

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

*Dhafin Baihaqi Alfani¹, Ismoyo Haryanto², Gunawan Dwi Haryadi²

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: dhafinbaihaqialfan@gmail.com

Abstrak

Sistem Air Conditioner (AC) merupakan subsistem penting pada Medium Electric Vehicle Bus karena berpengaruh langsung terhadap kenyamanan penumpang dan konsumsi energi kendaraan. Kegagalan pada sistem AC dapat menurunkan keandalan operasional bus listrik secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan sistem AC pada Medium Electric Vehicle Bus menggunakan metode Reliability Block Diagram (RBD), Fault Tree Analysis (FTA), dan Risk Based Inspection (RBI). Analisis RBD dan FTA digunakan untuk menentukan probabilitas kegagalan masing-masing komponen, sedangkan RBI diterapkan untuk menetapkan prioritas inspeksi berdasarkan tingkat risiko. Hasil analisis menunjukkan bahwa kompresor memiliki probabilitas kegagalan tertinggi sebesar 40,5% dan dikategorikan sebagai risiko tinggi, diikuti oleh blower dan sistem kontrol elektronik dengan probabilitas kegagalan masing-masing sebesar 25,1%. Kondensor memiliki probabilitas kegagalan sebesar 15,9% dan termasuk risiko menengah, sedangkan pipa refrigeran dan katup ekspansi masing-masing memiliki probabilitas kegagalan sebesar 10,9% dan dikategorikan sebagai risiko rendah.

Penerapan RBI berdasarkan hasil tersebut memungkinkan penentuan strategi inspeksi yang lebih terarah, sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem AC dan efektivitas pemeliharaan.

Kata Kunci: *air conditioner*; bus listrik; fta; keandalan; rbd; risk based inspection

Abstract

The Air Conditioner (AC) system is a critical subsystem in Medium Electric Vehicle Buses, as it directly affects passenger comfort and vehicle energy consumption. Failures in the AC system can reduce the overall operational reliability of electric buses. This study aims to analyze the reliability of the AC system in a Medium Electric Vehicle Bus using Reliability Block Diagram (RBD), Fault Tree Analysis (FTA), and Risk Based Inspection (RBI) methods. RBD and FTA are applied to determine the probability of failure of each component, while RBI is used to establish inspection priorities based on risk levels. The results indicate that the compressor has the highest probability of failure at 40.5% and is classified as high risk, followed by the blower and electronic control system with failure probabilities of 25.1% each. The condenser shows a failure probability of 15.9% and is categorized as medium risk, while the refrigerant pipes and expansion valve each have a failure probability of 10.9% and are classified as low risk. The implementation of RBI based on these results enables more focused inspection strategies and improves the reliability and maintenance effectiveness of the AC system.

Keywords: *air conditioner*; electric bus; fta; reliability; rbd; risk based inspection

1. Pendahuluan

Perkembangan bus listrik sebagai moda transportasi publik terus meningkat seiring dengan kebutuhan pengurangan emisi dan peningkatan efisiensi energi. Bus listrik dinilai mampu menurunkan emisi gas buang dan kebisingan di wilayah perkotaan, namun memiliki kompleksitas sistem yang lebih tinggi dibandingkan bus konvensional [1]. Oleh karena itu, keandalan sistem menjadi faktor penting dalam menjamin keselamatan dan keberlanjutan operasional bus listrik. Selain sistem penggerak dan penyimpanan energi, sistem pendukung seperti *Air Conditioner* (AC) memiliki peran penting dalam menjaga kenyamanan penumpang. Pada bus listrik, sistem AC mengambil daya langsung dari baterai sehingga berpengaruh terhadap konsumsi energi dan jarak tempuh kendaraan [2]. Penelitian menunjukkan bahwa sistem HVAC dapat menyerap porsi energi yang signifikan, terutama pada kondisi iklim panas dan beban penumpang tinggi [3]. Kegagalan pada sistem AC, seperti pada kompresor, blower, atau sistem kontrol, dapat menyebabkan penurunan kenyamanan kabin dan berdampak pada keandalan operasional kendaraan secara keseluruhan [4]. Oleh karena itu, analisis keandalan diperlukan untuk mengidentifikasi komponen kritis yang berkontribusi besar terhadap kegagalan sistem. Metode Reliability Block Diagram (RBD) dan Fault Tree Analysis (FTA) merupakan pendekatan yang umum digunakan untuk memodelkan struktur sistem dan menganalisis hubungan sebab-akibat kegagalan secara sistematis [5][6]. Hasil analisis keandalan tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam penerapan Risk Based Inspection (RBI), yaitu metode

