

# ANALISIS RISIKO KERUSAKAN MOTOR INDUKSI 3 FASA AKIBAT KEGAGALAN ISOLASI DENGAN METODE FMEA DI PLTU TANJUNG JATI B

Gesing Jati Mahendra<sup>1</sup>, Umar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura 57102 Telp 0271 717417

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura 57102 Telp 0271 717417  
Email: d400210090@student.ums.ac.id

## Abstrak

*Motor induksi 3 fasa merupakan komponen kritis dalam operasional PLTU Tanjung Jati B. Kerusakan motor, yang seringkali disebabkan oleh kegagalan isolasi, dapat mengakibatkan downtime operasional dan kerugian finansial yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko kerusakan motor induksi 3 fasa akibat kegagalan isolasi pada Waste Water Transfer Pump dengan menggunakan metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Data primer diperoleh melalui pengukuran tahanan isolasi berdasarkan standar IEEE 43-2013, observasi lapangan, dan studi dokumentasi. Hasil penelitian mengidentifikasi enam mode kegagalan, dengan overheating akibat arus bocor sebagai risiko tertinggi (RPN 576), diikuti oleh degradasi isolasi akibat kelembapan tinggi (RPN 504). Analisis lebih lanjut mengungkap korelasi kuat antara degradasi isolasi dengan kondisi musim hujan. Berdasarkan temuan ini, penelitian merekomendasikan serangkaian tindakan perbaikan, yang meliputi pemasangan motor heater, peningkatan frekuensi pemantauan, dan upgrade spesifikasi motor ke kelas isolasi yang lebih tinggi. Implementasi rekomendasi ini diharapkan dapat meningkatkan keandalan motor, menurunkan risiko downtime, dan mengoptimalkan program pemeliharaan.*

**Kata kunci:** motor induksi 3 fasa, kegagalan isolasi, FMEA, analisis risiko, PLTU

## Pendahuluan

Motor induksi 3 fasa merupakan salah satu komponen listrik yang paling banyak digunakan di berbagai sektor industri, termasuk pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pada PLTU Tanjung Jati B, motor induksi 3 fasa memainkan peran vital sebagai penggerak utama dalam berbagai sistem kritis, seperti pompa sirkulasi, pompa air limbah (*Waste Water Transfer Pump*), kipas pendingin, dan konveyor batu bara (Sartika et al., 2023). Keandalan motor ini sangat menentukan kelangsungan operasi pembangkit dalam menghasilkan energi listrik secara kontinu dan stabil (Zahari, 2023). Oleh karena itu, memastikan kondisi dan performa motor selalu dalam keadaan optimal menjadi hal yang sangat krusial bagi keberlangsungan operasional PLTU.

Sebagai komponen yang beroperasi secara intensif, motor induksi rentan mengalami kerusakan akibat keausan dan penurunan performa seiring waktu. Studi menunjukkan bahwa salah satu penyebab paling umum kerusakan motor induksi adalah kegagalan sistem isolasi (Hendra prasetyawan, 2024). Kegagalan isolasi terjadi ketika mutu bahan isolasi pada kumparan motor menurun, yang dapat dipicu oleh berbagai faktor seperti penuaan (*aging*), kondisi lingkungan yang ekstrem, temperatur operasi tinggi, kelembapan udara, serta adanya tegangan lebih (*overvoltage*) (Wahyudi et al., 2019). Apabila tidak terdeteksi dan ditangani secara dini, kegagalan isolasi dapat menyebabkan korsleting, arus bocor, hingga kebakaran pada motor (Irawan et al., 2020).

Dampak dari kegagalan isolasi tidak hanya terbatas pada kerusakan komponen itu sendiri, tetapi juga mempengaruhi performa sistem secara keseluruhan. Beberapa dampak yang sering terjadi antara lain peningkatan temperatur pada belitan stator, penurunan torsi, efisiensi kerja yang menurun, serta getaran berlebih yang dapat merusak bearing dan komponen mekanis lainnya (Hakim, 2020). Jika dibiarkan, kondisi ini akan memperpendek umur pakai motor dan meningkatkan frekuensi *downtime*, yang pada akhirnya menimbulkan kerugian operasional dan biaya perbaikan yang signifikan. Di lingkungan PLTU seperti Tanjung Jati B, *downtime* akibat kerusakan motor dapat mengganggu pasokan listrik nasional dan menurunkan keandalan sistem pembangkit (Mochammad Arif Wicaksono et al., 2022).

