukan, diawali dengan studi Pustaka dilanjutkan dengan pengumpulan data meliputi data primer dan data sekunder. Data sekunder antara lain gambar spesifikasi bantalan dan spesifikasi material bantalan tersebut. Selanjutnya dilakukan analisis dan perhitungan untuk mendapatkan spesifikasi teknis untuk input *property* pada *Software* MEH sebagai data primer. Setelah pengambilan data Langkah berikutnya yaitu memodelkan bantalan beton pada *Software* serta *running* perhitungan. Dari hasil analisis atau *running* pada *software* kemudian ditarik kesimpulan.

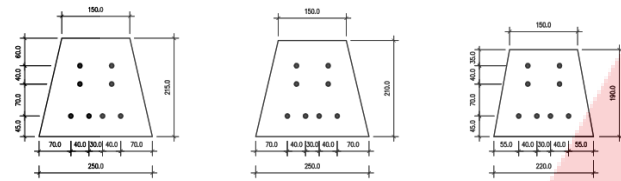
**Gambar 1.** Diagram Alir Penelitian

2.2 Material Properti Bantalan Beton

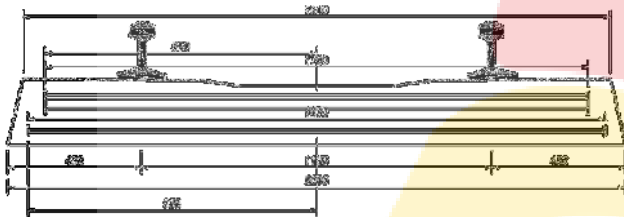
Model bantalan beton yang digunakan mengacu pada Bantalan WKA tipe N-67 pada penelitian Fistar, Wawarisa A 2021. Bantalan merupakan bantalan beton prategang untuk lebar jalan rel 1067 yang digunakan pada lintas Surabaya - Mojokerto. Spesifikasi bantalan beton yang digunakan memiliki ukuran 2000 mm x 250 mm x 215 mm, kuat tekan beton $F_c' = 54$ Mpa/ K.600, dimensi tulangan 8 ϕ 9, kuat leleh baja $F_y = 1400$ Mpa. Geometri bantalan beton dapat dilihat pada gambar 2.

Metode pengujian dan pembebanan pada penelitian ini mengadopsi dari *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association* (AREMA) Part 4 *Concrete Ties* 2010 dan Silva, Ramon et, al 2020. Dalam penelitian ini Langkah pembebanan dilakukan pada pembebanan momen positif tengah bantalan.

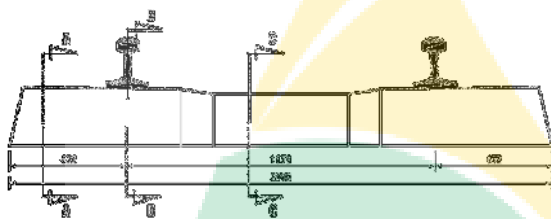
Setting tumpuan dan perletakan bantalan dapat dilihat pada Gambar 3.



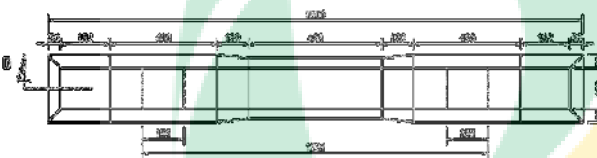
a. Potongan A, B dan C Bantalan Beton



b. Potongan D Bantalan Beton



c. Tampak Samping Bantalan Beton

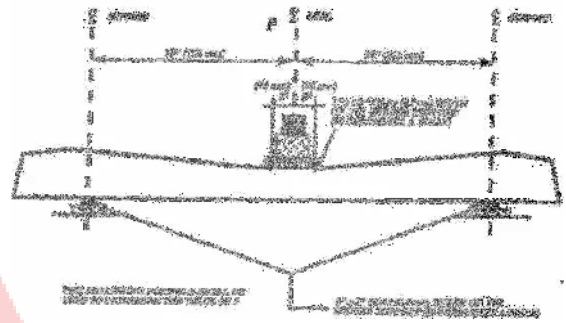


d. Tampak Atas Bantalan Beton

Gambar 2. Gambar Geometri Bantalan Beton KA

Berdasarkan gambar diatas, terlihat bantalan beton memiliki luas permukaan berbeda-beda di setiap potongannya, jumlah tulangan atas sebanyak 4 buah ϕ 9 dan tulangan bawah sebanyak 4 buah ϕ 9.

