

ANALISA AKIBAT *UNDER VOLTAGE* PADA MOTOR ESP DI AREA TIGA MINAS PT PERTAMINA HULU ROKAN

Andika Vanhoten

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning, Kota Pekanbaru
andikavanhoten1985@gmail.com

Monice

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning, Kota Pekanbaru
monice@gmail.com

Abstrak

Electric Submersible Pump (ESP) banyak digunakan sebagai metode artificial lift pada operasi produksi PT Pertamina Hulu Rokan (PHR) di Area Tiga Minas. Gangguan tegangan rendah pada sistem kelistrikan ESP tercatat berulang dan menyebabkan motor berhenti beroperasi. Penelitian ini menganalisis frekuensi, pola waktu, dan dampak gangguan tersebut terhadap motor ESP sumur 5C-58N, serta mengevaluasi kinerja setting proteksi yang diterapkan. Metode yang digunakan bersifat deskriptif-kuantitatif dengan data sekunder berupa log historis controller ESP periode 1 Maret–9 Oktober 2025 (500 rekaman event). Hasil penelitian menunjukkan 25 kali motor mengalami shutdown akibat gangguan tegangan (14 Undervolt Shutdown dan 11 Low Supply Voltage Shutdown), dengan konsentrasi tertinggi pada Juli–Agustus 2025 (76 dan 75 event). Median downtime otomatis per siklus trip adalah 30 menit, meskipun beberapa kejadian menyebabkan downtime yang jauh lebih panjang akibat lockout berulang. Gangguan ini juga beririsan dengan proteksi arus lebih dan stall saat restart motor. Sistem proteksi terbukti bekerja sesuai setting, namun frekuensi kejadian yang tinggi mengindikasikan perlunya investigasi kestabilan tegangan pada jaringan suplai di Area Tiga Minas.

Kata Kunci: Deferred Production, Downtime, Kualitas Daya, Proteksi Kelistrikan, Restart Otomatis, Sumur Minyak.

Abstract

The Electric Submersible Pump (ESP) is widely used as an artificial lift method in the production operations of PT Pertamina Hulu Rokan (PHR) in the Tiga Minas Area. Low-voltage disturbances in the ESP electrical system were recorded repeatedly and caused the motor to stop operating. This study analyzes the frequency, temporal pattern, and impact of these disturbances on the ESP motor at well 5C-58N, and evaluates the performance of the applied protection settings. A descriptive-quantitative method was used with secondary data from the ESP controller's historical event log covering 1 March–9 October 2025 (500 recorded events). The results show 25 motor shutdowns caused by voltage disturbances (14 Undervolt Shutdown and 11 Low Supply Voltage Shutdown events), with the highest concentration in July–August 2025 (76 and 75 events). The median automatic downtime per trip cycle was 30 minutes, although several events resulted in substantially longer downtime due to repeated lockouts. These disturbances also coincided with overload and stall protection during motor restart. The protection system proved to operate as configured, but the high event frequency indicates the need for further investigation into supply voltage stability in the Tiga Minas Area electrical network.

Keywords: Auto-Restart, Deferred Production, Downtime, Electrical Protection, Oil Well, Power Quality.

PENDAHULUAN

Electric Submersible Pump (ESP) merupakan metode artificial lift yang paling banyak digunakan pada industri hulu minyak dan gas bumi untuk mengangkat fluida dari dasar sumur ke permukaan, termasuk pada operasi PT Pertamina Hulu Rokan (PHR) di Area Tiga Minas. Sistem ESP terdiri atas motor induksi bawah permukaan, seal section, pompa bertingkat (multistage centrifugal pump), kabel daya, serta switchboard/Variable Speed Drive (VSD) di permukaan yang berfungsi mengatur dan melindungi motor dari gangguan kelistrikan (lihat Gambar 1). Sebagai metode artificial lift yang mengandalkan pasokan listrik secara terus-menerus dari permukaan hingga kedalaman ribuan kaki di bawah

tanah, keandalan operasi ESP sangat bergantung pada kestabilan tegangan yang diterima motor sepanjang lintasan kabel daya. Al-Hejjaj dkk. [1] dalam kajian perkembangan teknologi ESP menegaskan bahwa keandalan kelistrikan permukaan merupakan salah satu faktor penentu utama keberhasilan operasi ESP di sumur minyak.



