ANALISIS GANGGUAN FASA KE TANAH PADA SISTEM ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP TIGA FASA DI SUMUR 8C-88N, LAPANGAN MINAS, PT PERTAMINA HULU ROKAN

Muhammad Ronald
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning, Pekanbaru, Riau, Indonesia
E-mail: m.ronald.pku@gmail.com

Monice
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning, Pekanbaru, Riau, Indonesia
E-mail: moinice@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mengkaji gangguan kelistrikan pada sistem *Electrical Submersible Pump* (ESP) tiga fasa di Sumur 8C-88N, Lapangan Minas, PT Pertamina Hulu Rokan. Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan studi kasus deskriptif dengan memanfaatkan data riwayat sumur, desain ESP, catatan produksi, log pengendali, laporan penelusuran gangguan (*troubleshooting*), hasil pengukuran kelistrikan, serta catatan inspeksi pasca pengangkatan ESP. Diagram *fishbone* digunakan untuk mengelompokkan faktor-faktor yang berpotensi berkontribusi terhadap kegagalan, sedangkan *Fault Tree Analysis* (FTA) secara kualitatif digunakan untuk memetakan kemungkinan lokasi gangguan. ESP mengalami penghentian operasi pada 4 Januari 2026 dengan indikasi arus tinggi dan alarm beban lebih (*overload*). Hasil pengukuran setelah penghentian operasi menunjukkan nilai resistansi antarfasa yang relatif seimbang, yaitu sekitar 1,0 Ω, serta nilai resistansi isolasi fasa ke tanah sekitar 0 MΩ. Temuan tersebut paling sesuai dengan karakteristik gangguan fasa ke tanah pada rangkaian yang diuji, tetapi belum dapat mengidentifikasi komponen tempat gangguan bermula. Pompa dan motor dapat berputar bebas saat inspeksi pasca pengangkatan. Fluida berwarna hitam dan tampak berair yang ditemukan pada motor dan *protector* belum membuktikan adanya infiltrasi air. Catatan yang tersedia juga belum dapat menunjukkan urutan perubahan kondisi kelistrikan sebelum penghentian operasi. Pengujian setiap komponen secara terpisah dan sinkronisasi waktu pencatatan data operasi direkomendasikan untuk meningkatkan ketepatan identifikasi lokasi gangguan serta merekonstruksi urutan kejadian.

Kata Kunci: *Electrical Submersible Pump, gangguan fasa ke tanah, resistansi isolasi, analisis akar penyebab, umur operasi.*

Abstract

This study investigates an electrical fault in the three-phase electrical submersible pump (ESP) system at Well 8C-88N, Minas Field, PT Pertamina Hulu Rokan. A descriptive case study was conducted using well history, ESP design data, production records, controller logs, troubleshooting reports, electrical measurements, and post-pull inspection records. A fishbone diagram grouped potential contributing factors, while qualitative fault tree analysis mapped alternative fault locations. The ESP shut down on January 4, 2026, with a high-current indication and a reported overload alarm. Post-shutdown measurements showed relatively balanced phase-to-phase resistance of approximately 1.0 Ω and phase-to-ground readings of approximately 0 MΩ. These findings are most consistent with a phase-to-ground fault in the tested circuit but do not identify the component where the fault originated. The pump and motor rotated freely during post-pull inspection. Fluid described as black and watery in the motor and protector did not establish water ingress. The available records did not establish the sequence of electrical changes before shutdown. Separate component testing and time-aligned operating records are recommended to improve fault localization and reconstruct the event sequence.

.

Keywords: Electrical Submersible Pump, phase-to-ground fault, insulation resistance, root cause analysis, operational life.

PENDAHULUAN

Pada lapangan minyak yang telah memasuki tahap matang (*mature oil field*), tekanan reservoir umumnya mengalami penurunan hingga energi alami reservoir tidak lagi mencukupi untuk mengangkat fluida secara efektif ke permukaan. Oleh karena itu, diperlukan metode pengangkatan buatan (*artificial lift*) untuk mempertahankan produksi.

Salah satu sistem yang banyak digunakan adalah *Electrical Submersible Pump* (ESP), yaitu pompa sentrifugal bertingkat yang digerakkan oleh motor listrik

bawah permukaan. Instalasi ESP terdiri atas motor tiga fasa, *protector*, *intake* atau pemisah gas, pompa bertingkat, kabel daya, peralatan pengendali permukaan, serta komponen pendukung lainnya [1], [2].

Keandalan ESP tidak hanya bergantung pada kinerja pompa, tetapi juga pada kondisi motor dan kabel, sistem proteksi kelistrikan, karakteristik fluida, serta kondisi operasi sumur. Pemilihan peralatan yang sesuai dengan kondisi sumur merupakan faktor penting dalam menentukan umur operasi (*run life*) ESP [3]. Pemantauan dan pengawasan dapat membantu mengidentifikasi perubahan kondisi operasi sebelum berkembang menjadi kegagalan yang mengganggu produksi [4].