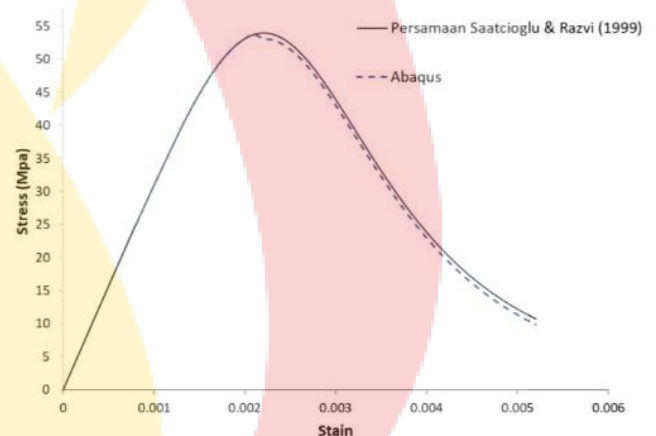
Momen lentur desain bantalan beton untuk momen negative dudukan rel 75000 kg/cm; momen positive dudukan rel 150000 kg/cm; momen negative tengah bantalan 93000 kg/cm dan momen positive tengah bantalan 66000 kg/cm.



Gambar 3. Gambar Geometri Pengujian

Properti material yang diinputkan pada *software* MEH didekati dengan persamaan empiris. Pendekatan digunakan untuk menentukan hubungan tegangan leleh terhadap regangan palstis pada Tarik beton, Tarik baja tulangan dan tekan beton. Properti material yang digunakan mengacu pada penelitian [1].

Kuat tekan beton didekati dengan persamaan Saatcioglu dan Razvi (1999) sedangkan kuat Tarik beton didekati dengan persamaan Hsu dan Zhang (1996) dengan rumus split hasil silinder beton mutu biasa Attard dan Setunge (1996). Kuat leleh Tarik baja didekati dengan persamaan Mander (1998). Properti material sebagai input *software* MEH telah dilakukan verifikasi terhadap persamaan empiris [1].

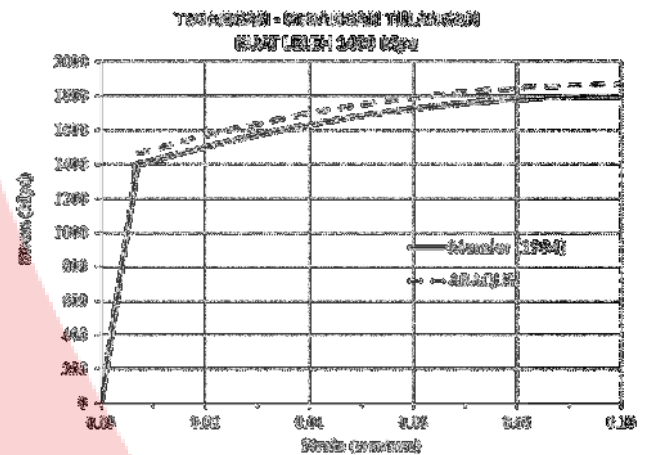


Gambar 4. Kurva Tegangan-Regangan Beton Akibat Tekan. Sumber: [1].

Berdasarkan hasil evaluasi perhitungan empiris didapatkan properti material beton dan baja tulangan untuk pemodelan bantalan beton sebagai berikut.

Tabel 2 Properti Material Baja tulangan

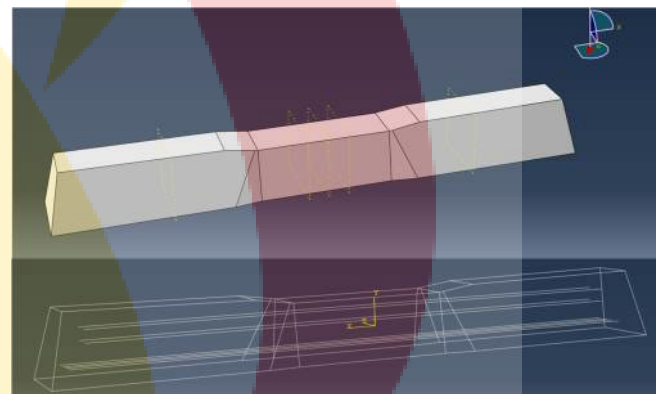
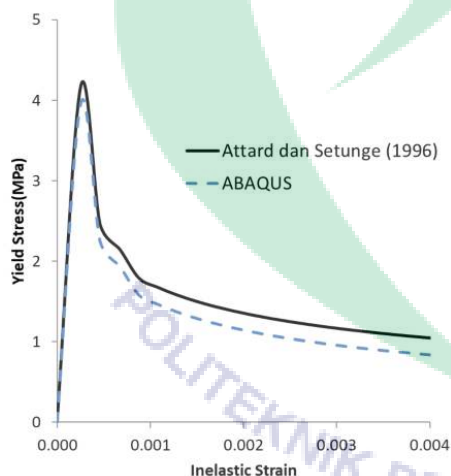
Properti	Nilai
Material Baja Tulangan Fy 1400 Mpa	
Density (ton/mm ³)	0.00000000785
Modulus Elastisitas, Et (Mpa)	200000
Poison Rasio, ν	0.3
Yeild Strength (Leleh)	1400
Yeild Strength (Ultimate)	1800

