

Analisis kekuatan *tamping tine* pada kereta pemeliharaan jalan rel csm 09-32 *duomatic* menggunakan metode *finite element analysis* (FEA)

Strength analysis of tamping tine on the csm 09-32 duomatic railway maintenance machine using finite element analysis (FEA)

SKRIPSI

Oleh:

Nama: Fahan Achmad Subekti

NPM: 243030095



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2026**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Fahan Achmad Subekti

Nomor Pokok Mahasiswa : 243030095

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Dalam Skripsi yang saya kerjakan ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan/ditulis oleh orang lain untuk memperoleh gelar dari suatu perguruan tinggi,
2. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu/dikutip/disitasi dalam naskah ini dan disebutkan dalam referensi,
3. Naskah laporan skripsi yang ditulis bukan dilakukan secara *copy paste* dari karya orang lain dan mengganti beberapa kata yang tidak perlu.
4. Naskah laporan skripsi bukan hasil plagiarisme.

Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 29 Juni 2026

Penulis,



Fahan Achmad Subekti

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan, saya:

N a m a : Fahan Achmad Subekti

NPM : 243030095

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya : Skripsi

Menyatakan bahwa sebagai pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, saya menyetujui memberikan kepada Universitas Pasundan Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Analisis kekuatan *tamping tine* pada kereta pemeliharaan jalan rel csm 09-32 *duomatic* menggunakan metode *finite element analysis (FEA)*

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pakalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandung, 29 Juni 2026

Yang menyatakan,



Fahan Achmad Subekti

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**Analisis kekuatan *tamping tine* pada kereta pemeliharaan jalan
rel CSM 09-32 *duomatic* menggunakan metode *finite element
analysis* (FEA)**



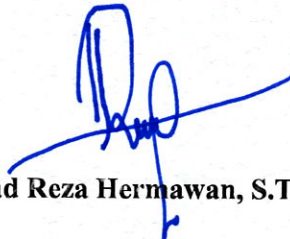
**Nama : Fahan Achmad Subekti
NPM : 243030095**

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

Pembimbing Pendamping



Mohammad Reza Hermawan, S.T., M.T.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

**Analisis kekuatan *tamping tine* pada kereta pemeliharaan jalan
rel CSM 09-32 *duomatic* menggunakan metode *finite element*
analysis (FEA)**



Nama : Fahan Achmad Subekti
NPM : 243030095

Tanggal sidang skripsi:

29 Juni 2026

Ketua : Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

Sekretaris : Mohammad Reza Hermawan, S.T., M.T.

Anggota : Ir. Agus Sentana, M.T.

Anggota : Prof. Dr. Ir. Hery Sonawan, M.T.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyusun laporan skripsi yang berjudul “Analisis kekuatan *tamping tyne* pada kereta pemeliharaan jalan rel csm 09-32 *duomatic* menggunakan metode *finite element analysis (fea)*” dengan baik dan tepat waktu. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan Pendidikan Sarjana Teknik S-1 pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Pasundan.

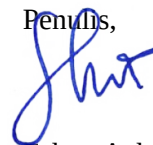
Dalam penyusunan usulan penelitian ini, penulis memperoleh banyak dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada bapak Dr. Muki Satya Permana., M.T., selaku dosen pembimbing utama, bapak Mohammad Reza Hermawan, S.T., M.T. sebagai dosen pendamping dalam penulisan laporan ini, yang telah memberikan arahan, masukan, dan motivasi selama proses penyusunan proposal ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ketua Program Studi Teknik Mesin, serta seluruh dosen dan staf Fakultas Teknik Universitas Pasundan, atas segala ilmu, bimbingan, dan fasilitas yang telah diberikan selama masa studi.

Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih memiliki keterbatasan, baik dari segi analisis maupun ruang lingkup bahasan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan penelitian ini pada tahap selanjutnya.

Akhir kata, penulis berharap semoga laporan skripsi ini dapat memberikan kontribusi positif bagi pengembangan ilmu pengetahuan serta menjadi referensi yang bermanfaat bagi pembaca dan pihak-pihak terkait.