Motor ESP tiga fasa mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk menggerakkan pompa. Motor tersebut beroperasi di bawah permukaan dalam kondisi tekanan, temperatur, dan karakteristik fluida yang dapat memengaruhi material isolasi serta integritas dielektriknya [5]. Oleh karena itu, isolasi listrik merupakan aspek penting dalam mengevaluasi keandalan motor ESP.

Jenis gangguan kelistrikan yang menjadi perhatian meliputi gangguan antar fasa (*phase-to-phase fault*), gangguan fasa ke tanah (*phase-to-ground fault*), serta gangguan antarlilitan (*turn-to-turn fault*). IEEE Std 43-2013 memberikan pedoman pengujian resistansi isolasi mesin listrik [6], sedangkan IEEE Std 522-2004 membahas pengujian isolasi antar lilitan pada kumparan stator berbentuk (*form-wound stator coils*) [7].

Penelitian sebelumnya telah mengkaji kegagalan motor di lapangan minyak Indonesia [8], kegagalan isolasi pada belitan stator ESP [9], serta penerapan *Root Cause Analysis* (RCA) terhadap kegagalan ESP pada sumur dengan kadar air (*water cut*) tinggi [10]. Catatan pembongkaran komponen (*teardown*) dapat meningkatkan ketepatan identifikasi mode kegagalan [11], sedangkan RCA yang sistematis dapat membantu membedakan temuan kegagalan dari faktor-faktor yang berpotensi menjadi penyebabnya [12].

Kabel dan sambungan listrik juga merupakan komponen penting bagi keandalan ESP. Sambungan kabel (*cable splice*) merupakan salah satu lokasi yang berpotensi mengalami kegagalan isolasi [13]. Oleh karena itu, motor tidak seharusnya langsung ditetapkan sebagai sumber gangguan sebelum kabel daya utama, *Motor Lead Extension* (MLE), *pothead*, dan sambungan lainnya dievaluasi.

Pola arus motor dapat membantu mendiagnosis kondisi operasi yang tidak normal [14]. Pada instalasi ESP, sistem pemantauan dan proteksi juga memberikan indikasi arus abnormal, tegangan abnormal, kehilangan fasa, serta kondisi gangguan kelistrikan lainnya [4], [15].

Sumur 8C-88N merupakan salah satu sumur produksi di Lapangan Minas, PT Pertamina Hulu Rokan. Program instalasi tahun 2025 menetapkan penggunaan pompa S8000N dengan 37 tingkat pada kedalaman pemasangan 2.273 ft, menggunakan motor berdaya 150 HP dengan tegangan nominal 1.004 V dan arus nominal 94,2 A. Laju fluida desain ditetapkan sebesar 5.000 *Barrels of Fluid per Day* (BFPD).

Unit sebelumnya menggunakan konfigurasi SN2600/48/BSL dengan motor berdaya 80 HP dan telah mencatat umur operasi selama 961 hari sebelum dilakukan pembongkaran rutin yang terencana. Unit S8000N mengalami penghentian operasi pada 4 Januari 2026 dengan indikasi arus tinggi. Pengujian selanjutnya menunjukkan kondisi *zero-meg*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi mode gangguan kelistrikan yang paling sesuai dengan bukti yang tersedia di Sumur 8C-88N, mengevaluasi faktor-faktor yang berpotensi berkontribusi berdasarkan catatan operasi dan inspeksi, menganalisis dampak penghentian operasi terhadap sistem ESP, serta merekomendasikan tindakan untuk mengurangi kemungkinan terulangnya kegagalan.

Analisis dilakukan terhadap sistem kelistrikan ESP secara keseluruhan tanpa mengasumsikan bahwa gangguan berasal dari belitan motor.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus deskriptif-analitis untuk mengintegrasikan berbagai bukti dari kejadian kegagalan operasi yang sebenarnya [16].

Sumber data penelitian meliputi riwayat sumur, spesifikasi desain dan instalasi ESP, riwayat produksi, log pengendali, laporan *troubleshooting*, hasil pengukuran resistansi anta rfasa dan fasa ke tanah, serta catatan inspeksi pasca pengangkatan ESP.

Analisis dilakukan dengan membandingkan catatan tersebut untuk membedakan indikasi operasional, dampak kegagalan yang diamati, kemungkinan mode kegagalan, dan mekanisme awal kegagalan yang belum terverifikasi.

Referensi teknis digunakan sesuai dengan ruang lingkupnya, yaitu pengujian isolasi dan belitan mesin listrik [6], [7], pengoperasian dan pembongkaran ESP [17], [18], serta spesifikasi nominal dan kinerja motor [19], [20].