Untuk mengantisipasi risiko tersebut, diperlukan langkah mitigasi yang sistematis dan terukur. Identifikasi dan analisis menyeluruh terhadap potensi kegagalan beserta dampaknya menjadi kunci dalam merancang strategi

pemeliharaan yang efektif. Salah satu metode yang terbukti handal dalam melakukan analisis risiko adalah Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Metode ini memungkinkan identifikasi berbagai mode kegagalan, analisis tingkat keparahan (*severity*), frekuensi kejadian (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*) dari setiap kegagalan (Nugroho, 2022). Dengan pendekatan ini, prioritas perbaikan dan tindakan pencegahan dapat ditetapkan secara objektif berdasarkan nilai Risk Priority Number (RPN), sehingga risiko kerusakan dapat diminimalisir (Sutopo & Grasella, 2023).

Penelitian ini berfokus pada analisis risiko kerusakan motor induksi 3 fasa akibat kegagalan isolasi di PLTU Tanjung Jati B, dengan studi kasus pada motor *Waste Water Transfer Pump*. Data primer diperoleh melalui pengukuran tahanan isolasi berdasarkan standar IEEE 43-2013, observasi lapangan, dan studi dokumentasi. Melalui pendekatan FMEA, diharapkan dapat diidentifikasi mode kegagalan yang paling kritis serta dirumuskan rekomendasi tindakan perbaikan dan pencegahan yang implementatif (Yaqin et al., 2020). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis dalam meningkatkan keandalan motor, mengurangi *downtime*, serta mengoptimalkan program pemeliharaan di PLTU Tanjung Jati B dan pembangkit listrik lainnya.

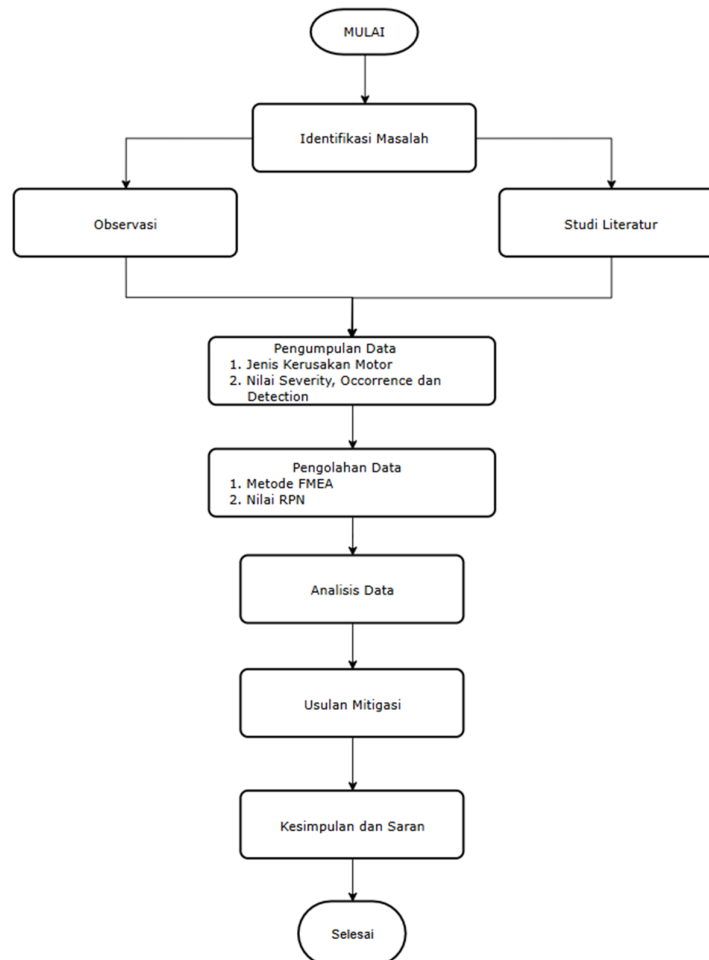
## Metode

### Objek dan Tempat Pelaksanaan

Penelitian dilakukan pada motor induksi 3 fasa Waste Water Transfer Pump di PLTU Tanjung Jati B, Jepara. Objek penelitian merupakan komponen yang cukup penting dalam sistem pengelolaan air limbah pembangkit.

### Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dengan identifikasi masalah melalui observasi lapangan, dilanjutkan dengan studi literatur, pengumpulan data primer dan sekunder, pengolahan data dengan metode FMEA, analisis data, usulan mitigasi, serta penyusunan kesimpulan dan saran.



Gambar 1. Flowchart tahapan penelitian

### Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui:

- Observasi langsung dan pengukuran tahanan isolasi menggunakan *megger* berdasarkan standar IEEE 43-2013.

