

KAJIAN KESELAMATAN PENGGUNAAN BATERAI SEBAGAI SISTEM BANTU DI KAPAL MENGGUNAKAN METODE FMEA

Fatmala Sumardianti

Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Program Studi Teknik Kelistrikan Kapal

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Email: fatmala111299@gmail.com

Mohammad Abu Jamiin

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Email: jammy@ppns.ac.id

Angjuang Adi Panji Pratama

Biro Klasifikasi Indonesia

Email: angjuang@bki.co.id

ABSTRAK

Penggunaan baterai dengan berbagai sumber energi terbarukan mulai banyak diminati dan digalakkan oleh banyak pemilik kapal. Baterai dengan jenis lead-acid sebagai sumber listrik pada kapal saat ini sudah mulai banyak digunakan. Namun, baterai tersebut dalam penggunaannya dapat menimbulkan bahaya salah satunya kebakaran. Pada penelitian ini dilakukan simulasi, pengujian dan evaluasi data untuk mengkaji keselamatan penggunaan baterai lead acid pada kapal penumpang GT<500 yang bertenaga baterai. Penggunaan Metode FMEA dihasilkan penggunaan baterai lead acid dapat menimbulkan bahaya yang ditimbulkan dari beberapa kegagalan, namun kegagalan yang menjadi prioritas berdasarkan nilai RPN tertinggi yakni short circuit berdasarkan bahaya yang ditimbulkan. Selain itu kinerja baterai selama digunakan menunjukkan bahwa jika baterai lead acid yang digunakan sesuai dengan beban yang diperhitungkan maka tegangan akan menurun namun masih di angka normal yakni hanya maksimal 12% dibawah tegangan nominal.

Kata kunci: baterai, FMEA, kapal, lead-acid, listrik

ABSTRACT

The use of batteries with various renewable energy sources is starting to be in great demand and encouraged by many ship owners. Lead-acid batteries as a power source on ships are now widely used. However, the battery in use can pose a hazard, one of which is fire. In this study, simulation, testing and data evaluation were carried out to assess the safety of using lead acid batteries on passenger ships GT<500, battery powered. The use of the FMEA Method resulted that the use of lead acid batteries can pose a hazard arising from several failures. But the priority of failure is a short circuit based on the highest RPN value, because of the danger posed. In addition, the performance of the lead acid battery during use shows that if the battery is used according to the calculated load then the voltage will decrease but still in normal numbers, which is only a maximum of 12% below the nominal voltage.

Keywords: battery, FMEA, ship, lead-acid, electricity

1. PENDAHULUAN

Secara umum, kapal digerakkan oleh mesin induk yang menggunakan bahan bakar cair (fosil) sebagai sumber energi penggerak. Meskipun demikian, perkembangan terkini mengenai regulasi polusi maritim

(MARPOL) yang semakin ketat dan menipisnya cadangan energi fosil serta trend yang menunjukkan harga bahan-bakar yang terus meningkat. Maka menyebabkan banyak pemilik kapal mulai beralih menggunakan alternatif lain seperti sumber energi yang dapat diperbarui. Hasil dari sumber energi yang dapat diperbarui tersebut disimpan didalam baterai agar dapat didistribusikan sebagai sistem bantu. Baterai jenis lead acid menjadi pilihan untuk digunakan dengan berbagai keuntungan yang ditawarkan salah satunya harga yang lebih terjangkau dari beberapa jenis lainnya. Dikarenakan memerlukan lebih sedikit cell untuk mencapai tegangan atau voltage yang diperlukan. Selain itu lead acid baterai juga memiliki arus stabil dalam jangka waktu yang lama serta beroperasi dengan rentang suhu yang cukup baik yakni 10°C hingga 30°C.[6]

Namun kenaikan suhu baterai yang diakibatkan karena tingginya suhu lingkungan (Ambient Temperature), atau karena arus yang diakibatkan dari proses charge dan discharge dapat menimbulkan bahaya. Hubungan pendek juga akan menyebabkan kerusakan baterai, parahnya dapat menimbulkan kebakaran. Sumber percikan api bisa dari baterai itu sendiri, dapat pula dari keteledoran operator penggunaannya. Baterai juga dapat menimbulkan panas berlebih yang berasal dari arus pembuangan berlebih. Dalam penggunaan baterai diperlukan penentuan baterai yang tepat sesuai yang dibutuhkan. Untuk menentukan kapasitas baterai maka dapat digunakan rumus berikut [5].

$$C = \sum \left(\frac{W}{V} \right) X H = \frac{WH}{V} \dots\dots\dots(1)$$

- C = Kapasitas Baterai (Ah)
- W = Beban Sebenarnya (Watt)
- V = Tegangan (Volt)
- H = Waktu operasi

Jumlah baterai yang digunakan juga perlu diperhatikan, mengingat di pasaran jenis varian baterai berdasarkan kapasitasnya tidaklah banyak ragamnya. Selain itu perlu memperhatikan DOD baterai. Depth of discharge (DOD) baterai yang menunjukkan persentase baterai yang telah dikosongkan relatif terhadap keseluruhan kapasitas baterai. Baterai lead acid sendiri dengan brand setiap pabriknya merekomendasikan agar nilai DOD tidak melebihi 80% dengan alasan agar usia baterai tidak cepat menyusut performanya dan tidak merusak partikel-partikel yang ada pada baterai tersebut.

$$A = \frac{\text{Kapasitas Baterai yang dibutuhkan}}{\text{Kapasitas Baterai}} \dots\dots\dots(2)$$

