



**ANALISIS KELELAHAN RODA *RETROFIT* KERETA  
REL LISTRIK (KRL) MENGGUNAKAN METODE  
ELEMEN HINGGA**

**SKRIPSI**

**RADEN PRANAYA DIDVA RAMADHAN  
2110311010**

**UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN  
2024**



**ANALISIS KELELAHAN RODA *RETROFIT* KERETA  
REL LISTRIK (KRL) MENGGUNAKAN METODE  
ELEMEN HINGGA**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk  
memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**RADEN PRANAYA DIDVA RAMADHAN  
2110311010**

**UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN  
2024**

## LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Raden Pranaya Didva Ramadhan  
NIM : 2110311010  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : ANALISIS KELELAHAN RODA *RETROFIT* KERETA  
REL LISTRIK (KRL) MENGGUNAKAN METODE  
ELEMEN HINGGA

Telah berhasil dipertahankan di hadapan para penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.



Dr. Eng. Riki Hendra Purba, S.T., M.Eng.

Penguji Utama



Sigit Pradana, S.T., M.T.

Penguji Lembaga



Dr. Ir. Muchamad Oktaviandri,  
S.T., M.T., IPM., ASEAN. Eng

Plt. Dekan Fakultas Teknik



M. Arifudin Lukmana, S.T., M.T.

Penguji III (Pembimbing)



Ir. Fahrudin, S.T., M.T.

Kepala Program Studi Teknik  
Mesin

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal Ujian : 10 Januari 2025

## LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Skripsi diajukan oleh:

Nama : Raden Pranaya Didva Ramadhan

NIM : 2110311010

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : ANALISIS KELELAHAN RODA *RETROFIT* KERETA REL  
LISTRIK (KRL) MENGGUNAKAN METODE ELEMEN  
HINGGA

Telah dikoreksi atau diperbaiki oleh penulis sesuai arahan dari dosen pembimbing dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.

Menyetujui



(M. Arifudin Lukmana, S.T., M.T.)

Pembimbing I



(Nicky Yongkimandalan, S.T., M.M.)

Pembimbing II

Mengetahui,



Ir. Fahrudin, S.T., M.T.

Kepala Program Studi S-1 Teknik Mesin

## LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri, dan semua sumber yang dikutip maupun yang dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Raden Pranaya Didva Ramadhan

NIM : 2110311010

Prodi : Teknik Mesin

Bilamana dikemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan saya ini maka saya bersedia dituntut dan diproses dengan ketentuan yang berlaku.

Jakarta, 10 Januari 2025

Yang menyatakan,



Raden Pranaya Didva Ramadhan

## **LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai civitas akademik Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, saya yang akan bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Raden Pranaya Didva Ramadhan

NIM : 2110311010

Program Studi : Teknik Mesin

Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas pembangunan Nasional Veteran Jakarta Hak Bebas Royalti Non Eksklusif (*Non Exclusive Royalty Free Right*) atas skripsi saya yang berjudul:

### **“ANALISIS KELELAHAN RODA *RETROFIT* KERETA REL LISTRIK (KRL) MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA”**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti ini, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan Skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta, 10 Januari 2025

  
Yang menyatakan,

Raden Pranaya Didva Ramadhan

# ANALISIS KELELAHAN RODA RETROFIT KERETA REL LISTRIK (KRL) MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Raden Pranaya Didva Ramadhan

## Abstrak

PT INKA (Persero) melakukan modifikasi desain roda *retrofit* Kereta Rel Listrik untuk mempermudah proses fabrikasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan dan umur kelelahan (*fatigue life*) roda tersebut akibat kontak dengan rel menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM). Simulasi dilakukan dengan pemodelan kontak dinamis antara roda dan rel, di mana roda berputar 1 kali di atas lintasan lurus sepanjang 3 meter. Analisis dilakukan menggunakan *software* ANSYS 2022 R1 dengan *toolbox transient structural*, sementara pembebanan mengacu pada standar EN 13979-1:2020. Hasil penelitian menunjukkan tegangan maksimum pada *web* roda mencapai 38,98 MPa, sedangkan pada *tread* roda mencapai 334,6 MPa. *Fatigue life* roda tercatat  $10^7$  siklus pada *web*, sedangkan pada *tread* tercatat 411.100 siklus atau setara dengan 1.101,7 km jarak tempuh. Faktor keamanan maksimum terhadap *yield strength* adalah 11,945 pada *web* dan 1,4943 pada *tread*, sedangkan terhadap *ultimate strength* masing-masing mencapai 15 dan 2,092.