Analisis menggunakan hasil pengukuran lapangan yang dicatat setelah penghentian operasi. Tidak dilakukan pengujian ulang dalam penelitian ini. Catatan pengukuran mencakup pasangan antar fasa AB, BC, dan CA, serta pasangan fasa ke tanah AG, BG, dan CG.

Catatan tersebut tidak menjelaskan terminal fisik pengujian, titik referensi pembumian, model atau resolusi alat ukur, tegangan dan durasi pengujian isolasi, temperatur pengujian, maupun apakah motor, MLE, *pothead*, dan kabel utama masih saling terhubung.

UNESA Universitas Negeri Surabaya

Oleh karena itu, hasil pembacaan sekitar 0 MΩ dilaporkan sebagai indikasi *zero-meg* yang tercatat, bukan sebagai nilai resistansi fisik yang pasti. IEEE Std 43-2013 [6] digunakan sebagai referensi interpretasi, tetapi kesesuaian prosedur pengujian lapangan terhadap standar tersebut belum dapat diverifikasi.

Nilai rata-rata resistansi antar fasa dan persentase deviasi absolut setiap hasil pengukuran terhadap nilai rata-ratanya ditentukan menggunakan Persamaan (1) dan (2):

$$R_{avg} = \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}{3}$$

$$\%R_{dev} = \frac{[R_i - R_{avg}]}{R_{avg}} \times 100\%$$

Dengan R_i merupakan nilai resistansi pasangan fasa yang sedang dievaluasi.

Karena nilai pengukuran yang tersedia telah mengalami pembulatan, data tersebut digunakan untuk mengevaluasi keseimbangan resistansi secara pendekatan, bukan untuk menentukan persentase deviasi secara presisi.

Diagram *fishbone* digunakan untuk mengelompokkan hasil pengamatan dan hipotesis tanpa memberikan pembobotan atau peringkat terhadap penyebab kegagalan.

Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) secara kualitatif menggunakan gerbang OR untuk merepresentasikan alternatif lokasi kegagalan isolasi fasa ke tanah. Probabilitas kegagalan pada masing-masing komponen tidak dihitung, dan diagram pohon kesalahan tidak digunakan untuk menyimpulkan urutan kejadian sebelum penghentian operasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik ESP dan Riwayat Operasi

Konfigurasi ESP tahun 2025 menggunakan pompa S8000N dengan 37 tingkat. Tabel 1 menyajikan parameter utama yang tercatat dalam dokumentasi instalasi.

Tabel 1. Parameter utama instalasi ESP S8000N di Sumur 8C-88N

Parameter	Nilai
Pump	S8000N
Stage	37
Pump setting depth	2.273 ft
Motor	150 HP
Tegangan nominal	1.004 V
Arus nominal	94,2 A
Design rate	5.000 BFPD
Stabilization time	25 menit

Unit S8000N mulai beroperasi sekitar 21 Oktober 2025 dan mengalami penghentian operasi pada 4 Januari 2026. Umur operasi (*run life*) dihitung berdasarkan selang waktu kalender menggunakan persamaan berikut:

$$RL = t_f - t_s \approx 76\ hari$$

selama 961 hari dan dijadwalkan untuk pembongkaran rutin, sedangkan unit yang telah mengalami peningkatan kapasitas (*upsizing*) mengalami penghentian operasi dengan indikasi arus tinggi.

Dengan demikian, perbandingan tersebut menggambarkan durasi operasi yang teramati, bukan perbandingan keandalan dalam kondisi operasi yang setara.

Daya nominal motor meningkat dari 80 HP menjadi 150 HP atau sebesar 87,5%. Namun, perubahan daya nominal tersebut tidak membuktikan adanya peningkatan beban aktual dengan persentase yang sama. Pemilihan pompa dan umur operasi harus diinterpretasikan berdasarkan desain peralatan dan kondisi sumur [1], [21], [22].

Tabel 2. Data pengamatan laju fluida sebelum dan sesudah upsizing ESP

Kondisi operasi	Contoh laju fluida total (BFPD)
Sebelum *upsizing*	2.892
Sesudah *upsizing*	7.107,98

Peningkatan antara kedua hasil pengamatan pada Tabel 2 dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta Q = \frac{7107{,}98 - 2892}{2892} \times 100\% \approx 145{,}8\%$$

Nilai laju fluida tersebut merupakan hasil pengamatan individual, bukan nilai rata-rata dari kedua periode operasi. Kadar air (*water cut*) mendekati 99% pada beberapa hasil pengamatan dan digunakan sebagai konteks kondisi operasi [10].

Laju fluida yang dipilih setelah *upsizing* melebihi laju desain yang terdokumentasi, yaitu sebesar 5.000 BFPD. Namun, perbandingan tersebut tidak membuktikan bahwa pompa beroperasi di luar rentang operasi yang diizinkan atau bahwa motor mengalami beban lebih.