Gambar 1 Foto Komponen Fisik ESP (Pump 400 Series, Motor 562 Series Maximus, Protector 540 Series, Gas Separator) — Dokumentasi Lapangan

Salah satu gangguan operasional yang kerap dijumpai pada sistem kelistrikan ESP adalah kondisi under voltage, yaitu penurunan tegangan suplai di bawah nilai nominal yang telah ditetapkan. Kondisi ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor pada sisi jaringan distribusi listrik, seperti pembebanan yang tidak merata, gangguan pada peralatan transmisi/distribusi, maupun fluktuasi pembangkitan. Motor induksi tiga fasa bekerja berdasarkan prinsip di mana torsi yang dihasilkan berbanding lurus dengan kuadrat tegangan suplai ($T \propto V^2$); dengan demikian, penurunan tegangan sebesar 10% dari nominal secara teoretis dapat menyebabkan penurunan torsi maksimum hingga sekitar 19% ($1 - 0,9^2$), dan penurunan tegangan 20% dapat menurunkan torsi hingga 36%. Implikasinya, pada beban mekanis pompa yang relatif konstan, penurunan torsi yang tersedia memaksa motor bekerja mendekati atau melewati batas kemampuannya, yang pada gilirannya memicu kenaikan arus (slip) untuk mengimbangi kebutuhan torsi beban.

Apabila tegangan menurun sementara beban mekanis relatif tetap, motor akan menarik arus yang lebih besar untuk mempertahankan daya keluaran yang dibutuhkan. Diantoro, Nugroho, dan Nugroho [2] melalui simulasi MATLAB Simulink menunjukkan bahwa perubahan tegangan dan frekuensi suplai berpengaruh signifikan terhadap efisiensi motor induksi tiga fasa. Hafis dkk. [3] melalui simulasi menunjukkan bahwa ketidakseimbangan tegangan pada motor induksi tiga fasa menyebabkan ketidakseimbangan arus antar fasa, yang berpotensi meningkatkan rugi-rugi dan pemanasan pada belitan motor. Sartika, Prasetya, dan Nicholas [4] turut menunjukkan bahwa penyimpangan kondisi kelistrikan dari titik operasi nominal berkontribusi terhadap penurunan efisiensi motor induksi pada aplikasi industri, sedangkan Yuvendius [5] menemukan pola serupa pada motor penggerak pompa vakum di lingkungan industri manufaktur. Rizqi [6] turut menunjukkan bahwa besaran daya dan efisiensi motor induksi tiga fasa sangat

dipengaruhi oleh kestabilan parameter kelistrikan pada aplikasi mesin penggerak industri, sejalan dengan temuan Apribowo dkk. [7] yang menekankan pentingnya menjaga voltage drop pada instalasi kelistrikan di bawah ambang batas standar agar tidak menimbulkan kerugian daya.

Habib dan Zakri [8] menganalisis voltage drop dan power losses pada instalasi motor ESP dan menunjukkan bahwa kualitas tegangan pada sistem kelistrikan ESP perlu memenuhi standar IEEE 141-1993 (voltage drop di bawah 5%) agar tidak menimbulkan kerugian daya dan risiko gangguan operasi. Lingom dkk. [9] mengkaji kualitas daya pada sistem ESP yang disuplai oleh Variable Frequency Drive dan menunjukkan bahwa topologi VFD dapat menimbulkan harmonisa yang memengaruhi kestabilan tegangan dan arus motor. Lyakhomskii dkk. [10] turut menegaskan bahwa harmonisa pada instalasi ESP berkontribusi terhadap kerugian daya tambahan yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan kelistrikan. Mahmud [11] melalui evaluasi kegagalan ESP pada berbagai kondisi operasi lapangan menemukan bahwa gangguan pada sisi kelistrikan merupakan salah satu kontributor signifikan terhadap downtime dan kegagalan operasi ESP, di samping faktor mekanis, sementara Rahman dan Kartohardjono [12] mengevaluasi efisiensi berbagai jenis motor ESP pada lapangan minyak lepas pantai di Indonesia. Pada level studi kasus lapangan, Gibran dkk. [13] menganalisis sensitivitas frekuensi motor ESP terhadap produksi sumur AZ-28, dan Abhista, Wicaksono, dan Rosiani [14] mengevaluasi kinerja ESP pada sumur LAN menggunakan nodal analysis; kedua studi tersebut menegaskan pentingnya pemantauan parameter operasi ESP secara berkelanjutan untuk menjaga produktivitas sumur.