**Kata Kunci:** Dinamis, Kekuatan, Kontak, Metode Elemen Hingga, Roda Kereta, Umur Kelelahan

# ***FATIGUE ANALYSIS OF ELECTRIC RAILWAY TRAIN RETROFIT (KRL) WHEELS USING FINITE ELEMENT METHOD***

**Raden Pranaya Didva Ramadhan**

## **Abstract**

*PT INKA (Persero) modified the design of the Electric Rail Train retrofit wheel to optimize the fabrication process. Therefore, this study aims to analyse the strength and fatigue life of the wheel due to contact with the rail using the Finite Element Method (FEM). The simulation was conducted by modelling the dynamic contact between the wheel and the rail, where the wheel rotates one time over a 3-meter-long straight track. The analysis was conducted using ANSYS 2022 R1 software with the transient structural toolbox, while the loading refers to the EN 13979-1:2020 standard. The results showed that the maximum stress on the wheel web reached 38,98 MPa, while that on the wheel tread reached 334.6 MPa. Fatigue life of the wheel was recorded at  $10^7$  cycles on the web, while on the tread it was recorded at 411,100 cycles or equivalent to 1,101.7 km of mileage. The maximum factor of safety for yield strength was 11.945 on the web and 1.4943 on the tread, while the ultimate strength reached 15 and 2.092, respectively.*

**Keyword:** *Contact, Dynamic, Fatigue Life, Finite Element Method, Railway Wheel, Strength*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Allah *subhanahu wa ta'ala*, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Analisis Kekuatan dan Kelelahan Roda *Retrofit* Kereta Rel Listrik Menggunakan Metode Elemen Hingga”. Sholawat serta salam semoga tercurahkan kepada Rasulullah Muhammad *shalallahu 'alaihi wa salam* yang telah memberikan syafaat kepada seluruh umatnya.

Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.), program studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Jakarta. Melalui kata pengantar ini, penulis ingin berterima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan dalam proses penyusunan hingga penyelesaian skripsi ini. Adapun seluruh pihak yang dimaksud antara lain:

1. Fahrudin, S.T., M.T., Kepala Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.
2. Muhammad Arifudin Lukmana, S.T, M.T., Dosen Pembimbing 1 tugas akhir, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.
3. Nicky Yongkimandalan, S.T., M.M., M.T., Dosen Pembimbing 2 tugas akhir, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta
4. Sigit Pradana, S.T., M.T., Dosen Pembimbing Akademik Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta
5. Seluruh dosen Program Studi Teknik Mesin Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan selama masa perkuliahan.
6. Karisma Rizal, S.T., M.T., Staff Desain Bogie, Pembimbing Lapangan Desain Bogie, PT INKA (Persero).
7. Muhammad Zainal Mahfud, S.T., *Structure Engineer*, Pembimbing Lapangan Analisis Struktur, PT INKA (Persero).
8. Seluruh karyawan PT INKA (Persero) yang telah meluangkan waktu untuk membimbing dan memberikan arahan selama kegiatan.

9. Keluarga tercinta, khususnya kepada Bapak R. Moh. Reza Pahlevi dan Ibu Yoneli Yapani, yang selalu memberikan doa, dukungan moral, dan materiil sehingga peneliti dapat menyelesaikan studi ini dengan baik.
10. Perkumpulan manusia pejuang hidup, Fauzi Syach Kemal Nasution, Ridwan Bambang Rianto, Naufal Dary Dewanto, dan Abi Fatoni.
11. Teman seperjuangan angkatan 2021 Teknik Mesin Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, yang selalu memberikan semangat, bantuan, dan kebersamaan dalam menyelesaikan tugas-tugas akademik.
12. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebut satu per satu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan akhir ini. Maka dari itu, penulis menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun agar dapat menjadi bahan evaluasi untuk penyusunan artikel ilmiah berikutnya. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat memenuhi tanggung jawab sebagai salah satu mahasiswa Teknik Mesin Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta dan bermanfaat bagi pembaca