Tanpa data arus motor, frekuensi operasi, temperatur motor, serta titik operasi pompa yang tersinkronisasi berdasarkan waktu, peningkatan laju fluida total maupun tingginya *water cut* belum dapat membuktikan terjadinya beban lebih, panas berlebih (*overheating*), atau degradasi isolasi.

Identifikasi Gangguan Kelistrikan

Laporan *troubleshooting* mencatat bahwa penghentian operasi terjadi pada pukul 11.48 tanggal 4 Januari 2026 dengan indikasi *HI Current*. Kegiatan *troubleshooting* di lapangan juga mencatat adanya alarm *overload*.

Arus tinggi merupakan indikasi operasional, bukan identifikasi gangguan yang mengawali kegagalan. Sistem proteksi ESP dapat merespons berbagai kondisi abnormal, termasuk arus lebih dan tegangan suplai yang tidak normal [15], [17].

UNESA Universitas Negeri Surabaya

Tabel 3. Bukti operasional dan kelistrikan yang terdokumentasi

Tahapan	Bukti yang tercatat	Batasan interpretasi
Periode operasi	Alarm *Low Supply Voltage*, *High Supply Voltage*, *Current Overload*, *Lockout*, dan *Stall* muncul pada log pengendali.	Urutan alarm sesaat sebelum penghentian operasi belum diketahui.
4 Januari 2026, pukul 11.48	ESP berhenti dengan indikasi *HI Current*. Alarm *overload* tercatat saat *troubleshooting* di lapangan.	Indikasi tersebut tidak mengidentifikasi gangguan awal.
Setelah penghentian operasi	AB, BC, dan CA masing-masing sekitar 1,0 Ω. AG, BG, dan CG masing-masing sekitar 0 MΩ.	Hasil pengukuran menggambarkan kondisi rangkaian setelah penghentian operasi, bukan kondisi sesaat sebelum kejadian.

Pola arus dan tegangan dapat mendukung proses diagnosis apabila tersedia dalam bentuk catatan operasi yang dilengkapi penanda waktu (*timestamp*) [4], [14].

Dalam kasus ini, catatan yang tersedia tidak menyediakan deret waktu arus, tegangan, dan frekuensi sebelum penghentian operasi yang dapat dianalisis. Indikasi arus tinggi dan hasil pengukuran *zero-meg* setelahnya telah terdokumentasi, tetapi data tersebut belum dapat menentukan perubahan kondisi kelistrikan yang terjadi terlebih dahulu.

Nilai resistansi antarfasa yang telah dibulatkan menunjukkan kondisi yang relatif seimbang. Namun, nilai tersebut tidak mendukung estimasi deviasi secara presisi maupun mengesampingkan kemungkinan gangguan isolasi antarlilitan [7].

Hasil pengukuran *zero-meg* merupakan bukti utama yang mendukung adanya gangguan fasa ke tanah pada rangkaian yang diuji [6].

Apabila ketiga fasa masih saling terhubung melalui belitan motor, hasil pembacaan mendekati nol pada ketiga pasangan fasa ke tanah tidak secara independen membuktikan adanya tiga gangguan yang terpisah.

Hasil pengukuran tersebut juga belum dapat mengidentifikasi apakah gangguan awal terjadi pada belitan motor, *pothead*, MLE, kabel daya utama, atau sambungan listrik lainnya.

Analisis Penyebab Kegagalan

Inspeksi pascapengangkatan memberikan bukti tambahan untuk mengevaluasi kemungkinan penyebab kegagalan dari aspek kelistrikan dan mekanik.

Hasil inspeksi menunjukkan bahwa pompa dan motor dapat berputar bebas, terdapat material asing (*debris*) pada bagian *intake*, serta fluida di dalam motor dan *protector* berwarna hitam dan tampak berair.

Tabel 4. Ringkasan hasil inspeksi pascapengangkatan ESP

Komponen	Hasil inspeksi	Interpretasi
Pompa	Dapat berputar bebas	Tidak ditemukan kondisi penguncian mekanis yang menetap saat inspeksi.
Motor	Dapat berputar bebas	Tidak ditemukan kondisi rotor terkunci yang menetap saat inspeksi.
Intake	Terdapat material asing (*debris*)	Pengaruhnya terhadap beban operasi sebelum penghentian belum diketahui.
Protector	Fluida berwarna hitam dan tampak berair	Pengamatan visual; integritas seal dan komposisi fluida belum diketahui.
Motor	Fluida berwarna hitam dan tampak berair	Pengamatan visual; kadar air dan kekuatan dielektrik tidak tercatat dalam data pengukuran yang tersedia.

Kemampuan pompa dan motor untuk berputar bebas setelah pengangkatan tidak mendukung adanya penguncian mekanis yang menetap. Namun, kondisi tersebut tidak mengesampingkan kemungkinan adanya gangguan mekanis sementara selama operasi.