Bandung, 29 Juni 2025

Penulis,



Fahan Achmad Subekti

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI.....	VI
DAFTAR GAMBAR.....	VIII
DAFTAR TABEL	IX
ABSTRAK	X
ABSTRACT	XI
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang	1
2. Rumusan masalah.....	2
3. Tujuan.....	3
4. Manfaat.....	3
5. Lingkup masalah.....	3
6. Sistematika penulisan	4
BAB II STUDI LITERATUR	6
1. Pemeliharaan jalan rel	6
2. <i>Tamping Tine</i>	7
3. <i>Material Tamping Tine</i>	9
4. Teori tegangan & regangan	10
5. Konsentrasi tegangan.....	15

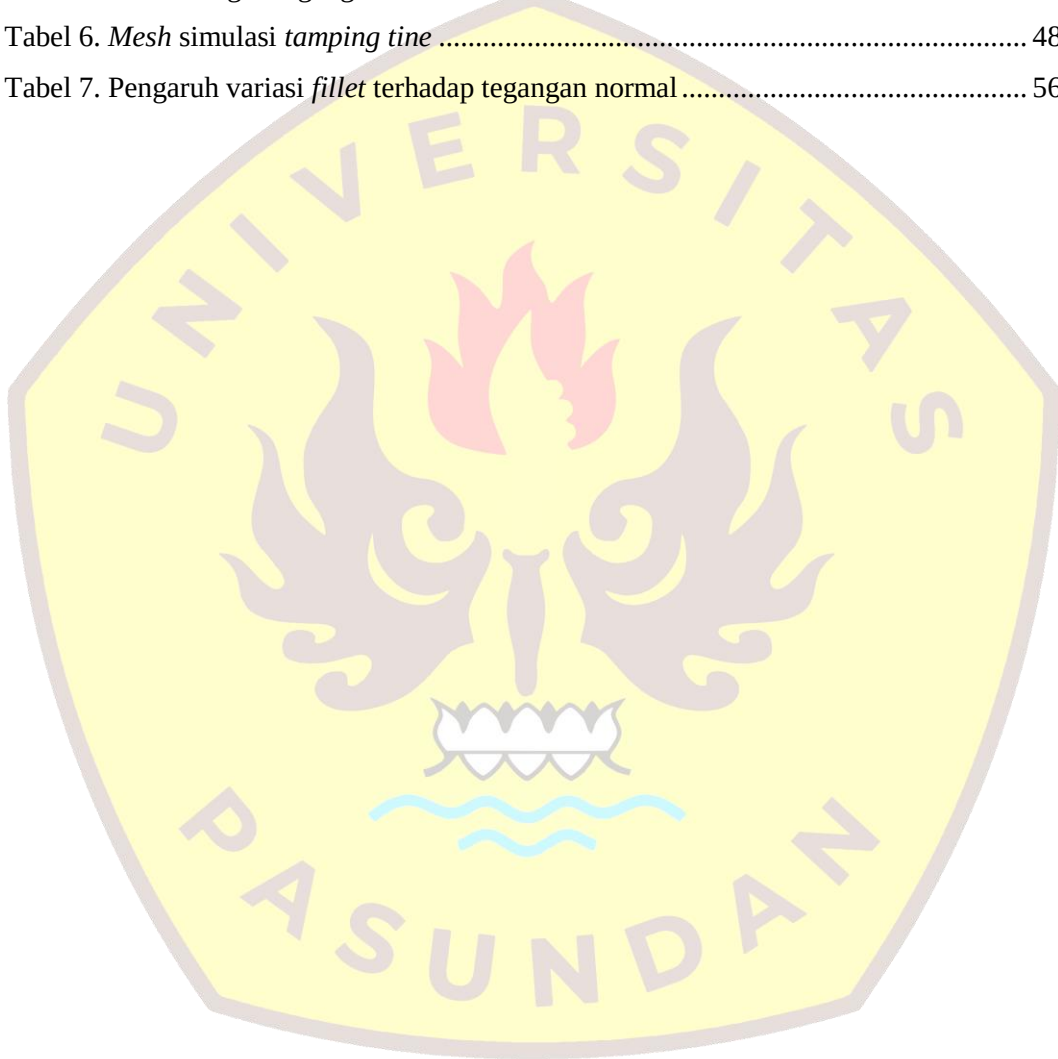
6. Teori kegagalan	15
7. Kegagalan <i>fatigue</i>	18
8. Metode <i>finite element analysis</i> (FEA)	22
BAB III METODOLOGI	27
1. Gambaran umum penelitian.....	27
2. Tahapan penelitian.....	27
3. Jadwal kegiatan.....	29
4. Alat dan bahan	29
5. Setup pengerjaan/pengujian.....	30
6. Metode pengolahan data hasil pengujian.....	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
1. Penentuan gaya kerja pada <i>Tamping Tine</i>	35
2. Analisis tegangan normal secara teoritis	40
3. Validasi model simulasi batang sederhana	41
4. Simulasi <i>Tamping Tine</i> aktual	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	57
1. Kesimpulan.....	57
2. Saran	58
DAFTAR PUSTAKA.....	59
LAMPIRAN.....	63
1. Model geometri <i>tamping tine</i>	64
2. <i>Report solidworks simulation of tamping tine</i>	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. MTT (<i>Multi Tie Temper</i>) [7].....	6
Gambar 2. Penggunaan lapis perkerasan pada formasi <i>ballast</i> [9]	7
Gambar 3. Terminologi bagian-bagian <i>tamping tine</i>	8
Gambar 4. <i>Tamping tine</i> [9].....	8
Gambar 5. Empat tahap <i>tamping</i> [11].....	9
Gambar 6. Diagram benda bebas dan langkah-langkah pembuatannya [19].....	14
Gambar 7. Contoh skematik kurva S–N [24].....	19
Gambar 8. Skema inisiasi dan propagasi retak akibat <i>fatigue</i> [25].....	20
Gambar 9. Perkembangan retak kelelahan pada pembebanan <i>high cycle fatigue</i> [26]	21
Gambar 10. Proses analisis metode elemen hingga [30].....	23
Gambar 11. Jenis elemen dalam metode elemen hingga (1D, 2D, 3D) [31]	25
Gambar 12. Diagram alir penelitian.....	28
Gambar 13. Diagram benda bebas pada silinder sederhana.....	38
Gambar 14. Diagram gaya geser pada silinder sederhana	38
Gambar 15. Diagram momen lentur pada silinder sederhana	39
Gambar 16. Geometri batang sederhana	42
Gambar 17. <i>Boundary condition</i> dan pembebanan model batang sederhana	42
Gambar 18. Grafik hasil studi konvergensi <i>mesh</i> model batang sederhana.....	44
Gambar 19. Distribusi tegangan normal pada model batang sederhana	45
Gambar 20. Geometri <i>tamping tine</i>	47
Gambar 21. <i>Boundary condition</i> dan pembebanan <i>tamping tine</i>	47
Gambar 22. Grafik <i>mesh</i> simulasi <i>tamping tine</i>	49
Gambar 23. <i>Mesh</i> model <i>tamping tine</i>	49
Gambar 24. Distribusi tegangan normal pada <i>tamping tine</i>	50
Gambar 25. Kontur tegangan <i>von Mises</i> pada <i>tine mount</i> dan <i>tine plate</i>	51
Gambar 26. Kontur tegangan <i>von Mises</i> pada area <i>tine shaft</i>	52
Gambar 27. Distribusi perpindahan pada <i>tamping tine</i>	53
Gambar 28. Distribusi faktor keamanan pada <i>tamping tine</i>	55
Gambar 29. Geometri hasil modifikasi <i>fillet</i> 10 mm.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Terminologi bagian-bagian <i>tamping tine</i> [10]	8
Tabel 2. Sifat mekanis baja AISI 4140 [13].....	10
Tabel 3. Jadwal kegiatan.....	29
Tabel 4. Hasil studi konvergensi <i>mesh</i> model batang sederhana	43
Tabel 5. Perbandingan tegangan normal hasil analitis dan simulasi.....	45
Tabel 6. <i>Mesh</i> simulasi <i>tamping tine</i>	48
Tabel 7. Pengaruh variasi <i>fillet</i> terhadap tegangan normal	56