Berbeda dari penelitian-penelitian terdahulu yang umumnya menganalisis dampak under voltage terhadap motor induksi melalui pendekatan simulasi ([2], [3]) atau pengukuran kualitas daya secara langsung pada satu titik waktu ([9], [7]), penelitian ini menawarkan pendekatan yang berbeda, yaitu analisis kuantitatif terhadap log historis event controller ESP dalam rentang waktu operasional nyata (± 7 bulan, 500 rekaman event). Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola waktu (temporal pattern), estimasi downtime aktual, serta keterkaitan antar-jenis proteksi (under voltage, stall, overload) berdasarkan data operasi riil di lapangan, yang belum banyak dieksplorasi pada studi ESP maupun motor induksi industri lainnya. Kontribusi utama penelitian ini adalah menunjukkan bahwa data log controller yang secara rutin tersimpan namun jarang dianalisis secara sistematis dapat menjadi sumber informasi bernilai tinggi untuk mendiagnosis gangguan kelistrikan pada sistem ESP tanpa memerlukan instrumentasi tambahan.

Berdasarkan hasil observasi awal terhadap data log historis controller ESP pada sumur 5C-58N di Area Tiga Minas selama periode Maret hingga Oktober 2025, tercatat sejumlah kejadian under voltage yang berulang dan menyebabkan motor mengalami shutdown, yang berpotensi menurunkan produktivitas sumur akibat terhentinya proses pengangkatan fluida. Selain menyebabkan hilangnya waktu produksi secara langsung, siklus trip dan restart yang berulang juga berpotensi mempercepat keausan komponen elektromekanis motor, seperti bearing dan sistem kontaktor, serta menambah beban kerja tim operasi lapangan yang harus memantau dan menindaklanjuti setiap

kejadian alarm maupun lockout. Kondisi ini melatarbelakangi perlunya suatu kajian yang menganalisis secara sistematis frekuensi, pola, dan dampak kejadian under voltage tersebut terhadap operasi motor ESP.

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah: (1) seberapa sering dan bagaimana pola waktu kejadian under voltage pada motor ESP sumur 5C-58N; (2) bagaimana dampak kejadian tersebut terhadap kondisi operasional motor, termasuk keterkaitannya dengan proteksi overload dan stall; serta (3) bagaimana efektivitas setting proteksi bertingkat (graded protection) yang telah diterapkan. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis frekuensi dan pola waktu kejadian under voltage, menganalisis dampaknya terhadap kondisi operasional motor ESP, serta mengevaluasi efektivitas setting proteksi under voltage pada motor controller ESP eksisting. Penelitian ini dibatasi pada studi kasus satu unit motor ESP (sumur 5C-58N) dengan data log historis periode 1 Maret–9 Oktober 2025, dan tidak mencakup pengukuran langsung terhadap kualitas daya pada sisi jaringan distribusi listrik eksternal, sehingga analisis penyebab pada sisi hulu jaringan bersifat indikatif dan memerlukan verifikasi lanjutan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kuantitatif mengenai frekuensi dan dampak under voltage pada motor ESP, serta menjadi bahan pertimbangan dalam evaluasi sistem kelistrikan maupun strategi perawatan (maintenance) ESP di Area Tiga Minas.

Motor controller/Variable Speed Drive (VSD) ESP modern umumnya dilengkapi dengan berbagai parameter proteksi yang dapat dikonfigurasi, antara lain proteksi tegangan rendah dan tinggi (Lo Volts/Hi Volts), proteksi suplai daya kontrol (Lo/Hi Supply), ketidakseimbangan tegangan (Voltage Unbalance), arus lebih (Overload), stall, serta hubung singkat (Short Circuit). Setiap parameter dilengkapi nilai setpoint dan trip time yang menentukan seberapa cepat sistem memutuskan suplai motor apabila kondisi abnormal terdeteksi, serta pengaturan restart otomatis (restart delay dan jumlah percobaan restart) sebelum sistem masuk ke kondisi lockout yang memerlukan intervensi manual. Skema ini umumnya disusun secara bertingkat (graded protection): semakin dalam penyimpangan tegangan dari nilai nominal, semakin cepat waktu trip yang diterapkan, sebagai upaya mencegah kerusakan motor akibat kondisi tegangan ekstrem sekaligus meminimalkan gangguan produksi akibat trip yang tidak perlu pada penyimpangan tegangan ringan dan sesaat.