Selain itu terdapat beberapa parameter yang wajib diperhatikan karena berhubungan dengan kondisi baterai itu sendiri. SOC (State of Charge) Baterai adalah kondisi kapasitas baterai, turun nilai SOC maka semakin turun nilai tegangan baterai tersebut. Lalu SOH (State of Health) Baterai adalah Nilai yang menunjukkan penurunan kinerja karena penuaan pada baterai. Setelah mengetahui kondisi baterai itu sendiri, penggunaan baterai sebagai sumber listrik di kapal memerlukan tempat penyimpanan yang sesuai agar tidak menimbulkan bahaya serta baterai dapat bekerja dengan baik sesuai yang diharapkan. Menurut aturan BKI tahun 2015 (Rules for Inland Waterway Vessels-Electrical Installation), Tempat penyimpanan harus dapat diakses untuk penggantian baterai, inspeksi, pengujian, pengisian ulang, dan pembersihan. Tempat penyimpanan baterai dapat ditentukan dengan rumus berikut.[2]

$$V_{total} = \text{Volume udara bebas} + \text{Volume keseluruhan baterai} \\ = (2,5 \times Q = 2,5 \times (f \cdot 0,25 \cdot I \cdot n)) + \text{Volume keseluruhan baterai} \dots\dots\dots(2)$$

$$V = \text{Volume udara bebas (m}^3\text{)} \\ Q = \text{kuantiti udara (m}^3\text{/h)} \\ = 0,25 \cdot f \cdot I \cdot n \dots\dots\dots(3)$$

- n = jumlah baterai -sel dalam koneksi seri
- f = 0,03 untuk baterai timbal dengan elektrolit padat
 0,11 untuk baterai dengan cairan elektrolit

Semua instalasi baterai harus dibangun dengan berventilasi sedemikian rupa didalam ruang baterai untuk mencegah akumulasi campuran gas yang mudah terbakar karena ketika baterai sedang di charge gas - gas yang timbul adalah gas hidrogen dan oksigen. Serta penempatan baterai itu sendiri tidak boleh menghalangi ventilasi diruangannya. Berikut adalah rumus penentuan ukuran ventilasi minimal ruang penyimpanan baterai [2].

$$A = 5,6 \cdot Q \dots\dots\dots (3)$$

A = Luas penampang ventilasi (cm²)

Dalam mencegah timbulnya bahaya selama penggunaannya, baterai harus dirancang sedemikian rupa. Maka selama bekerja variasi tegangan dan suhu yang terjadi dalam operasi normal. Baterai dalam penggunaannya tanpa mengisi ulang harus tetap menjaga tegangan baterai selama periode pengosongan dalam 12% di atas atau di bawah tegangan nominalnya. Untuk setiap kenaikan suhu 10°C dari kondisi normal, lifetime baterai akan berkurang sebesar 50%. Diperlukan adanya penilaian resiko untuk mengetahui tingkat risiko yang dapat muncul untuk sistem baterai. Metode FMEA dinilai paling cocok dengan penelitian ini dikarenakan FMEA dapat menentukan presentase risiko tertinggi hingga terendah untuk memberikan prioritas risiko serta hasil FMEA berupa rekomendasi untuk meningkatkan kehandalan tingkat keselamatan peralatan. Metode FMEA yakni menggabungkan pengetahuan dan pengalaman manusia. [7]

Berikut ini adalah Langkah – Langkah dalam menyelesaikan penilaian risiko metode FMEA:

- a. Menentukan Komponen atau proses yang akan dianalisa
- b. Failure Analysis dengan tujuan dari analisis proses kegagalan adalah untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan, mode dan efek dan menunjukkan hubungan untuk memungkinkan penilaian risiko
- c. Menetapkan Severity Rating (S)
 Efek kegagalan yang sudah ditentukan maka selanjutnya ditetapkan berada pada tingkatan seberapa.

Tingkat keparahan atau severity ditetapkan berjenjang dimulai dari tingkat 1 sampai 10. Seperti yang ditunjukkan pada tabel 1 [1].

Tabel 1. Tingkat Severity

Kriteria Evaluasi Umum Tingkat Keparahannya (Severity)		
Efek Kegagalan Potensial dinilai sesuai dengan kriteria dibawah ini		
S	Efek	Kriteria Keparahannya (Severity)
10	Sangat Tinggi	Mempengaruhi keselamatan pengoperasian keseluruhan sistem, kesehatan operator atau pengguna
9		Mempengaruhi keselamatan pengoperasian sebagian sistem, beberapa kesehatan operator atau beberapa pengguna
8	Tinggi	Hilangnya fungsi sistem utama yang diperlukan untuk digunakan selama masa pakai yang diharapkan
7		Penurunan fungsi sistem utama yang diperlukan untuk digunakan selama masa pakai yang diharapkan
6	Sedang	Hilangnya fungsi sekunder sistem
5		Penurunan fungsi sekunder sistem
4		Penampilan, pemindaian, getaran, kekerasan, atau sentuhan yang sangat tidak menyenangkan
3	Rendah	Penampilan, pemindaian, getaran, kekerasan, atau sentuhan yang tidak pantas
2		Penampilan, pemindaian, getaran, kekerasan, atau sentuhan yang sedikit tidak menyenangkan
1	Sangat Rendah	Tidak ada efek yang terlihat

d. Menetapkan Occurance

Penyebab – penyebab kejadian yang sudah ditetapkan maka selanjutnya dianalisa dengan data OREDA pada Gambar 1 untuk dihitung dalam menentukan nilai probability.[8]