ABSTRAK

Tamping tine merupakan komponen utama pada unit pemadat *ballast* (*tamping unit*) mesin CSM 09-32 *Duomatic* yang berfungsi memadatkan *ballast* di bawah bantalan rel untuk menjaga stabilitas dan geometri jalan rel. Pada kondisi operasional, ditemukan kegagalan berupa patah pada *tamping tine* yang diduga berkaitan dengan pembebanan selama proses kerja. Oleh karena itu, analisis tegangan dilakukan untuk mengetahui apakah beban kerja yang diterima melebihi kemampuan material. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tegangan, menentukan lokasi titik kritis, dan mengevaluasi *factor of safety* pada *tamping tine* menggunakan metode *finite element analysis* (FEA). Gaya pembebanan ditentukan berdasarkan tekanan hidrolik sebesar 100 bar dengan diameter piston 50 mm sehingga diperoleh gaya sebesar 9.815 N pada setiap *tamping tine*. Perhitungan analitis dilakukan menggunakan diagram benda bebas (DBB), diagram gaya geser (DGS), diagram momen lentur (DML), dan teori tegangan lentur untuk memperoleh tegangan normal teoritis. Hasil perhitungan kemudian divalidasi menggunakan simulasi metode elemen hingga pada model sederhana dengan kondisi pembebanan yang sama. Hasil validasi menunjukkan tegangan analitis sebesar 115,5 MPa dan tegangan hasil simulasi sebesar 115,5 MPa, yang menunjukkan kesesuaian antara hasil analitis dan simulasi. Hasil simulasi pada geometri aktual menunjukkan tegangan normal maksimum sebesar 115,2 MPa pada daerah peralihan antara *tine mount* dan *tine shaft*, sedangkan tegangan *von Mises* maksimum sebesar 103,1 MPa terjadi pada daerah *tine shaft*. Perpindahan maksimum sebesar 0,9987 mm terjadi pada ujung *tamping tine*, dengan *factor of safety* sebesar 4,02 berdasarkan tegangan *von Mises* maksimum. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembebanan statis yang dianalisis tidak menyebabkan tegangan melebihi *yield strength* material AISI 4140 sebesar 415 MPa. Dengan demikian, kegagalan *tamping tine* yang terjadi tidak terindikasi disebabkan oleh beban statis berlebih dan kemungkinan dipengaruhi oleh faktor lain yang memerlukan kajian lebih lanjut.