Jakarta, Januari 2025

Penulis

## DAFTAR ISI

|                                                                                             |             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>HALAMAN JUDUL .....</b>                                                                  | <b>i</b>    |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....</b>                                                       | <b>ii</b>   |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING .....</b>                                                   | <b>iii</b>  |
| <b>LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS .....</b>                                                 | <b>iv</b>   |
| <b>LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK<br/>KEPENTINGAN AKADEMIK .....</b> | <b>v</b>    |
| <b>ABSTRAK .....</b>                                                                        | <b>vi</b>   |
| <b><i>ABSTRACT</i> .....</b>                                                                | <b>vii</b>  |
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>                                                                  | <b>viii</b> |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                                                                      | <b>x</b>    |
| <b>DAFTAR GAMBAR .....</b>                                                                  | <b>xiii</b> |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                                                                   | <b>xvi</b>  |
| <b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>                                                              | <b>1</b>    |
| 1.1    Latar Belakang .....                                                                 | 1           |
| 1.2    Rumusan Masalah.....                                                                 | 2           |
| 1.3    Batasan Masalah .....                                                                | 2           |
| 1.4    Tujuan Penelitian .....                                                              | 3           |
| 1.5    Sistematika Penulisan .....                                                          | 3           |
| <b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....</b>                                                         | <b>5</b>    |
| 2.1    Penelitian Terdahulu .....                                                           | 5           |
| 2.2    Roda Kereta.....                                                                     | 13          |
| 2.2.1    Pengertian Roda Kereta .....                                                       | 13          |
| 2.2.2    Jenis-Jenis Roda Kereta .....                                                      | 15          |
| 2.2.3 <i>Wheelset</i> .....                                                                 | 16          |
| 2.3    EN 13979-1:2020 .....                                                                | 17          |

|                                         |                                                                       |           |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.1                                   | Pengertian Standar EN 13979-1:2020.....                               | 17        |
| 2.3.2                                   | <i>Mechanical Behaviour Assessment</i> .....                          | 17        |
| 2.3.3                                   | Gaya pada Roda .....                                                  | 18        |
| 2.4                                     | Metode Elemen Hingga.....                                             | 23        |
| 2.4.1                                   | Pengertian Metode Elemen Hingga .....                                 | 23        |
| 2.4.2                                   | Jenis-Jenis Elemen .....                                              | 24        |
| 2.4.3                                   | <i>Boundary Condition</i> .....                                       | 25        |
| 2.4.4                                   | Verifikasi .....                                                      | 27        |
| 2.5                                     | Tegangan Von Mises .....                                              | 30        |
| 2.6                                     | Kegagalan <i>Fatigue</i> .....                                        | 31        |
| 2.7                                     | Hertzian <i>Contact</i> .....                                         | 33        |
| <b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b> |                                                                       | <b>35</b> |
| 3.1                                     | Tempat dan Waktu Penelitian.....                                      | 35        |
| 3.2                                     | Diagram Alir.....                                                     | 35        |
| 3.3                                     | Identifikasi Masalah .....                                            | 37        |
| 3.4                                     | Studi Literatur .....                                                 | 37        |
| 3.5                                     | Kalkulasi Gaya berdasarkan EN 13979-1 .....                           | 37        |
| 3.6                                     | Desain Roda <i>Retrofit</i> KRL dan Rel KRL Jabodetabek .....         | 38        |
| 3.7                                     | Simulasi Roda <i>Retrofit</i> KRL berdasarkan EN 13979-1 .....        | 40        |
| 3.7.1                                   | <i>Pre-Processing</i> .....                                           | 40        |
| 3.7.2                                   | <i>Processing</i> .....                                               | 49        |
| 3.7.3                                   | <i>Post-Processing</i> .....                                          | 50        |
| <b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b> |                                                                       | <b>51</b> |
| 4.1                                     | Validasi model FEM.....                                               | 51        |
| 4.2                                     | Hasil Simulasi Tegangan <i>Web</i> dan <i>Tread</i> Roda Kereta ..... | 54        |
| 4.2.1                                   | Tegangan dan <i>Safety Factor</i> pada <i>Web</i> Roda Kereta .....   | 54        |