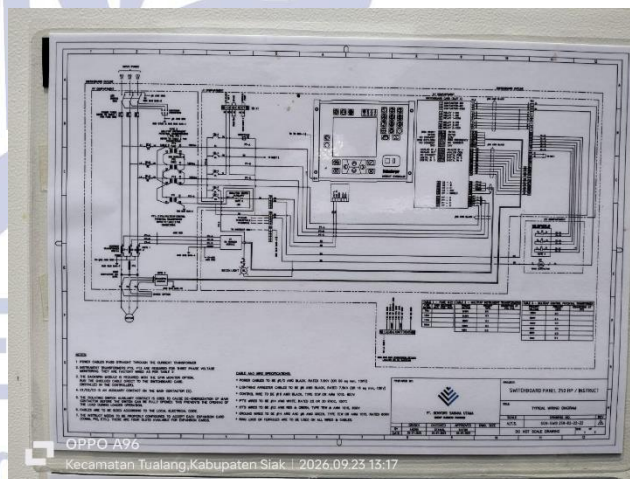
Penurunan tegangan pada sistem kelistrikan ESP dapat bersumber dari berbagai faktor, baik pada sisi hilir (peralatan ESP itu sendiri, seperti rugi-rugi pada kabel daya yang panjang) maupun pada sisi hulu (jaringan distribusi/pembangkitan yang menyuplai lapangan). Pada lapangan minyak yang tersebar luas seperti Area Tiga Minas, umumnya satu jaringan distribusi atau generator set menyuplai listrik untuk banyak sumur ESP sekaligus, sehingga gangguan pada satu titik jaringan berpotensi memengaruhi tegangan suplai secara bersamaan pada beberapa sumur. Secara akademik, penelitian ini memberikan kontribusi berupa metode analisis kuantitatif berbasis log historis controller yang dapat direplikasi untuk sumur ESP lain, sedangkan secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi tim

operasi dan pemeliharaan kelistrikan PHR dalam memprioritaskan investigasi dan perbaikan pada sumber gangguan tegangan yang paling signifikan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan mengambil studi kasus pada motor ESP sumur 5C-58N yang berlokasi di Area Tiga Minas, PT Pertamina Hulu Rokan (PHR), dengan periode data 1 Maret 2025 hingga 9 Oktober 2025. Penelitian menggunakan metode deskriptif-kuantitatif dengan data sekunder yang terdiri atas: (1) log historis event controller ESP berjumlah 500 rekaman event, memuat catatan waktu kejadian (timestamp) dan jenis event seperti Undervolt Alarm, Undervolt Shutdown, Low Supply Voltage Alarm/Shutdown, Voltage Unbalance, Overload, Stall, Underload, Contactor On/Off, Manual Off, dan Lockout; serta (2) data konfigurasi setting proteksi pada motor controller ESP, meliputi setting Lo Volts/Hi Volts, Lo/Hi Supply, Voltage Unbalance, Stall, Short Circuit, dan Overload/Underload. Jumlah 500 rekaman event merupakan seluruh data yang berhasil diekspor dari controller pada saat pengambilan data; tidak ditemukan penanda eksplisit (seperti event "Clear Logs" atau indikasi kapasitas memori penuh) pada rekaman tersebut, sehingga tidak dapat dipastikan secara pasti apakah 500 rekaman ini adalah keseluruhan histori sejak commissioning atau dibatasi oleh kapasitas ekspor/memori controller.

Sebagai dokumentasi pendukung, Gambar 2 menampilkan diagram pengawatan (wiring diagram) aktual switchboard panel 250 HP yang menaungi motor controller ESP sumur 5C-58N, menunjukkan integrasi antara instrument transformer, motor controller (UniLert), kontaktor utama, dan relai proteksi yang menjadi dasar seluruh setting proteksi pada Tabel 1 dan Tabel 2.



