



Modifikasi Rail pada *Tripper Limestone* 214-TR1: Analisis Pengaruh Stiffener terhadap Distribusi Tegangan dan Peningkatan Umur Pakai Rail

Johannes Irfan Hindom¹, Muslimin^{2*}, Budi Prasetyo³, Nandang Saputra³

¹Program Studi Konsentrasi Rekayasa Industri Semen, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

³Mechanic Crusher & Reclaimer, PT Solusi Bangun Indonesia Tbk, Narogong Plant

*Corresponding author E-mail address: muslimin@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Tripper Limestone 214-TR1 merupakan peralatan yang berfungsi melakukan proses stacking material limestone pada stockpile NAR 2 PT Solusi Bangun Indonesia Tbk. Tingginya intensitas operasi menyebabkan rail sebagai jalur pergerakan Tripper menerima pembebanan berulang yang mengakibatkan deformasi plastis pada beberapa titik head rail. Kondisi tersebut berpotensi mengganggu kelancaran operasi, meningkatkan frekuensi perbaikan, serta menurunkan umur pakai rail. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi penyebab deformasi, merancang modifikasi rail melalui penambahan stiffener, serta menganalisis pengaruh modifikasi terhadap distribusi tegangan dan umur pakai rail. Metode yang digunakan meliputi observasi lapangan, Root Cause Analysis (RCA), analisis tegangan, perhitungan momen inersia, dan pengujian kekerasan Brinell. Hasil analisis menunjukkan bahwa pemasangan 78 buah flat plate stiffener berbahan SS400 (120×60×10 mm) pada kedua sisi web rail S900A menggunakan metode SMAW dengan elektroda E7018 dan preheating 100–150°C berhasil menurunkan tegangan kerja dari 278,30 MPa menjadi 88,98 MPa (penurunan 68,0%), meningkatkan momen inersia penampang sebesar 9,6%, serta menjaga kekerasan HAZ di bawah batas kritis 350 HB (rata-rata 318 HB).

Kata-kata kunci: Tripper Limestone , Rail, Stiffener, Distribusi Tegangan, Umur Pakai

Abstract

Tripper Limestone 214-TR1 is a material stacking equipment at the NAR 2 stockpile of PT Solusi Bangun Indonesia Tbk. High-intensity operations cause repeated loading on the rail, resulting in plastic deformation at several head rail points. This study aims to identify deformation causes, design rail modification through stiffener addition, and analyze its effect on stress distribution and rail service life. Methods include field observation, Root Cause Analysis (RCA), stress analysis, moment of inertia calculation, and Brinell hardness testing. Results show that installing 78 SS400 flat plate stiffeners (120×60×10 mm) on both sides of the S900A rail web using SMAW with E7018 electrodes and 100–150°C preheating reduced working stress from 278.30 MPa to 88.98 MPa (68.0% reduction), increased cross-sectional moment of inertia by 9.6%, and maintained HAZ hardness below the critical limit of 350 HB (average 318 HB).

Keywords: Tripper Limestone , Rail, Stiffener, Stress Distribution, Service Life

1. PENDAHULUAN

PT Solusi Bangun Indonesia Tbk merupakan salah satu produsen semen terkemuka di Indonesia yang beroperasi di Narogong, Jawa Barat. Dalam proses produksi semen, limestone merupakan bahan baku utama yang penanganannya melibatkan serangkaian peralatan material handling, termasuk *Tripper Limestone* 214-TR1. Tripper ini berfungsi mendistribusikan material limestone ke seluruh area stockpile NAR 2 melalui sistem rail yang memungkinkan gerakan translasi secara bolak-balik [1].

Tingginya intensitas operasi menyebabkan rail sebagai jalur pergerakan Tripper menerima pembebanan berulang secara terus-menerus. Kondisi ini mengakibatkan terjadinya deformasi plastis pada beberapa titik head rail, yang berdampak pada gangguan kelancaran operasi, peningkatan frekuensi perbaikan, dan penurunan umur pakai komponen [2]. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari mekanisme rolling contact fatigue dan kelelahan material akibat tegangan siklus yang berlangsung secara berulang [3].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji permasalahan deformasi pada komponen rail dan struktur baja industri. Kajian teoritis menunjukkan bahwa penambahan elemen penguat (*stiffener*) pada penampang baja mampu meningkatkan kekakuan dan mendistribusikan tegangan secara lebih merata sehingga risiko deformasi plastis berkurang [4]. Namun demikian, penerapan konsep *stiffener* pada sistem rail Tripper di industri semen belum banyak didokumentasikan secara kuantitatif.