**Gambar 6.** Kurva Tegangan-Regangan Tulangan Akibat Tarik, Sumber: [1].**Tabel 3** Properti Material Beton

Properti	Nilai
Material Beton Fc' 54 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
FBo / FCo	1.16
Yield surface parameter, K	0.667
Viscosity Parameter, μ	0.001
Yeild Strength (Tekan)	54
Yeild Strength (Tarik)	4.19

2.3 Pemodelan Bantalan Beton

Pemodelan benda uji dilakukan pada software MEH, dimana benda uji bantalan beton dimodelkan tiga dimensi dengan pemodelan elemen beton menggunakan elemen solid CD38R, elemen baja tulangan atas dan bawah menggunakan elemen truss T3D2. Input yang diberikan pada elemen T3D2 adalah luas penampang $A = \text{mm}^2$, tulangan atas 2-2 (D9) = 63,585 mm² dan tulangan bawah 4 (D9) = 63,585 mm².

**Gambar 7.** Pemodelan Bantalan Beton KA**Gambar 5.** Kurva Tegangan-Regangan Beton Akibat Tarik, Sumber: [1].

Tampak pada gambar bagian atas merupakan elemen beton yang sudah dimodelkan sebagai bantalan KA dan gambar bagian bawah merupakan elemen baja tulangan yang sudah di *assembly* kan menjadi satu dengan elemen beton.

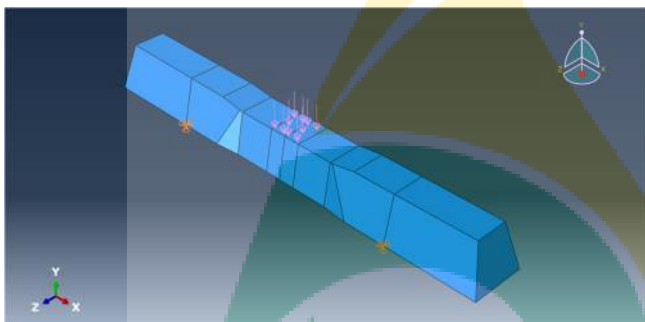
2.4 Analisis FEM

Metode yang digunakan adalah Fenite Element Methode atau metode elemen hingga yaitu dengan membagi elemen struktur (bantalan Beton) menjadi elemen-elemen lebih kecil, tujuan dari pembagian

tersebut adalah untuk menyelesaikan persamaan numerik untuk mendapatkan solusi dari persamaan diferensial (diferensial biasa dan diferensial parsial) dalam suatu analisa agar mendekati bentuk dari suatu elemen tersebut. Dalam hal ini analisa FEM dilakukan menggunakan software untuk mendapatkan tingkat ketelitian yang baik akibat dari pembagian elemen-elemen yang sangat banyak.

3 ANALIS DATA DAN HASIL PENELITIAN

Analisis data diawali dengan penginputan properti material sesuai Tabel 2 dan Tabel 3 dan dilanjutkan dengan proses *assign* material, pemberian beban dan *boundary condition* (tumpuan). Pembebanan yang digunakan mengacu pada beban desain dari bantalan beton KA, dimana beban desain positif tengah bantalan sebesar $660 \text{ kg/m} = 6,6 \text{ N/mm}$ pada luas area pembebanan 22800 mm^2 . Konfigurasi pembebanan dan *boundary condition* dapat dilihat pada Gambar 8. Dibawah ini.