pemeliharaan yang memprioritaskan inspeksi berdasarkan tingkat risiko kegagalan [7]. Pendekatan RBI terbukti mampu meningkatkan efektivitas pemeliharaan dengan memfokuskan sumber daya pada komponen berisiko tinggi, sehingga dapat menurunkan potensi kegagalan dan biaya perawatan [8]. Penggunaan standar dan referensi internasional seperti IEC 61025 dan IEC 60812 juga mendukung penerapan analisis keandalan dan manajemen risiko yang terstruktur dan terstandarisasi [9][10]. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis keandalan sistem Air Conditioner pada Medium Electric Vehicle Bus menggunakan metode RBD, FTA, dan RBI untuk meningkatkan keandalan serta efisiensi operasional sistem.

2. Objek dan Metode Penelitian

2.1 Bahan Penelitian

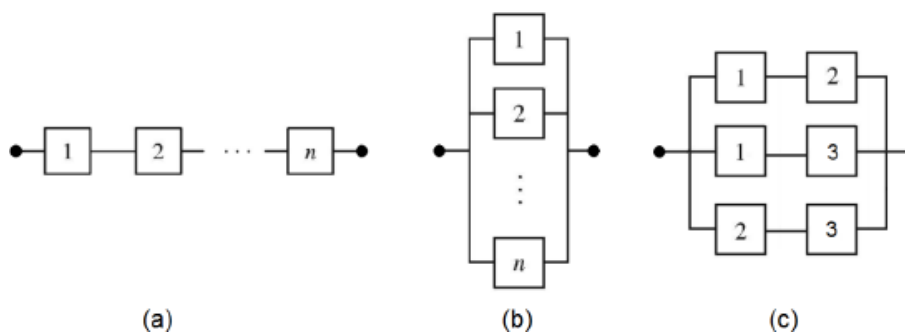
Penelitian ini menggunakan *Air Conditioner* pada *Medium EV Bus* komponen sistem, serta data kegagalan yang diperoleh dari analisis operasional dan survei lapangan.

2.2 Metode Penelitian

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

1. Reliability Block Diagram (RBD)

Reliability Block Diagram (RBD) digunakan sebagai alat untuk merepresentasikan struktur keandalan suatu sistem melalui penyusunan komponen dalam bentuk rangkaian blok yang saling terhubung. Setiap blok merefleksikan fungsi komponen dalam menyalurkan energi atau daya selama sistem beroperasi. Tingkat keandalan sistem ditentukan dari kontribusi keandalan masing-masing komponen penyusunnya. Dalam penelitian ini, metode RBD diterapkan untuk mengevaluasi performa keandalan dan menentukan komponen yang memiliki peran paling kritis pada sistem baterai bus listrik.



Gambar 1. Reliability block diagram (a) series (b) Parallel (c) Two out of three [11]

2. Fault Tree Analysis (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) adalah metode analisis risiko yang digunakan untuk mengidentifikasi penyebab utama kegagalan sistem (top event) dengan membangun diagram pohon yang menunjukkan hubungan logis antara kegagalan tersebut dan berbagai faktor penyebabnya

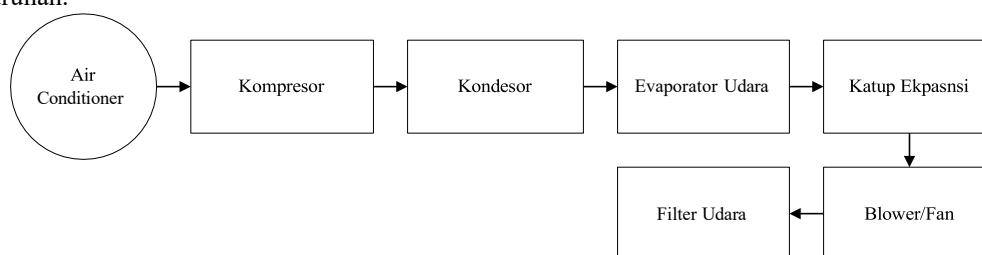
3. Risk-Based Inspection (RBI)

Risk-Based Inspection (RBI) adalah metode inspeksi berbasis risiko yang digunakan untuk mengelola risiko kegagalan peralatan atau sistem dengan memprioritaskan inspeksi berdasarkan tingkat risiko. RBI sering digunakan dalam industri, termasuk pada sistem kendaraan seperti bus listrik, untuk memastikan keandalan dan keselamatan.

