J-CEKI: Jurnal Cendekia Ilmiah
Vol.4, No.3, April 2025

Desain dan Penilaian Risiko Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Kapal Jenis *Oil barge*

Maulana Harry Pratomo
Program Profesi Insinyur (PPI) - Sekolah Interdisiplin Manajemen dan Teknologi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
E-mail: maulanaharryp@gmail.com

Article History:
Received: 17 Maret 2025
Revised: 06 April 2025
Accepted: 14 April 2025

Keywords: *PLTS, kapal, risiko kebakaran, baterai lithium, FMEA, Fire Dynamic Simulator.*

Abstract: *Penerapan energi terbarukan di industri perkapalan menjadi langkah strategis dalam menurunkan konsumsi bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) pada kapal tongkang minyak (Oil barge). Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan simulasi numerik dengan Fire Dynamic Simulator (FDS) digunakan untuk menilai risiko operasional terutama terkait penempatan baterai lithium dalam ruang terbatas yang memiliki atmosfer eksplosif. Hasil kajian menunjukkan bahwa mode kegagalan overheat dan short circuit pada baterai memiliki tingkat risiko yang berada pada kategori tolerable, namun dengan potensi konsekuensi berskala catastrophic. Penerapan sistem pemadam CO_2 dan insulasi termal terbukti menurunkan risiko menjadi negligible. Studi ini menyimpulkan bahwa integrasi desain teknis dengan pendekatan manajemen risiko dapat meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem energi alternatif di atas kapal.*

PENDAHULUAN

Peningkatan efisiensi energi di sektor perkapalan menjadi fokus utama seiring dengan tuntutan global terhadap pengurangan emisi karbon. Kapal berjenis tongkang minyak (*oil barge*) beroperasi dengan konsumsi bahan bakar tinggi dan menghasilkan emisi yang signifikan (Mahmud et al., 2022). Salah satu solusi adalah implementasi sumber daya alternatif seperti pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) (Akbar et al., 2024). Namun, penempatan baterai lithium sebagai media penyimpanan energi di area berisiko tinggi (*explosive atmosphere*) menimbulkan tantangan keselamatan yang harus diidentifikasi dan dikendalikan.

Penelitian ini dirancang untuk untuk mengevaluasi sistem PLTS pada kapal tongkang minyak dengan mempertimbangkan aspek keselamatan dan keandalan. Menggunakan metode FMEA *(Failure Mode and Effect Analysis)* (Daryanto, 2024) dan simulasi numerik dengan *Fire Dynamic Simulator (FDS)* penelitian yang dilakukan diharap mampu memberi kontribusi pada pengembangan sistem energi alternatif yang lebih aman dan andal di industri perkapalan.

Dengan demikian, Penelitian yang dilakukan oleh penulis diharapkan dapat memberikan insight positif bagi industri perkapalan dalam mengembangkan sistem energi alternatif yang lebih

bersih, aman, dan berkelanjutan. Disamping itu, penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan kebijakan dan regulasi terkait energi terbarukan di industri perkapalan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif berbasis analisis risiko (Ramadhani et al., 2023), yang dirancang untuk mengevaluasi keamanan dan keandalan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di atas kapal tongkang minyak (*oil barge*) (Zullah, 2023). Fokus utama berada pada subsistem penyimpanan energi, yakni baterai lithium, yang memiliki potensi bahaya kebakaran dan ledakan jika tidak dikelola dengan baik. Dua metode utama digunakan secara terintegrasi, yaitu:

***Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)**

FMEA diterapkan untuk mengidentifikasi, mengkategorikan, dan mengevaluasi risiko yang muncul dari kegagalan komponen-komponen sistem PLTS (Ardian Burhandono & Sinaga, 2022). Metode ini mengacu pada standar internasional IEC 60812, yang merekomendasikan pendekatan sistematis terhadap penilaian kegagalan berdasarkan tiga parameter utama:

1. *Severity* (S): tingkat keparahan dampak apabila kegagalan terjadi,
2. *Occurrence* (O): frekuensi atau kemungkinan kegagalan terjadi,
3. *Detection* (D): kemampuan sistem dalam mendeteksi potensi kegagalan sebelum berdampak serius.

