

ANALISIS KEANDALAN INTEGRATED ELECTRIC PNEUMATIC PUMP PADA BUS LISTRIK MENENGAH MENGGUNAKAN RELIABILITY BLOCK DIAGRAM DAN FAULT TREE ANALYSIS

*Ghossan Putra Setiawan¹, Ismoyo Haryanto², Gunawan Dwi Haryadi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: ghossaanntnn@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mengkaji keandalan Integrated Electric Pneumatic Pump (IEPP) yang merupakan komponen utama dalam sistem bus listrik menengah. Analisis dilakukan menggunakan metode Reliability Block Diagram (RBD) dan Fault Tree Analysis (FTA) untuk mengevaluasi performa dan mengidentifikasi potensi kegagalan sistem. Data keandalan setiap komponen dikumpulkan dan dimodelkan dalam diagram RBD, serta dianalisis dengan FTA untuk menelusuri penyebab kegagalan sistem. Hasil menunjukkan tingkat keandalan IEPP dapat ditingkatkan melalui identifikasi komponen kritis yang menjadi titik lemah. Studi ini diharapkan dapat membantu dalam perawatan dan pengembangan sistem bus listrik yang lebih handal dan aman.

Kata Kunci: bus listrik; *fault tree analysis*; *integrated electric pneumatic pump*; keandalan

Abstract

This study analyzes the reliability of the Integrated Electric Pneumatic Pump (IEPP), a key component in medium electric bus systems. The analysis is conducted using the Reliability Block Diagram (RBD) and Fault Tree Analysis (FTA) methods to evaluate performance and identify potential system failures. Reliability data of each component are collected and modeled in the RBD, then analyzed with FTA to trace the causes of system failure. Results indicate that the reliability of the IEPP can be improved by identifying critical components that are weak points. This study aims to assist in maintenance and development of more reliable and safe electric bus systems

Keywords: *electric bus; fault tree analysis; integrated electric pneumatic pump; reliability*

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi kendaraan listrik semakin pesat sebagai solusi transportasi ramah lingkungan dan efisien energi. Bus listrik menengah menjadi salah satu alternatif transportasi publik yang banyak dikembangkan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara di perkotaan [1]. Namun, keandalan sistem kelistrikan dan pneumatik pada bus listrik ini merupakan faktor krusial yang menentukan keselamatan dan kenyamanan penumpang selama operasional.

Integrated Electric Pneumatic Pump (IEPP) adalah salah satu komponen utama dalam sistem bus listrik menengah yang berfungsi sebagai sumber tekanan udara untuk berbagai sistem, seperti rem dan pengoperasian pintu otomatis. Kegagalan IEPP dapat mengakibatkan gangguan fungsi sistem keselamatan dan kenyamanan, sehingga perlu dilakukan analisis keandalan yang mendalam [2].

Metode Reliability Block Diagram (RBD) dan Fault Tree Analysis (FTA) banyak digunakan untuk mengevaluasi keandalan dan mengidentifikasi potensi kegagalan pada sistem teknik. RBD menggambarkan hubungan antar komponen dalam sistem dan memodelkan probabilitas keberhasilan keseluruhan, sedangkan FTA menelusuri sebab-akibat kegagalan untuk menemukan akar permasalahan secara sistematis [3].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan IEPP pada bus listrik menengah dengan menggunakan metode RBD dan FTA sebagai alat bantu dalam pengambilan keputusan pemeliharaan dan perbaikan. Hasil dari penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai komponen kritis yang harus menjadi perhatian utama dalam upaya peningkatan keandalan dan keselamatan bus listrik.

2. Dasar Teori

Keandalan merupakan kemampuan suatu sistem atau komponen untuk menjalankan fungsi yang diharapkan dalam kondisi tertentu selama periode waktu yang telah ditentukan tanpa mengalami kegagalan. Dalam konteks teknik, keandalan sangat penting untuk memastikan keselamatan, efisiensi operasional, dan penghematan biaya pemeliharaan serta perbaikan [4].

