

ANALISIS KEANDALAN BERBASIS RISIKO PADA SISTEM *ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP* MENGGUNAKAN *FAULT TREE ANALYSIS* DAN PENDEKATAN PRIORITAS INSPEKSI

*Nofal Dzaki Taqiy¹, Yusuf Umardani², 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:nofaldzakitaqiy@students.undip.ac.id

Abstrak

Electrical Submersible Pump (ESP) merupakan salah satu sistem artificial lift yang banyak digunakan dalam industri minyak dan gas untuk meningkatkan produksi fluida pada sumur bertekanan rendah. Meskipun memiliki kapasitas produksi yang tinggi, sistem ESP rentan mengalami kegagalan akibat kondisi operasi yang kompleks seperti temperatur tinggi, tekanan tinggi, kandungan pasir, gas bebas, serta fluida korosif. Kegagalan komponen ESP dapat menyebabkan penurunan produksi, peningkatan biaya perawatan, serta downtime yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat keandalan sistem ESP melalui identifikasi komponen kritis dan analisis risiko kegagalan menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan pendekatan *Risk-Based Inspection* (RBI). Metode penelitian dilakukan melalui studi literatur dan analisis sistem dengan mengidentifikasi komponen utama ESP, menyusun diagram pohon kesalahan, menghitung *Probability of Failure* (PoF), serta menentukan tingkat risiko berdasarkan kombinasi probabilitas dan konsekuensi kegagalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gangguan sistem kelistrikan dan kondisi fluida sumur merupakan faktor dominan yang berkontribusi terhadap kegagalan sistem dengan probabilitas kegagalan sebesar 98,2%. Selain itu, penurunan kinerja pompa memiliki probabilitas kegagalan sebesar 97,8%, protector atau seal section sebesar 97,0%, serta motor listrik sebesar 96,4%. Analisis menunjukkan bahwa kabel daya, isolasi listrik, gas lock, scaling, dan produksi pasir merupakan penyebab utama yang memengaruhi keandalan operasi ESP. Berdasarkan hasil tersebut, strategi inspeksi berbasis risiko difokuskan pada komponen dengan tingkat risiko tinggi melalui pemantauan parameter operasi seperti arus listrik, tegangan, temperatur, getaran, dan karakteristik fluida sumur.

Kata kunci: *electrical submersible pump; fault tree analysis; probability of failure; reliability; risk-based inspection*

Abstract

Electrical Submersible Pumps (ESPs) are widely used artificial lift systems in the oil and gas industry to enhance fluid production from low-pressure reservoirs. Despite their high production capacity, ESP systems are vulnerable to failure due to complex operating conditions, including high temperature, pressure fluctuations, sand production, free gas, and corrosive fluids. Component failures may result in production losses, increased maintenance costs, and significant downtime. This study aims to evaluate the reliability level of ESP systems by identifying critical components and analyzing failure risks using *Fault Tree Analysis* (FTA) and a *Risk-Based Inspection* (RBI) approach. The research methodology consists of literature review and system analysis, including identification of key ESP components, development of fault tree diagrams, calculation of *Probability of Failure* (PoF), and risk assessment based on failure probability and consequence levels. The results indicate that electrical system disturbances and well-fluid conditions are the dominant contributors to system failure, each exhibiting a failure probability of 98.2%. In addition, pump performance degradation shows a failure probability of 97.8%, protector or seal section failure 97.0%, and motor failure 96.4%. The analysis reveals that power cable degradation, insulation failure, gas lock, scaling, and excessive sand production are the primary factors affecting ESP reliability. Based on these findings, *Risk-Based Inspection* strategies should focus on high-risk components through continuous monitoring of operational parameters such as current, voltage, temperature, vibration, and fluid characteristics.

Keywords: *electrical submersible pump; fault tree analysis; maintenance strategy; probability of failure; reliability; risk-based inspection*

1. Pendahuluan

Electrical Submersible Pump (ESP) merupakan salah satu teknologi artificial lift yang paling banyak digunakan dalam industri minyak dan gas karena kemampuannya menghasilkan laju produksi fluida yang tinggi dan stabil. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan motor listrik bawah permukaan yang menggerakkan pompa sentrifugal bertingkat untuk mengangkat fluida dari reservoir menuju permukaan. Dibandingkan dengan metode artificial lift lainnya, ESP memiliki keunggulan dalam menangani sumur dengan laju produksi tinggi, kedalaman besar, serta variasi karakteristik fluida yang kompleks. Oleh karena itu, ESP banyak diterapkan pada lapangan minyak yang mengalami penurunan tekanan reservoir untuk mempertahankan tingkat produksi yang ekonomis [1,2]. Seiring bertambahnya umur lapangan minyak dan gas, kebutuhan terhadap sistem pengangkatan buatan yang andal semakin meningkat karena sebagian besar reservoir telah memasuki fase mature field dengan tekanan alami yang tidak lagi mampu mengalirkan fluida ke permukaan secara optimal [1].

