

BAB V

PENUTUP

V.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kekuatan rel robot uji kolong menggunakan *Finite Element Method* (FEM) berbasis SolidWorks Simulation yang telah dilakukan pada enam variasi panjang rel (1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 6 m, dan 12 m) dengan sembilan titik pembebanan masing-masing, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Distribusi tegangan, deformasi, dan regangan pada rel robot uji kolong akibat beban statis dan dinamis telah berhasil dianalisis menggunakan FEM berbasis SolidWorks Simulation. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada seluruh variasi panjang rel, tegangan, deformasi, dan regangan mencapai nilai maksimum pada titik-titik pembebanan yang berada di tengah bentang (T2, T5, dan T8), sedangkan titik yang berada tepat di atas tumpuan (T1 dan T9) menunjukkan nilai paling rendah, konsisten dengan perilaku balok sederhana yang mengalami pembebanan terpusat. Tegangan von Mises maksimum tercatat yaitu rel 1 m sebesar 3,737 MPa, rel 2 m sebesar 8,116 MPa, rel 3 m sebesar 12,629 MPa, rel 4 m sebesar 16,977 MPa, rel 6 m sebesar 23,653 MPa, dan rel 12 m sebesar 60,946 MPa, seluruhnya masih di bawah kekuatan luluh aluminium Al 6063-T5 (145 MPa). Regangan ekuivalen (*MaxESTRN*) juga seluruhnya di bawah batas regangan luluh material, dengan rasio pemanfaatan tertinggi 29,56% pada rel 12 m.
2. Nilai *Safety Factor* (SF) dan ketahanan material rel terhadap beban operasional robot telah berhasil ditentukan. Nilai SF menurun signifikan seiring bertambahnya panjang rel, rel 1 m dengan SF = 94,37; rel 2 m dengan SF = 43,48; rel 3 m dengan SF = 27,94; rel 4 m dengan SF = 20,79; rel 6 m dengan SF = 6,13; dan rel 12 m dengan SF = 2,38. Seluruh konfigurasi menghasilkan SF > 1 (aman terhadap kegagalan luluh), namun rel 12 m dengan SF = 2,38 memiliki margin paling tipis. Konfigurasi 1–3 m dikategorikan sangat aman (SF > 10), 4–6 m aman

dengan margin cukup (SF 3–10), dan 12 m aman dengan margin minimal (SF < 3).

3. Perbandingan lintasan rel parsial vs. rel utuh menunjukkan perbedaan kinerja struktural yang signifikan. Konfigurasi 1–4 m memenuhi kriteria dengan margin keamanan defleksi 97,98% (1 m) hingga 16,12% (4 m). Rel 6 m melampaui $L/360$ sebesar $2,1\times$, dan rel 12 m melampaui hingga $9,2\times$. Pola pertumbuhan displacement bersifat eksponensial. Konfigurasi dengan penyangga antar segmen (parsial) terbukti jauh lebih unggul dalam mengendalikan defleksi dan tegangan dibanding bentang penuh.
4. Jumlah siklus beban berulang hingga *fatigue failure* telah ditentukan melalui analisis kelelahan dengan metode *zero-based loading* ($R = 0$) sebanyak 300 siklus simulasi. Rel 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, dan 6 m memiliki damage percentage sebesar 0,000300% pada 300 siklus, dengan Total Life mencapai batas saturasi SolidWorks 100.000.000 siklus — setara estimasi umur operasional 333.333 hari (1.277 tahun) dan SFF $333.333\times$ terhadap rencana operasi. Kelima konfigurasi dinyatakan aman sepenuhnya terhadap kegagalan kelelahan. Rel 12 m menunjukkan kondisi paling kritis dengan damage percentage maksimum 0,047340% di area dekat tumpuan ujung, sekitar $158\times$ lebih besar dibanding konfigurasi lain, Setara estimasi 633.714 siklus hingga kegagalan atau 2.112 hari (8,09 tahun), dengan SFF $2.112\times$ terhadap rencana operasi. Meski masih jauh di atas rencana, margin keamanan fatigue rel 12 m jauh lebih kecil dibanding konfigurasi lain, sehingga dinyatakan aman jangka pendek namun memerlukan inspeksi berkala. Perlu dicatat bahwa rel 6 m dan 12 m, meskipun aman dari sisi fatigue, telah melampaui batas lendutan $L/360$, sehingga kriteria defleksi tetap menjadi faktor pembatas (*governing criterion*) yang lebih kritis dibanding fatigue untuk kedua konfigurasi tersebut.