Taxonomy no 2.3		Item Electric Equipment Battery and UPS									
Population 6	Installations 4	Aggregated time in service (10 ⁶ hours)					No of demands				
		Calendar time * 0.2104			Operational time † 0.2102		Active rep. hrs		Manhours		
Failure mode	No of failures	Failure rate (per 10 ⁶ hours)					Active rep. hrs		Manhours		
		Lower	Mean	Upper	SD	n/τ	Mean	Max	Mean	Max	
Critical	2*	0.84	8.95	24.50	7.91	9.51	42	72*	42	72*	
	2†	0.84	8.95	24.52	7.92	9.51					
Fail to function on demand	2*	0.84	8.95	24.50	7.91	9.51	42	72*	42	72*	
	2†	0.84	8.95	24.52	7.92	9.51					
Degraded	12*	31.89	56.37	86.50	16.78	57.04	25	48*	25	48*	
	12†	31.91	56.41	86.55	16.79	57.08					
Faulty output voltage	5*	1.80	22.67	63.96	20.93	23.77	12	12*	12	12*	
	5†	1.80	22.68	64.00	20.94	23.78					
Minor in-service problems	1*	3E-3	4.36	18.51	7.13	4.75	24	24*	24	24*	
	1†	3E-3	4.36	18.52	7.13	4.76					
Other	6*	12.43	28.52	49.98	11.64	28.52	28	48*	28	48*	
	6†	12.44	28.54	50.01	11.65	28.54					

Gambar 1. Reability Data Table

Dari data diatas dapat ditentukan nilai Probability setiap Failure Cause dengan rumus berikut:
 $P = 1 - e^{(-\Lambda T)}$ (4)

- P = Failure Probability (Probabilitas Kegagalan)
- Λ =Failure Rate (Tingkat Kegagalan)
- T =Exposure Interval (Waktu)

Kemudian tingkatan probabilitas dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2 berikut ini [9]

Tabel 2. Tingkat Probability

No.	Probability	Deskripsi
1	$P < 10^{-5}$	Sangat kurang/ hampir tidak pernah terjadi
2	$P = 10^{-5}$	Terpencil (<i>remote</i>)
3	$P = 10^{-5}$	Sangat sedikit / pernah terjadi namun sangat sedikit
4	4×10^{-4}	Sedikit
5	2×10^{-3}	Sesekali / Jarang
6	1×10^{-2}	Sedang
7	4×10^{-2}	Sering terjadi
8	0,2	Tinggi
9	0,33	Sangat Tinggi
10	$\geq 0,2$	Sangat Sering Terjadi

e. Menetapkan detection rating (D)

Mengidentifikasi current control atau deteksi terhadap kegagalan – kegagalan yang terjadi. Lalu diberi nilai tingkatan berdasarkan Tabel 3 tingkat detection dibawah ini. [1]

Tabel 3. Tingkat Detection Mode
 Pemantauan dan Respon Sistem (D)

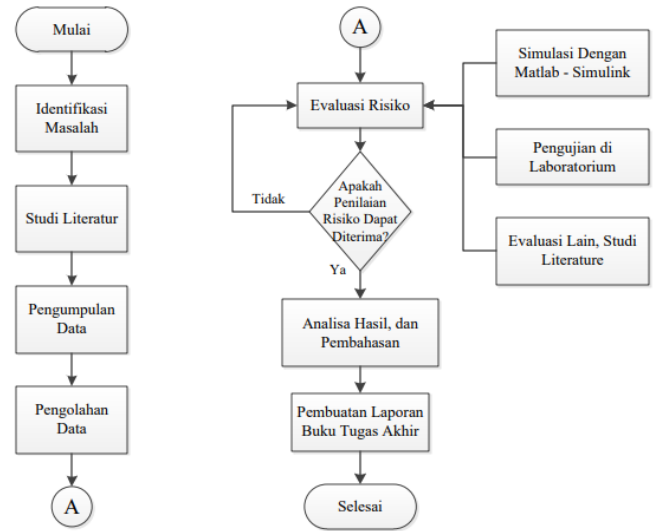
D	Efektifitas Kontrol Pendeteksi	Kriteria Pendeteksi	Respon Sistem
10	Tidak Efektif	Kegagalan tidak dapat dideteksi sama sekali atau tidak selama interval waktu penanganan kesalahan oleh sistem, operator atau teknisi servis	Tidak ada tanggapan selama intervak waktu penanganan kesalahan
9	Sangat Rendah	Kegagalan hampir tidak pernah dapat dideteksi dalam kondisi operasi yang relevan. Kontrol pemantauan dengan efektivitas rendah, varians tinggi atau ketidakpastian tinggi. Cakupan diagnose minimal	Reaksi terharap kegagalan oleh sistem mungkin tidak terjadi selama interval penanganan kesalahan
8	Rendah	Kegagalan dapat dideteksi dalam kondisi operasi yang sangat relevan. Kontrol pemantauan dengan efektivitas rendah, varians tinggi atau ketidakpastian tinggi.	Reaksi terhadap kegagalan oleh sistem atau operator mungkin tidak selalu terjadi selama interval waktu penanganan kesalahan
7	Cukup Rendah	Probabilitas rendah untuk mendeteksi kesalahan selama interval waktu penanganan kesalahan. Kontrol pemantauan dengan efektivitas rendah, varians tinggi atau ketidakpastian tinggi.	Probabilitas rendah untuk bereaksi terhadap kegagalan yang terdeteksi selama interval waktu penanganan kesalahan oleh sistem atau driver
6		Kegagalan akan secara otomatis dideteksi oleh sistem hanya selama power up, dengan variasi menengah waktu deteksi	Sistem otomatis akan dapat bereaksi terhadap kegagalan yang terdeteksi selama interval waktu penanganan kesalahan dalam banyak kondisi pengopersian
5	Sedang	Kegagalan akan secara otomatis dideteksi oleh sistem selama interval waktu penanganan kesalahan atau terdeteksi oleh operator dalam banyak kondisi pengoperasian	Sistem otomatis akan dapat bereaksi terhadap kegagalan yang terdeteksi selama interval waktu penanganan kesalahan dalam banyak kondisi pengopersian
4	Cukup Tinggi	Kegagalan akan secara otomatis dideteksi oleh sistem selama interval waktu penanganan kesalahan atau terdeteksi oleh operator dalam sebagian besar kondisi pengoperasian	Sistem otomatis akan dapat bereaksi terhadap kegagalan yang terdeteksi selama interval waktu penanganan kesalahan dalam sebagian besar kondisi pengopersian
3	Tinggi	Kegagalan akan secara otomatis dideteksi oleh sistem selama interval waktu penanganan kesalahan atau terdeteksi oleh operator dalam sebagian besar kondisi pengoperasian dengan probabilitas tinggi	Sistem otomatis akan dapat bereaksi terhadap kegagalan yang terdeteksi selama interval waktu penanganan kesalahan dalam sebagian besar kondisi pengopersian dengan probabilitas tinggi
2	Sangat Tinggi	Kegagalan akan secara otomatis dideteksi oleh sistem selama interval waktu penanganan kesalahan atau terdeteksi oleh operator dalam hampir keseluruhan kondisi pengoperasian dengan probabilitas tinggi	Sistem otomatis akan dapat bereaksi terhadap kegagalan yang terdeteksi selama interval waktu penanganan kesalahan dalam hampir keseluruhan kondisi pengopersian dengan probabilitas tinggi