Tabel 1. Level Tahanan Isolasi

Level Tahanan Isolasi	Keterangan Level
2 M $\Omega$ atau kurang	Buruk
2 – 5 M $\Omega$	Kritis
5 – 10 M $\Omega$	Tidak Normal
10 – 50 M $\Omega$	Normal
50 – 100 M $\Omega$	Bagus
100 M $\Omega$ atau lebih	Sangat Bagus

Sumber: (Guide, 2013)



Gambar 2. Proses Pengukuran Isolasi



Gambar 3. Nilai Megger saat Pengukuran

- Studi dokumentasi terhadap data historis pemeliharaan dan laporan kerusakan motor.
- Wawancara dengan teknisi berpengalaman (>10 tahun) untuk validasi data dan identifikasi mode kegagalan.

### Pengolahan Data dengan Metode FMEA

Data yang telah terkumpul dianalisis menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) melalui langkah-langkah:

1. Mengidentifikasi mode kegagalan potensial pada motor.
2. Menganalisis dampak dan penyebab setiap kegagalan.

3. Memberikan nilai pada parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D).
4. Memberikan nilai *Severity* (S) dengan memberikan peringkat 1-10 untuk menunjukkan tingkat keseriusan dampak kegagalan, dimana:
  - Nilai 1: Tidak ada dampak (risiko minimal)
  - Nilai 10: Sangat berbahaya tanpa peringatan (risiko maksimal)

Tabel 2. Rating Severity

Rating	Effect	Criteria Of Severity Effect
10	<i>Hazardous without warning</i> (HWOW)	Tingkat keparahan sanagat tinggi ketika mode kegagalan potensial mempengaruhi <i>system safety</i> tanpa peringatan
9	<i>Hazardous with warning</i> (HWW)	Tingkat keparahan sangat tinggi Ketika mode kegagalan potensial mempengaruhi <i>system safety</i> dengan peringatan.
8	<i>very high</i> (HV)	Sistem tidak dapat beroperasi dengan kegagalan menyebabkan kerusakan tanpa membahayakan keselamatan
7	<i>High</i> (H)	Sistem tidak dapat beroperasi dengan kerusakan peralatan
6	<i>Moderate</i> (M)	Sistem tidak dapat beroperasi dengan kerusakan kecil
5	<i>Low</i> (L)	Sistem tidak dapat peroperasi tanpa kerusakan
4	<i>Very low</i> (VL)	Sistem dapat beroperasi dengan kinerja mengalami penurunan secara signifikan
3	<i>Minor</i> (MR)	Sistem dapat beroperasi dengan kinerja mengalami beberapa penurunan
2	<i>Very Minor</i> (VMR)	Sistem dapat beroperasi dengan sedikit gangguan
1	<i>None</i> (N)	Tidak ada pengaruh

Sumber: (Kusumawati et al., 2024)

5. Memberi penilaian *Occurrence* (O) dengan memberikan rating 1-10 berdasarkan frekuensi terjadinya penyebab kegagalan, dengan mengacu pada data historis atau indeks kinerja proses.

Tabel 3. Rating Occurrence

Rating	Kriteria Verbal	Probabilitas Kegagalan
10	Kegagalan sangat tinggi	1 dalam 2
9	Kegagalan hampir tidak bisa dihindari	1 dalam 3
8	Umumnya berkaitan dengan peroses terdahulu yang kadang mengalami kegagalan dalam jumlah besar	1 dalam 8
7		1 dalam 20
6	Umumnya berkaitan dengan proses terdahulu yang kadang mengalami kegagalan tetapi tidak dalam jumlah besar	1 dalam 80
5		1 dalam 400
4		1 dalam 2000
3	Kegagalan terisolasi berkaitan proses serupa	1 dalam 15000
2	Hanya kegagalan terisolasi yang berkaitan dengan proses hampir identik	1 dalam 150000
1	Kegagalan mustahil, tak pernah ada kegagalan yang terjadi dalam proses identik	1 dalam 1500000

Sumber: (Bob, 2016)

6. Penilaian *Detection* (D) dengan memberikan skor 1-10 untuk mengukur efektivitas sistem deteksi, dimana:
  - Nilai 1: Sistem deteksi sangat efektif (hampir pasti mendeteksi)
  - Nilai 10: Tidak ada sistem deteksi yang mampu mendeteksi kegagalan