Mengacu pada permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang modifikasi rail *Tripper Limestone* 214-TR1 menggunakan flat plate *stiffener* berbahan SS400 yang dipasang pada web rail S900A, serta menganalisis pengaruhnya terhadap distribusi tegangan, kekakuan struktur, dan umur pakai rail secara kuantitatif.

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dilaksanakan pada sistem rail *Tripper Limestone* 214-TR1 yang beroperasi di area Crusher & Reclaimer NAR 2, PT Solusi Bangun Indonesia Tbk, Narogong Plant, Bogor, Jawa Barat.

2. METODE PELAKSANAAN

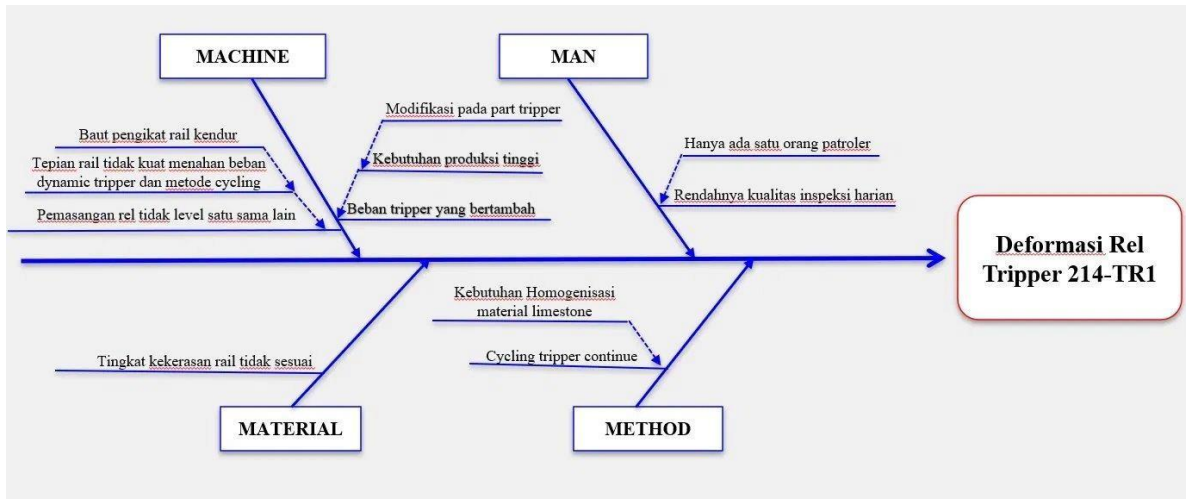
Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara sistematis melalui beberapa tahapan utama, yaitu identifikasi masalah, observasi lapangan, studi pustaka, perancangan modifikasi, fabrikasi dan pemasangan *stiffener*, pengujian kekerasan, hingga analisis data dan penarikan kesimpulan. Tahapan-tahapan tersebut dilaksanakan secara berurutan menggunakan pendekatan rekayasa (*engineering research*).

Identifikasi Masalah

Berdasarkan data pemeliharaan yang diperoleh dari departemen *Maintenance Crusher & Reclaimer* NAR 2, rail *Tripper Limestone* 214-TR1 mengalami deformasi plastis berulang pada beberapa titik *head rail*. Kondisi deformasi diidentifikasi melalui inspeksi visual dan pengukuran langsung di lapangan. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa *web rail* tidak dilengkapi elemen penguat sehingga seluruh beban operasi ditopang oleh penampang *web* yang relatif kecil.

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah diuraikan, dilakukan *Root Cause Analysis* (RCA) terhadap penyebab deformasi plastis pada *head rail* menggunakan metode *Fishbone Diagram* seperti ditunjukkan pada Gambar 1. *Fishbone Diagram* merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan berbagai faktor penyebab suatu permasalahan sehingga diperoleh akar penyebab sebagai dasar penentuan solusi [5].



Gambar 1. Fishbone diagram penyebab deformasi pada head rail

Gambar 1 merupakan hasil RCA menggunakan *Fishbone Diagram* terhadap deformasi plastis pada head rail. Inti analisis menunjukkan penyebab utama berasal dari aspek material (ketidakcukupan penampang web rail), aspek method (tidak adanya elemen penguat pada desain awal), dan aspek machine (pembebanan berulang melebihi kapasitas penampang eksisting). Secara keseluruhan, permasalahan tersebut menunjukkan perlunya modifikasi struktural berupa penambahan *stiffener* pada web rail.