V.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran dikemukakan untuk perbaikan dan pengembangan lebih lanjut, baik bagi peneliti selanjutnya maupun bagi perancang sistem rel robot uji kolong

1. Untuk konfigurasi rel dengan panjang 6 m dan 12 m yang telah melebihi batas lendutan yang diizinkan, disarankan untuk menambahkan tumpuan perantara (*intermediate support*) sehingga panjang bentang efektif tidak melebihi 4 m. Penambahan tumpuan ini terbukti secara simulasi mampu menurunkan tegangan dan defleksi secara signifikan sesuai hasil analisis konfigurasi parsial.
2. Perlu dilakukan optimasi desain penampang rel, seperti penggunaan profil aluminium dengan momen inersia yang lebih besar atau penggantian material dengan paduan aluminium kekuatan lebih tinggi (misalnya Al 6061-T6 atau Al 7075), untuk meningkatkan kekakuan struktur pada bentang panjang tanpa menambah beban struktur secara berlebihan.
3. Titik sambungan (konektor) dan tumpuan (penyangga) merupakan zona kritis yang teridentifikasi dalam analisis *fatigue*, terutama pada konfigurasi rel 6 m dan 12 m. Disarankan untuk melakukan penguatan lokal pada zona ini, misalnya dengan gusset plate atau pengencang tambahan, dan menjadwalkan inspeksi berkala minimal setiap 12 bulan sekali untuk mendeteksi potensi inisiasi retak lelah secara dini.
4. Penelitian ini menggunakan analisis berbasis simulasi numerik (FEM) dan belum mencakup pengujian eksperimental langsung. Untuk validasi yang lebih komprehensif, disarankan agar penelitian lanjutan melakukan uji fisik (*experimental test*) pada prototipe rel dengan kondisi pembebanan yang serupa, sehingga hasil simulasi dapat diverifikasi dan tingkat kepercayaan model FEM dapat ditingkatkan.
5. Model simulasi yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memasukkan variabel tambahan, seperti beban dinamis akibat percepatan dan perlambatan robot secara eksplisit, efek temperatur lingkungan pengujian, serta variasi kondisi koneksi antara rel dan penyangga guna memperoleh gambaran perilaku struktur yang lebih realistis.
6. Berdasarkan seluruh hasil analisis, konfigurasi rel dengan panjang maksimum 4 m per bentang tanpa tumpuan perantara direkomendasikan sebagai konfigurasi optimal untuk implementasi lapangan, mengingat konfigurasi ini memberikan keseimbangan terbaik antara keamanan

struktural, nilai *safety factor*, pemenuhan batas lendutan, dan umur fatigue yang sangat panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji Pranata, Yosafat. 2024. Metode Elemen Hingga. 1st ed. edited by Dewani. Yogyakarta: ANDI.
- Bajor, Teresa, Anna Kawalek, Szymon Berski, Henryk Jurczak, and Jacek Borowski. 2022. Analysis of the Extrusion Process of Aluminium Alloy Profiles. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/23/8311>.
- Bayu, Muhammad, and Mochammad Choifin. 2025. Analisis Stress , Displacement Dan Safety Factor Pada Rangka Mobil Listrik Jeep Mini Sys-8. 05(01):3–9.
- Builds, Open. 2025. Rel Linier V-Slot® 20x80. https://us.openbuilds.com/v-slot-20x80-linear-rail/?searchid=0&search_query=v+slot .
- Cam, C. A. D., Adil O. Abdullah, Fenik K. Muhammed, Bowen Zheng, and Yi Liu. 2018. An Overview of Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing An Overview of Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing (CAD / CAM) in Restorative Dentistry. 7(March 2020):1–10. doi:10.22038/jdmt.2017.26351.1213.
- Goreta, Marko, Neno Torić, Ivica Boko, and Vladimir Divić. 2022. Behaviour of Aluminium EN AW 6082 T6 Columns Exposed to Transient Heating—Experimental and Numerical Analysis. Metals 12(8). doi:10.3390/met12081326.
- Humada, Hilmi, Budi Yuwono, and Fitri Wijayanti. 2022. Desain Dan Analisis Tegangan Rangka Frame Base Car Terhadap Ladle Transfer Car Menggunakan Software Solidworks. 1237–45. <https://prosiding.pnj.ac.id/index.php/sntm/article/view/176/177>.
- Khawaja, H., and M. Moatamedi. 2018. Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) – Solution in MATLAB ®. 12(4):313–26.
- Klabklay, Teerawat, Chaiyut Sumpavakup, Asawadech Khumkrong, Natthikan Thasanavirud, and Pannachai Pensuk. 2025. Finite Element Analysis for Estimating Strength and Fatigue of the APM Structure. 01012. https://www.researchgate.net/publication/388004404_Finite_Element_Analysis_for_Estimating_Strength_and_Fatigue_of_the_APM_Structure/link/6786d472d587995ad105c5bc/download.
- Li, Peng-hui, Shao-fei Kong, Chun-mei Geng, Bin Han, Bing Lu, Ru-feng Sun, Ruo-