Tabel 4. Rating Detection

Ranking	Kriteria Verbal	Efek
1	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan hampir pasti	Hampi Pasti
2	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan sangat tinggi	Sangat Tinggi
3	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan tinggi	Tinggi
4	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan sedang sampai tinggi	Agak Tinggi
5	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan sedang	Sedang
6	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan rendah	Rendah
7	Kemampuan alat kontrol untuk mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan sangat rendah	Sangat Rendah
8	Alat pengontrol saat ini sulit mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan	Jarang
9	Alat pengontrol saat ini sangat sulit mendeteksi bentuk dan penyebab kegagalan	Sangat Jarang
10	Tidak ada alat pengontrol yang mampu mendeteksi kegagalan	Hampir Tidak Mungkin

Sumber: (Bob, 2016)

7. Perhitungan *Risk Priority Number* ( $RPN = S \times O \times D$ ).
8. Prioritisasi mode kegagalan berdasarkan nilai RPN tertinggi.

#### Analisis Hasil dan Rekomendasi

Hasil perhitungan FMEA diverifikasi dengan data lapangan untuk memvalidasi temuan. Berdasarkan analisis risiko, dirumuskan rekomendasi tindakan perbaikan dan pencegahan yang terstruktur, meliputi tindakan segera, preventif dan tindakan pencegahan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

Penelitian dilakukan pada enam unit motor induksi 3 fasa yang menggerakkan *Waste Water Transfer Pump* (WWTP) di PLTU Tanjung Jati B. Motor-motor ini merupakan peralatan kritis dalam sistem pembuangan air limbah PLTU. Spesifikasi teknis motor yang diteliti disajikan pada tabel dibawah.

Tabel 5. Spesifikasi Teknis Motor Induksi

Parameter	Spesifikasi
<i>Type</i>	<i>3-Phase Squirrel Cage</i>
<i>Rated Voltage</i>	380V/660V

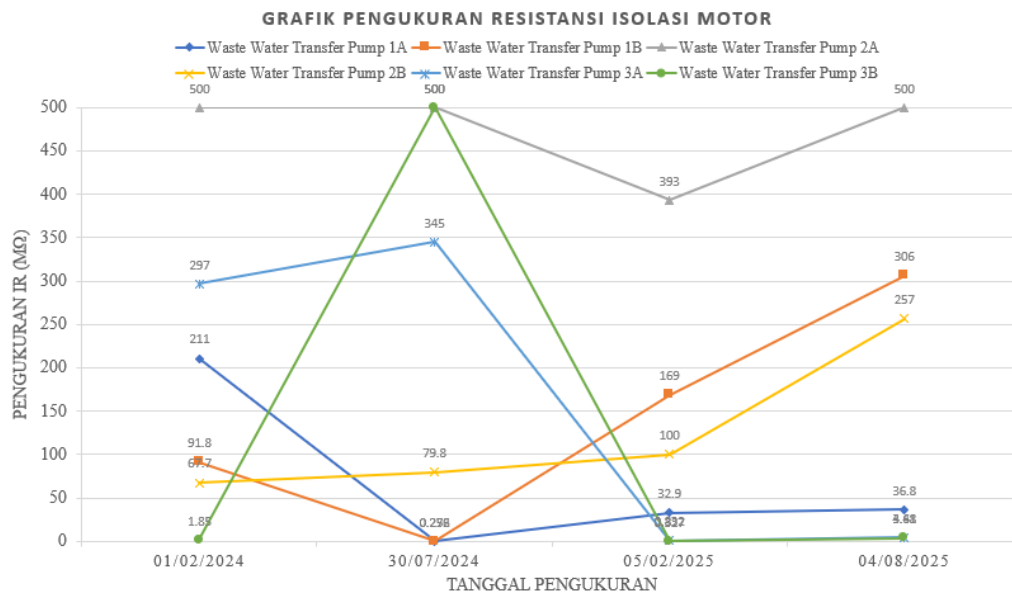
<i>Rated Current</i>	70A/40A
<i>Rated Speed</i>	2940 rpm
<i>Rated Power</i>	37 kW (50 HP)
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Cos Phi</i>	0.86
<i>Protection Class</i>	IP55
<i>Insulation Class</i>	Class F
<i>Duty Cycle</i>	S1 (Continuous)

**Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi**

Pengukuran tahanan isolasi dilakukan secara berkala dari Februari 2024 hingga Agustus 2025 sesuai standar IEEE 43-2013. Hasil pengukuran (Tabel 6) mengungkapkan fluktuasi nilai tahanan isolasi yang sangat signifikan pada sebagian besar motor, terutama selama periode musim penghujan.