3. Hasil dan Pembahasan

a. Reliability Block Diagram (RBD)

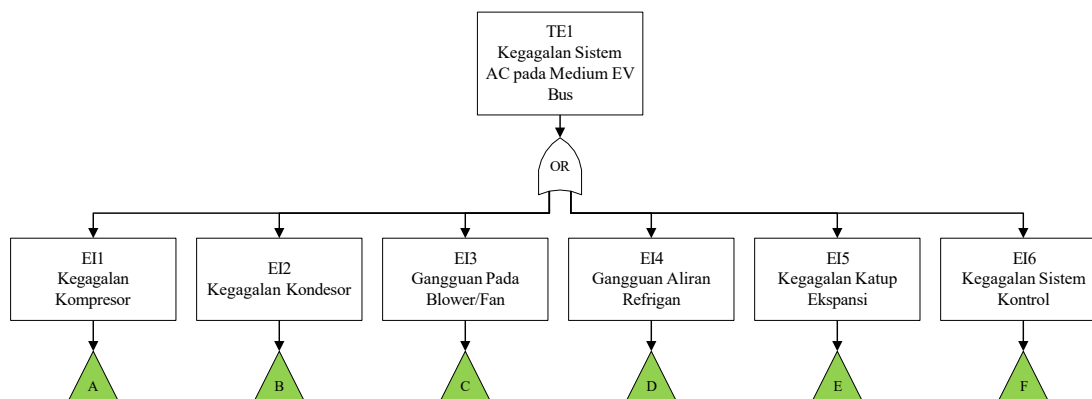
Dalam sistem *Air Conditioner* (AC), RBD menggambarkan keterkaitan antar komponen seperti kompresor, kondensor, evaporator, dan sistem kontrol dalam mendukung kinerja pendinginan yang stabil. Model ini digunakan untuk memahami bagaimana interaksi antar komponen tersebut memengaruhi keandalan dan kontinuitas operasi sistem AC secara keseluruhan.



Gambar 2. Reliability Block Diagram Battery Management System

menggambarkan keterkaitan fungsional antar komponen utama, yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, evaporator, blower/fan, dan filter udara. Struktur RBD disusun secara seri, yang menunjukkan bahwa setiap komponen memiliki peran penting dalam proses pendinginan, mulai dari sirkulasi refrigeran hingga distribusi udara dingin ke kabin. Kegagalan pada salah satu komponen dapat menyebabkan sistem AC tidak beroperasi secara optimal atau berhenti berfungsi, sehingga seluruh komponen perlu diperhatikan dalam analisis keandalan sistem.

b. Fault Tree Analysis



Gambar 3. Fault Tree Diagram Kegagalan Sistem Battery

Pada Gambar 4, Fault Tree Analysis (FTA) pada sistem *Air Conditioner (AC) Medium EV Bus*, di mana kejadian puncak (Top Event) berupa kegagalan sistem AC dapat terjadi apabila salah satu dari beberapa kegagalan komponen utama terjadi, yang dihubungkan dengan gerbang logika OR. Kegagalan tersebut meliputi kerusakan kompresor, kondensor, blower/fan, gangguan aliran refrigeran, kegagalan katup ekspansi, serta kegagalan sistem kontrol. Struktur FTA ini menunjukkan bahwa setiap kegagalan komponen memiliki kontribusi langsung terhadap terjadinya kegagalan sistem AC secara keseluruhan, sehingga komponen-komponen tersebut dapat dikategorikan sebagai elemen kritis yang perlu mendapat prioritas dalam analisis keandalan dan perencanaan pemeliharaan.

c. Risk Based Inspection (RBI)

