

ANALISIS KEANDALAN *INTEGRATED ELECTRIC HYDRAULIC PUMP* PADA *MEDIUM EV BUS* MENGGUNAKAN METODE *RELIABILITY BLOCK DIAGRAM* DAN *FAULT TREE ANALYSIS*

Muhamad Aldyan Krisna Oktavia¹, Gunawan Dwi Haryadi², Yusuf Umardani²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: aldyankrisna024@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis keandalan sistem *Integrated Electric Hydraulic Pump (IEHP)* pada *Medium Electric Vehicle (EV) Bus* menggunakan metode *Reliability Block Diagram (RBD)*, *Fault Tree Analysis (FTA)*, dan *Risk Based Inspection (RBI)*. Metode *RBD* digunakan untuk memodelkan hubungan antar komponen, sedangkan *FTA* untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan sistem. Hasil analisis menunjukkan bahwa motor listrik, pompa hidrolis, dan sistem hidrolis memiliki nilai *Probability of Failure (PoF)* tertinggi sebesar 40,5% sehingga menjadi prioritas utama inspeksi. Reservoir dan sistem pendinginan fluida memiliki *PoF* 33,3%, sedangkan inverter/motor drive dan sistem kontrol elektronik memiliki *PoF* 25,1%. Hasil ini digunakan sebagai dasar penerapan *RBI* untuk menentukan prioritas inspeksi dan meningkatkan keandalan sistem *IEHP* pada *Medium EV Bus*.

Kata kunci: *electric vehicle bus; fault tree analysis; integrated electric hydraulic pump; reliability block diagram; risk based inspection*

Abstract

This study analyzes the reliability of the Integrated Electric Hydraulic Pump (IEHP) system in a Medium Electric Vehicle (EV) Bus using Reliability Block Diagram (RBD), Fault Tree Analysis (FTA), and Risk Based Inspection (RBI) methods. RBD is used to model component relationships, while FTA identifies potential causes of system failure. The results show that the electric motor, hydraulic pump, and hydraulic system have the highest Probability of Failure (PoF) at 40.5%, making them the main inspection priorities. The reservoir and fluid cooling system have a PoF of 33.3%, while the inverter/motor drive and electronic control system have a PoF of 25.1%. These results provide the basis for implementing RBI to determine inspection priorities and improve the reliability of the IEHP system in Medium EV Bus operations.

Keywords: *electric vehicle bus, fault tree analysis, integrated electric hydraulic pump, reliability block diagram, risk based inspection.*

1. Pendahuluan

Perkembangan kendaraan listrik (*electric vehicle / EV*) mendorong inovasi pada berbagai sistem kendaraan, termasuk sistem kemudi pada bus listrik. Bus *EV* menggunakan sumber energi dari baterai utama dan baterai sekunder untuk menggerakkan berbagai komponen seperti motor penggerak, sistem pendingin, *power steering*, kompresor pengereman udara, serta komponen aksesoris lainnya [1]. Konsumsi energi pada sistem kemudi yang cukup besar mendorong pengembangan teknologi yang lebih efisien untuk mendukung performa kendaraan listrik. Salah satu teknologi yang digunakan adalah *integrated electric hydraulic pump* atau *electrohydraulic power steering pump (EHPS)* yang berfungsi untuk menyuplai aliran oli sesuai kebutuhan sistem kemudi hidrolis pada kendaraan komersial seperti bus [2]. Sistem ini menggunakan motor listrik dengan elektronik daya terintegrasi serta pompa hidrolis yang bekerja secara efisien dengan prinsip *power-on-demand* sehingga konsumsi energi dapat lebih optimal dibandingkan sistem konvensional [3][4]. Untuk memastikan keandalan sistem tersebut, diperlukan metode analisis yang mampu mengevaluasi potensi kegagalan pada sistem. *Reliability Block Diagram (RBD)* dapat digunakan untuk memodelkan hubungan antar komponen dan memperkirakan tingkat keandalan sistem [5]. Selain itu, *Fault Tree Analysis (FTA)* digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan penyebab kegagalan sistem secara sistematis melalui pendekatan *top-down* [6][7]. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan dan potensi kegagalan pada *integrated electric hydraulic pump* pada *medium EV bus* menggunakan metode *RBD* dan *FTA*.