|                               |                                                                        |           |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.2                         | Tegangan dan <i>Safety Factor</i> pada <i>Tread</i> Roda Kereta.....   | 56        |
| 4.3                           | Hasil Simulasi Kelelahan <i>Web</i> dan <i>Tread</i> Roda Kereta ..... | 57        |
| 4.4                           | Hasil Simulasi Tegangan Kontak antara Roda dan Rel.....                | 59        |
| 4.5                           | Pembahasan.....                                                        | 60        |
| 4.5.1                         | Analisis Kekuatan <i>Web</i> dan <i>Tread</i> Roda Kereta .....        | 60        |
| 4.5.2                         | Analisis Kelelahan <i>Web</i> dan <i>Tread</i> Roda Kereta.....        | 60        |
| 4.5.3                         | Analisis Tegangan Kontak antara Roda dan Rel.....                      | 63        |
| <b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b> |                                                                        | <b>64</b> |
| 5.1                           | Kesimpulan .....                                                       | 64        |
| 5.2                           | Saran.....                                                             | 64        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b>         |                                                                        |           |
| <b>RIWAYAT HIDUP</b>          |                                                                        |           |
| <b>LAMPIRAN</b>               |                                                                        |           |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 2.1</b> (a) Pemodelan FEM dan meshing; (b) Kondisi batas penelitian (Jelila <i>et al.</i> , 2021) .....                                                                                          | 6  |
| <b>Gambar 2.2</b> (a) Model FEM roda kereta monobloc 3D; (b) Model FEM roda kereta monobloc axially symmetry; (c) kondisi batas roda kereta monobloc pada bagian poros (Rakoczy and Bińkowski, 2021) ..... | 7  |
| <b>Gambar 2.3</b> model simplifikasi kontak Hertz berbentuk elips yang merupakan lokasi pembebanan (Sinđelić, Bižić and Petrović, 2019).....                                                               | 8  |
| <b>Gambar 2.4</b> (a) Meshing roda kereta; (b) Constraint pada roda kereta di bagian hub (Sinđelić, Bižić and Petrović, 2019) .....                                                                        | 8  |
| <b>Gambar 2.5</b> Pemodelan mesh roda dan rel pada software Ansys (Jagadeep, Kumar and Subbaiah, 2018).....                                                                                                | 9  |
| <b>Gambar 2.6</b> Model FEM 2D <i>axissymmetry</i> roda kereta (Vinod, Rao and Reddy, 2014) .....                                                                                                          | 10 |
| <b>Gambar 2.7</b> Model geometri dan kondisi batas roda kereta .....                                                                                                                                       | 11 |
| <b>Gambar 2.8</b> Bentuk konikal roda kereta (Chandra, 2007, p. 78).....                                                                                                                                   | 13 |
| <b>Gambar 2.9</b> Nomenklatur cross-section roda kereta (Shao <i>et al.</i> , 2018).....                                                                                                                   | 14 |
| <b>Gambar 2.10</b> Definisi profil roda kereta (Rail Safety and Standards Board, 2007, p. 38) .....                                                                                                        | 14 |
| <b>Gambar 2.11</b> Jenis-jenis roda kereta (Iwnicki, 2006, p. 47).....                                                                                                                                     | 16 |
| <b>Gambar 2.12</b> Nomenklatur wheelset (Urassa, 2021).....                                                                                                                                                | 17 |
| <b>Gambar 2.13</b> Diagram alir Mechanical Behaviour Assessment sesuai EN 13979-1 .....                                                                                                                    | 18 |
| <b>Gambar 2.14</b> <i>Free body diagram</i> kereta.....                                                                                                                                                    | 19 |
| <b>Gambar 2.15</b> <i>Free body diagram</i> bogie.....                                                                                                                                                     | 19 |
| <b>Gambar 2.16</b> <i>Free body diagram</i> wheelset.....                                                                                                                                                  | 20 |
| <b>Gambar 2.17</b> <i>Free body diagram</i> (FBD) <i>wheelset</i> dan detail FBD roda kereta ..                                                                                                            | 21 |
| <b>Gambar 2.18</b> Titik pembebanan gaya yang terjadi pada roda (European Standards, 2020) .....                                                                                                           | 22 |
| <b>Gambar 2.19</b> Mesh dari hinge joint (Liu and Quek, 2013, p. 7) .....                                                                                                                                  | 24 |
| <b>Gambar 2.20</b> (a) Gambar elemen 3D dengan paduan heksahedral; (b) Gambar elemen 3D dengan paduan tetrahedral .....                                                                                    | 24 |