Kata kunci: AISI 4140, *factor of safety*, *finite element analysis* (FEA), *tamping tine*, tegangan normal.

ABSTRACT

Tamping tine is a key component of the ballast compaction unit (tamping unit) of the CSM 09-32 Duomatic machine, which functions to compact ballast beneath rail sleepers to maintain track stability and geometry. During operation, fracture was observed in the tamping tine, which was suspected to be related to the working load. Therefore, stress analysis was conducted to determine whether the applied load exceeded the material capacity. This study aims to analyze the stress distribution, determine the critical location, and evaluate the factor of safety of the tamping tine using the finite element analysis (FEA) method. The applied load was determined from a hydraulic pressure of 100 bar and a piston diameter of 50 mm, resulting in a force of 9,815 N on each tamping tine. Analytical calculations were performed using the free-body diagram (FBD), shear force diagram (SFD), bending moment diagram (BMD), and bending stress theory to determine the theoretical normal stress. The analytical results were validated using FEA simulation on a simplified model under the same loading conditions. The validation results showed an analytical stress of 115.5 MPa and a simulation stress of 115.5 MPa. Simulation of the actual geometry resulted in a maximum normal stress of 115.2 MPa at the transition between the tine mount and tine shaft, while the maximum von Mises stress of 103.1 MPa occurred in the tine shaft. The maximum displacement was 0.9987 mm at the tamping tine tip, with a factor of safety of 4.02 based on the maximum von Mises stress. These results indicate that the static loading does not cause stress to exceed the AISI 4140 yield strength of 415 MPa. Therefore, the observed fracture is not indicated to be caused by excessive static loading and may be influenced by other factors requiring further investigation.

Keywords: AISI 4140, factor of safety, finite element analysis (FEA), normal stress, tamping tine.

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Transportasi memiliki peranan yang sangat penting dalam jaringan layanan mobilitas masyarakat yang terus berkembang secara dinamis. Angkutan kereta api merupakan salah satu moda transportasi massal di Indonesia yang memiliki beberapa keunggulan, antara lain mampu mengangkut penumpang dalam jumlah besar, hemat penggunaan lahan, rendah polusi, serta memiliki tingkat keselamatan yang tinggi. Dalam sistem transportasi kereta api, prasarana memegang peranan yang sangat penting karena merupakan salah satu faktor utama dalam mendukung kelancaran pengoperasian kereta api. Oleh karena itu, kondisi prasarana tersebut harus terawat dan andal [1].

Perawatan prasarana secara berkala, khususnya pada jalan rel yang merupakan salah satu faktor pendukung operasional kereta api sehingga dapat berjalan optimal. Kondisi geometri jalan rel harus dipertahankan sesuai dengan rencana kecepatan dan dimensi sarana yang melintas, dengan tetap memperhatikan aspek keselamatan, kenyamanan, efisiensi, ekonomi, serta keselarasan dengan lingkungan sekitar. Perawatan geometri jalan rel tidak dapat diabaikan karena geometri jalan rel yang buruk dapat memengaruhi kondisi dan kinerja sarana perkeretaapian. Perawatan geometri jalan rel meliputi pemeriksaan kondisi geometri jalan rel, angkatan, listringan, pertinggian, dan pemeliharaan lebar sepur [2].

Mesin Duomatic 09-32 CSM merupakan salah satu jenis mesin perawatan jalan rel yang digunakan dalam kegiatan pemeliharaan jalan rel. Mesin ini dilengkapi dengan unit pemadat *ballast* (*tamping unit*) yang bekerja dengan memasukkan *tamping tine* (pecok) ke dalam *ballast* di bawah bantalan rel, kemudian memberikan gaya getaran dan gaya tekanan sehingga material *ballast* menjadi padat dan mampu menopang lintasan pada posisi geometrik baru yang diinginkan. Mesin ini mampu melakukan proses pemadatan pada dua bantalan rel secara simultan, sehingga meningkatkan efisiensi pekerjaan perawatan lintasan rel [3].