Tampilan fluida tersebut menunjukkan perlunya pemeriksaan lebih lanjut terhadap fluida internal dan sistem penyekatan.

Meskipun kelembapan atau kontaminasi dapat memengaruhi kinerja isolasi [5], catatan yang tersedia belum dapat memastikan kadar air, kekuatan dielektrik, kondisi seal, jalur masuknya fluida, maupun hubungan sebab-akibat antara tampilan fluida dan gangguan kelistrikan.

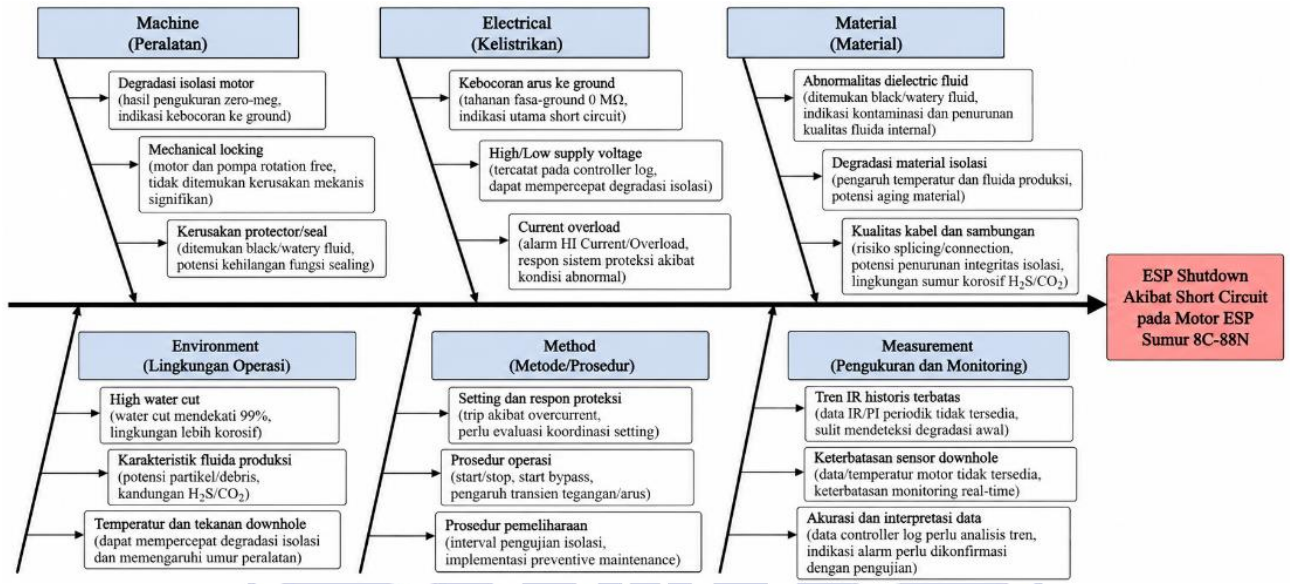
Oleh karena itu, infiltrasi air (*water ingress*) masih merupakan hipotesis yang belum terverifikasi. Pengujian dengan mengisolasi setiap komponen dan catatan pembongkaran diperlukan untuk membedakan kemungkinan lokasi kegagalan [11], [13], [18].

Analisis Akar Penyebab (Root Cause Analysis)

Analisis menggunakan diagram *fishbone* mengelompokkan hasil pengamatan dan hipotesis ke dalam kategori mesin (*Machine*), kelistrikan (*Electrical*), material (*Material*), lingkungan (*Environment*), metode (*Method*), pengukuran (*Measurement*), dan personel (*Personnel*).

Kategori tersebut digunakan untuk mengorganisasikan bukti, bukan untuk menentukan peringkat penyebab kegagalan.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 merupakan diagram fishbone penelitian.



Gambar 1. Diagram *Fishbone*

Hasil pengukuran *zero-meg* merupakan hasil pengukuran utama yang mendukung mode gangguan yang didiagnosis. Namun, hasil tersebut tidak menetapkan faktor kelistrikan atau mesin sebagai kategori penyebab yang dominan.

Kondisi putaran bebas dan keberadaan material asing pada *intake* diamati setelah pengangkatan ESP. Hubungan antara kondisi tersebut dan beban saat penghentian operasi belum dapat ditentukan.

Tampilan fluida internal dan tingginya *water cut* tidak membuktikan adanya mekanisme infiltrasi fluida. Pengaturan proteksi, prosedur, serta praktik kerja personel belum dapat dievaluasi sebagai faktor penyebab yang berkontribusi terhadap kegagalan.

Tidak lengkapan data pengukuran dan tren operasi merupakan keterbatasan diagnosis, bukan penyebab fisik kegagalan yang telah terbukti.