Observasi Alat

Observasi dilakukan langsung pada sistem rail *Tripper Limestone* 214-TR1 di lapangan. Inspeksi visual mencakup pengukuran dimensi aktual rail S900A, dokumentasi titik-titik deformasi pada head rail, dan verifikasi kondisi sambungan antar segmen rail. Data spesifikasi rail yang digunakan adalah: tipe S900A sesuai standar EN 13674-1, tinggi web 47 mm, tebal web 12 mm, kekuatan luluh minimum 580 MPa, dan kekerasan minimum 261 HB [6].



Gambar 2. Kondisi aktual rail *Tripper* 214-TR1 sebelum modifikasi

Studi Literatur

Tahapan studi literatur dilakukan untuk mempelajari informasi yang relevan berkaitan dengan material *rail* baja pearlitik, sistem pengelasan *dissimilar metal*, analisis tegangan penampang komposit, dan pengujian kekerasan *Brinell*.

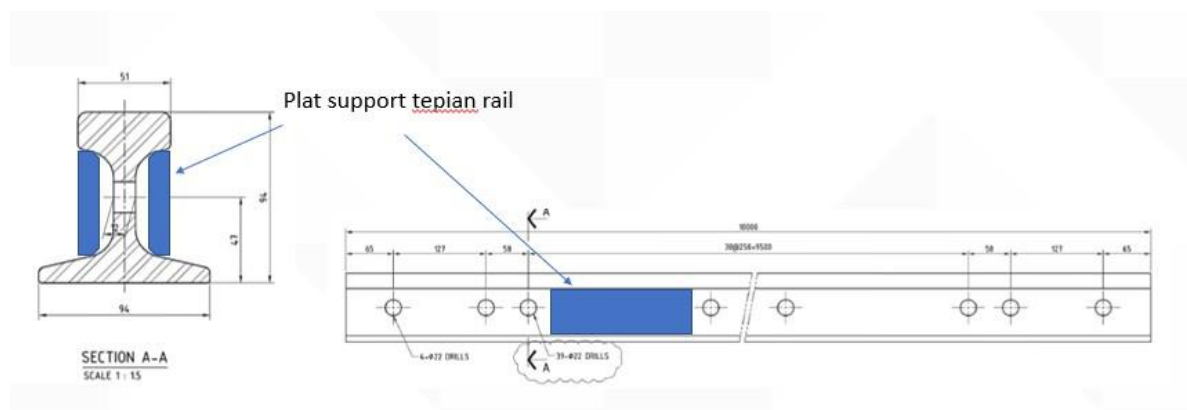
Literatur yang digunakan adalah sebagai berikut:

- 1 Standar EN 13674-1 membahas spesifikasi teknis rel kereta api tipe Vignole termasuk material S900A, mencakup komposisi kimia, sifat mekanik, dan nilai kekerasan minimum [6].
- 2 Dalam *Mechanics of Materials* membahas analisis tegangan normal, momen inersia penampang, dan teorema sumbu sejajar (*parallel axis theorem*) yang digunakan sebagai dasar perhitungan struktural [7].
- 3 Pengaruh *preheating* terhadap mikrostruktur HAZ dan distribusi kekerasan pada pengelasan baja rel berkekuatan tinggi, sebagai acuan prosedur pengelasan S900A-SS400 [8].

Diskusi

Tahap diskusi dilakukan dengan beberapa pihak terkait, meliputi teknisi *Maintenance Crusher & Reclaimer* untuk memahami kondisi aktual dan riwayat kerusakan *rail*, serta *engineer* untuk menentukan prosedur pengelasan dan spesifikasi *stiffener* yang sesuai. Diskusi dengan dosen pembimbing dilakukan untuk memperoleh arahan dalam penyusunan metode penelitian, pemilihan material *stiffener*, dan analisis data hasil pengujian.