Tamping tine merupakan salah satu komponen utama pada unit pemadat *ballast* yang berperan dalam mentransfer gaya getar dan gaya tekan ke material *ballast* selama proses pemadatan *ballast*. Komponen ini bekerja pada lingkungan operasi yang berat karena terus-menerus berinteraksi dengan batu *ballast* yang memiliki sifat keras dan abrasif. Kondisi pembebanan berulang serta kontak langsung dengan *ballast* tersebut

menyebabkan *tamping tine* berpotensi mengalami keausan, deformasi, maupun kerusakan yang dapat memengaruhi kinerja proses pemadatan lintasan rel.

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, *tamping tine* produksi pabrikan lokal dengan masa pemakaian rata-rata selama 3 bulan mengalami patah pada area cekam. Kondisi tersebut menyebabkan terganggunya proses pemeliharaan jalan rel sehingga diperlukan waktu tambahan untuk melakukan penggantian komponen, meningkatkan biaya perawatan, serta menurunkan produktivitas mesin pemeliharaan jalan rel. Terjadinya kerusakan pada lokasi yang sama menunjukkan adanya indikasi bahwa area tersebut merupakan bagian kritis yang perlu dianalisis lebih lanjut berdasarkan pembebanan yang diterima *tamping tine* selama pengoperasian.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan metode *finite element analysis* (FEA) untuk menganalisis komponen yang menerima pembebanan. Metode FEA dapat digunakan untuk mengetahui respons mekanik komponen serta menganalisis konsentrasi tegangan yang terjadi akibat pembebanan. Konsentrasi tegangan pada suatu komponen dapat mengurangi masa pakai komponen dan berpotensi menyebabkan kegagalan struktur [4]. Selain itu, lokasi tegangan maksimum dapat dipengaruhi oleh kondisi dan arah pembebanan, sehingga lokasi tegangan kritis perlu ditentukan berdasarkan kondisi pembebanan yang bekerja pada komponen [5].

Berdasarkan uraian tersebut, kajian mengenai distribusi tegangan pada *tamping tine* mesin perawatan jalan rel, khususnya pada area yang mengalami kegagalan berdasarkan kondisi di lapangan masih perlu dilakukan. Permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini meliputi distribusi tegangan yang terjadi pada *tamping tine* akibat pembebanan kerja, lokasi yang mengalami tegangan maksimum, serta tingkat keamanan komponen berdasarkan kekuatan material.

Hasil analisis diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai respons *tamping tine* terhadap pembebanan kerja serta menjadi dasar dalam mengevaluasi potensi kegagalan pada area kritis. Dengan demikian, hasil penelitian dapat memberikan informasi teknis mengenai kemampuan *tamping tine* dalam menerima pembebanan kerja dan menjadi bahan pertimbangan untuk meningkatkan keandalan komponen.

2. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana distribusi tegangan yang terjadi pada *tamping tine* akibat pembebanan selama proses pengoperasian berdasarkan analisis *finite element analysis* (FEA)?

- b. Di mana letak titik kritis yang mengalami tegangan maksimum pada *tamping tine*?
- c. Berapa nilai faktor keamanan *tamping tine* berdasarkan tegangan maksimum dan kekuatan material?

3. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

- a. Menganalisis distribusi tegangan pada *tamping tine* akibat pembebanan selama proses pengoperasian menggunakan metode *finite element analysis* (FEA).
- b. Menentukan titik kritis berdasarkan lokasi tegangan maksimum yang terjadi pada *tamping tine*.
- c. Menentukan nilai faktor keamanan *tamping tine* berdasarkan tegangan maksimum dan kekuatan material.

4. Manfaat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

- a. Manfaat teoritis
Menambah referensi mengenai analisis kekuatan komponen perawatan jalan rel menggunakan metode *finite element analysis* (FEA), khususnya pada komponen *tamping tine*.
- b. Manfaat praktis
 - Memberikan informasi mengenai distribusi tegangan, lokasi titik kritis, dan faktor keamanan pada *tamping tine* sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi desain dan pemeliharaan komponen.
 - Memberikan informasi teknis yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam pemeliharaan dan peningkatan keandalan *tamping tine*.
 - Menjadi referensi untuk penelitian lanjutan terkait komponen *tamping tine*.

5. Lingkup masalah

Agar penelitian terfokus dan terarah, batasan masalah yang ditetapkan adalah:

- a. Penelitian difokuskan pada komponen *tamping tine* pada mesin Duomatic 09-32 CSM.
- b. Analisis dilakukan menggunakan metode *finite element analysis* (FEA) pada model tiga dimensi komponen.
- c. Material *tamping tine* menggunakan AISI 4140 sesuai data material yang digunakan pada pabrikan lokal.