1	Sangat Rendah	Kegagalan akan selalu otomatis dideteksi oleh sistem selama interval waktu penanganan kesalahan atau terdeteksi oleh operator dalam keseluruhan kondisi pengoperasian	Sistem akan selalu secara otomatis bereaksi terhadap kegagalan yang terdeteksi
----------	----------------------	---	--

- f. Menentukan nilai Risk Priority Number (RPN)
 Nilai RPN didapatkan dari rumus berikut:
 $RPN = \text{severity rating} \times \text{occurance rating} \times \text{detection rating}$
 $= S \times O \times D \dots\dots\dots(5)$

2. METODOLOGI PENELITIAN

Metode pada penelitian ini tergambar pada flowchart dibawah ini. Pada penelitian ini dilakukan evaluasi risiko dengan 3 tahap yang berbeda. Tahap tersebut yakni simulasi, pengujian, dan evaluasi tambahan/ lainnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Flowchart Penelitian

Simulasi dilakukan untuk melihat performance baterai lead acid jika dibebankan dengan beban kapal penumpang $GT \leq 500$ bertenaga baterai. Dalam simulasi, beban listrik yang terhubung ke baterai yakni beban selama kapal berlayar dengan total daya 6289,5 Wh seperti yang ditunjukkan Tabel 4. Simulasi menggunakan Simulink Matlab.

Tabel 4. Beban Daya Kapal Penumpang Total Saat Berlayar

No	Keterangan	Daya (Wh)
	Beban Daya	
a.	Beban Kontinyu	6048
b.	Beban Intermitten	241,5
Beban Daya Total		6289,5

Selanjutnya dilakukan pengujian baterai lead acid di laboratorium. Pengujian dilakukan untuk menguji secara langsung di laboratorium performance baterai lead-acid jika diberi beberapa beban listrik kapal sebagai

perwakilan pengujian. Pengujian dilakukan dengan cara Baterai VLRA sebagai sumber listrik lalu sebagian diubah arusnya menjadi Arus AC dengan Inverter, lalu arus AC tersebut digunakan sebagai sumber dari beban yang tersedia di Lab yakni Lampu, Hair Drayer. Sedangkan sebagian lagi dari baterai langsung diberi beban Lampu DC. Setelah itu dilakukan monitoring tegangan dan temperatur saat terbebani.

Evaluasi tambahan berfokus pada perhitungan diluar dari kebutuhan simulasi dan pengujian seperti perhitungan penentuan ruangan penyimpanan baterai yang ideal. Selain itu juga untuk mengevaluasi berbagai aturan keselamatan pada kapal yang menggunakan baterai sebagai sumber listrik dengan melihat pada aturan BKI dan aturan lainnya. Aturan Aturan ini juga menjadi pertimbangan dalam penilaian resiko. Metode FMEA akan menganalisa kegagalan pada baterai. Setelah itu maka dapat dilakukan analisa hasil dan pembahasan untuk mengetahui pencegahan kegagalan. Selanjutnya juga dilakukan Analisa untuk ditarik kesimpulan mengenai faktor keselamatan pemakaian baterai sebagai sistem bantu di kapal khususnya kapal penumpang.

Heading diberi nomor menggunakan angka arab (1,2,3, dst). Jika *heading* anda melebihi satu, gunakan level kedua *heading* seperti di bawah ini. Heading ditulis dalam huruf kapital semua. Penulisan antar bab, sub bab dan isi diberi jarak 1 spasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Perhitungan Baterai

- Untuk Kapal Penumpang

Daya Beban Kapal Selama Berlayar (8Jam/hari) = 6168,7 Wh

Tegangan Baterai = 12 V

Maka Kapasitas Baterai yang dibutuhkan (C)

$$C = \sum \left(\frac{W}{V} \right) X H = \frac{WH}{V} = \frac{6289,5 \text{ Watt hour}}{12 \text{ Volt}} = 524,125 \text{ Amperehour}$$

Baterai lead acid dengan brand setiap pabriknya merekomendasikan nilai DOD tidak melebihi 80% dengan alasan agar usia baterai tidak cepat menyusut performanya dan agar tidak merusak partikel-partikel yang ada pada baterai tersebut. Baterai yang dipilih yakni Baterai Lead Acid VRLA dengan Kapasitas 100AH.