Analisis dilakukan secara menyeluruh terhadap subsistem kritis, seperti:

1. Baterai lithium,
2. Inverter dan sistem proteksi kelistrikan,
3. Sistem ventilasi,
4. Sensor suhu dan gas.

Setiap mode kegagalan dianalisis untuk menghasilkan Risk Priority Number (RPN) atau skor prioritas risiko (Nevada et al., 2021), yang digunakan untuk menentukan kebutuhan mitigasi dan penilaian kelayakan teknis instalasi PLTS di atas kapal.

Simulasi Kebakaran dengan Fire Dynamic Simulator (FDS)

Untuk mengevaluasi konsekuensi termal dari skenario kegagalan baterai, dilakukan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak *Fire Dynamic Simulator* (FDS) yang dikembangkan oleh NIST (*National Institute of Standards and Technology*). Simulasi ini bertujuan untuk menggambarkan perilaku api, penyebaran panas, dan dinamika asap di dalam ruang baterai kapal.

Empat skenario simulasi dirancang berdasarkan kombinasi proteksi aktif dan pasif yang umum diterapkan di kapal (Ardila et al., 2020):

1. **Skenario 1**: Ruang baterai tanpa sistem proteksi. Digunakan sebagai baseline untuk mengetahui risiko maksimal dalam kondisi terburuk.
2. **Skenario 2**: Ruang baterai dilengkapi **insulasi termal kelas A60** pada dinding dan langit-langit ruangan. Ini merupakan bentuk proteksi pasif yang berfungsi menghambat propagasi panas.
3. **Skenario 3**: Kombinasi insulasi dengan **sistem sprinkler air otomatis**, yang mewakili strategi penekanan suhu dan pelepasan tekanan awal.
4. **Skenario 4**: Kombinasi insulasi dan **sistem pemadam otomatis berbasis gas CO_2**, yang secara efektif mengisolasi oksigen dan memadamkan api tanpa merusak perangkat elektronik.

Setiap simulasi dilakukan dengan parameter tetap seperti volume ruangan, kapasitas panas baterai, dan posisi titik api. Hasil utama yang diamati meliputi:

1. Puncak suhu ruangan (°C),
2. Waktu pemadaman (detik),
3. Persebaran panas horizontal dan vertikal,
4. Efektivitas sistem pemadam terhadap skenario overheat dan short circuit.

Integrasi antara metode FMEA dan FDS dalam penelitian ini memberikan kerangka kerja yang kuat dalam menilai potensi kegagalan dan konsekuensinya secara kuantitatif, serta menentukan strategi mitigasi yang paling efektif sebelum sistem PLTS dioperasikan secara penuh di atas kapal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Berikut merupakan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat 2 (dua) poin yang pertama yaitu Hasil FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*)

Hasil FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode FMEA, beberapa komponen utama sistem PLTS yang berpotensi menimbulkan risiko signifikan telah diidentifikasi. Komponen tersebut meliputi:

1. Baterai lithium, yang merupakan media penyimpanan utama energi listrik dan memiliki potensi bahaya besar karena sifatnya yang mudah terbakar apabila terjadi overheat atau kegagalan listrik.
2. Sistem ventilasi, yang sangat berperan dalam menjaga suhu ruang baterai tetap stabil dan menghindari akumulasi gas berbahaya.
3. *Heat detector,* sebagai elemen deteksi awal terhadap kenaikan suhu ekstrem yang dapat memicu kebakaran.