Gambar 2 Diagram Pengawatan Switchboard Panel 250 HP (Dokumentasi Aktual)

Analisis data dilakukan melalui tahapan: (1) kategorisasi event log ke dalam kelompok shutdown akibat under voltage, alarm tanpa shutdown, kejadian momenter, voltage unbalance, proteksi ikutan (overload, stall, underload), dan shutdown non-tegangan (manual off); (2) rekapitulasi frekuensi kejadian secara keseluruhan, per bulan, dan per hari (untuk mengakomodasi jumlah hari yang tidak sama pada setiap bulan, terutama Oktober 2025 yang hanya mencakup 9 hari); (3) estimasi downtime setiap siklus trip dengan memasang waktu event "Contactor Off" dengan "Contactor On" berikutnya secara presisi

menggunakan pencocokan timestamp, sekaligus mengidentifikasi penyebab setiap Contactor Off berdasarkan event yang memiliki timestamp identik (Undervolt/Low Supply Voltage Shutdown, Lockout, atau Manual Off); (4) identifikasi keterkaitan waktu antara kejadian under voltage dengan proteksi ikutan, dihitung sebagai persentase kejadian Overload/Stall/Underload yang memiliki timestamp identik dengan event "Contactor On"; dan (5) pembahasan hasil analisis dikaitkan dengan teori kelistrikan motor induksi dan standar proteksi yang berlaku.

Landasan teori utama yang digunakan adalah hubungan antara tegangan, arus, dan daya pada motor induksi tiga fasa, yang secara umum dinyatakan pada Persamaan (1):

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan: P = daya motor (watt)
V = tegangan fasa-fasa (volt)
I = arus motor (ampere)
 $\cos \phi$ = faktor daya.

Berdasarkan Persamaan (1), pada beban (P) yang relatif tetap, penurunan tegangan (V) akan menyebabkan kenaikan arus (I) untuk mengimbangnya, yang berpotensi meningkatkan rugi-rugi I^2R serta suhu operasi motor. Standar NEMA MG-1 [15] mensyaratkan motor induksi mampu beroperasi pada rentang toleransi tegangan $\pm 10\%$ dari tegangan nominal, di luar rentang tersebut motor berisiko mengalami penurunan kinerja maupun kerusakan bila dioperasikan dalam jangka panjang.

Downtime setiap siklus trip (Persamaan 2) dihitung sebagai selisih waktu langsung antara timestamp "Contactor Off" dan "Contactor On" berikutnya, tanpa memerlukan asumsi tambahan karena kedua data tersebut bersifat riil (aktual) dari log controller:

$$t_{\text{downtime}} = t_{\text{ContactorOn}} - t_{\text{ContactorOff}} \dots (2)$$

Selanjutnya, estimasi kerugian produksi (deferred production) akibat downtime tersebut dihitung dengan Persamaan (3):

$$Q_{\text{hilang}} = (t_{\text{downtime}} \div 24) \times Q_{\text{baseline}} \dots\dots (3)$$

Keterangan: Q_{hilang} = estimasi volume fluida yang hilang (bbl)

t_{downtime} = downtime hasil Persamaan (2) (jam)

Q_{baseline} = asumsi laju produksi harian sumur 5C-58N dalam kondisi normal (BFPD).

Pada penelitian ini, nilai Q_{baseline} ditetapkan sebesar 720 BFPD sebagai nilai ilustratif yang mengacu pada kisaran umum laju produksi sumur ESP sejenis pada lapangan mature, mengingat data produksi harian aktual (Daily Production Report) sumur 5C-58N belum

diperoleh pada saat penelitian dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data konfigurasi controller, parameter proteksi tegangan yang diterapkan pada motor ESP 5C-58N adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Setting Proteksi Tegangan Motor Controller ESP 5C-58N