Maka Jumlah Baterai yang digunakan

$$A = \frac{\text{Kapasitas Baterai yang dibutuhkan}}{\text{Kapasitas Baterai}} = \frac{524,125 \text{ Ah}}{80 \text{ Ah}} = 6,5 \text{ buah} = 7 \text{ Buah}$$

Ke tujuh baterai tersebut yang masing masing berkapasitas 100AH akan diparalel. Maka Total Kapasitas baterai 700 Ah. Ukuran Baterai berasal dari datasheet Baterai VRLA Gel 12-100 12 V 100 AH dengan merk VOZ yang Dimensinya ditunjukkan pada Tabel 5 dibawah ini.

Tabel 5. Dimensi Baterai

Dimensi	Panjang	330 ± 3 mm (12,99 inci)
	Lebar	173 ± 2 mm (6,81 inci)
	Tinggi Wadah	214 ± 2 mm (8,43 inci)
	Total Tinggi (dengan Terminal)	243 ± 2 mm (9,57 inci)

Dapat ditentukan Volume 1 Baterai yakni sebesar $0,0122 \text{ m}^3$ lalu untuk 7 baterai menjadi $0,0855 \text{ m}^3$. Selanjutnya merupakan penentuan volume udara bebas :

$$V = 2,5 \times Q = 2,5 \times (f \cdot 0,25 \cdot I \cdot n) = 2,5 \times (0,03 \times 0,25 \times (8 \cdot \frac{k}{100}) \times n) \\ = 2,5 \times (0,03 \times 0,25 \times (8 \cdot \frac{100}{100}) \times 6) = 0,9 \text{ m}^3$$

Dikarenakan dibutuhkan 7 baterai maka Volume udara bebas menjadi 7 kalinya dengan $V = 6,7 \text{ m}^3$

Maka Volume minimal ruangan yakni :

$$V_{\text{total}} = \text{Volume udara bebas} + \text{Volume 7 Baterai} = 6 + 0,855 = 6,855 \text{ m}^3$$

Untuk Luas Ventilasi Ruang Tempat Penyimpanan Baterai

$$A = 5,6 \times Q = 5,6 \times (f \cdot 0,25 \cdot I \cdot n) = 5,6 \times (0,03 \times 0,25 \times (8 \cdot \frac{700}{100}) \times 6) = 5,6 \times 2,52 \\ A = 14,112 \text{ cm}^2$$

Perhitungan diatas merupakan sebagai ukuran minimal yang bisa digunakan.

b. Ruang Penyimpanan Baterai

Hal – Hal yang perlu diperhatikan pada Ruangan Penyimpanan Baterai yang didasarkan pula dari aturan pada BKI dan SOLAS [7] [8] yaitu :

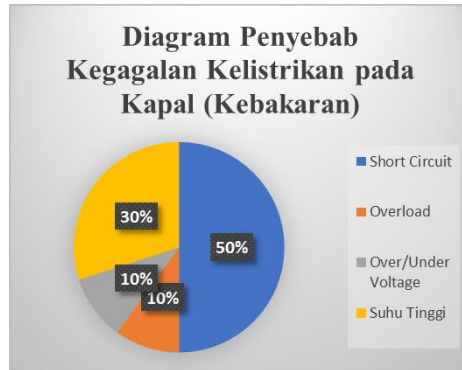
- Ruangan penyimpanan harus dapat diakses untuk penggantian baterai, inspeksi, pengujian, pengisian ulang, dan pembersihan
- Dikarenakan baterai dilarang dipasang di area akomodasi, di ruang kargo dan ruang kemudi maka direkomendasikan ruang penyimpanan / pemasangan baterai terletak di area deck yang langsung terbuka (main deck)
- Tempat penyimpanan baterai harus terhindar dari baterai terkenan temperature tinggi, semprotan atau efek lain yang dapat merusaknya maka perlu diberi pendingin ruangan seperti AC atau kipas serta dilakukan kontrol suhu ruangan secara berkala.
- Semua instalasi baterai harus dibangun dan berventilasi sedemikian rupa didalam ruang baterai untuk mencegah akumulasi campuran gas yang mudah terbakar karena ketika baterai sedang di *charge* gas - gas yang timbul adalah gas hidrogen dan oksigen.

c. Identifikasi Resiko

Sebelum mengidentifikasi penyebab kegagalan penggunaan baterai sebagai sistem bantu di kapal, perlu dilakukan analisa kasus kegagalan kelistrikan di kapal dengan melihat data kasus kegagalan dalam kurun waktu 10 tahun terakhir. Data berasal dari laporan final – pelayaran KNKT (Komisi Nasional Keselamatan Transportasi). Dari data kegagalan kelistrikan di kapal KNKT maka dapat dianalisa dan disimpulkan untuk penyebab kegagalan dalam penggunaan baterai sebagai sistem bantu di kapal yakni sebagai berikut:

1. Short Circuit
2. Overload
3. Over/Under Voltage
4. Suh Tinggi

Seperti yang tergambar pada Gambar 6 dibawah, dapat disimpulkan kegagalan kelistrikan yang menyebabkan kebakaran didominasi penyebabnya karena short circuit.