Meskipun memiliki efisiensi operasional yang tinggi, sistem ESP memiliki tingkat kerentanan terhadap kegagalan yang relatif besar akibat kondisi operasi yang berat. Berbagai faktor seperti temperatur tinggi, tekanan tinggi, kandungan gas bebas (free gas), produksi pasir, scaling, korosi, serta fluktuasi tegangan listrik dapat mempercepat degradasi komponen sistem [2,12]. Kegagalan pada salah satu komponen utama, seperti motor listrik, protector, kabel daya, maupun pompa sentrifugal, dapat menyebabkan penghentian produksi secara mendadak dan menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan. Selain biaya perbaikan dan penggantian komponen yang tinggi, downtime produksi juga berpotensi menyebabkan kehilangan produksi minyak dan gas dalam jumlah besar [7,8].

Keandalan (reliability) merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kemampuan suatu sistem untuk beroperasi sesuai fungsi yang diharapkan dalam periode waktu tertentu tanpa mengalami kegagalan. Dalam sistem produksi minyak dan gas, keandalan peralatan menjadi faktor utama yang memengaruhi keselamatan operasi, efisiensi produksi, dan biaya pemeliharaan. Menurut teori keandalan, probabilitas kegagalan suatu sistem dipengaruhi oleh karakteristik komponen penyusunnya, lingkungan operasi, serta efektivitas strategi pemeliharaan yang diterapkan [5,6]. Oleh karena itu, evaluasi keandalan sistem ESP menjadi langkah penting dalam menentukan strategi pengelolaan aset yang efektif dan berkelanjutan.

Pada praktik industri, program pemeliharaan masih banyak dilakukan menggunakan pendekatan time-based maintenance yang berorientasi pada jadwal inspeksi berkala tanpa mempertimbangkan kondisi aktual peralatan. Pendekatan ini sering kali menyebabkan terjadinya over-maintenance maupun under-maintenance sehingga meningkatkan biaya operasional dan menurunkan efektivitas pemeliharaan [7]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai perusahaan mulai menerapkan pendekatan Reliability-Centered Maintenance (RCM) dan *Risk-Based Inspection* (RBI) yang berfokus pada identifikasi risiko kegagalan serta penentuan prioritas inspeksi berdasarkan tingkat kritisitas peralatan [3,9]. Pendekatan tersebut memungkinkan sumber daya pemeliharaan dialokasikan secara lebih efisien pada komponen yang memiliki tingkat risiko tertinggi.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan sistem secara sistematis adalah *Fault Tree Analysis* (FTA). Metode ini menggunakan struktur logika berbentuk pohon untuk menggambarkan hubungan antara kegagalan komponen, subsistem, dan kegagalan sistem secara keseluruhan. Melalui penggunaan gerbang logika seperti AND dan OR gate, FTA mampu menunjukkan jalur kegagalan yang paling kritis serta memberikan gambaran kuantitatif mengenai probabilitas kegagalan sistem [4]. Metode ini telah banyak diterapkan pada berbagai sektor industri berisiko tinggi, termasuk industri minyak dan gas, karena mampu membantu proses pengambilan keputusan dalam manajemen risiko dan peningkatan keandalan peralatan [5,10].

Selain identifikasi penyebab kegagalan, evaluasi tingkat risiko juga diperlukan untuk menentukan prioritas tindakan mitigasi yang tepat. *Risk-Based Inspection* (RBI) merupakan pendekatan yang mengombinasikan *Probability of Failure* (PoF) dan *Consequence of Failure* (CoF) untuk menghasilkan tingkat risiko suatu peralatan [3]. Dengan pendekatan ini, inspeksi dapat difokuskan pada komponen yang memiliki probabilitas kegagalan tinggi dan konsekuensi kegagalan yang signifikan terhadap keselamatan, lingkungan, maupun produksi. Implementasi RBI terbukti mampu mengurangi biaya inspeksi sekaligus meningkatkan efektivitas program pemeliharaan pada berbagai fasilitas industri proses [3,11].