2. Objek dan Metode Penelitian

2.1 Bahan Penelitian

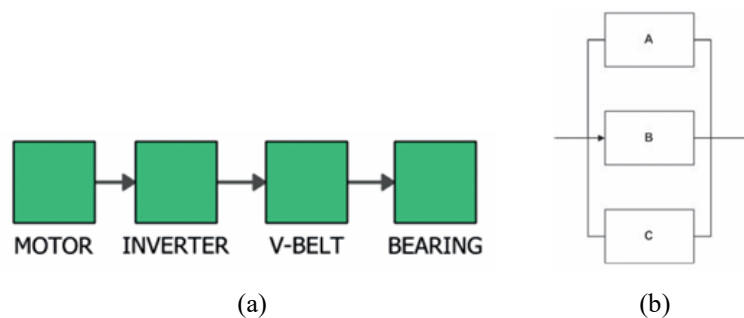
Penelitian ini menggunakan *Air Conditioner* pada *Medium EV Bus* komponen sistem, serta data kegagalan yang diperoleh dari analisis operasional dan survei lapangan.

2.2 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga teknik utama:

1. *Reliability Block Diagram* (RBD)

Reliability Block Diagram (RBD) adalah metode untuk memodelkan dan menganalisis keandalan sistem dengan menggambarkan hubungan logis antar komponen dalam bentuk rangkaian blok yang saling terhubung, sehingga komponen yang paling berpengaruh terhadap keandalan sistem dapat diidentifikasi [8]. Dalam studi Rosihan dan Yuniarto, RBD digunakan pada sistem proses extrusion yang terdiri atas rangkaian mesin secara seri, dan hasil pemodelan menunjukkan bahwa kegagalan satu mesin saja sudah cukup menghentikan keseluruhan proses, sehingga analisis keandalan sistem dan penentuan critical equipment dapat dilakukan secara terstruktur menggunakan perangkat lunak seperti Reliasoft BlockSim [8].



Gambar 1. *Reliability block diagram* (a) series (b) Parallel [8]

2. *Fault Tree Analysis* (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan suatu sistem secara sistematis. Metode ini menggunakan diagram berbentuk pohon untuk menunjukkan hubungan antara kegagalan sistem utama (top event) dengan berbagai penyebab kegagalan yang lebih kecil (basic event). Dalam FTA terdapat dua elemen utama yaitu event dan logic gate [9]. Event menggambarkan kejadian kegagalan pada sistem, sedangkan logic gate menunjukkan hubungan logika antar kejadian, seperti AND gate dan OR gate, yang menentukan bagaimana kegagalan dapat terjadi. FTA digunakan untuk membantu mengidentifikasi sumber kegagalan serta menganalisis kemungkinan terjadinya kegagalan pada suatu sistem sehingga dapat meningkatkan keandalan dan keselamatan system [9].



Gambar 2. (a) AND gate (b) OR gate

3. *Risk-Based Inspection* (RBI)