Gambar 6. Diagram Penyebab Kebakaran

d. Evaluasi Resiko

Tabel 6 dan Gambar 7 dibawah menjelaskan hasil pengujian baterai berdasarkan rangkaian baterai dan nilai beban. Dilakukan 4 kali Pengujian, dengan beban 27 Watt dan 202 Watt yang di supply dari 1 baterai 18 Ah serta dari 2 baterai 18 Ah yang di parallel. Di pengujian kali ini selain terdapat MCB pada beban sebagai pengaman, pada inverter terdapat pengaman beban tidak sesuai (inverter auto protection) agar tidak langsung mengenai baterai jika terdapat risiko kegagalan yakni salah satunya overload. Jika dilakukan perhitungan, 1 baterai tersebut hanya dapat menyuplai beban sebesar 172,8 Watt dan jika 2 Baterai diparalel hanya dapat menyuplai 345,5 Watt. Dari pengujian tersebut juga membuktikan bahwa jika baterai digunakan melebihi kapasitasnya maka tegangan baterai akan turus drastis, komponen lainnya seperti inverter dan beban yang disuplai bertemperatur lebih tinggi



Gambar 7. Pengujian Baterai

Tabel 6. Hasil Pengujian 1

Nilai Beban	Waktu (menit)	Paralel 2 Baterai		1 Baterai	
		(V)	Keterangan	(V)	Keterangan
27 Watt	1	12,55	Baterai dapat digunakan oleh beban hingga 30 menit , arus stabil yakni 0,03A pada arus AC(Beban	12,68	Baterai dapat digunakan oleh beban hingga 30 menit namun terus
	3	12,53		12,63	
	5	12,53		12,60	
	10	12,51		12,56	

	15	12,50	AC) namun terus terjadi penurunan tegangan pada baterai	12,54	terjadi penurunan tegangan
	30	12,46		12,49	
202 Watt	1	12,10	Baterai dapat digunakan oleh beban hingga 30 menit namun terus terjadi penurunan tegangan.	11,33	Baterai hanya dapat digunakan beban selama 3 menit , menimbulkan inverter dan beban bertemperatur tinggi. Pada inverter, indikator merah menyala yang menunjukkan beban berlebih (Overload & Undervoltage)
	3	12,06		10,60	
	5	12,03		-	
	10	11,99		-	
	15	11,92		-	
	30	11,66		-	

Pengujian juga dilakukan dengan kondisi cuaca lingkungan dengan temperature 33 °C pada jam 13.25 WIB. Pengaruh suhu lingkungan juga dapat dibuktikan hasilnya ditunjukkan di Tabel 7 bahwa mempengaruhi performance baterai itu sendiri seperti pada tegangan, SOC dan SOH Baterai.

Tabel 7. Hasil Pengujian 2

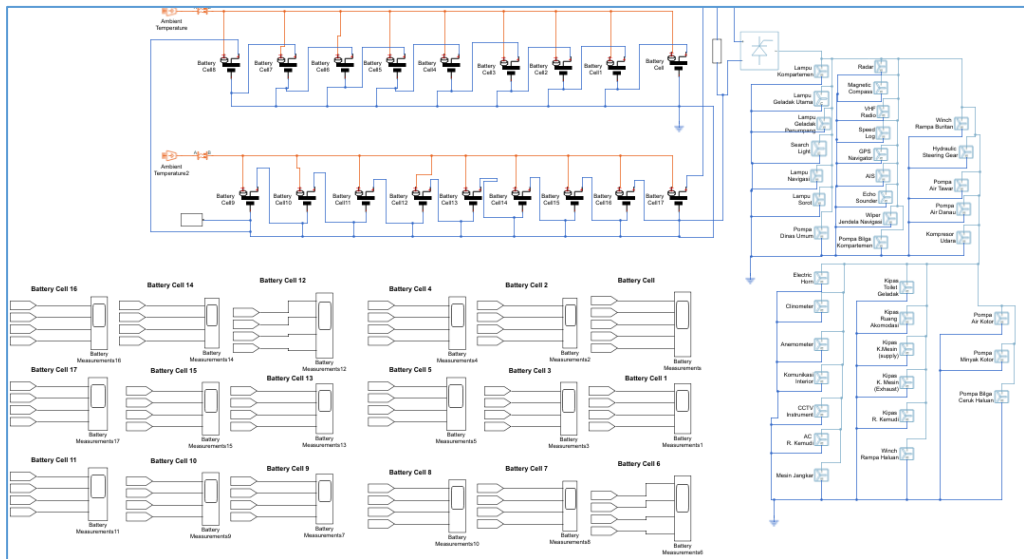
Nilai Beban	Waktu (menit)	Approx % SOC (State Of Charge)	1 Baterai		Keterangan
			(°C)	(V)	
27 Watt	1	69	39	12,60	Semakin tinggi temperatur lingkungan digunakannya baterai maka SOC baterai akan lebih cepat menurun, diikuti dengan SOH baterai ikut menurun
	3	67	43	12,57	
	5	63	45	12,52	
	10	26	45	11,45	
	15	18	41	11,31	
	30	13	40	11,07	

Selain pengujian, dilakukan simulasi pada Simulink matlab untuk mensimulasikan penggunaan baterai sebagai sumber listrik untuk beban kapal penumpang. Beban listrik pada saat kondisi kapal berlayar dengan beban kontinyu 6048 watt dan beban intermitten 241,45 Watt maka beban daya total 6289,5 Watt. Gambaran simulasi seperti Gambar 8 dibawah ini dan hasil nya ditunjukkan pada Tabel 8. Simulasi ini berfokus untuk melihat performance baterai saat digunakan serta perhitungan baterai yang dibutuhkan dapat digunakan di kapal (melalui simulasi matlab).