Integrated Electric Pneumatic Pump (IEPP) adalah komponen utama dalam sistem pneumatik bus listrik yang mengintegrasikan pompa listrik dengan sistem pneumatik untuk menghasilkan tekanan udara yang dibutuhkan dalam

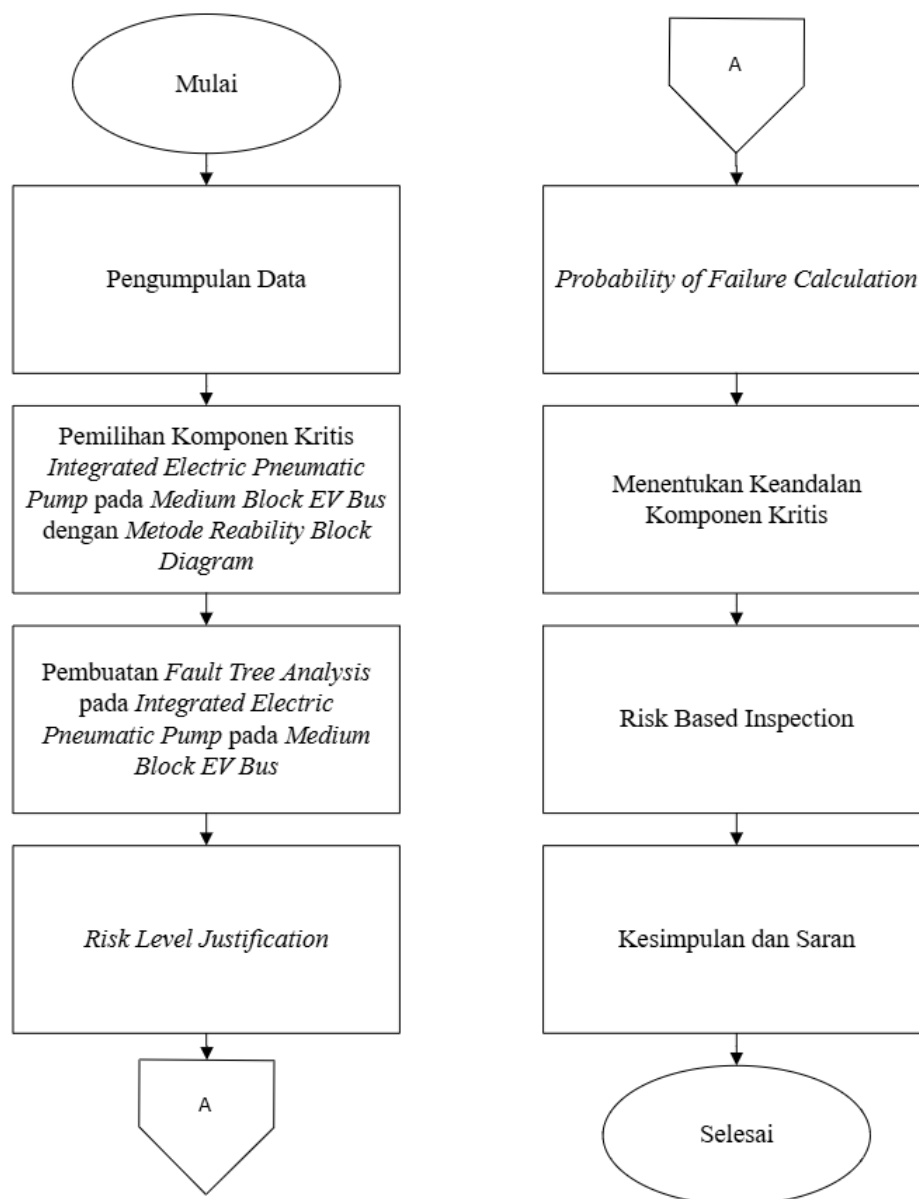
berbagai aplikasi seperti sistem rem dan pengoperasian pintu otomatis [5]. Keandalan IEPP sangat berpengaruh terhadap performa dan keamanan bus listrik [6].

Fault Tree Analysis (FTA) adalah metode analisis sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan akar penyebab kegagalan sistem melalui diagram pohon sebab-akibat [7]. FTA memulai dari kejadian kegagalan utama (top event) dan menelusuri berbagai kombinasi kegagalan komponen atau subsistem yang dapat menyebabkan kejadian tersebut. Pendekatan ini membantu dalam perencanaan pemeliharaan preventif dan peningkatan keandalan [8].