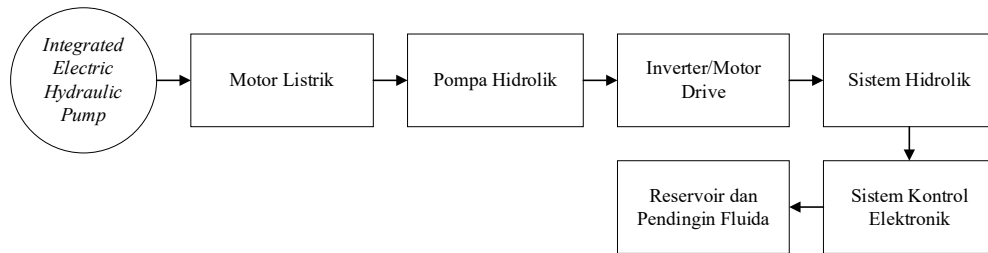
Risk Based Inspection (RBI) merupakan metode inspeksi yang memprioritaskan pemeriksaan berdasarkan tingkat risiko kegagalan suatu peralatan atau sistem. Pendekatan ini mempertimbangkan kemungkinan terjadinya kegagalan serta dampak yang ditimbulkan, sehingga inspeksi dapat difokuskan pada komponen yang memiliki risiko paling tinggi. Pada sistem perpipaan gas, risiko kegagalan dapat disebabkan oleh korosi, kerusakan mekanis, maupun faktor lingkungan yang dapat mengganggu integritas pipa. Penerapan RBI membantu meningkatkan efektivitas inspeksi serta menjaga keamanan dan keandalan sistem perpipaan [10].

3. Hasil dan Pembahasan

a. *Reliability Block Diagram* (RBD)

Dalam sistem *Integrated Electric Hydraulic Pump*, *Reliability Block Diagram* (RBD) menggambarkan keterkaitan antar komponen seperti motor listrik, pompa hidrolik, inverter motor drive, sistem hidrolik, sistem kontrol elektronik, serta reservoir dan pendingin fluida dalam mendukung kinerja sistem hidrolik yang stabil. Model ini digunakan untuk

memahami bagaimana interaksi antar komponen tersebut memengaruhi keandalan dan kontinuitas operasi sistem secara keseluruhan.

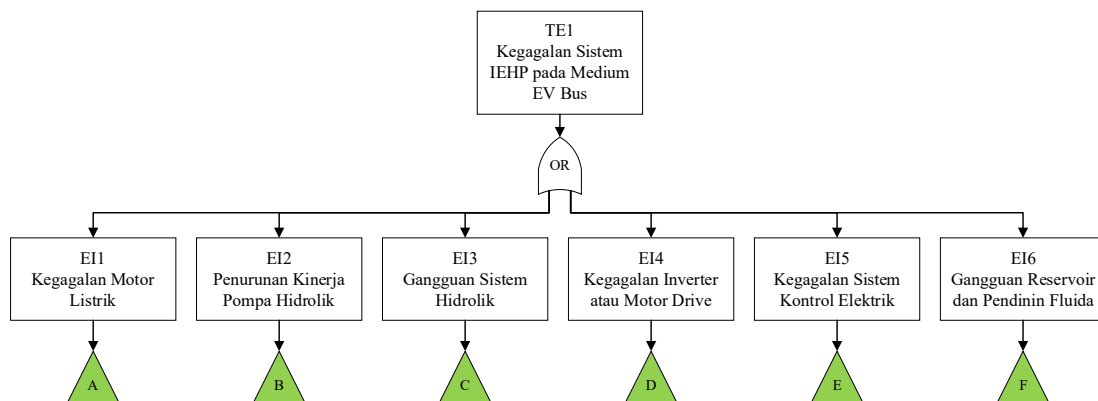


Gambar 2. Reliability Block Diagram Intergrated Electric Hydraulic Pump

Gambar tersebut menunjukkan Reliability Block Diagram (RBD) sistem Integrated Electric Hydraulic Pump yang menggambarkan keterkaitan fungsional antar komponen utama, yaitu motor listrik, pompa hidrolik, inverter motor drive, sistem hidrolik, sistem kontrol elektronik, serta reservoir dan pendingin fluida. Struktur RBD disusun secara seri, yang menunjukkan bahwa setiap komponen memiliki peran penting dalam proses kerja sistem, mulai dari penyediaan energi listrik oleh motor listrik, konversi energi menjadi tekanan fluida oleh pompa hidrolik, hingga pengaturan dan pengendalian sistem melalui inverter motor drive dan sistem kontrol elektronik. Kegagalan pada salah satu komponen dapat menyebabkan sistem tidak beroperasi secara optimal atau bahkan berhenti berfungsi, sehingga seluruh komponen perlu diperhatikan dalam analisis keandalan system.