Tabel 8. Hasil Simulasi Beban Kapal Penumpang

Nilai Beban	Waktu	Paralel 7 Baterai	Keterangan
		(V)	
6289,5 Wh (Beban selama 8 Jam dengan Kapasitas	1 menit	13,077	Baterai dapat digunakan sesuai dengan yang dibutuhkan dengan kondisi tegangan yang semakin menurun tapi tetap pada tegangan aman. SOC baterai hingga 1 jam simulasi (seperti 8 jam pemakaian) menunjukkan di
	3 menit	13,076	
	5 menit	13,075	
	10 menit	13,074	

Baterai untuk beban tersebut)	15 menit	13,074	angka 47%. Kondisi SOC tersebut masih dikatakan aman karena batas nya hingga 20%
	30 menit	13,072	
	45 menit	13,070	
	60 menit	13,068	



Gambar 8. Simulasi Simulink Matlab Baterai

Berdasarkan hasil analisa pengujian, simulasi dan analisa data historical selama 10 tahun terakhir maka selanjutnya ini yang dijadikan dasar untuk mengidentifikasi bahaya atau resiko penggunaan baterai yang menjadi obyek penelitian ini dengan metode FMEA yang terdiri dari 3 parameter bahaya, penyebab dan mode deteksi ditunjukkan Tabel 9,10,dan 11 dibawah ini.

Tabel 9. Potential Impact

No	Risiko	Bahaya yang ditimbulkan (Potential Impact)
1	Short Circuit	Merusak Baterai
		Menimbulkan Panas berlebih pada komponen pendukung (Kabel, Inverter)
2	Overload	Menimbulkan baterai meledak / terjadi kebakaran disekitarnya atau bahkan seluruh kapal
		Pemanasan berlebihan sebagai akibat beban lebih, bila bertahan cukup lama, akan mengakibatkan kerusakan atau pemanasan yang berbahaya
3	Over / Under Voltage	Merusak baterai / SOH menurun
		Merusak komponen pendukung (inverter, kabel, beban dll)
4	Suhu Tinggi	Mengakibatkan panas berlebih pada komponen pendukung ataupun baterai
		Baterai akan tidak awet, SOH baterai menurun

Dapat menimbulkan kerusakan pada baterai dan komponen pendukung lainnya karena kapasitas menurun sedangkan terus dipakai beban banyak dengan suhu tinggi

Tabel 10. Potential Causes

No	Risiko	Penyebab Kegagalan
1	Short Circuit	Overload/ Beban Lebih
		Kegagalan Isolasi kabel Terhubungnya Kutub Positif – Negatif Baterai (dapat dikarenakan faktor benda lain)
2	Overload	Tidak ada pengaman/pemutus arus
		Beban tidak sesuai
		Kabel tidak sesuai kebutuhan instalasi
3	Over / Under Voltage	Overcharging
		Beban tidak sesuai spesifikasi baterai dan inverter
4	Suhu Tinggi	Cuaca Panas di sekeliling kapal
		Terkena udara panas buangan (ex:Blower,dll)

Dalam menentukan nilai setiap potential cause maka perlu perhitungan probability yang didasari dari data OREDA [6] seperti dibawah ini :

- Short Circuit
 - Kegagalan Isolasi Kabel $= 1 - e^{-(18,52 \times 10^{-6})(0,2102)} = 3,89 \times 10^{-6}$
 - Overload $= 1 - e^{-(50,01 \times 10^{-6})(0,2102)} = 1,051 \times 10^{-5}$
 - Terhubungnya 2 Kutub $= 1 - e^{-(50,01 \times 10^{-6})(0,2102)} = 1,051 \times 10^{-5}$
- Overload
 - Beban tidak sesuai $= 1 - e^{-(50,01 \times 10^{-6})(0,2102)} = 1,051 \times 10^{-5}$
 - Tidak ada pemutus arus $= 1 - e^{-(50,01 \times 10^{-6})(0,2102)} = 1,051 \times 10^{-5}$
 - Kabel tidak sesuai kebutuhan instalasi $= 1 - e^{-(50,01 \times 10^{-6})(0,2102)} = 1,051 \times 10^{-5}$
- Over/ Undervoltage
 - Beban tidak sesuai $= 1 - e^{-(50,01 \times 10^{-6})(0,2102)} = 1,051 \times 10^{-5}$
 - Overcharging $= 1 - e^{-(64,00 \times 10^{-6})(0,2102)} = 1,34 \times 10^{-5}$
- Suhu Tinggi
 - Cuaca Panas Sekeliling kapal $= 1 - e^{-(50,01 \times 10^{-6})(0,2102)} = 1,051 \times 10^{-5}$
 - Terkena Udara Panas buangan $= 1 - e^{-(50,01 \times 10^{-6})(0,2102)} = 1,051 \times 10^{-5}$

Tabel 11. Detection Mode

No	Risiko	Mode Deteksi
1	Short Circuit	Monitoring Arus keluaran
		Pemasangan Sekring Pemutus Arus Baterai
		Monitoring Suhu Baterai dan Komponen Pendukung
2	Overload	Pemasangan Sekring pemutus arus
		Monitoring SOC dan SOH baterai dan Tegangan Baterai
		Monitoring Arus Keluaran

3	Over / Under Voltage	Monitoring Tegangan dan Suhu Baterai Monitoring SOC dan SOH baterai
4	Suhu Tinggi	Monitoring Suhu Baterai dan Lingkungan Baterai Monitoring SOC dan SOH Baterai

Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai RPN yang didapat dengan mengalikan nilai severity, occurrence dan detection. Nilai RPN digunakan untuk mengetahui prioritas perbaikan dan perhatian lebih. Hasil FMEA ditunjukkan pada Tabel 12 dibawah ini [10]