Tabel 6. Hasil Pengukuran Tahanan Isolasi (MΩ)

Motor	01/02/24	30/07/24	05/02/25	04/08/25	Status
WWTP 1A	211	0,256	32,9	36,8	Normal
WWTP 1B	91,8	0,272	169	306	Sangat Bagus
WWTP 2A	>500	>500	393	>500	Sangat Bagus
WWTP 2B	67,7	79,8	100	257	Sangat Bagus
WWTP 3A	297	345	0,832	4,41	Kritis
WWTP 3B	1, 85	>500	0,327	3,68	Kritis



Gambar 2. Grafik Pengukuran Resistansi Isolasi Motor

Grafik tren pengukuran tahanan isolasi enam motor *Waste Water Transfer Pump* (WWTP) menunjukkan fluktuasi nilai yang signifikan selama periode pengamatan. Pola yang teridentifikasi dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama:

1. Motor dengan Performa Stabil (WWTP 2A & 2B):  
Motor-motor ini mempertahankan nilai tahanan isolasi yang konsisten tinggi (>200 MΩ) sepanjang periode pengukuran, menunjukkan sistem isolasi yang masih dalam kondisi optimal dan terlindungi dengan baik dari faktor lingkungan.
2. Motor dengan Fluktuasi Ekstrem (WWTP 1A, 1B, 3A, & 3B):  
Kelompok motor ini menunjukkan pola degradasi yang khas dengan penurunan drastis nilai tahanan isolasi, khususnya pada periode Februari 2025. Motor 3A mengalami penurunan paling signifikan dari 345 MΩ menjadi 0,832 MΩ, sementara Motor 1B turun dari 91,8 MΩ menjadi 0,272 MΩ pada periode yang sama.
3. Pola Recovery Pasca-Pemeliharaan:  
Beberapa motor menunjukkan kemampuan recovery yang baik setelah tindakan pemeliharaan, seperti Motor 1B yang berhasil meningkat dari 0,272 MΩ menjadi 306 MΩ, dan Motor 2B yang menunjukkan peningkatan konsisten dari 67,7 MΩ menjadi 257 MΩ.

Penurunan drastis yang terjadi secara simultan pada Februari 2025 pada hampir semua motor mengindikasikan pengaruh kuat faktor musim hujan. Pola ini konsisten dengan temuan analisis FMEA yang menempatkan "degradasi isolasi akibat kelembapan tinggi" sebagai mode kegagalan prioritas kedua. Perbedaan performa motor WWTP 2A/2B yang stabil dibandingkan WWTP 3A/3B yang fluktuatif mengindikasikan adanya variabel lain selain faktor lingkungan. Berdasarkan wawancara dengan teknisi, kemungkinan terkait dengan: (1) perbedaan riwayat pemeliharaan, (2) variasi beban operasional, atau (3) kualitas instalasi yang berbeda.

1. Riwayat Pemeliharaan

Motor 2A/2B menunjukkan pola recovery yang bagus (2B: 67.7 → 257 MΩ), mengindikasikan maintenance berkualitas tinggi dengan prosedur standarisasi (rewinding, drying komprehensif, impregnasi resin). Motor 3A/3B yang mengalami fluktuasi ekstrem kemungkinan mengalami maintenance reaktif (hanya setelah terjadi kerusakan) dengan prosedur yang kurang standarisasi karena hanya untuk memberi perbaikan cepat, ditangani oleh teknisi/kontraktor berbeda tanpa mempertimbangkan standar IEEE 43-2013. Pemulihan pasca perbaikan juga terbatas pada motor 3A (345 → 4,41 MΩ) menunjukkan tindakan pemeliharaan yang kurang lengkap dan kondisi pengeringan termal yang tidak efektif.

2. Variasi Beban Operasional

Penelitian dan observasi menunjukkan bahwa thermal stress dari beban operasional langsung mempercepat degradasi isolasi. Motor 3A/3B yang tidak stabil kemungkinan menerima beban lebih tinggi atau operasi kontinu yang lebih besar dibanding motor 2A/2B. Peningkatan suhu yang signifikan juga mempercepat penuaan material insulasi dan mengurangi kekuatan dielektrik. Perbedaan riwayat beban operasional ini dapat menjelaskan mengapa motor 3A mengalami penurunan ekstrem (345 → 0,832 MΩ Feb 2025) sementara motor 2A tetap stabil. Akumulasi thermal stress dari tingginya beban operasional menciptakan percepatan degradasi pada kelembapan material isolasi.