Penggabungan metode RBD dan FTA dalam analisis keandalan IEPP memberikan gambaran yang komprehensif tentang performa sistem serta sumber-sumber potensial kegagalan [9]. Data keandalan komponen IEPP diperoleh dari pengukuran dan dokumen teknis, kemudian digunakan untuk membangun model RBD dan grafik pohon kesalahan FTA. Hasil analisis membantu dalam menentukan prioritas pemeliharaan dan desain ulang komponen kritis agar keandalan sistem meningkat [10].

3. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dengan beberapa proses yang dilewati. Proses-proses yang dilakukan pada penelitian kali ini disajikan pada diagram alir seperti Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3.1 Objek Penelitian

Penelitian ini berfokus pada Integrated Electric Pneumatic Pump (IEPP) yang digunakan pada bus listrik menengah sebagai objek utama studi. IEPP berfungsi menyediakan tekanan udara untuk sistem rem dan pengoperasian pintu otomatis. Analisis dilakukan terhadap komponen-komponen utama IEPP untuk menentukan tingkat keandalan dan potensi kegagalan.

3.2 Teknik Pengumpulan Data

Data keandalan komponen IEPP diperoleh melalui dokumentasi teknis pabrik, hasil pengujian laboratorium, serta catatan pemeliharaan operasional bus listrik. Selain itu, dilakukan pengumpulan data sekunder dari literatur dan standar keandalan terkait komponen pneumatik dan elektrik.

3.3 Teknik Analisis

Analisis keandalan dilakukan menggunakan dua metode utama, yaitu:

- a) *Reliability Block Diagram (RBD)*
 Digunakan untuk memodelkan struktur sistem IEPP dan menghitung probabilitas keandalan keseluruhan berdasarkan keandalan individu komponen. Diagram ini menggambarkan hubungan seri dan paralel antar blok fungsi komponen IEPP.
- b) *Fault Tree Analysis (FTA)*
 Digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan sistem dengan membangun diagram pohon kesalahan yang dimulai dari kegagalan utama. FTA menelusuri kombinasi kegagalan komponen dan subsistem yang dapat menyebabkan sistem gagal berfungsi.

3.4 Prosedur Penelitian

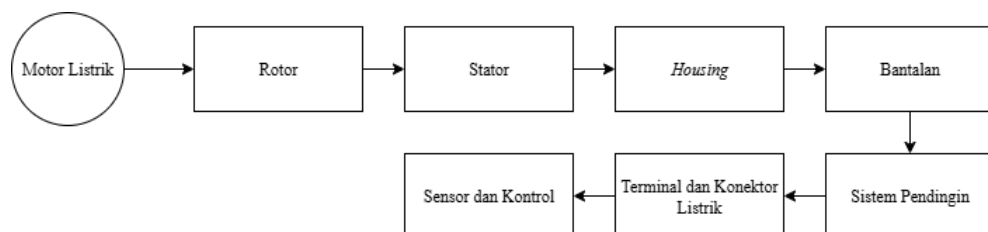
Langkah-langkah metode penelitian ini meliputi

- a) Pengumpulan data teknis dan statistik kegagalan komponen IEPP.
- b) Pembuatan model RBD berdasarkan struktur sistem IEPP dengan memperhitungkan karakteristik reliabilitas masing-masing komponen.
- c) Analisis model RBD untuk memperoleh tingkat keandalan sistem secara keseluruhan.
- d) Penyusunan Fault Tree Diagram untuk mengevaluasi kemungkinan dan hubungan sebab-akibat kegagalan sistem.
- e) Evaluasi hasil analisis untuk mengidentifikasi komponen kritis dan area yang membutuhkan perhatian dalam pemeliharaan dan perbaikan.