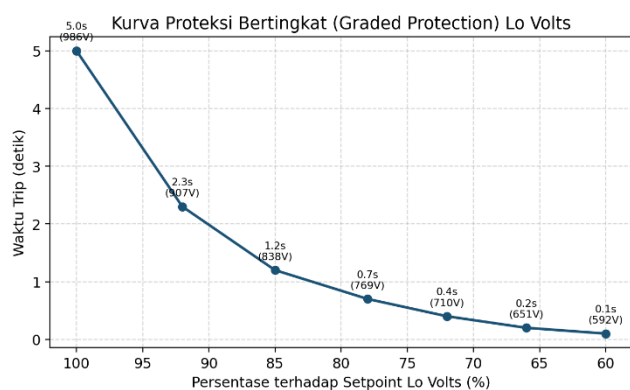
Parameter	Setpoint	Trip Time	Restart / Keterangan
Lo Volts (Undervolt) Trip	986 V	5,0 s	Restart 2×, delay 30 menit
Hi Volts (Overvolt) Trip	1.417 V	5,0 s	Restart 2×, delay 30 menit
Lo Supply Trip	95 V	60,0 s	Restart 2×, delay 10 menit
Hi Supply Trip	120–130 V	60,0 s	Restart 2×, delay 5 menit
Voltage Unbalance Trip	18 %	5,0 s	Restart 1×, delay 30 menit
Motor Stall Trip	269 A	0,2 s	—
Motor Short Circuit Trip	646 A	0,2 s	—

Selain proteksi bertingkat pada nilai absolut, controller juga menerapkan proteksi bertingkat berbasis persentase penurunan tegangan (92%, 85%, 78%, 72%, 66%, dan 60%) dengan waktu trip yang semakin singkat seiring semakin dalamnya penurunan tegangan (dari 2,3 detik pada 92% hingga 0,1 detik pada 60%), sebagai bentuk proteksi bertingkat (graded protection).

Proteksi bertingkat berbasis persentase penurunan tegangan dianalisis lebih lanjut pada Tabel 2 dan divisualisasikan pada Gambar 3:

Tabel 2. Skema Proteksi Bertingkat (Graded Protection) Lo Volts

Tingkat (% dari Setpoint 986 V)	Tegangan (V)	Trip Time (s)
100% (Setpoint dasar)	986,00	5,0
92%	907,12	2,3
85%	838,10	1,2
78%	769,08	0,7
72%	709,92	0,4
66%	650,76	0,2
60%	591,60	0,1



Gambar 3. Kurva Waktu Trip terhadap Persentase Penurunan Tegangan (Graded Protection)

Gambar 3 menunjukkan karakteristik kurva waktu-tegangan berbentuk invers (*inverse-time characteristic*): semakin dalam tegangan turun di bawah Setpoint, semakin singkat waktu yang dibutuhkan sistem untuk memutus motor. Pada penurunan ringan (92% dari Setpoint), sistem masih memberi waktu 2,3 detik sebelum trip — cukup untuk melewati gangguan sesaat (*voltage sag*) tanpa menghentikan operasi motor secara tidak perlu. Sebaliknya, pada penurunan tegangan yang dalam (60% dari Setpoint, setara 591,6 V), sistem memutus motor hampir seketika (0,1 detik) untuk mencegah kerusakan akibat arus berlebih dan pemanasan berlebih yang dapat timbul pada kondisi tegangan sangat rendah. Skema ini secara efektif menyeimbangkan dua kebutuhan yang saling bertentangan: meminimalkan trip yang tidak perlu (*nuisance tripping*) pada gangguan tegangan ringan dan sesaat, sekaligus memberikan proteksi cepat pada kondisi tegangan ekstrem yang berpotensi merusak motor.

Spesifikasi Motor (Data Nameplate Aktual): menindaklanjuti permintaan reviewer, data nameplate motor ESP sumur 5C-58N telah diperoleh langsung dari foto plat data (nameplate) unit terpasang (Gambar 1b) dan dari unit fisik ESP series 562 yang didokumentasikan (Gambar 1a). Nilai arus nominal terpasang pada controller (107,6 A, dari log konfigurasi) berselisih tipis ($\approx 3,5\%$) dari VR Amps nameplate (104 A), mengindikasikan bahwa setting proteksi arus pada controller telah dikonfigurasi mendekati rating nameplate motor — sebuah validasi silang yang memperkuat keandalan data konfigurasi proteksi yang dianalisis pada penelitian ini.