3. Kualitas Instalasi

Kualitas Instalasi mempengaruhi pembagian mechanical stress pada sistem isolasi. pemasangan yang buruk (sambungan terminal longgar, proses winding yang kurang bagus, pemasangan yang tidak tepat) mengakibatkan degradasi mekanis akibat getaran. Motor 2A/2B yang stabil kemungkinan memiliki kualitas pemasangan yang unggul (ukuran kabel yang tepat, kepatuhan peringkat suhu, terminasi yang aman, proses winding yang benar). Motor 3A/3B yang rentan terhadap kelembapan musiman menunjukkan kemungkinan instalasi yang kurang bagus. Sehingga motor 3A/3B mengalami penurunan kualitas isolasi yang ekstrem.

**Analisis Risiko dengan Metode FMEA**

Analisis FMEA mengidentifikasi enam mode kegagalan utama dengan perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) sebagai berikut:

Tabel 7. Analisis FMEA Motor Waste Water Transfer Pump (WWTP)

Failure Mode	Potential Effects	S	O	D	RPN	Rank
Overheating akibat arus bocor	Downtime tak terduga, kerusakan belitan	9	8	8	576	1

Degradasi isolasi akibat kelembapan tinggi	Motor trip total, potensi overflow	9	8	7	504	2
Korosi terminal dan koneksi	Ketidakstabilan operasi, pemeliharaan tak terencana	8	7	8	448	3
Ground fault pada Isolasi	Bahaya listrik, shutdown sistem	10	6	6	360	4
Kontaminasi pada isolasi	Penurunan performa gradual	7	6	6	252	5
Mechanical stress pada isolasi	Biaya pemeliharaan berulang	7	5	5	175	6

### Pembahasan Hasil

Dari Tabel 7, terlihat dengan jelas bahwa overheating akibat arus bocor menduduki peringkat pertama sebagai risiko paling kritis dengan RPN 576. Tingginya nilai *Severity* (9) disebabkan oleh dampaknya yang dapat memicu kebakaran belitan dan *downtime* tak terduga yang lama. Nilai *Occurrence* (8) yang tinggi menunjukkan bahwa fenomena ini sering terjadi, terutama pada motor yang isolasinya sudah mulai menua atau terkontaminasi. Sementara itu, nilai *Detection* (8) yang juga tinggi mengindikasikan betapa sulitnya mendeteksi masalah ini secara dini tanpa peralatan pemantauan yang khusus dan rutin, karena kenaikan suhu dan arus bocor seringkali tidak terlihat hingga mencapai titik kritis.

Mode kegagalan degradasi isolasi akibat kelembapan tinggi (RPN 504) menempati posisi kedua, yang secara langsung mencerminkan tantangan lingkungan operasi. Pola data pengukuran tahanan isolasi selama periode penelitian memberikan validasi yang kuat. Teramati penurunan nilai tahanan isolasi yang sangat drastis dan konsisten pada bulan-bulan musim hujan. Sebagai contoh, Motor 1A mengalami kemerosotan dari 211 M $\Omega$  menjadi hanya 0,256 M $\Omega$ , sementara Motor 3A jatuh dari 345 M $\Omega$  menjadi 0,832 M $\Omega$ . Pola musiman ini membuktikan bahwa kelembapan atmosfer adalah faktor akselerator utama dalam proses degradasi isolasi, sebagaimana juga ditemukan dalam penelitian. Meskipun dapat dideteksi melalui pengukuran *megger* rutin, frekuensi pengukuran yang selama ini diterapkan ternyata belum memadai untuk mengantisipasi laju degradasi yang cepat selama musim hujan.

### Dampak Kegagalan Motor

Dampak dari kegagalan isolasi ini bersifat multidimensi, meliputi aspek operasional, keandalan, dan finansial. Pada tingkat operasional, *downtime* yang dipaksa adalah konsekuensi yang paling langsung. Data menunjukkan bahwa 4 dari 6 motor yang diteliti pernah mengalami kondisi kritis (tahanan isolasi <5 M $\Omega$ ) yang mengharuskan penghentian operasi segera. Durasi perbaikan untuk kasus seperti ini bervariasi, mulai dari 24-48 jam untuk perbaikan isolasi lokal hingga 72 jam atau lebih jika diperlukan proses *rewinding* belitan yang memakan waktu.

Pada tingkat sistem, kegagalan satu unit motor akan membebani unit *backup* yang masih beroperasi. Beban berlebih ini justru dapat mempercepat proses degradasi pada motor yang masih sehat. Dampak sistemik tersebut adalah potensi *overflow* pada kolam limbah, yang dapat mengganggu operasi area *coal handling* dan bahkan memicu *shutdown* darurat pada unit pembangkit, dengan kerugian finansial yang sangat besar.