Tabel 12. FMEA Total

Failure Type	S	O	D	RPN
Short Circuit	8	2	4	64
	6	1	3	18
	10	2	6	120
Overload	9	2	3	54
	8	2	6	96
	6	2	5	60
Over / Under Voltage	5	2	4	40
	5	2	8	80
Suhu Tinggi	7	2	3	42
	5	2	6	60

Sehingga berdasarkan nilai RPN tersebut jenis kegagalan pada baterai lead acid dapat lebih fokus pada pencegahan short circuit dan overload dengan cara :

- Memasang pemutus arus / sekring pada sistem baterai yang digunakan.
- Meletakkan baterai pada ruangan yang sesuai serta didalam ruangan hanya diperbolehkan terpasang lampu, sakelar, dan kipas motor yang terdapat perlindungan ledakan.
- Melakukan *monitoring* rutin kondisi baterai meliputi tegangan, arus yang keluar dari inverter, suhu, dan SOC serta SOH nya. dengan memasang monitoring otomatis dengan 5 parameter yakni suhu, tegangan, arus baterai, SOH dan SOC baterai. Dalam monitoring tersebut, juga dilengkapi Alarm jika 5 parameter itu diluar batas normal.
- Melakukan *monitoring* rutin juga pada komponen pendukung seperti kondisi kabel instalasi (pengecekan isolasi kabel), dan suhu inverter.
- Sebelum baterai digunakan, Beban yang akan dibebankan ke baterai harus disesuaikan dengan kapasitas baterai yang diperbolehkan dipakai (80% dari kapasitas baterai) serta juga memperhatikan waktu pemakaian baterai.
- Pemasangan Alarm Otomatis jika 5 Parameter diluar batas normal & jika muncul Percikan Api

Setelah tindakan mitigasi dilakukan maka akan ada perubahan pada nilai RPN yang dipengaruhi oleh tingkat bahaya yang ditimbulkan nilainya semakin menurun. Berikut hasil analisa severity sebagai berikut , Maka Tabel FMEA setelah dimitigasi ditunjukkan pada Tabel 13 dibawah ini :

Tabel 13 FMEA setelah mitigasi

Failure Type	S	O	D	RPN
Short Circuit	7	2	4	54
	5	1	3	15
	8	2	6	96
Overload	8	2	3	48
	7	2	6	84
	5	2	5	50

4. KESIMPULAN

Beberapa faktor yang dapat memicu kegagalan penggunaan baterai lead acid sebagai sumber listrik adalah short circuit, overload, over/under voltage, dan suhu tinggi. Perhitungan untuk memilih baterai yang tepat dan ruang penyimpanan baterai dengan ventilasi yang memadai juga perlu dilakukan agar penggunaan baterai tetap aman dan meminimalisir kegagalan – kegagalan terjadi. Berdasarkan nilai RPN yang paling tinggi pada FMEA yaitu 120, kegagalan yang menjadi prioritas utama dikarenakan tingkat bahaya yang ditimbulkan yakni short circuit. Tindakan mitigasi perlu dilakukan guna meminimalisir kegagalan tersebut yakni Melakukan monitoring rutin kondisi baterai, kondisi komponen pendukung seperti kabel dan inverter, serta memasang sekering pemutus arus otomatis dengan begitu maka nilai RPN akan turun. Namun perlu adanya pengujian secara langsung pada kapal saat baterai digunakan sebagai sumber listrik agar dapat mengetahui kondisi nya secara real.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian Kajian Keselamatan Penggunaan Baterai Sebagai Sistem Bantu Di Kapal Menggunakan Metode FMEA ini terlaksana berkat kerjasama PPNS dengan BKI di tahun 2022 ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] AIAG, A. I. A. G. and, & VDA, V. der A. (2019). *Failure Mode & Effects Analysis - FMEA Handbook*. Automotive Industry Action Group. <https://id.id1lib.org/book/11268434/1a3748>
- [2] Biro Klasifikasi Indonesia. (2015). *Rules for Inland Waterway Vessels-Electrical Installation*. Biro Klasifikasi Indonesia.
- [3] Biro Klasifikasi Indonesia. (2021). *Rules for Electrical Installations*. Biro Klasifikasi Indonesia.
- [4] IMO. (2009). *SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea. SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea, 1–910*. [http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/IMO-Conventions\(copies\)/SOLAS.pdf](http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/IMO-Conventions(copies)/SOLAS.pdf)
- [5] Jauhar. (2012). *Cara Menghitung Emergency Battery*. <https://joe-pencerahan.blogspot.com/2012/11/cara-menghitung-emergency-battery.html>
- [6] Jung, J., Zhang, L., & Zhang, J. (2016). *Lead-acid Battery technologies*. CRC Press.

- [7] Marimin, Djatna, T., Suharjito, Hidayat, S., Utama, D. N., Astuti, R., & Martini, S. (2013). *Teknik dan Analisis Pengambilan Keputusan Fuzzy Dalam Manajemen Rantai Pasok*. IPB Press.
- [8] SINTEF, & NTNU. (2015). *OREDA 6th Edition 2015-Vol.1 (6th Editio)*. OREDA Participants.
- [9] Sinha, Y., & Steel, J. A. (2015). A progressive study into offshore wind farm maintenance optimisation using risk based failure analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.087>
- [10] Sedex. (2020). *A guide to risk assessment in supply chains*. 127, 1–6. <https://www.sedex.com/wp-content/uploads/2020/03/Sedex-Risk-assessment-in-supply-chains.pdf>