Hasil evaluasi risiko menunjukkan beberapa mode kegagalan utama sebagai berikut:

1. ***Overheat***: Dapat terjadi akibat sirkulasi udara yang buruk atau kegagalan sistem pendingin. Risiko ini dikategorikan sebagai *Tolerable (4)* karena dapat dikendalikan dengan pendinginan dan monitoring suhu yang tepat.
2. ***Short circuit***: Merupakan salah satu kegagalan paling kritis pada sistem penyimpanan energi. Potensi terjadinya tinggi akibat hubungan arus pendek internal baterai atau kegagalan komponen inverter. Risiko dinilai *Tolerable (4)* namun membutuhkan sistem proteksi arus lebih.
3. ***Overcurren*t**: Terjadi ketika aliran arus melebihi kapasitas desain. Meskipun berdampak pada keandalan sistem, konsekuensinya dianggap ringan dan dapat dikendalikan dengan sistem pemutus otomatis. Risiko ini dinilai *Negligible (2)*.
4. **Gas leak**: Kemungkinan kebocoran gas dari sel baterai lithium, terutama pada kondisi overcharging atau suhu tinggi. Risiko ini dinilai *Tolerable (3)* dengan catatan harus ada sistem ventilasi dan deteksi gas yang memadai.

Setiap mode kegagalan telah dipetakan berdasarkan tingkat keparahan (*severity*), kemungkinan kejadian (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*), sehingga dapat disusun prioritas mitigasi secara sistematis.

Hasil Simulasi FDS (Fire Dynamic Simulator)

Untuk mengevaluasi potensi dampak termal dan dinamika penyebaran api akibat kegagalan

baterai, dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak Fire Dynamic Simulator (FDS). Dua skenario utama dianalisis:

1. Skenario 1 (tanpa sistem proteksi): Dalam kondisi ini, tidak ada perlindungan termal maupun sistem pemadam otomatis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa suhu dalam ruang baterai dapat mencapai 1072 °C, yang menunjukkan bahwa kebakaran dapat berkembang sangat cepat dan berpotensi menjalar ke ruang sekitarnya. Kondisi ini dikategorikan sebagai *unacceptable risk* karena berbahaya bagi kapal secara keseluruhan.
2. Skenario 4 (dengan insulasi termal A60 + sistem pemadam CO_2 otomatis): Hasil simulasi menunjukkan suhu dapat dikendalikan dalam rentang aman antara 25–130 °C. Api padam sepenuhnya dalam waktu 178 detik setelah aktivasi sistem CO_2. Risiko kebakaran dalam kondisi ini dapat ditekan hingga level *Negligible*, dengan efisiensi pendinginan yang optimal dan waktu tanggap yang cepat

Simulasi ini membuktikan bahwa penambahan sistem proteksi aktif dan pasif sangat berpengaruh dalam pengendalian risiko kebakaran akibat baterai lithium di kapal.

Pembahasan

Dari hasil FMEA dan simulasi FDS, dapat disimpulkan bahwa penempatan baterai lithium di ruang eks cat memiliki potensi risiko tinggi jika tidak disertai dengan langkah mitigasi yang memadai. Ruang tersebut sebelumnya dirancang sebagai tempat penyimpanan bahan mudah terbakar, sehingga terdapat sisa atmosfer berisiko (*explosive atmosphere*) yang dapat memperparah dampak insiden.

Namun, dengan penerapan sejumlah langkah mitigasi teknis, risiko tersebut dapat dikendalikan secara signifikan. Langkah-langkah mitigasi yang direkomendasikan meliputi:

1. Instalasi sistem pemadam otomatis berbasis CO_2, yang bekerja cepat tanpa meninggalkan residu dan efektif dalam ruang tertutup.
2. Penambahan insulasi termal kelas A60 pada seluruh dinding dan langit-langit ruangan untuk menahan propagasi panas.
3. Sistem ventilasi aktif, untuk mempertahankan sirkulasi udara dan mencegah akumulasi panas serta gas.

Pendekatan ini menunjukkan bahwa dengan rekayasa proteksi yang tepat, sistem penyimpanan energi berbasis baterai dapat diintegrasikan secara aman ke dalam kapal, tanpa mengorbankan keselamatan operasional

KESIMPULAN

Studi ini membuktikan bahwa penerapan PLTS di kapal tongkang minyak (*oil barge*) merupakan langkah strategis dalam mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan, sejalan dengan tren industri maritim global (Pijoh et al., 2024). Namun, terdapat tantangan keselamatan signifikan terkait penggunaan baterai lithium sebagai penyimpanan energi.