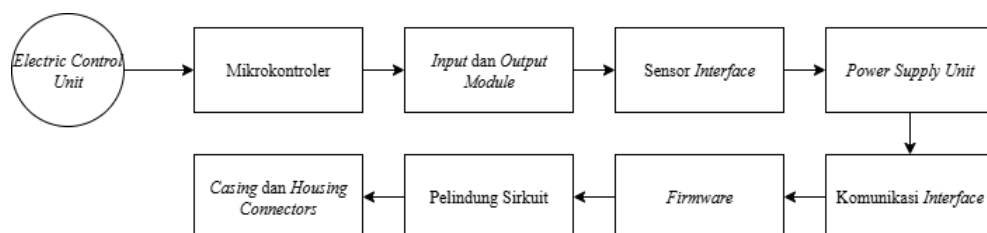
4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Reliability Block Diagram (RBD)

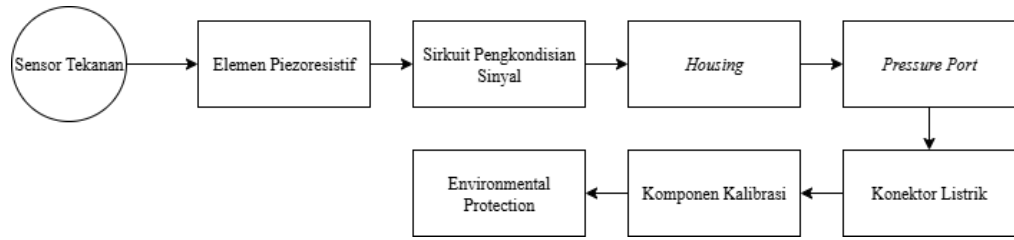
Diagram RBD yang dibuat merepresentasikan struktur sistem IEPP dengan komponen-komponen utama sebagai berikut: Motor Listrik, Pompa Pneumatik utama dengan dua pompa cadangan paralel, Sistem Katup, Unit Kontrol, dan Sensor Tekanan. Konfigurasi paralel pada subsistem pompa memberikan redundansi yang meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan karena kegagalan satu pompa masih dapat diatasi oleh pompa cadangan.



Gambar 2. Reliability Block Diagram Motor Listrik IEPP Medium EV Bus



Gambar 3. Reliability Block Diagram Electric Control Unit (ECU) IEPP Medium EV Bus



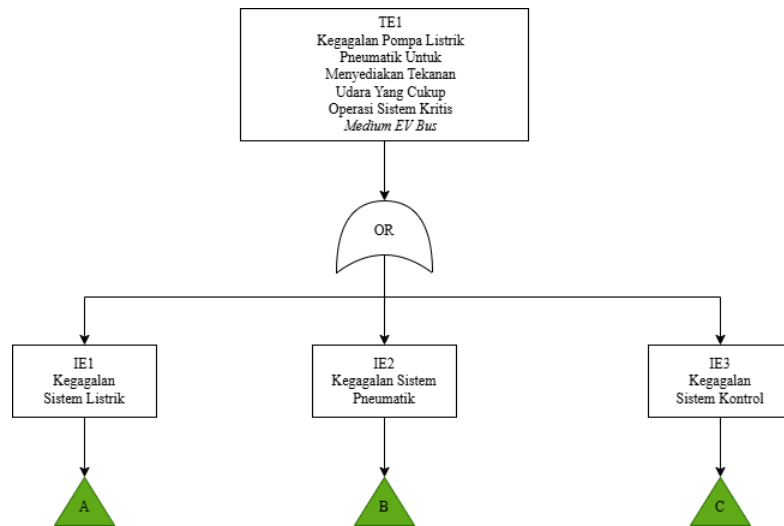
Gambar 4. Reliability Block Diagram Sensor Tekanan IEPP Medium EV Bus

4.2 Fault Tree Analysis (FTA)

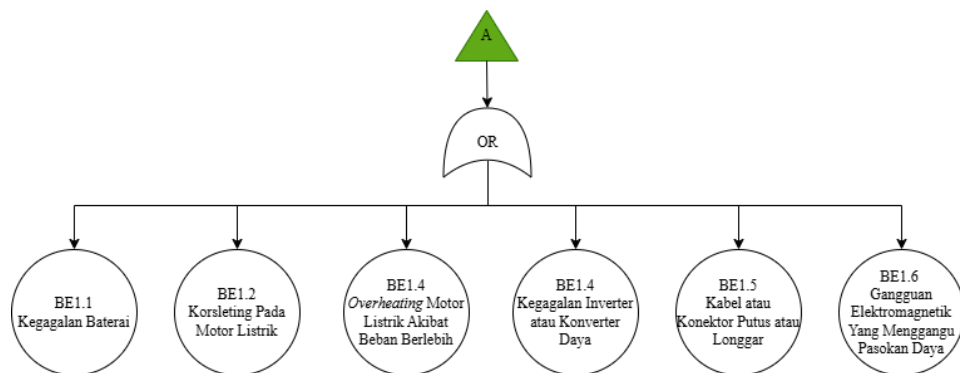
Pada Fault Tree Analysis, top event yang dianalisis adalah "Kegagalan Sistem IEPP". Kegagalan sistem ini diklasifikasikan ke dalam tiga penyebab utama