Berdasarkan pentingnya keandalan sistem ESP dalam menjaga kontinuitas produksi minyak dan gas, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis tingkat risiko kegagalan komponen ESP menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan pendekatan *Risk-Based Inspection* (RBI). Analisis dilakukan melalui identifikasi komponen kritis, penyusunan diagram pohon kesalahan, perhitungan *Probability of Failure* (PoF), serta penentuan prioritas inspeksi berdasarkan tingkat risiko. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi strategi pemeliharaan yang lebih efektif, meningkatkan keandalan sistem ESP, mengurangi downtime produksi, serta mendukung pengelolaan aset yang berkelanjutan pada industri minyak dan gas [8,9,12].

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan objek berupa sistem *Electrical Submersible Pump* (ESP) yang terdiri atas motor listrik, pompa, kabel daya, protector/seal section, sistem kontrol permukaan, dan kondisi fluida sumur. Data yang digunakan diperoleh dari studi literatur, laporan teknis industri, data historis kegagalan komponen, serta referensi keandalan

peralatan yang relevan. Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi seluruh komponen utama yang berkontribusi terhadap kegagalan sistem dan menyusun struktur hubungan kegagalan menggunakan *Fault Tree Analysis* (FTA).

Metode penelitian meliputi penyusunan diagram FTA, identifikasi basic event dan intermediate event, perhitungan failure rate (λ), serta penentuan *Probability of Failure* (PoF) menggunakan model distribusi eksponensial. Selanjutnya dilakukan penilaian tingkat risiko berdasarkan kombinasi probabilitas dan konsekuensi kegagalan melalui pendekatan *Risk-Based Inspection* (RBI). Hasil evaluasi digunakan untuk menentukan prioritas inspeksi dan strategi pemeliharaan yang sesuai bagi setiap komponen ESP.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa kegagalan sistem ESP dipengaruhi oleh enam kelompok intermediate event, yaitu kegagalan motor listrik, penurunan kinerja pompa, gangguan sistem kelistrikan, kegagalan protector atau seal section, gangguan sistem kontrol. Analisis FTA menunjukkan bahwa kegagalan motor listrik dapat disebabkan oleh kerusakan rotor, gangguan stator, kerusakan bearing, overheating, dan gangguan suplai listrik. Faktor-faktor tersebut memiliki hubungan logis yang memungkinkan terjadinya penghentian operasi secara total apabila salah satu komponen mengalami kegagalan. Pada subsistem pompa, penyebab utama kegagalan meliputi keausan impeller, kerusakan shaft, kebocoran seal, plugging, dan erosi akibat pasir. Komponen-komponen tersebut secara langsung memengaruhi performa hidrolik pompa sehingga menyebabkan penurunan kapasitas produksi.

Perhitungan failure rate menunjukkan bahwa sistem kelistrikan dan kondisi fluida sumur memiliki nilai kegagalan tertinggi sebesar $0,000456 \text{ jam}^{-1}$. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan subsistem lainnya sehingga menunjukkan tingkat kerentanan yang lebih besar terhadap kegagalan operasional. Nilai *Probability of Failure* menunjukkan bahwa gangguan sistem kelistrikan dan kondisi fluida memiliki probabilitas kegagalan sebesar 98,2%. Tingginya probabilitas tersebut mengindikasikan bahwa faktor kelistrikan dan karakteristik fluida merupakan penyebab dominan kegagalan ESP. Penurunan kinerja pompa memiliki probabilitas kegagalan sebesar 97,8%, sedangkan protector/seal section dan motor listrik masing-masing memiliki probabilitas kegagalan sebesar 97,0% dan 96,4%. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh komponen utama ESP berada pada kategori risiko tinggi.