Perancangan Modifikasi Rail

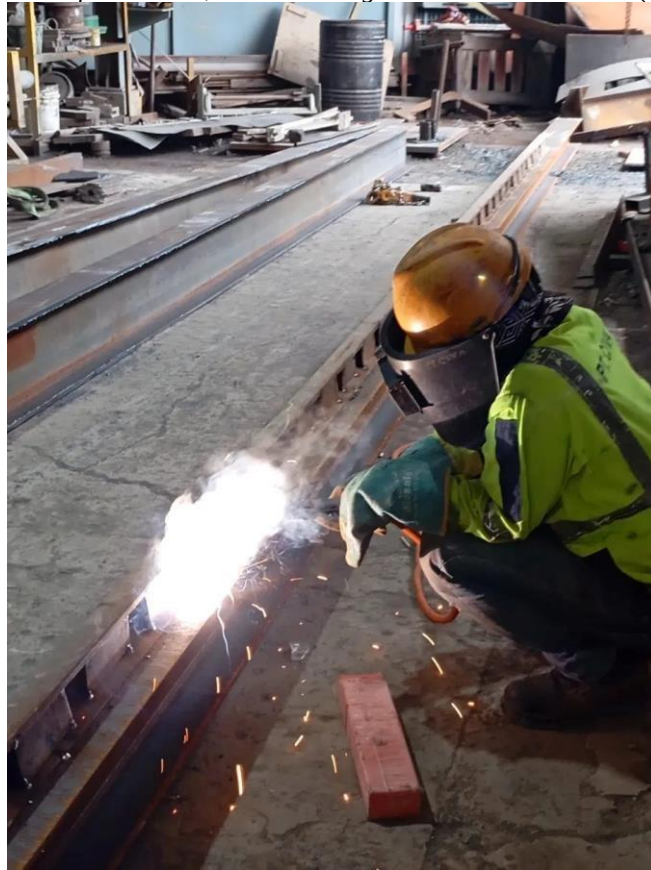


Gambar 3. Desain *flat plate stiffener* pada web rail S900A

Modifikasi *rail* dirancang dengan memasang *flat plate stiffener* berbahan baja struktural SS400 sesuai standar JIS G3101 pada kedua sisi *web rail* S900A. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, *stiffener* berukuran 120×60×10 mm dipasang tegak lurus terhadap sumbu *web rail*. Pemilihan metode penyambungan dilakukan melalui evaluasi matriks yang mempertimbangkan kekuatan sambungan, kemudahan pelaksanaan di lapangan, biaya, dan waktu pengerjaan. Pengelasan SMAW terpilih sebagai metode final dengan elektroda E7018 (*low hydrogen*) dan prosedur *preheating* 100–150°C untuk mencegah *cold cracking* pada material S900A yang memiliki *Carbon Equivalent* (C_{eq}) = 0,912 [8].

Fabrikasi dan Pemasangan

Proses fabrikasi *stiffener* meliputi tahap marking dan pemotongan pelat SS400 menggunakan mesin *Beaver*, pembuatan *bevel* (*chamfering*) pada ujung *stiffener* menggunakan gerinda tangan, serta *setting* dan *tack weld* sebelum pengelasan penuh. Proses pengelasan dilakukan menggunakan metode SMAW di lokasi ketinggian di atas *conveyor*. Setelah pemasangan *stiffener*, dilakukan pemotongan segmen *rail* lama yang mengalami deformasi, pemasangan bantalan *rail* dari material *rubber*, verifikasi jarak *center rail*, dan pengelasan sambungan antar segmen *rail* untuk menghasilkan lintasan yang kontinyu.



Gambar 4. Proses pengelasan stiffener SS400 pada web rail S900A

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Distribusi Tegangan

Perhitungan tegangan dilakukan berdasarkan data operasional aktual *Tripper Limestone* 214-TR1. Berat total sistem (*Tripper* + BC 214-BC3) adalah 16 ton, menghasilkan gaya statis $F_{\text{statis}} = 16.000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 156.960 \text{ N}$. Dengan faktor dinamis $k = 2,0$, gaya dinamis total $F_{\text{dinamis}} = 313.920 \text{ N}$ yang ditopang dua *rail* sehingga F per *rail* = 156.960 N [9].

Web rail S900A memiliki luas penampang $A_{\text{web}} = 47 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} = 564 \text{ mm}^2$. Penambahan dua *stiffener* SS400 ($60 \times 10 \text{ mm}$) memberikan luas tambahan $A_{\text{stiffener}} = 2 \times 600 = 1.200 \text{ mm}^2$, sehingga luas total = 1.764 mm^2 . Menggunakan persamaan tegangan normal $\sigma = F/A$ [7], diperoleh: tegangan sebelum modifikasi $\sigma_0 = 156.960/564 = 278,30 \text{ MPa}$; tegangan sesudah modifikasi $\sigma_1 = 156.960/1.764 = 88,98 \text{ MPa}$. Pemasangan *stiffener* menurunkan tegangan kerja sebesar 68,0%, dan rasio tegangan terhadap kekuatan luluh turun dari 48,0% menjadi 15,3%.