- d. Pembebanan yang dianalisis merupakan beban statis yang merepresentasikan kondisi kerja *tamping tine*.
- e. Hasil analisis dibatasi pada distribusi tegangan, lokasi tegangan maksimum (titik kritis), dan faktor keamanan komponen.
- f. Penelitian tidak membahas pengaruh keausan, kelelahan material (*fatigue*), maupun analisis dinamis akibat getaran selama operasi.

6. Sistematika penulisan

Laporan skripsi ini secara garis besar terdiri atas lima bab, yaitu Pendahuluan, Studi Literatur, Metodologi Penelitian, Hasil dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran, yang dilengkapi dengan Daftar Pustaka dan Lampiran. Adapun isi masing-masing bab adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab I ini berisi perihal latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, lingkup masalah serta sistematika penulisan.

BAB II STUDI LITERATUR

Bab II berisi kajian teori, konsep dasar, dan hasil penelitian terdahulu yang relevan sebagai landasan dalam penelitian. Studi literatur meliputi pembahasan mengenai *tamping tine*, material AISI 4140, metode elemen hingga (*finite element analysis/FEA*), teori tegangan dan deformasi, faktor keamanan, serta teori-teori lain yang mendukung analisis penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab III menjelaskan tahapan penelitian, lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode pengumpulan data, pemodelan dan simulasi menggunakan metode elemen hingga, serta metode analisis dan pengolahan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab IV menyajikan hasil penelitian yang diperoleh dari simulasi dan analisis, meliputi distribusi tegangan, deformasi, faktor keamanan, validasi hasil simulasi, serta pembahasan terhadap hasil yang diperoleh berdasarkan teori dan penelitian terdahulu.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab V berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian serta saran yang dapat dijadikan masukan untuk penelitian selanjutnya maupun pengembangan objek penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi seluruh referensi yang digunakan sebagai acuan dalam penyusunan skripsi sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah.

LAMPIRAN

Berisi data pendukung penelitian seperti gambar teknik, hasil simulasi, serta dokumen lain yang mendukung isi skripsi.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan analitis dan simulasi metode elemen hingga (*finite element analysis/FEA*) terhadap *tamping tine* berbahan AISI 4140, dapat disimpulkan bahwa gaya pembebanan yang diterima oleh satu buah *tamping tine* sebesar 9.815 N, yang diperoleh berdasarkan tekanan hidrolik sebesar 100 bar dengan diameter piston 50 mm. Hasil validasi menunjukkan bahwa tegangan hasil simulasi sebesar 115,5 MPa sesuai dengan hasil perhitungan analitis sebesar 115,5 MPa, sehingga model FEA yang digunakan dapat dinyatakan sesuai dengan perhitungan analitis.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan normal maksimum sebesar 115,2 MPa terjadi pada daerah peralihan antara *tine mount* dan *tine shaft*. Sementara itu, tegangan *von Mises* maksimum sebesar 103,1 MPa terjadi pada bagian *tine shaft*, sedangkan perpindahan maksimum sebesar 0,9987 mm terjadi pada ujung *tamping tine*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa lokasi tegangan maksimum berbeda berdasarkan jenis tegangan yang dianalisis, sehingga identifikasi lokasi kritis perlu mempertimbangkan parameter tegangan yang digunakan dalam evaluasi komponen.

Berdasarkan tegangan *von Mises* maksimum sebesar 103,1 MPa dan kekuatan luluh (*yield strength*) material AISI 4140 sebesar 415 MPa, diperoleh *factor of safety* sebesar 4,02. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi masih berada di bawah kekuatan luluh material, sehingga *tamping tine* masih mampu menerima pembebanan statis sebesar 9.815 N dengan tingkat keamanan yang memadai terhadap kegagalan akibat luluh material. Semakin tinggi nilai *factor of safety*, semakin besar margin keamanan komponen terhadap kegagalan luluh.

Modifikasi geometri berupa penambahan *fillet* 10 mm pada daerah transisi menunjukkan penurunan tegangan normal pada *node* 23 dari 115,2 MPa menjadi 114,1 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *fillet* pada daerah transisi dapat menjadi salah satu alternatif untuk mengurangi konsentrasi tegangan pada *tamping tine*. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa *tamping tine* berbahan AISI 4140 yang dianalisis masih berada dalam kondisi aman terhadap pembebanan statis yang diberikan.