Risk Based Inspection (RBI) diterapkan untuk menentukan prioritas inspeksi pada sistem Air Conditioner (AC) Medium EV Bus berdasarkan nilai probabilitas kegagalan (Probability of Failure/POF) yang diperoleh dari analisis Reliability Block Diagram (RBD) dan Fault Tree Analysis (FTA). Berdasarkan hasil perhitungan, komponen dengan nilai POF tertinggi adalah kompresor sebesar 40,5%, diikuti oleh blower dan sistem kontrol elektronik masing-masing sebesar 25,1%, sehingga dikategorikan sebagai komponen dengan risiko tinggi dan menjadi prioritas utama inspeksi. Komponen kondensor memiliki nilai POF sebesar 15,9% dan diklasifikasikan sebagai risiko menengah, sedangkan pipa refrigeran dan katup ekspansi masing-masing memiliki POF sebesar 10,9% dan dikategorikan sebagai risiko rendah. Pemetaan tingkat risiko ini digunakan sebagai dasar penyusunan risk matrix serta penentuan strategi inspeksi yang lebih terarah dan efisien.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis keandalan sistem Air Conditioner (AC) pada Medium Electric Vehicle Bus menggunakan metode Reliability Block Diagram (RBD) dan Fault Tree Analysis (FTA), diperoleh bahwa komponen dengan probabilitas kegagalan tertinggi adalah kompresor sebesar 40,5%, sehingga menjadi komponen paling kritis dalam sistem AC. Blower dan sistem kontrol elektronik masing-masing memiliki probabilitas kegagalan sebesar 25,1% dan dikategorikan sebagai komponen berisiko tinggi. Komponen kondensor memiliki probabilitas kegagalan sebesar 15,9% dan termasuk dalam kategori risiko menengah, sedangkan pipa refrigeran dan katup ekspansi memiliki probabilitas kegagalan terendah yaitu masing-masing sebesar 10,9% dan dikategorikan sebagai risiko rendah. Penerapan Risk Based Inspection (RBI) berdasarkan hasil tersebut memungkinkan penentuan prioritas inspeksi yang lebih terarah, sehingga dapat meningkatkan keandalan sistem AC serta mengoptimalkan efektivitas dan efisiensi pemeliharaan.

5. Saran

Disarankan agar pihak karoseri atau operator Medium EV Bus menerapkan strategi Risk Based Inspection (RBI) yang telah disusun, khususnya pada komponen kompresor, blower/fan, dan sistem kontrol elektronik, guna meningkatkan keandalan sistem Air Conditioner. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat menggunakan data operasional dan histori kegagalan yang lebih lengkap, sehingga perhitungan Probability of Failure dapat dilakukan secara lebih akurat dan mendekati kondisi nyata di lapangan.

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] Niewczas, A., Rymarz, J., Ślęzak, M., and Kasperek, D., 2025, "Reliability study of electric buses in the urban public transport system," *Energies*, vol. 18, no. 14, Art. 3863, doi: 10.3390/en18143863.
- [2] Widmer, F., van Dooren, S., and Onder, C., 2021, "Optimization of the energy-comfort trade-off of HVAC systems in electric city buses," *Energies*, vol. 14, no. 5, doi: 10.3390/en14051437.
- [3] Kale, S. K., Patil, S. S., and Deshmukh, S. P., 2024, "Reliability analysis of HVAC systems in passenger vehicles," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 22, Art. 10522, doi: 10.3390/app142210522.
- [4] Khaligh, A., and Li, Z., 2010, "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, doi: 10.1109/TVT.2010.2047877.
- [5] Henley, E. J., and Kumamoto, H., 1996, *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists*, IEEE Press, New York.
- [6] Rausand, M., and Høyland, A., 2004, *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, Wiley, New York.
- [7] Khan, F. I., and Haddara, M. M., 2003, "Risk-based maintenance: A quantitative approach for maintenance and inspection scheduling," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 16, no. 6, pp. 561–573, doi: 10.1016/S0950-4230(03)00063-0.
- [8] Villemeur, A., 1992, *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment*, Vol. 1, Wiley, Chichester.
- [9] IEC 61025, 2006, *Fault Tree Analysis (FTA)*, International Electrotechnical Commission, Geneva.
- [10] IEC 60812, 2018, *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA)*, International Electrotechnical Commission, Geneva.
- [11] Callou, Gustavo, et al. "An integrated modeling approach to evaluate and optimize data center sustainability, dependability and cost." *Energies* 7.1 (2014): 238-277.