- jie Zhao, and Zhi-peng Bai. 2013. Assessing the Hazardous Risks of Vehicle Inspection Workers ' Exposure to Particulate Heavy Metals in Their Work Places. 255–65. doi:10.4209/aaqr.2012.04.0087.
- Luis. 2025. Implementasi Algoritma Yolo Untuk Deteksi Objek Sistem Kemudi Pada Kendaraan Bermotor. *Journal Information* 10(3):1–17. <http://eprints.pktj.ac.id/3812/>.
- Nasrullah, Hamid, Dori Yuvenda, Adhan Efendi, Dwi Jatmoko, and Hasiffurozi. 2023. Fatigue Analysis on Wheels with Fatigue Analysis on Wheels with Finite Element Method Using Solidworks Software. doi:10.20944/preprints202310.1538.v1.
- Raswin, A. C., E. Ubaid, V. Ajeesh, and R. Jibi. 2020. Integrating CAD / CAE Design Technology for Design and Analysis of Bending Tool. 9(10):20–29. doi:10.17605/OSF.IO/XJMZE.
- Shangguan, Yiming, Wenjing Wang, Chao Yang, and Anrui He. 2023. Fatigue Strength Assessment of an Aluminium Alloy Car Body Using Multiaxial Criteria and Cumulative Fatigue Damage Theory. *Applied Sciences (Switzerland)* 13(1). doi:10.3390/app13010215.
- Shofiah, Siti, Tri Griyo Arti, and Gunawan. 2022. Nilai Guna IP Webcam Sebagai Alat Bantu Pemeriksaan Bawah Kolong Kendaraan Bermotor. 9(2). doi:10.46447/ktj.v9i2.445.
- Simon, János. 2023. Fuzzy Control of Self-Balancing, Two-Wheel-Driven, SLAM-Based, Unmanned System for Agriculture 4.0 Applications. *Machines* 11(4). doi:10.3390/machines11040467.
- Tian, Yang, Mohamed Kalifa, and Muhammad Khan. 2024. Interplay Between Wear and Thermal Expansion in 6082 Aluminum: A Simulation and Experimental Study. *MDPI* 14(23). <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/23/10852>.
- Yazdani, Majid, Quentin Boyadjian, and Philippe Bocher. 2023. Texture and Mechanical Properties of Extruded AA6063 Aluminum Alloy. 1–10.
- Zahra. 2025. Analisis Postur Tubuh Pada Uji Kolong Menggunakan Metode Rula Dan Reba Pada Pengujian Kendaraan Bermotor. (2504):1–9. <http://eprints.pktj.ac.id/3977/>.
- Planchard, M. 2025. *The SOLIDWORKS*. <https://blogs.solidworks.com/>
- Adi. 2020. Penggunaan Kamera Dalam Proses Pemeriksaan Uji Kolong Pada Unit Pelaksana Teknis Pengujian Kendaraan Bermotor Dinas Perhubungan Kota.

<http://digilib.ptdisttd.ac.id/194/1/LAP.TA%20%20PUTU%20EKAYANA%20FIX%20U.pdf>

Yurii Shumak. 2024. What is FEM in Structural Analysis?.

<https://sdcverifier.com/structural-engineering-101/fem-in-structural-analysis/>

Jousef Murad. 2022. The Finite Element Method (FEM) – A Beginner’s Guide.

Jousef Murad. <https://www.engineered-mind.com/fem/the-finite-element-method-beginners-guide/>

Solidexpert. 2019. FEM Analysis – Do not be afraid of numerical methods when calculating strength.

<https://blogs.solidworks.com/tech/2019/10/fem-analysis-do-not-be-afraid-of-numerical-methods-when-calculating-strength.html>

Ohmar Zohni. 2019. Solving Beamy – Three-Point Bending Test with SOLIDWORKS Simulation.

<https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2019/08/solving-beamy-three-point-bending-test-with-solidworks-simulation.html>

Al Fatih. 2021. Perhitungan Tegangan & Regangan Statis Menggunakan Excel & Solidworks Simulation (Stress & Strain).

<https://www.youtube.com/watch?v=AOaPq1Qr2zw>