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 2.21</b> Elemen 2D; (a) triangular; (b) quadrilateral .....                                                                                       | 25 |
| <b>Gambar 2.22</b> FEM rangka sepeda dengan elemen 1D dan letak pembebanannya (Liu and Quek, 2013, p. 123) .....                                            | 27 |
| <b>Gambar 2.23</b> Bentuk elemen ideal dan <i>skewed</i> (ANSYS, 2010, p. 115).....                                                                         | 28 |
| <b>Gambar 2.24</b> Nilai skewness dan kualitas sel (ANSYS, 2010, p. 115).....                                                                               | 29 |
| <b>Gambar 2.25</b> Nilai kualitas mesh berdasarkan skewness (Fatchurrohman and Chia, 2017) .....                                                            | 29 |
| <b>Gambar 2.26</b> Kurva konvergensi mesh (Madier, 2020, p. 164). ....                                                                                      | 30 |
| <b>Gambar 2.27</b> (a) <i>endurance limit</i> pada kurva S-N; (b) simbol-simbol pada diagram tegangan <i>cyclic</i> (Khurmi and Gupta, 2005b, p. 182) ..... | 32 |
| <b>Gambar 2.28</b> Diagram metode Soderberg dalam analisis <i>fatigue</i> (Khurmi and Gupta, 2005b, p. 200).....                                            | 32 |
| <b>Gambar 2.29</b> Bentuk Hertzian <i>contact</i> .....                                                                                                     | 33 |
| <b>Gambar 2.30</b> Parameter Hertzian <i>contact</i> pada roda dan rel .....                                                                                | 34 |
| <b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian .....                                                                                                             | 35 |
| <b>Gambar 3.2</b> Diagram alir simulasi.....                                                                                                                | 36 |
| <b>Gambar 3.3</b> Desain roda <i>retrofit</i> KRL profil <i>S-Shaped</i> milik PT INKA (Persero) .....                                                      | 39 |
| <b>Gambar 3.4</b> Desain rel R.54 berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012.....                                                          | 39 |
| <b>Gambar 3.5</b> Model 3D roda <i>retrofit</i> KRL milik PT INKA (Persero).....                                                                            | 40 |
| <b>Gambar 3.6</b> Model 3D rel KRL.....                                                                                                                     | 40 |
| <b>Gambar 3.7</b> Letak pembebanan dan asumsi <i>stress</i> yang tidak seragam melingkari web .....                                                         | 41 |
| <b>Gambar 3.8</b> Simplifikasi menghilangkan gap .....                                                                                                      | 41 |
| <b>Gambar 3.9</b> Simplifikasi menghilangkan <i>fillet</i> .....                                                                                            | 42 |
| <b>Gambar 3.10</b> Permukaan kontak antara roda dan rel.....                                                                                                | 42 |
| <b>Gambar 3.11</b> Pengaturan material SSW-Q1R <i>Class 2</i> di perangkat lunak ANSYS 2022 R1 .....                                                        | 44 |
| <b>Gambar 3.12</b> Kurva S-N material roda.....                                                                                                             | 44 |
| <b>Gambar 3.13</b> <i>Mesh</i> yang dihasilkan pada roda.....                                                                                               | 45 |