Analisis Kekakuan Struktur dan Momen Inersia

Momen inersia *web rail* S900A: $I_0 = (12 \times 47^3)/12 = 103.823 \text{ mm}^4$. Kontribusi setiap *stiffener* ($60 \times 10 \text{ mm}$, dipasang simetris): $I_{\text{stiffener}} = (60 \times 10^3)/12 = 5.000 \text{ mm}^4$. Untuk dua *stiffener*: $\Delta I = 10.000 \text{ mm}^4$. Momen inersia total: $I_{\text{total}} = 103.823 + 10.000 = 113.823 \text{ mm}^4$, meningkat 9,6% dibandingkan kondisi eksisting.

Dengan modulus elastisitas baja $E = 200.000 \text{ MPa}$, kekakuan lentur meningkat dari $EI_0 = 2,076 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ menjadi $EI_{\text{total}} = 2,276 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$. Peningkatan kekakuan ini secara langsung berkontribusi pada pengurangan lendutan maksimum dan deformasi plastis yang selama ini menjadi penyebab utama keausan *rail* [10].

Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan *Brinell* (HB) dilakukan sesuai standar ISO 6506-1 pada empat zona sambungan las: *base metal rail* S900A, *Heat Affected Zone* (HAZ), *weld metal*, dan *base metal stiffener* SS400 [11]. Setiap zona diuji pada tiga titik untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif.

Hasil pengujian menunjukkan nilai kekerasan *base metal rail* S900A rata-rata 324 HB, melampaui spesifikasi minimum 261 HB sesuai standar EN 13674-1 [6]. Kekerasan HAZ rata-rata 318 HB berada di bawah batas kritis 350 HB, mengkonfirmasi bahwa prosedur *preheating* 100–150°C berhasil mengendalikan pembentukan martensit pada zona terpengaruh panas [8]. *Weld metal* menghasilkan kekerasan rata-rata 126 HB, dalam rentang normal elektroda E7018 (120–180 HB) sesuai standar AWS D1.1 [12].



Gambar 5. Dokumentasi pengujian kekerasan pada zona sambungan las S900A-SS400

Nilai kekerasan *rail* lama yang telah beroperasi mencapai 418 HB, lebih tinggi dari *base metal* (324 HB), mengkonfirmasi terjadinya *work hardening* akibat kontak roda-rel berulang selama masa operasi. Nilai kekerasan sambungan *rail* hasil pengelasan antar segmen sebesar 347 HB, masih di bawah batas kritis 350 HB, menunjukkan prosedur pengelasan yang diterapkan memenuhi standar keamanan.

Analisis Pengaruh Modifikasi terhadap Umur Pakai *Rail*

Penurunan tegangan kerja sebesar 68,0% secara langsung mengurangi *driving force* deformasi plastis dan laju keausan pada *head rail*. Berdasarkan teori *rolling contact fatigue*, laju kerusakan akibat *fatigue* bersifat sensitif terhadap amplitudo tegangan siklus sehingga penurunan tegangan yang signifikan berpotensi memperpanjang umur kelelahan komponen secara substansial [13].

Mekanisme keausan abrasif dan adhesif pada sistem *wheel-rail* juga dipengaruhi oleh tekanan kontak [14]. Dengan meningkatnya luas penampang efektif, tekanan kontak per satuan luas berkurang sehingga laju keausan permukaan dapat ditekan.

Hasil penurunan tegangan kerja sebesar 68,0% dan peningkatan momen inersia penampang sebesar 9,6% pada penelitian ini sejalan dengan temuan penelitian terdahulu mengenai pengaruh penambahan stiffener pada elemen struktur baja. Penelitian lain pada balok baja profil IWF melaporkan bahwa penambahan stiffener meningkatkan kekakuan lentur balok dari 5,620 kN/mm menjadi 6,22 kN/mm (peningkatan sekitar 10,7%) serta menurunkan lendutan maksimum akibat pembebanan [4]. Meskipun besaran peningkatan kekakuan pada penelitian tersebut lebih kecil dibandingkan penelitian ini, kecenderungan yang sama menunjukkan bahwa penambahan elemen penguat secara konsisten memperbaiki distribusi tegangan dan kekakuan struktur baja. Perbedaan besaran ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan konfigurasi pemasangan, yaitu penelitian ini menerapkan stiffener pada kedua sisi web rail secara menerus melalui pengelasan penuh, sedangkan penelitian perbandingan menggunakan stiffener parsial pada balok profil-I. Perbandingan ini memperkuat validitas pendekatan modifikasi rail yang diterapkan dalam penelitian ini sebagai solusi efektif untuk mengurangi risiko deformasi plastis akibat pembebanan berulang.