### Rekomendasi Tindakan

Untuk memitigasi risiko yang telah teridentifikasi, direkomendasikan serangkaian tindakan strategis yang terbagi dalam tiga horizon waktu. Sebagai tindakan segera, pemasangan *motor heater* pada semua unit yang berdiri di lingkungan lembap adalah langkah yang paling *cost-effective* untuk mencegah kondensasi selama periode *standby*. Motor dengan nilai tahanan isolasi yang telah memasuki zona kritis (<2 M $\Omega$ ) harus segera dihentikan operasinya dan menjalani inspeksi serta perbaikan menyeluruh.

Pada tingkat tindakan preventif, diperlukan penyesuaian strategi pemeliharaan yang lebih adaptif. Protokol pemantauan harus ditingkatkan frekuensinya, terutama selama musim hujan, dari yang mungkin sebelumnya bulanan menjadi mingguan, dengan mencakup pengukuran *Polarization Index* (PI) untuk deteksi dini kontaminasi kelembapan. Program pembersihan dan pengeringan terjadwal juga perlu dilakukan setiap 2-3 bulan.

Sebagai strategi jangka panjang dan perbaikan desain, investasi dalam *Advanced Monitoring System* berbasis IoT, seperti *online insulation monitoring* dan *thermal imaging* berkala, akan menggeser paradigma pemeliharaan dari *preventive* yang berbasis waktu ke *predictive* yang berbasis kondisi, sehingga memungkinkan intervensi yang lebih tepat waktu dan efisien, yang pada akhirnya akan memaksimalkan keandalan aset dan meminimalkan *total life cycle cost*.

### Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, frekuensi pengukuran tahanan isolasi yang terbatas pada 3-4 titik data per motor berpotensi menyebabkan tidak terdeteksinya fluktuasi nilai isolasi di antara periode pengukuran, khususnya selama musim hujan. Kedua, penelitian belum mengintegrasikan data parameter lingkungan seperti suhu harian, kelembapan relatif, dan komposisi kimia waste water yang dapat mempengaruhi laju degradasi isolasi. Terakhir, variasi beban operasional, duty cycle, dan riwayat pemeliharaan masing-masing motor tidak sepenuhnya terakomodasi dalam analisis, sehingga perbedaan laju degradasi antar motor belum dapat dijelaskan secara komprehensif.

### Penutup

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini berhasil mengidentifikasi enam mode kegagalan kritis pada motor induksi 3 fasa di PLTU Tanjung Jati B akibat kegagalan isolasi, dengan *overheating* akibat arus bocor (RPN 576) dan degradasi isolasi akibat kelembapan tinggi (RPN 504) sebagai risiko paling dominan. Analisis FMEA yang divalidasi dengan data pengukuran tahanan isolasi berdasarkan standar IEEE 43-2013 menunjukkan konsistensi yang tinggi, terutama dalam menangkap korelasi kuat antara degradasi isolasi dengan kondisi musim hujan, dimana nilai tahanan isolasi mengalami penurunan drastis seperti pada motor 1A yang turun dari 211 M $\Omega$  menjadi 0,256 M $\Omega$ . Secara metodologis, penelitian ini memberikan kontribusi dalam penerapan FMEA yang divalidasi dengan data pengukuran tahanan isolasi berdasarkan standar IEEE 43-2013. Temuan korelasi kuat antara degradasi isolasi dengan kondisi musim hujan memberikan dasar ilmiah untuk penyesuaian strategi pemeliharaan yang adaptif di lingkungan PLTU. Dampak operasional yang ditimbulkan cukup signifikan, termasuk *downtime* operasional, risiko *cascade failure*, peningkatan biaya pemeliharaan, dan penurunan keandalan sistem secara keseluruhan. Untuk memitigasi risiko tersebut, telah direkomendasikan serangkaian tindakan perbaikan yang terbagi dalam tiga level, yaitu tindakan segera berupa penghentian operasi motor dengan IR <2 M $\Omega$  dan pemasangan *motor heater*, tindakan preventif melalui peningkatan frekuensi monitoring dan pembersihan terjadwal, serta perbaikan desain jangka panjang dengan implementasi sistem *predictive maintenance*. Implementasi rekomendasi ini diharapkan dapat meningkatkan keandalan motor, menekan angka *downtime*, dan mengoptimalkan program pemeliharaan di PLTU Tanjung Jati B.