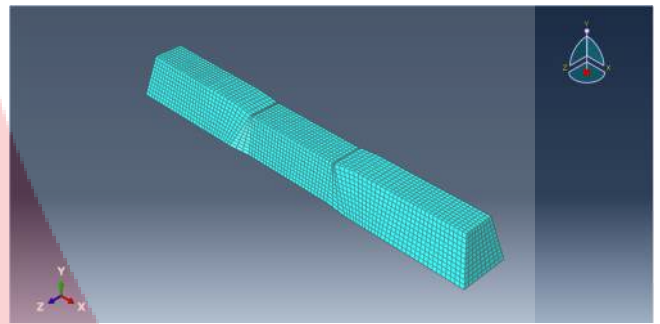


Gambar 8. Konfigurasi Pembebanan dan *Boundary Condition*

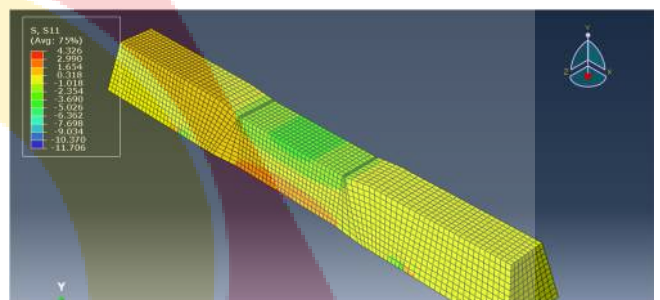
Langkah berikutnya yaitu *meshing* atau membagi atau merajang bantalan beton KA menjadi bagian-bagian yang lebih kecil lagi untuk penganalisisan *software*. Semakin banyak perajangan yang dilakukan maka semakin optimal pula hasil analisa dari *software* nya. Namun hal tersebut berpengaruh pada kecepatan iterasi yang dilakukan.

Setelah dilakukan *meshing* pada benda uji, kemudian dilakukan *run analysis*. Hasil Output berupa perilaku struktur dari bantalan beton kereta api N-67. Perilaku struktur yang dianalisis antara lain tegangan tekan (*compressive stress*) bantalan beton dan tegangan tarik (*tensile stress*) bantalan beton serta lendutan (*displacement*). Hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11 di bawah ini.

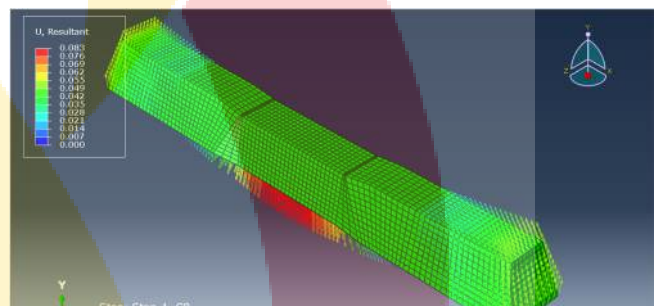
Berdasarkan hasil analisis didapat nilai tegangan tekan (*compressive stress*) bantalan beton sebesar 11,706 MPa; tegangan tarik (*tensile stress*) bantalan beton sebesar 4,326 MPa dan lendutan (*displacement*) akibat pembebanan yang dilakukan sebesar 0,083 mm.



Gambar 9. *Meshing* pada Model Bantalan Beton KA



Gambar 10. Tegangan (*Stress*) bantalan beton KA



Gambar 11. Lendutan (*Displacement*) bantalan beton KA

Hasil yang didapat kemudian dievaluasi berdasarkan persamaan (Attard and Setunge, 1996) dalam ACI Journal untuk tegangan tekan (*compressive stress*) beton maks adalah $0,85F_c'$ sebesar 45,9 MPa ($11,706 \text{ MPa} < 45,9 \text{ MPa}$) dan Tegangan tarik (*tensile stress*) beton maks adalah $0,32F_c'^{0,67}$ sebesar 4,6329 MPa ($4,326 \text{ MPa} < 4,6329 \text{ MPa}$). Dari hasil evaluasi didapatkan bahwa bantalan beton dapat menumpu beban yang dipersyaratkan.

Terlihat pula pada gambar-gambar hasil analisis, secara visual belum terdapat retakan (*crack*) pada model benda uji. Hal tersebut dikarenakan properti material yang di inputkan pada *software* merupakan properti material benda uji yang belum mengalami deformasi. Seperti yang diketahui berdasarkan prosedur pengujian

American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) Part 4 Concrete Ties 2010 pembebanan pada tengah bantalan merupakan langkah pengujian ke-4 pada satu benda uji bantalan beton. Dimana langkah 1 sampai 3 benda uji tersebut sudah dilakukan pembebanan sehingga secara tidak langsung juga sudah mengalami kelelahan struktur.