b. Fault Tree Analysis

Fault Tree Analysis (FTA) merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan penyebab kegagalan suatu sistem secara sistematis. Metode ini menggambarkan hubungan logika antara kegagalan utama (top event) dengan berbagai penyebab kegagalan yang lebih spesifik pada setiap komponen sistem.



Gambar 3. Fault Tree Diagram

Gambar 4 menunjukkan struktur Fault Tree Analysis (FTA) pada sistem Integrated Electric Hydraulic Pump (IEHP) pada Medium EV Bus. Pada diagram tersebut, Top Event (TE1) menggambarkan kegagalan sistem IEHP secara keseluruhan yang dihubungkan dengan gerbang logika OR, sehingga kegagalan pada salah satu komponen dapat menyebabkan kegagalan sistem. Beberapa intermediate event yang memicu kegagalan sistem antara lain E11 kegagalan motor listrik, E12 penurunan kinerja pompa hidrolik, E13 gangguan sistem hidrolik, E14 kegagalan inverter atau motor drive, E15 kegagalan sistem kontrol elektronik, serta E16 gangguan reservoir dan pendingin fluida. Setiap kejadian tersebut ditelusuri ke penyebab dasar yang ditunjukkan sebagai basic event (A–F). Melalui metode FTA, hubungan sebab-akibat kegagalan komponen terhadap kegagalan sistem dapat dianalisis secara terstruktur sehingga membantu mengidentifikasi komponen kritis serta menentukan strategi pemeliharaan untuk meningkatkan keandalan sistem IEHP.

c. Risk Based Inspection (RBI)

Risk Based Inspection (RBI) diterapkan untuk menentukan prioritas inspeksi pada sistem Integrated Electric Hydraulic Pump (IEHP) pada Medium EV Bus berdasarkan nilai Probability of Failure (PoF) yang diperoleh dari analisis Reliability Block Diagram (RBD) dan Fault Tree Analysis (FTA). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa motor listrik, pompa hidrolik, dan sistem hidrolik memiliki nilai PoF tertinggi sebesar 40,5% sehingga termasuk kategori risiko tinggi dan menjadi prioritas utama inspeksi. Reservoir dan sistem pendinginan fluida memiliki PoF 33,3% dan dikategorikan

sebagai risiko menengah, sedangkan inverter/motor drive dan sistem kontrol elektronik memiliki PoF 25,1% dengan tingkat risiko relatif lebih rendah. Pemetaan risiko ini digunakan sebagai dasar penyusunan risk matrix dan strategi inspeksi yang lebih efektif untuk menjaga keandalan sistem IEHP selama operasi Medium EV Bus.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis keandalan Integrated Electric Hydraulic Pump (IEHP) pada Medium EV Bus menggunakan metode Reliability Block Diagram (RBD) dan Fault Tree Analysis (FTA) pada interval operasi 250 jam, diperoleh bahwa komponen kritis sistem berada pada subsistem penggerak dan unit kontrol dengan nilai Probability of Failure (PoF) tertinggi sekitar 25–40%. Hal ini disebabkan kedua subsistem berada pada jalur kegagalan utama yang sangat mempengaruhi kegagalan total sistem. Sementara itu, subsistem sirkuit fluida, katup internal, dan komponen pendukung lainnya memiliki nilai PoF lebih rendah yaitu sekitar 10–16% sehingga termasuk kategori risiko menengah hingga rendah. Berdasarkan hasil tersebut, penerapan Risk Based Inspection (RBI) dapat dilakukan dengan memprioritaskan inspeksi pada komponen dengan PoF $\geq 25\%$, sedangkan komponen dengan PoF 10–16% dilakukan inspeksi berkala untuk meningkatkan keandalan dan efektivitas perawatan sistem IEHP.