2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penulis berharap agar inspeksi dan pemeriksaan berkala dapat dilakukan pada daerah peralihan antara *tine mount* dan *tine shaft* karena daerah tersebut merupakan lokasi terjadinya tegangan normal maksimum. Modifikasi geometri berupa penambahan *fillet* 10 mm pada daerah transisi juga dapat dipertimbangkan sebagai salah satu alternatif untuk mengurangi konsentrasi tegangan. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pemodelan cacat porositas pada *tamping tine* sebagai pengembangan analisis terhadap distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Kristian and T. Roesdiana, “Analisis Kerusakan Jalan Rel Wilayah UPT Resor Jalan Rel 3.13 Tanjung Berdasarkan Hasil Kereta Ukur,” 2016. Accessed: Feb. 28, 2026. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1pg7aTnK25-qOPpC-I3XEwqrtElULfPmS/view?usp=sharing>
- [2] C. Adityadharma et al., “Kajian Sistem Manajemen Pemeliharaan Jalan Rel Daerah Operasi 2 Bandung: Studi Kasus Distrik 23C Kiaracondong,” 2004. Accessed: Feb. 28, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1fk7eppNYZi1X4XSOMmjb_qvi8GKJusKZ/view?usp=drive_link
- [3] Plasser & Theurer, “Duomatic 09-32 CSM Multiple Tie Tamper (Gauge 1067 MM) Manual Operator,” 2021. Accessed: Jan. 10, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1Vwhu_-pHfm47NytAiUfMAWO9NIJRslQh/view?usp=drive_link
- [4] E. Izard, R. Garcia, M. Rodriguez-Martín, and M. Lorenzo, “Finite Element Analysis of the Reduction in Stress Concentration Factors in Shrink Fits by Using Contact Rings,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/app121910037.
- [5] M. Iqbal, S. Karuppanan, V. Perumal, M. Ovinis, and H. Nouman, “Empirical modeling of stress concentration factors using FEA and artificial neural networks for the fatigue design of tubular KT-joints under combined loading,” *International Journal of Structural Integrity*, vol. 15, no. 4, 2024, doi: <https://doi.org/10.1108/IJSI-03-2024-0043>.
- [6] Pemerintah Pusat Indonesia, *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 2007*. Indonesia: LN.2007/No.65, Tln No.4722, Ll Setneg: 70 Hlm, 2007. Accessed: Mar. 19, 2026. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/39896/uu-no-23-tahun-2007>
- [7] E. Hm, A. Mubarak, and M. M. Hasan, “Perawatan Jalan Rel Kereta Api Antara Stasiun Tanjung Priok-Stasiun Kemayoran,” *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, vol. 2, no. 6, pp. 2212–2220, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.55681/sentri.v2i6.1055>.

- [8] S.-H. Ahn, K.-J. Hyung, and K.-C. Su, "A Conceptual Design on Training Simulator of the Special Railway Vehicle for Multiple Tie Tamper," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, no. 10, pp. 430–436, 2018, doi: 10.5762/KAIS.2018.19.10.430.
- [9] A. Baskoro, "Mesin pemadat jalur kereta api Plasser and Theurer," Oct. 18, 2015. Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.flickr.com/photos/arisbaskoro/22078518848>
- [10] A. Sanjaya, "Kajian Perbandingan Biaya dan Waktu Pekerjaan Perawatan Jalan Rel Menggunakan Mekanisasi dan Non-Mekanisasi (Studi Kasus: Petak Jalan Rel Antara Bojonggede – Bogor)," vol. 6, 2017. Accessed: Mar. 19, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1yOCTqNM-citeEjRhyMhZxgOLhAedcqfn/view?usp=drive_link
- [11] S. A. P. Rosyidi, "Rekayasa Jalan Kereta Api," Yogyakarta, 2015. Accessed: Mar. 19, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1rvaMejXFKJ4Zm4wtO_-1jIOBs1-000qH/view?usp=drive_link
- [12] M. Buerger and Z. Gerald, "Tamping Tine And Method for Tamping A Track," Feb. 11, 2020 Accessed: May 05, 2026. [Online]. Available: <https://patents.justia.com/patent/12221750>
- [13] Y. Guo, V. Markine, and G. Jing, "Review of ballast track tamping: Mechanism, challenges and solutions," Sep. 20, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123940.
- [14] S. Mudda, A. Hegde, S. Sharma, B. M. Gurumurthy, and U. R. Poojary, "A review of the latest developments regarding the heat treatment effects on hardness, impact toughness, and microstructure in AISI 1040, 4140, and 4340 medium carbon structural steels," *Discov. Mater.*, Jan. 2026, doi: 10.1007/s43939-025-00532-z.
- [15] Inc. Alloys International, "Alloy Steel 4140." Accessed: Jul. 12, 2026. [Online]. Available: <https://alloysintl.com/inventory/alloys-steels-supplier/alloy-steel-4140/>
- [16] A. Wibowo, *Fisika Teknik*. Semarang: Yayasan Prima Agus Teknik, 2024. Accessed: Mar. 22, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1e4RARu1uc_wQcRYx5z3P-m5HTVYv7_QX/view?usp=drive_link