Hasil penilaian risiko menunjukkan bahwa kerusakan kabel daya, kegagalan isolasi kabel, short circuit, gas lock, scaling, dan produksi pasir merupakan basic event dengan tingkat risiko tertinggi. Kegagalan komponen tersebut berpotensi menyebabkan penghentian produksi secara mendadak serta meningkatkan biaya workover. Berdasarkan hasil analisis RBI, strategi inspeksi perlu difokuskan pada pemantauan kondisi kabel daya, kestabilan tegangan, temperatur motor, getaran pompa, dan karakteristik fluida sumur. Pendekatan ini memungkinkan deteksi dini kerusakan sehingga dapat mengurangi downtime dan meningkatkan keandalan operasi ESP secara keseluruhan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis keandalan dan risiko pada sistem *Electrical Submersible Pump* (ESP), dapat disimpulkan bahwa metode *Fault Tree Analysis* (FTA) mampu mengidentifikasi secara sistematis hubungan antara kegagalan komponen dengan kegagalan sistem secara keseluruhan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gangguan sistem kelistrikan dan kondisi fluida sumur merupakan faktor dominan yang menyebabkan kegagalan ESP dengan nilai *Probability of Failure* (PoF) tertinggi sebesar 98,2%. Selain itu, penurunan kinerja pompa memiliki probabilitas kegagalan sebesar 97,8%, diikuti oleh protector atau seal section sebesar 97,0% dan motor listrik sebesar 96,4%. Tingginya nilai probabilitas kegagalan pada komponen-komponen tersebut menunjukkan bahwa keandalan sistem ESP sangat dipengaruhi oleh kualitas suplai listrik, kondisi fluida produksi, serta integritas mekanis dan elektrik dari komponen utama yang bekerja di bawah kondisi operasi yang ekstrem. Analisis juga menunjukkan bahwa kegagalan kabel daya, kerusakan isolasi listrik, gas lock, scaling, korosi, dan produksi pasir merupakan penyebab utama yang berkontribusi terhadap menurunnya performa sistem serta meningkatnya risiko penghentian produksi secara tidak terencana.

Penerapan pendekatan *Risk-Based Inspection* (RBI) memberikan kerangka kerja yang efektif dalam menentukan prioritas inspeksi dan strategi pemeliharaan berdasarkan tingkat risiko masing-masing komponen. Dengan menggabungkan nilai *Probability of Failure* (PoF) dan konsekuensi kegagalan, komponen kritis dapat diidentifikasi secara lebih akurat sehingga sumber daya inspeksi dan pemeliharaan dapat difokuskan pada area yang memiliki dampak terbesar terhadap keandalan operasi. Strategi inspeksi yang direkomendasikan meliputi pemantauan kondisi kabel daya, parameter kelistrikan, temperatur motor, getaran pompa, serta karakteristik fluida sumur secara berkala dan berkelanjutan. Implementasi pendekatan ini berpotensi meningkatkan efektivitas program pemeliharaan, mengurangi frekuensi downtime, meminimalkan kerugian produksi, dan memperpanjang umur operasi peralatan. Oleh karena itu, kombinasi metode FTA dan RBI dapat dijadikan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam manajemen aset dan pengelolaan risiko pada sistem ESP guna mendukung keberlanjutan operasi industri minyak dan gas yang aman, andal, dan ekonomis.

5. Daftar Pustaka

- [1] Takacs G. *Electrical Submersible Pumps Manual*. 2nd ed. Oxford: Elsevier; 2017.
- [2] Brown KE. *The Technology of Artificial Lift Methods*. Tulsa: PennWell Publishing; 2018.

-
- [3] API. *Recommended Practice 581: Risk-Based Inspection Technology*. 3rd ed. Washington DC: American Petroleum Institute; 2016.
 - [4] Vesely WE, Goldberg FF, Roberts NH, Haasl DF. *Fault Tree Handbook*. Washington DC: US Nuclear Regulatory Commission; 2002.
 - [5] Modarres M. *Reliability Engineering and Risk Analysis*. Boca Raton: CRC Press; 2016.
 - [6] Rausand M. *Reliability of Safety-Critical Systems*. New York: Wiley; 2014.
 - [7] Dhillon BS. *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. Boca Raton: CRC Press; 2002.
 - [8] Smith DJ. *Reliability, Maintainability and Risk*. 9th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2017.
 - [9] Moubray J. *Reliability-Centered Maintenance*. New York: Industrial Press; 2015.
 - [10] Ebeling CE. *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. New York: McGraw-Hill; 2019.
 - [11] Kumar U, Crocker J. *Reliability, Maintenance and Logistic Support*. London: Springer; 2015.
 - [12] Bloch HP, Geitner FK. *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. Houston: Gulf Publishing; 2013.