- a) Gangguan Daya (termasuk Motor Rusak dan Kehilangan Daya)
- b) Kegagalan Pompa (termasuk Pompa Utama Rusak dan Pompa Cadangan Rusak)
- c) Kegagalan Kontrol (termasuk Sensor Rusak dan Katup Rusak)

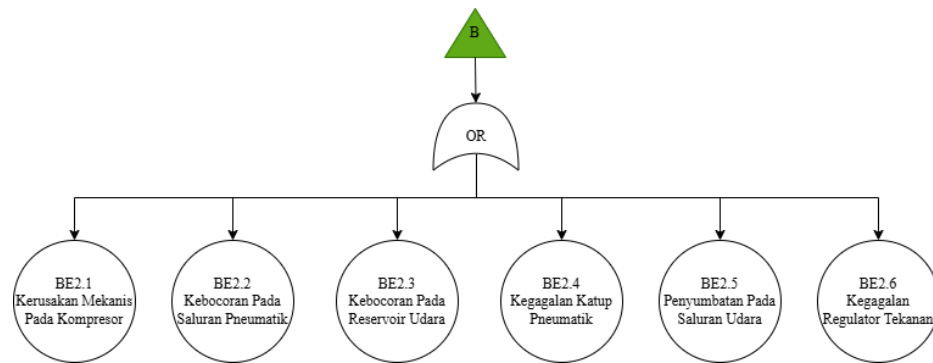
Diagram pohon kesalahan ini membantu mengurai akar masalah dan komponen-komponen kritis yang perlu mendapat perhatian dalam perawatan dan perbaikan. Berikut adalah diagram Fault Tree Analysis (FTA)



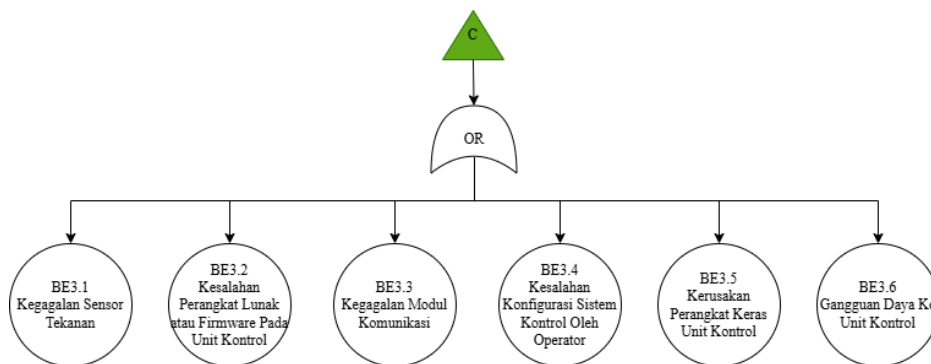
Gambar 5. Hasil Penyusunan Fault Tree Diagram



Gambar 6. Fault Tree Diagram Lanjutan A



Gambar 7. Fault Tree Diagram Lanjutan B



Gambar 8. Fault Tree Diagram Lanjutan C

4.3 Analisis dan Diskusi

Hasil analisis dari diagram RBD menunjukkan bahwa meskipun ada redundansi pada pompa dengan konfigurasi paralel, komponen seperti motor listrik, unit kontrol, dan sensor tekanan yang terhubung secara seri masih menjadi titik kegagalan tunggal (single point of failure) yang dapat menyebabkan kegagalan total sistem.

Analisis FTA memfokuskan pada tiga kategori kegagalan utama yang dapat terjadi dan menguraikan penyebab-penyebab spesifik masing-masing. Hal ini memberikan dasar yang kuat untuk merencanakan program pemeliharaan preventif dan peningkatan desain komponen kritis.