| <b>Gambar 3.14</b> <i>Mesh</i> yang dihasilkan pada rel.....                                                                                                | 45 |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Gambar 3.15</b> <i>Mesh</i> yang dihasilkan pada roda dan rel .....                                       | 45 |
| <b>Gambar 3.16</b> Grafik hubungan antara <i>von mises stress</i> dengan ukuran elemen..                     | 46 |
| <b>Gambar 3.17</b> Grafik <i>element metric</i> berdasarkan <i>skewness</i> .....                            | 47 |
| <b>Gambar 3.18</b> Penempatan <i>remote displacement</i> pada roda .....                                     | 47 |
| <b>Gambar 3.19</b> Penempatan <i>fixed support</i> pada rel .....                                            | 48 |
| <b>Gambar 3.20</b> Penggunaan <i>bearing load</i> sebagai <i>axle load</i> .....                             | 48 |
| <b>Gambar 3.21</b> Penggunaan <i>rotational velocity</i> pada roda.....                                      | 49 |
| <b>Gambar 3.22</b> Pengaturan <i>time step</i> pada pemodelan simulasi dinamis roda kereta .....             | 49 |
| <b>Gambar 4.1</b> Parameter perhitungan analitikal Hertzian <i>Contact</i> .....                             | 51 |
| <b>Gambar 4.2</b> Sumbu <i>ae</i> dan <i>be</i> Hertzian <i>contact</i> pada ANSYS saat <i>initial</i> ..... | 52 |
| <b>Gambar 4.3</b> Grafik gaya reaksi arah vertikal terhadap waktu .....                                      | 54 |
| <b>Gambar 4.4</b> Grafik tegangan yang terjadi pada <i>web</i> roda kereta sepanjang waktu simulasi .....    | 55 |
| <b>Gambar 4.5</b> Distribusi tegangan di <i>web</i> roda kereta pada kondisi tegangan maksimum.....          | 55 |
| <b>Gambar 4.6</b> <i>Cross-section</i> distribusi tegangan di <i>web</i> roda kereta.....                    | 56 |
| <b>Gambar 4.7</b> Grafik tegangan yang terjadi pada <i>tread</i> roda kereta sepanjang waktu simulasi .....  | 56 |
| <b>Gambar 4.8</b> Distribusi tegangan di <i>tread</i> roda kereta pada kondisi tegangan maksimum.....        | 57 |
| <b>Gambar 4.9</b> Pembebanan siklik <i>zero based</i> .....                                                  | 57 |
| <b>Gambar 4.10</b> <i>Fatigue life</i> pada <i>web</i> roda kereta .....                                     | 58 |
| <b>Gambar 4.11</b> <i>Fatigue life</i> pada <i>tread</i> roda kereta .....                                   | 58 |
| <b>Gambar 4.12</b> Deformasi yang terjadi pada <i>tread</i> roda kereta.....                                 | 59 |
| <b>Gambar 4.13</b> Tegangan kontak antara roda dan rel .....                                                 | 59 |
| <b>Gambar 4.14</b> Grafik <i>fatigue sensitivity</i> pada bagian <i>web</i> roda .....                       | 61 |
| <b>Gambar 4.15</b> Grafik <i>fatigue sensitivity</i> pada bagian <i>tread</i> roda .....                     | 62 |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabel 2.1</b> Perbandingan enam penelitian terdahulu.....                       | 12 |
| <b>Tabel 2. 2</b> Jenis-jenis <i>constraint</i> (Madier, 2020, p. 219) .....       | 26 |
| <b>Tabel 3.1</b> Sifat mekanis SSW-Q1R <i>Class 2</i> .....                        | 43 |
| <b>Tabel 3.2</b> Sifat mekanis U33.....                                            | 43 |
| <b>Tabel 3.3</b> Hasil studi konvergensi <i>mesh</i> .....                         | 46 |
| <b>Tabel 3.4</b> Spesifikasi komputer yang digunakan .....                         | 50 |
| <b>Tabel 4.1</b> Validasi Hertzian <i>contact</i> pada sampel <i>initial</i> ..... | 52 |
| <b>Tabel 4.2</b> Validasi Hertzian <i>contact</i> pada sampel $t=1$ .....          | 52 |
| <b>Tabel 4.3</b> Validasi Hertzian <i>contact</i> pada sampel $t=2$ .....          | 53 |
| <b>Tabel 4.4</b> Validasi Hertzian <i>contact</i> pada sampel $t=3$ .....          | 53 |
| <b>Tabel 4.5</b> Validasi gaya reaksi pada daerah kontak .....                     | 53 |
| <b>Tabel 4.6</b> Hubungan antara siklus dan jarak tempuh.....                      | 61 |