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis data di atas, dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain yaitu benda uji model bantalan beton mampu menerima beban desain yang diberikan sebesar 6,6 N/mm dimana hingga pemberian beban rencana maksimum pada benda uji belum terlihat keretakan. Nilai tegangan tekan (*compressive stress*) bantalan beton sebesar 11,706 Mpa; tegangan tarik (*tensile stress*) bantalan beton sebesar 4,326 Mpa dan lendutan (*displacement*) akibat pembebanan yang dilakukan sebesar 0,083 mm. Dapat disimpulkan pula berdasarkan hasil evaluasi pada persamaan (Attard and Setunge, 1996) bahwa model benda uji bantalan beton dapat menumpu beban yang dipersyaratkan.

Saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah untuk dapat mengevaluasi hasil pemodelan analisa menggunakan software MEH perlu dilakukan pengujian *real* di laboratorium yaitu menggunakan benda uji dengan skala 1:1, sehingga nilai properti material setiap langkah pengujian dapat diketahui dan dapat dimodelkan, kemudian saran dalam pemodelan *Finite Element* menggunakan software disarankan untuk menggunakan software asli, hal tersebut berpengaruh kepada hasil output program yang lebih optimal dan pengujian eksperimental lapangan sebaiknya dilakukan sebagai pembandingan langsung dari eksperimental menggunakan software bantu.

REFERENSI

- [1] W. A. (Institusi T. S. N. Fistcar, "Pengaruh Parameter Track Quality Indeks (Tqi) Terhadap Perilaku Bantalan Beton," 2019.
- [2] A. Roziqin, S. Y. F. Mas'udi, and I. T. Sihidi, "An analysis of Indonesian government policies against COVID-19," *Public Adm. Policy*, vol. 24, no. 1, pp. 92–107, Jan. 2021, doi: 10.1108/PAP-08-2020-0039.
- [3] Z. Zulkifli, "Analisis Kekuatan Komposit Kayu Sebagai Pengganti Bahan Sleeper Pada Rel Kereta Api." Universitas Hasanuddin, 2021.
- [4] P. M. Perhubungan, R. Indonesia, P. Teknis, and J. Kereta, "Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor Pm. 60 Tahun 2012 Tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api." pp. 1–42, 2012.
- [5] F. R. Fajar Ramadhan, "Kajian Penggunaan Bantalan Kayu Dan Bantalan Sintetis Pada Jembatan Di Lintas Kiaracandong–Cicalengka." Politeknik Transportasi Darat Indonesia-STTD, 2021.
- [6] F. D. Sentanu, "Pekerjaan pengecoran abutment jembatan kereta api BH 182 WTT 46, 5 dengan beton mutu tinggi untuk percepatan pembukaan lebih cepat (Fast Track) di Sumobito, Jombang,," in *Prosiding SENTRA (Seminar Teknologi dan Rekayasa)*, 2021, no. 6, pp. 129–137.
- [7] F. Ilhami, "Perencanaan Jalan Kereta Api Baru Antara Stasiun Banjar–Stasiun Cijulang." Universitas Siliwangi, 2019.
- [8] Z. A. M. Zam, "Analisis Perubahan Lengkung Geometrik Jalan Keretaapi Terhadap Kecepatan Kereta Api Pada Proyek Peningkatan Jalan Kereta Api Penggantian Bantalan Dan Rel R. 54 Lintas Araskabu-Siantar." Universitas Quality, 2021.
- [9] M. A. Kurniawan, D. Malaiholo, and W. Riyanta, "Perilaku Struktur Bantalan Beton Kereta Api Berlubang Akibat Beban Pada Tengah Bantalan," *J. Kacapuri J. Keilmuan Tek. Sipil*, vol. 4, no. 2, pp. 213–222, 2022.
- [10] A. Puspawan, F. Febriansyah, A. Suandi, and N. Supardi, "The Heat Transfer Flow Analysis Of The Jis G 3106 Sm520b Steel Plate Cutting Process Using Cnc Flame Cutting Machine In The Manufacture Of The Bottom Plate Box Girder," *Rekayasa Mek. Mech. Eng. Sci. Journal, Pure Inter Discip.*, vol. 5, no. 1, 2021.
- [11] W. F. Tjong, "Pengantar Metode Elemen Hingga untuk Analisis Struktur-Teori, Perumusan, Implementasi Komputer, dan Aplikasi," *Pengantar Metode Elemen Hingga untuk Analisis Struktur-Teori, Perumusan, Implementasi Komputer, dan Aplikasi*. Rajawali Pers, PT RajaGrafindo Persada, 2021.
- [12] P. B. Kosasih, *Teori dan Aplikasi Metode Elemen Hingga*. Yogyakarta: CV Andi Offset.