Pemisahan antara hasil pengamatan dan hipotesis tersebut sesuai dengan peran RCA dan bukti pembongkaran dalam investigasi kegagalan ESP [10]–[12].

FTA kualitatif pada Gambar 2 membahas kemungkinan lokasi jalur isolasi yang mengalami gangguan, bukan penyebab atau waktu terjadinya penghentian operasi.

Kejadian puncak (*top event*) adalah hilangnya integritas isolasi fasa ke tanah pada rangkaian yang diuji setelah penghentian operasi. Kedua kejadian antara (*intermediate event*) dan kejadian dasarnya (*basic event*) dihubungkan menggunakan gerbang OR.

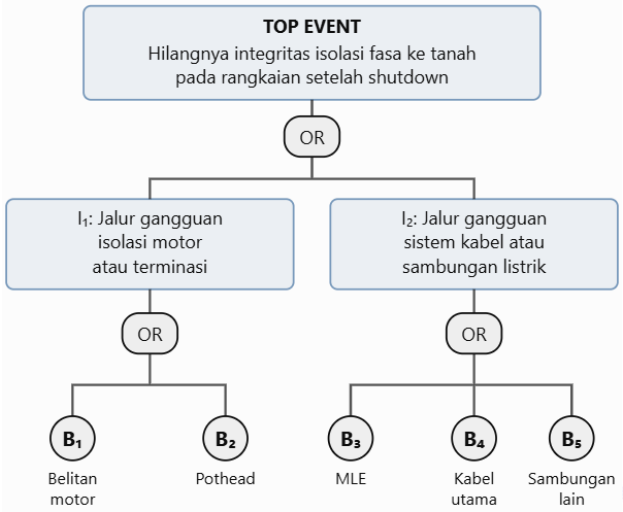
Setiap kejadian dasar merupakan hipotesis yang berlaku dengan syarat bahwa komponen terkait masih terhubung selama pengujian.

Gerbang OR menunjukkan bahwa satu atau lebih alternatif kejadian dasar dapat menyebabkan kejadian puncak. Gerbang tersebut tidak mengidentifikasi komponen yang telah dipastikan mengalami kegagalan maupun menetapkan urutan kejadian secara kronologis. Tabel 5 memisahkan dampak operasional dari bukti diagnostik.

Tabel 5. Klasifikasi hasil temuan kegagalan

Parameter	Hasil
Dampak kegagalan (*Failure effect*)	Penghentian operasi ESP
Indikasi kegagalan (*Failure indication*)	Arus tinggi / *overload*
Mode kegagalan (*Failure mode*)	Gangguan fasa ke tanah / *zero-meg*
Mekanisme kegagalan (*Failure mechanism*)	Hilangnya integritas isolasi

UNESA Universitas Negeri Surabaya



Gambar 2. Diagram pohon kesalahan kualitatif untuk alternatif lokasi kegagalan isolasi fasa ke tanah

Dampak terhadap Produksi dan Upaya Mitigasi

Gangguan kelistrikan pada sistem ESP di Sumur 8C-88N menyebabkan terhentinya proses pengangkatan buatan sehingga mengganggu kemampuan sumur dalam mengangkat fluida ke permukaan.

Selain mengganggu produksi, penghentian operasi tersebut diikuti dengan kegiatan *troubleshooting*, pengangkatan pompa, dan inspeksi. Kegagalan tersebut juga dapat memerlukan penggantian dan pemasangan ulang peralatan sehingga memengaruhi ketersediaan peralatan serta kontinuitas operasi sumur.

Catatan yang tersedia belum dapat memastikan waktu dimulainya kembali produksi yang stabil maupun menyediakan data laju produksi minyak acuan yang telah terverifikasi. Oleh karena itu, durasi penghentian operasi (*downtime*) aktual dan volume produksi minyak yang tertunda (*deferred oil production*) belum dapat dihitung.

Salah satu tindakan mitigasi utama adalah melakukan pengujian resistansi isolasi sebelum instalasi dan setiap kali terdapat indikasi gangguan kelistrikan.

Hasil pengukuran sebelum instalasi perlu didokumentasikan sebagai data acuan (*baseline*) untuk dibandingkan dengan hasil pengukuran berikutnya. IEEE Std 43-2013 [6] memberikan pedoman mengenai pengujian resistansi isolasi pada mesin listrik.

Apabila ditemukan hasil pengukuran *zero-meg*, kegiatan *troubleshooting* perlu dilakukan secara bertahap dengan mengisolasi bagian-bagian sistem kelistrikan yang relevan, mulai dari pengendali dan *junction box*, sambungan kepala sumur (*wellhead connection*), kabel daya utama, MLE, *pothead*, hingga motor.

Pendekatan tersebut membantu membedakan gangguan isolasi motor dari gangguan yang terjadi pada kabel, sambungan kabel, atau terminasi [13].