- [17] J. M. Gere and B. J. Goodno, "Mechanics of Materials Eighth Edition," 2013. Accessed: Mar. 23, 2026. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1sht8RxwoaL3oLcqnBTUGASCBdH9D1gkl/view?usp=sharing>
- [18] C. Adinda Nathasia, A. Muliasari, and S. P. Ediyani, "Evaluasi Perbandingan Strktur Jembatan Akibat Beban Lalu Lintas Standar dan Kendaraan Angkutan Barang Over Dimension Over Load (ODOL) pada Jembatan KCM Wisma Asri Bekasi," *Jurnal Praktik Keinsinyuran*, vol.3, no. 3, 2026. Accessed: Jun. 22, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1LSzB6XaSDQ-zD_TfFqjCpuu07HVwJ2kV/view?usp=drive_link
- [19] F. P. Beer, E. Russell, Johnston, J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, *Mechanics of Materials*. McGraw-Hill Education, 2015. Accessed: Mar. 23, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1QEAWCjO1R9XVDt3hgPhGEhxOqFhA4Ry8/view?usp=drive_link
- [20] E. Suriani, "Studi Gaya Dalam Pada Konstruksi Balok Sederhana Dengan Pemodelan Beban," vol. 24, 2025, doi: 10.24853/nalars.24.1.21-32.
- [21] P. R. Sathe, S. D. Abhale, A. A. Kakade, V. C. Abnave, P. B. Adamane, and R. N. Adhav, "Free Body Diagram Errors among First-Year Engineering," *International Journal of Computer Techniques-IJCT*, vol. 13, [Online]. Available: <https://ijctjournal.org/>
- [22] D. Rosengrant, A. Van Heuvelen, and E. Etkina, "Do students use and understand free-body diagrams?," *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, vol. 5, no. 1, Jun. 2009, doi: 10.1103/PhysRevSTPER.5.010108.
- [23] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons, 2006. Accessed: Jun. 19, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1kqj6WEHButxmVlF8Lzzx4q7_GoyejkR/view?usp=drive_link
- [24] R. G. Budynas and J. Keith, "Mechanical Engineering Design." Accessed: Mar. 23, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1QPcEkdknunq_r2aPvboPBsky0VN2Lh-M/view?usp=drive_link
- [25] C. Schreiber, R. Müller, and C. Kuhn, "Phase field simulation of fatigue crack propagation under complex load situations," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 91, no. 2, pp. 563–577, Feb. 2021, doi: 10.1007/s00419-020-01821-0.

- [26] International Atomic Energy Agency, "Fatigue Assessment in Light Water Reactors for Long Term Operation: Good Practices and Lessons Learned," 2023. [Online]. Available: www.iaea.org/publications
- [27] O. K. Chopra, "Mechanism and Estimation of Fatigue Crack Initiation in Austenitic Stainless Steels in LWR Environments," 2002. Accessed: Mar. 24, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1XgSDtNQfDza4r9y5v3rtueSVM9Yjf67J/view?usp=drive_link
- [28] M. D. Sangid, "The physics of fatigue crack propagation," Aug. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.ijfatigue.2025.108928.
- [29] Y. Li, H. Wang, and D. Gong, "The interrelation of the parameters in the Paris equation of fatigue crack growth," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 96, pp. 500–509, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.engfracmech.2012.08.016.
- [30] D. L. Logan, *A First Course in The Finite Element Method*. Thomson, 2007. Accessed: Mar. 29, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1PuDz-WNoO_Bucu9cDEVtDzw14MuVVCHh/view?usp=drive_link
- [31] V. Jagota, A. Preet, S. Sethi, and K. Kumar, "Finite Element Method: An Overview," 2013. Accessed: Mar. 28, 2026. [Online]. Available: <http://wjst.wu.ac.th>
- [32] N. Kim, S. S. Jeon, and M. Y. Kim, "An improved numerical method evaluating exact static element stiffness matrices of thin-walled beam-columns on elastic foundations," *Comput. Struct.*, vol. 83, no. 23–24, pp. 2003–2022, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.compstruc.2005.02.024.
- [33] Vaidyanathan and Banu, "Finite Element Analysis – Concepts for Knowledge and Implementation in Dental Research" *The Journal of Indian Prosthodontic Society*, vol. 22, no.3, 2022, doi: 10.5772/intechopen.
- [34] I. Zeid, *Mastering SolidWorks: The Design Approach*. Peachpit, 2015. Accessed: Mar. 28, 2026. [Online]. Available: https://drive.google.com/file/d/1RAQcnd7hNVqDdJZRo-r6McIU2ItPLtAa/view?usp=drive_link