5. Saran

Berdasarkan hasil penelitian, komponen Integrated Electric Hydraulic Pump (IEHP) dengan nilai Probability of Failure (PoF) $\geq 25\%$ disarankan menjadi prioritas utama dalam kegiatan inspeksi dengan interval pemeriksaan yang lebih pendek. Sementara itu, komponen dengan nilai PoF 10–16% dikategorikan sebagai risiko menengah sehingga inspeksi dapat dilakukan sesuai jadwal perawatan berkala dengan tetap memantau kondisi operasional. Selain itu, penggunaan data kegagalan aktual dan histori perawatan IEHP pada penelitian selanjutnya disarankan untuk meningkatkan akurasi Mean Time Between Failure (MTBF) sehingga perhitungan PoF menjadi lebih presisi. Hasil analisis menggunakan metode Fault Tree Analysis (FTA), Reliability Block Diagram (RBD), dan Risk Based Inspection (RBI) juga dapat dijadikan dasar dalam penyusunan strategi preventive dan predictive maintenance guna meningkatkan keandalan sistem IEHP pada Medium EV Bus.

6. Acknowledgement

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dan kerja sama yang diberikan oleh Laboratorium Electrical Analysis & Engineering Measurement – Reliability, UPT Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro. Dukungan fasilitas, bimbingan teknis, serta diskusi ilmiah yang diberikan sangat membantu dalam pelaksanaan dan penyelesaian penelitian ini.

7. Daftar Pustaka

- [1] Nazaruddin, N., Sumarsono, D. A., Adhitya, M., Heryana, G., Siregar, R., Prasetya, S., & Zainuri, F. (2021). Development of alternative steering models for EV bus: A preliminary study on the conversion of hydraulic to electric power steering. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1), 37–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.227329>
- [2] Slavov, T., Mitov, A., & Kravev, J. (2020). Advanced embedded control of electrohydraulic power steering system. *Cybernetics and Information Technologies*, 20(2), 105–121. <https://doi.org/10.2478/cait-2020-0020>
- [3] Liu, L., & Cartes, D. (2007). Synchronisation based adaptive parameter identification for permanent magnet synchronous motors. *IET Control Theory and Applications*, 1(4), 1015–1022. <https://doi.org/10.1049/iet-cta:20060065>
- [4] Lee, D., Kim, K., & Kim, S. (2017). Controller design of an electric power steering system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26(2), 748–755. <https://doi.org/10.1109/tcst.2017.2679062>
- [5] Hasan, O., Ahmed, W., Tahar, S., & Hamdi, M. S. (2015). Reliability block diagrams based analysis: A survey. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.4913184>
- [6] Robidoux, R., Xu, H., Xing, L., & Zhou, M. (2009). Automated modeling of dynamic reliability block diagrams using colored Petri nets. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part A*, 40(2), 337–351. <https://doi.org/10.1109/tsmca.2009.2034837>
- [7] Sinnamon, R., & Andrews, J. (2002). Fault tree analysis and binary decision diagrams. *Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 215–222. <https://doi.org/10.1109/rams.1996.500665>
- [8] Rosihan, R. I., & Yuniarto, H. A. (2019). Analisis sistem reliabilitas dengan pendekatan reliabilitas block diagram. *Jurnal Teknosains*, 9(1), 57–67. <https://doi.org/10.22146/teknosains.36758>
- [9] Ruijters, E., & Stoelinga, M. (2015). Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. *Computer Science Review*, 15–16, 29–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001>
- [10] Sabará, M. A., Gomes, J. A. C. P., & Bueno, A. H. S. (2025). Development of a fault tree analysis (FTA) for structural integrity assessment of gas pipelines: A literature-based approach. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 19(4), 1–22. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n4-035>