### Daftar Pustaka

- Bob, M. A. (2016). Analisis Penyebab Kerusakan Hot Rooler Table Dengan Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis ( Fmea ). *Jurnal INTECH Teknik Industri Universitas Serang Raya*, 4(1), 1–8.
- Guide, M. M. S. M. (2013). *GRUNDFOS SUBMERSIBLE MOTOR GUIDE MS/MMS Application-Installation-Maintenance 60Hz, Single-Phase and Three-Phase Motors*.
- Hakim, A. (2020). Analisis Pengaruh Arus Tidak Seimbang Terhadap Kerja Motor Induksi Tiga Fasa. *Jurnal Ekonomi Volume 18, Nomor 1 Maret 201*, 2(1), 1–56.
- Hendra prasetyawan, 2024. (2024). *Analisis Pengaruh Endwinding Vibration Terhadap Isolasi Belitan Stator Generator #2 412 Mva Pltu Tanjung Awar-Awar Dengan Metode Condition Assessment Diagnostics Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung Semarang*.
- Irawan, B. J., PK, I. D., Dewantara, B. Y., & Rahmatullah, D. (2020). Klasifikasi Hubung Singkat Turn To Turn Pada Belitan Stator Motor Induksi Yang Disebabkan Kegagalan Isolasi Menggunakan Metode Neural Network (Nn). *Media Elekrika*, 13(1), 1. <https://doi.org/10.26714/me.v13i1.6351>
- Kusumawati, A., Safitri, S., Amanda Putra, L., & Ramayanti, G. (2024). Analisis Penyebab Kerusakan Mesin Dengan Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Di PT. Sulfindo Adiusaha. *Jurnal InTent*, 7(2), 80–93.
- Machado, L., Sousa, T. J. C., Pedrosa, D., Monteiro, V., Pinto, J. G., & Afonso, J. L. (2021). Experimental Validation of a Three-Phase Induction Motor Operating with a Three-Phase Bidirectional Variable Speed Drive. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 8(34), 1–13. <https://doi.org/10.4108/eai.14-1-2021.168137>
- Mochammad Arif Wicaksono, Edy Prasetyo Hidayat, Hendro Agus Widodo, & Catur Rakhmad Handoko. (2022). Penggunaan Metode Phase Failure Relay Untuk Gangguan Voltage Unbalance Pada Motor Induksi 3 Phasa. *Jurnal 7 Samudra*, 7(1). <https://doi.org/10.54992/7samudra.v7i1.105>
- Nugroho, S. D. (2022). Evaluasi Distributed Control System pada PLTU dengan Failure Mode, Effect and Criticaly Analysis (FMECA). *Kilat*, 11(1), 88–102. <https://doi.org/10.33322/kilat.v11i1.1531>
- Oktavianto, A., & Joko, J. (2024). Analisis Kelayakan Motor Induksi 3 Fasa Berdasarkan Tahanan Isolasi dan Indeks Polaritas Di PT. PLN Indonesia Power Grati PGU. *Jurnal Teknik Elektro*, 14(2), 108–113. <https://doi.org/10.26740/jte.v14n2.p108-113>
- Sartika, L., Prasetia, A. M., & Nicholas, I. E. N. (2023). Analisa Pengaruh Perubahan Beban Terhadap Kinerja Motor Induksi 3 Fasa Scraper Conveyordi Pt. Citra Siwit Lestari. *Jurnal Elektro Dan Telekomunikasi Terapan*, 10(1), 7. <https://doi.org/10.25124/jett.v10i1.5999>

- Sutopo, P. S., & Grasella, F. (2023). Analisis Risiko menggunakan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dalam Menganalisa Kerusakan Komponen Mesin Printing Industrial. *Jurnal Sains Terapan Dan Teknologi*, 4(1), 167–174.
- Wahyudi, M., Asfani, D. A., Negara, I. M. Y., Fahmi, D., & Hernanda, I. G. N. S. (2019). Evaluasi Degradasi Isolasi Motor akibat Multi-factor Aging berdasarkan Indeks Polarisasi dan SEM-EDX. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, 8(1), 92. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v8i1.495>
- Yaqin, R. I., Zamri, Z. Z., Siahaan, J. P., Priharanto, Y. E., Alirejo, M. S., & Umar, M. L. (2020). Pendekatan FMEA dalam Analisa Risiko Perawatan Sistem Bahan Bakar Mesin Induk: Studi Kasus di KM. Sidomulyo. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 9(3), 189–200. <https://doi.org/10.26593/jrsi.v9i3.4075.189-200>
- Zahari, M. A. (2023). Analisis pengaruh ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Matlab Simulink Tegangan Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi. *Universitas Islam Sultan Agung*, 1(1), 1–69.