Rekomendasi untuk peningkatan keandalan sistem IEPP antara lain:

- Menambahkan redundansi pada motor listrik untuk mengurangi risiko single point of failure.
- Memperkuat program pemeliharaan preventif khususnya pada pompa cadangan untuk memastikan ketersediaannya.
- Menggunakan sensor dan katup dengan tingkat keandalan lebih tinggi dan monitoring yang lebih intensif.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis keandalan Integrated Electric Pneumatic Pump (IEPP) pada bus listrik menengah menggunakan metode Reliability Block Diagram (RBD) dan Fault Tree Analysis (FTA), dapat disimpulkan bahwa:

- Redundansi pada pompa pneumatik dengan konfigurasi paralel memberikan peningkatan keandalan sistem secara signifikan, sehingga kegagalan satu pompa tidak langsung menyebabkan kegagalan total sistem.
- Komponen-komponen yang berkontribusi sebagai single point of failure adalah motor listrik, unit kontrol, dan sensor tekanan. Kegagalan pada komponen ini berpotensi menyebabkan kegagalan sistem secara keseluruhan.
- Fault Tree Analysis membantu mengidentifikasi akar penyebab utama kegagalan sistem IEPP yang terbagi pada tiga kategori besar: gangguan daya, kegagalan pompa, dan kegagalan kontrol.
- Rekomendasi perbaikan untuk peningkatan keandalan sistem meliputi penambahan redundansi pada motor listrik, peningkatan kualitas dan pemeliharaan sensor serta katup, serta penguatan program pemeliharaan preventif khususnya pada pompa cadangan.

Dengan penerapan rekomendasi tersebut, diharapkan keandalan IEPP pada bus listrik dapat meningkat, sehingga mengurangi potensi downtime dan memperbaiki performa operasional bus listrik menengah.

6. Daftar Pustaka

- [1] Belmonte, B. B., Avemarie, G., & Rinderknecht, S. (2024). Optimized Smart Charging of Electric Bus Fleets for Greenhouse Gas Emission 76 Minimization. *Proceedings - 24th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 8th I and CPS Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2024*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/eeeic/icpseurope61470.2024.10751621>
- [2] Li, Q., Leng, Y., Yao, H., & Pei, M. (2024). Assessment of transit bus electricity consumption using a random parameters approach. *Energy*, 307, 132811.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132811>
- [3] Lawton, M. P., & Brody, E. M. (1969). Assessment of Older people: Self Maintaining and Instrumental Activities of Daily living. *The Gerontologist*, 9(3 Part 1), 179–186. https://doi.org/10.1093/geront/9.3_part_1.179.
- [4] Topal, O. (2024). A new perspective on the performance comparison of pure electric buses versus converted electric buses in public transportation systems. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 1829–1840.
<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae049>
- [5] Li, Shuwei, Zheng, & Yaogang. (2013). Development of integrated braking and steering system for electric bus. *仪器仪表学报*, 138–141.
<http://www.cqvip.com/QK/94550X/2013S1/1005526660.html>
- [6] Engel, D. W., Dalton, A. C., Dale, C., Jones, E., & Thompson, J. (2013). Risk Analysis and Decision Making FY 2013 Milestone Report.
<https://doi.org/10.2172/1088638>
- [7] László, P. (2011). Sensitivity Investigation of Fault Tree Analysis with Matrix Algebraic Method. *Deleted Journal*,
https://www.eng.unideb.hu/userdir/pokoradi/11_02.pdf
- [8] Lapp, S. A. (2005). Applications of fault tree analysis to maintenance interval extension and vulnerability assessment. *Process Safety Progress*, 24(2), 91–97.
<https://doi.org/10.1002/prs.10071>
- [9] Ahmad, W., Hasan, O., Pervez, U., & Qadir, J. (2016). Reliability modeling and analysis of communication networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 78, 191–215.
<https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.11.008>
- [10] Yllera, J. (2018). Modularization methods for evaluating fault trees of complex technical systems. In *CRC Press eBooks* (pp. 81–100).
<https://doi.org/10.1201/9781351071710-5>