4. KESIMPULAN

Setelah melakukan identifikasi masalah, perancangan, fabrikasi, pemasangan, dan pengujian modifikasi *rail Tripper Limestone 214-TR1*, dapat disimpulkan bahwa penyebab utama deformasi plastis pada *head rail Tripper Limestone 214-TR1* adalah konsentrasi tegangan akibat pembebanan berulang pada *web rail* tanpa elemen penguat, dengan tegangan kerja aktual mencapai 278,30 MPa (48,0% dari kekuatan luluh S900A). Modifikasi berupa pemasangan 78 *flat plate stiffener* SS400 (120×60×10 mm) pada kedua sisi *web rail* menggunakan SMAW elektroda E7018 dengan *preheating* 100–150°C berhasil menurunkan tegangan kerja menjadi 88,98 MPa (penurunan 68,0%) dan meningkatkan momen inersia penampang sebesar 9,6%. Selain itu, pengujian kekerasan memverifikasi keberhasilan prosedur pengelasan dengan nilai kekerasan HAZ rata-rata 318 HB, berada di bawah batas kritis 350 HB, sehingga risiko *cold cracking* dan kerapuhan material dapat dicegah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Solusi Bangun Indonesia Tbk atas dukungan dan fasilitas selama pelaksanaan penelitian ini, serta kepada Politeknik Negeri Jakarta atas dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada tim *Maintenance Crusher & Reclaimer* dan seluruh pihak yang telah memberikan arahan dan bantuan selama proses penelitian berlangsung.

REFERENSI

- [1] M. A. Alsbaugh, Bulk Material Handling by Conveyor Belt 7. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), 2008.
- [2] S. R. W. Kurniawan, Modifikasi Unit Roda Harrow Reclaimer Limestone 312-RE1, 2022.
- [3] J. W. Seo, H. K. Jun, S. J. Kwon, and D. H. Lee, "Rolling contact fatigue and wear of rail steel," Int. J. Fatigue, 2022.
- [4] N. Kamelia, A. Farid, and R. Hidayat, "Analisis pengaruh stiffener terhadap kekakuan dan lendutan struktur baja," J. Tek. Sipil, 2021.
- [5] K. Ishikawa, Guide to Quality Control. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1982.
- [6] European Committee for Standardization, EN 13674-1: Railway Applications – Track – Rail – Part 1: Vignole Railway Rails 46 kg/m and Above. Brussels: CEN, 2011.
- [7] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, and D. F. Mazurek, Mechanics of Materials, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2015.
- [8] D. Bajic, M. Medjo, and B. Gligorijevic, "Influence of Preheating on the HAZ Microstructure and Hardness in Welding of High-Strength Rail Steels," J. Mater. Eng. Perform., vol. 29, no. 8, pp. 5214–5223, 2020. doi: 10.1007/s11665-020-05004-4.
- [9] C. Esveld, Modern Railway Track, 2nd ed. Zaltbommel: MRT-Productions, 2001.
- [10] R. Lewis and U. Olofsson, Eds., Wheel–Rail Interface Handbook. Cambridge: Woodhead, 2009.
- [11] ISO 6506-1, Metallic Materials – Brinell Hardness Test – Part 1: Test Method. Geneva: ISO, 2014.
- [12] American Welding Society, AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel. Miami: AWS, 2020.
- [13] Y. Sugiyama and S. Hasegawa, "Effect of Rail Profile Wear on Rolling Contact Fatigue Initiation in Wheel-Rail Contact," Wear, vol. 265, no. 9–10, pp. 1342–1348, 2008.
- [14] S. M. Soleimani and M. Moavenian, "Wear mechanisms in rail–wheel contact," Tribol. Int., 2017.
- [15] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed. Hoboken: Wiley, 2018.
- [16] S. P. Timoshenko and J. M. Gere, Theory of Elastic Stability, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1961.
- [17] P. Duda, M. Musial, and P. Lezuch, "Welding of dissimilar high-strength steels: a review," Weld. Int., 2020.