Protector dan sistem penyekatan juga perlu diperiksa karena fluida internal ditemukan berwarna hitam dan tampak berair setelah pengangkatan ESP.

Pemeriksaan lanjutan perlu mencakup kondisi seal, elastomer, oli internal, serta kemungkinan jalur masuknya fluida. Tampilan fluida saja tidak dapat mengonfirmasi adanya kontaminasi, kegagalan seal, atau infiltrasi air.

Kontaminasi internal masih merupakan faktor potensial yang dapat berkontribusi terhadap kegagalan hingga dilakukan pembongkaran dan pengujian lebih lanjut.

Catatan pengendali perlu dianalisis dalam bentuk tren yang dilengkapi penanda waktu, bukan hanya berdasarkan alarm terakhir sebelum penghentian operasi.

Evaluasi data arus, tegangan, dan frekuensi yang dikaitkan dengan waktu munculnya alarm dan kejadian *trip* dapat membantu merekonstruksi perkembangan kondisi operasi yang tidak normal.

Pemantauan tersebut dapat mendukung peningkatan keandalan ESP dan memperpanjang umur operasinya [4], [14], [23].

Hasil pengangkatan dan pembongkaran ESP perlu didokumentasikan bersama dengan umur operasi, riwayat operasi, hasil pengukuran kelistrikan, serta alarm pengendali.

Pengintegrasian berbagai catatan tersebut dapat membantu membangun basis data kegagalan dan mendukung penerapan pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) pada instalasi ESP berikutnya [22], [23].

Kasus Sumur 8C-88N menunjukkan bahwa satu alarm saja tidak cukup untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan. Diagnosis harus membedakan indikasi operasional, hasil pengukuran kelistrikan setelah penghentian operasi, dan hasil pengamatan setelah pengangkatan ESP.

Bukti yang tersedia paling sesuai dengan karakteristik gangguan isolasi fasa ke tanah pada rangkaian yang diuji. Namun, bukti tersebut belum dapat mengidentifikasi komponen tempat gangguan bermula maupun membuktikan bahwa kontaminasi internal berkontribusi terhadap kegagalan.

PENUTUP

Simpulan

Electrical Submersible Pump (ESP) di Sumur 8C-88N mengalami penghentian operasi pada 4 Januari 2026 dengan indikasi arus tinggi dan alarm beban lebih (*overload*).

Hasil pengukuran setelah penghentian operasi menunjukkan resistansi antarfasa yang relatif seimbang, yaitu sekitar 1,0 Ω, serta resistansi isolasi fasa ke tanah sekitar 0 MΩ (*zero-meg*). Hasil tersebut paling sesuai dengan karakteristik gangguan fasa ke tanah pada

rangkaian yang diuji. Namun, hasil pengukuran tersebut belum dapat mengidentifikasi komponen tempat gangguan bermula maupun membuktikan bahwa hilangnya integritas isolasi terjadi sebelum munculnya alarm *overload*. Pompa dan motor dapat berputar bebas setelah pengangkatan sehingga tidak ditemukan bukti adanya penguncian mekanis yang menetap pada saat inspeksi. Fluida berwarna hitam dan tampak berair yang ditemukan pada motor dan *protector* belum dapat mengonfirmasi adanya infiltrasi air maupun membuktikan hubungan sebab-akibat dengan gangguan kelistrikan. ESP yang telah mengalami *upsizing* beroperasi selama kurang lebih 75 hari kalender, dibandingkan dengan 961 hari operasi yang tercatat pada unit sebelumnya. Perbedaan tersebut saja tidak membuktikan bahwa *upsizing* merupakan penyebab kegagalan. Penghentian operasi menyebabkan terganggunya proses pengangkatan fluida menggunakan ESP. Namun, catatan yang tersedia belum mencukupi untuk menghitung durasi penghentian operasi maupun volume produksi minyak yang tertunda.

Saran

Untuk kejadian *zero-meg* pada masa mendatang, pengukuran resistansi isolasi perlu dilakukan terhadap motor, MLE, *pothead*, kabel daya utama, serta sambungan listrik terkait setelah setiap komponen diisolasi secara kelistrikan. Informasi mengenai alat ukur, tegangan dan durasi pengujian, titik pengujian, referensi pembumian, temperatur, serta konfigurasi rangkaian perlu didokumentasikan agar hasil pengukuran dapat diinterpretasikan dan dibandingkan dengan hasil pengukuran sebelum instalasi. Data arus, tegangan, dan frekuensi yang dilengkapi penanda waktu perlu disinkronisasikan dengan alarm pengendali dan kejadian *trip* untuk merekonstruksi urutan kejadian sebelum penghentian operasi. Selama proses pembongkaran, seal dan elastomer pada *protector* perlu diperiksa. Kadar air dan kekuatan dielektrik fluida internal juga perlu diukur untuk mengevaluasi kemungkinan kontaminasi atau infiltrasi air. Waktu penghentian operasi, waktu dimulainya kembali produksi yang stabil, serta laju produksi minyak acuan dan aktual perlu dicatat untuk menghitung durasi *downtime* dan memperkirakan volume produksi minyak yang tertunda.