Melalui pendekatan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan simulasi numerik menggunakan FDS, potensi risiko kebakaran akibat mode kegagalan baterai dapat dianalisis secara kuantitatif (Dina., 2024). Hasilnya menunjukkan bahwa risiko dapat ditekan dari kategori tolerable menjadi negligible dengan penggunaan insulasi termal, sistem ventilasi, dan pemadam CO_2 otomatis.

Dengan demikian, integrasi sistem PLTS berbasis baterai lithium di kapal dapat dilakukan secara aman apabila desain dan implementasinya memperhatikan prinsip rekayasa keselamatan dan pengendalian risiko. Temuan ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan kebijakan

dan pedoman teknis sistem energi terbarukan di industri pelayaran.

DAFTAR REFERENSI

Akbar, M. A., Tarigan, A. D., & Lesmana, D. (2024). Analisis Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik Hybride (Plts Dan Diesel) Pada Kapal Tanker. *Power Elektronik : Jurnal Orang Elektro*, *13*(1), 58–63. https://doi.org/10.30591/polektro.v13i1.6550

Ardian Burhandono, & Sinaga, N. (2022). Menjaga Keandalan Sistem PLTS dengan Metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA). *Jurnal Teknik Industri*, *12*(1), 30–39. https://doi.org/10.25105/jti.v12i1.13958

Dina, F. P. (2024). *Kajian Risiko Kegagalan pada Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun dan Limbah Padat Industri Gula PG Trangkil PT Kebon Agung dengan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*.

Ardila, M., Raspiyahni., Cahyani, R., Hasibuan, A.,(2020). Analisis Penerapan Sistem Proteksi Kebakaran Aktif Dalam Upaya Pencegahan dan Penanggulangan Bahaya Kebakaran Di PTPN IV Unit PKS Pabatu, Serdang Bedagai. *Journal of Healthcare Technology and Medicine*, *6*(2), 1020. https://doi.org/10.33143/jhtm.v6i2.1088

Daryanto. (2024). Application of the *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) Method in the Shipping Industry in Identifying Potential Failure of Main Engine Components (Case Study on the Xyz Ship). ZONA LAUT. 5(3), 256–265.

Mahmud, M. F., Ismayana, A., & Yani, M. (2022). Life cycle assessment proses pengadaan bahan baku batubara pembangkit listrik tenaga uap Tidore. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, *18*(1), 49–58. https://doi.org/10.30556/jtmb.vol18.no1.2022.1243

Manea, F., Ghicioi, E., Suvar, M. C., Prodan, M., Vlasin, N. I., Suvar, N. S., & Vlase, T. (2022). *FDS Results for Selecting the Right Scenario in the Case of a Building Fire: A Case Study. Fire 2022, 5, 198*.

Momtaz, H. R., & Nematollahi, M. R. Simulation and analysis of fire accident in Isfahan nuclear fuel production complex and standardization of fire extinguishing system according to NFPA global standard using CFAST code.

Nevada, F.S., Utomo, E.B., Darojah, Z., Kusumawati.E., (2021). Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika. *SNESTIK: Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi Dan Teknik Informatika*, 219–224.

Pijoh, F., Brahmana Duta P. K, & Purba Parulian Lasman. (2024). Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Energi RamahLingkungan yang Berkelanjutan. *Industrial & System Engineering Journals*, *2*(2), 201–207.

Priyanta, D., & Zaman, M. B. (2024, February). The application of OREDA (offshore reliability data) in developing valve criticality analysis criteria. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1298, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.

Ramadhani, A., Baharudin, L., Jumaedi, S., & Katili, L. (2023). Analisa Status Tingkat Kecelakaan Kapal Penangkap Ikan dan Solusi Pencegahan Kecelakaan Kapal di PPP. Sungai Rengas Kubu Raya Kalimantan Barat. *Manfish Journal*, *4*(2), 87–95. https://doi.org/10.31573/manfish.v4i2.618

Zullah, A., (2023). *Tesis implementasi floating plts mini pada kapal pandu sebagai energi alternatif terbarukan*.