DAFTAR PUSTAKA

[1] G. Takacs, *Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations, and Maintenance*, 2nd ed. Gulf Professional Publishing, 2018.

[2] B. L. Wilson, *Electrical Submersible Pump Analysis and Design*, SPE Textbook Series, vol. 17. Society of Petroleum Engineers, 2012.

[3] A. Mubarak and H. Purwanto, “Analisis keandalan sistem Electrical Submersible Pump (ESP) menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) di lapangan minyak Kalimantan,” Jurnal Teknik Mesin dan Elektro, vol. 8, no. 2, pp. 101–113, 2020.

[4] M. Hagan and B. Petersen, “ESP system monitoring and surveillance: Best practices for maximizing run life in high-temperature environments,” Society of Petroleum Engineers, SPE-197087-MS, 2019.

[5] A. M. Berd and J. M. Guichon, “Insulation failure mechanisms in submersible motors operating under sour conditions: A laboratory investigation,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 4, pp. 3872–3881, 2018.

[6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*, IEEE Std 43-2013, 2013.

[7] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for AC Rotating Electric Machines*, IEEE Std 522-2004, 2004.

[8] S. Handayani and B. W. Susanto, “Identifikasi jenis dan frekuensi kegagalan motor Electrical Submersible Pump (ESP) di lapangan minyak Indonesia,” in Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro 2020, pp. 112–121, 2020.

[9] R. Kurniawan and T. Suhendra, “Analisis kegagalan isolasi stator motor ESP menggunakan metode thermal imaging dan polarization index di lapangan minyak Riau,” ELECTRICIAN – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro, vol. 15, no. 1, pp. 45–55, 2021.

[10] M. F. Hidayat, A. B. Santoso, and R. D. Permana, “Penerapan root cause analysis (RCA) pada kegagalan motor ESP di lapangan minyak Pertamina EP: Studi kasus sumur high water cut,” Jurnal Energi dan Kelistrikan, vol. 14, no. 1, pp. 32–44, 2022.

[11] B. J. Kelley and R. D. Sherrill, “Diagnosis of motor failures from ESP teardown data: A statistical approach to root cause identification,” SPE Production & Operations, vol. 33, no. 3, pp. 589–600, 2018.

[12] H. Dunlap and E. Villamizar, “Comprehensive analysis of short circuit failures in ESP motors: Case studies and lessons learned from Latin American oil fields,” Journal of Petroleum Technology, vol. 72, no. 5, pp. 44–52, 2020.

[13] D. Firmansyah and A. Gunawan, “Evaluasi kualitas splicing kabel power ESP dan pengaruhnya terhadap keandalan sistem di lapangan minyak Kalimantan Timur,” Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer, vol. 10, no. 1, pp. 45–54, 2022.

UNESA Universitas Negeri Surabaya

[14] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, 2001.

[15] S. Vempati and B. Rapp, "Variable speed drive application and its effect on ESP system reliability: Field evidence from deepwater installations," Society of Petroleum Engineers, SPE-190050-MS, 2018.

[16] R. K. Yin, *Case Study Research and Applications: Design and Methods*, 6th ed. SAGE Publications, 2018.

[17] American Petroleum Institute, *Recommended Practice for the Operation, Maintenance, Surveillance, and Troubleshooting of Electric Submersible Pump Installations*, API RP 11S, 4th ed., 2015.

[18] American Petroleum Institute, *Electric Submersible Pump Teardown Report*, API RP 11S1, 3rd ed., 2013.

[19] International Electrotechnical Commission, *Rotating Electrical Machines—Part 1: Rating and Performance*, IEC 60034-1, 2022.

[20] National Electrical Manufacturers Association, *Motors and Generators*, NEMA MG-1, 22nd ed., 2021.

[21] American Petroleum Institute, *Recommended Practice for Sizing and Selection of Electric Submersible Pump Installations*, API RP 11S4, 2nd ed., 2002.

[22] M. A. Usman, J. O. Ojo, and P. I. Obi, "Failure mode and effect analysis (FMEA) of electrical submersible pump in oil production: A quantitative approach," International Journal of Engineering Research and Technology, vol. 11, no. 3, pp. 501–512, 2022.

[23] H. Pham and M. H. Tran, "Condition-based maintenance framework for ESP systems: Integration of real-time data, predictive analytics, and reliability engineering," Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 198, Art. no. 108178, 2021.

UNESA Universitas Negeri Surabaya