Gambar 1b. Nameplate Motor ESP Sumur 5C-58N (Schlumberger/REDA, Series 562)

Tabel 3. Spesifikasi Motor ESP Sumur 5C-58N

Parameter	Nilai
Series Motor	562 (REDA Maximus)
VR HP (Variable Rating Horsepower)	375 HP
VR Volts (Tegangan Nominal)	2.204 V
VR Amps (Arus Nominal)	104 A
Frekuensi	60 Hz
Kecepatan Putar (RPM)	3.600 RPM
Resistansi Belitan	65 ohm/1000 ft

Perlu dicatat bahwa nilai tegangan pada Setpoint proteksi controller (Tabel 1, 986 V) dan pembacaan tegangan operasional pada layar operator controller (berkisar 1.189–1.196 V pada observasi awal) tidak identik dengan VR Volts nameplate (2.204 V). Selisih ini kemungkinan besar disebabkan oleh penggunaan Potential Transformer (PT) pada sisi pengukuran controller, sebagaimana terlihat pada dokumentasi diagram pengawatan switchboard panel 250 HP milik unit ini yang mencantumkan tabel multitap Control Potential Transformer dengan beberapa pilihan tap tegangan primer (1.500 V, 1.320 V, 1.100 V, 990 V, 880 V, 700 V); log konfigurasi controller turut mencatat perubahan pengaturan "PT Ratio" pada rentang nilai yang sejalan dengan tap tersebut. Dengan demikian, nilai tegangan yang ditampilkan pada controller merupakan nilai yang telah diskalakan melalui PT dan bukan pembacaan langsung tegangan terminal motor; interpretasi rasio PT yang tepat memerlukan konfirmasi lebih lanjut terhadap dokumen desain kelistrikan switchboard yang bersangkutan.

Berdasarkan hasil kategorisasi terhadap 500 rekaman log selama periode penelitian, diperoleh rekapitulasi kejadian sebagai berikut:

Tabel 4. Rekapitulasi Kategori Event Terkait Tegangan

Kategori Event	Jumlah Kejadian	Keterangan
Undervolt Shutdown	14	Motor shutdown akibat tegangan motor rendah
Low Supply Voltage Shutdown	11	Motor shutdown akibat suplai tegangan kontrol rendah
Undervolt Alarm	14	Alarm tanpa shutdown langsung
Low Supply Voltage Alarm	16	Alarm tanpa shutdown langsung
Low Supply Voltage (momenter)	113	Fluktuasi sesaat, tidak sampai trip
Undervolt (momenter)	14	Fluktuasi sesaat, tidak sampai trip
Voltage Unbalance	12	Ketidakseimbangan tegangan antar fasa
Overload (proteksi ikutan)	31	93,5% beririsan dengan restart (Contactor On)
Stall (proteksi ikutan)	29	100% beririsan dengan restart (Contactor On)
Underload (proteksi ikutan)	50	60,0% beririsan dengan restart (Contactor On)

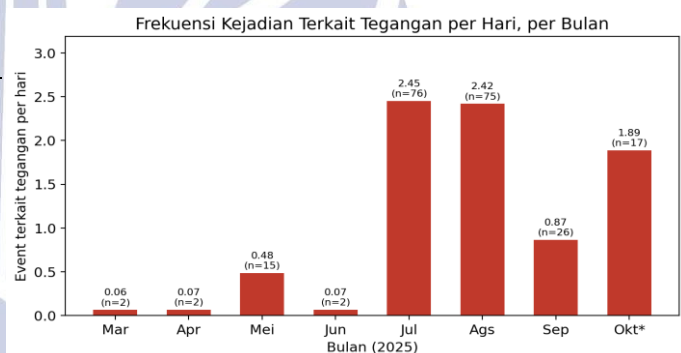
Total kejadian shutdown yang secara eksplisit bertanda "Undervolt Shutdown" atau "Low Supply Voltage Shutdown" tercatat 25 kali. Angka ini berbeda dengan total 30 siklus trip-restart (pasangan Contactor Off–Contactor On) yang teridentifikasi pada log. Penelusuran timestamp secara presisi terhadap seluruh 30 siklus tersebut menunjukkan komposisi sebagai berikut: 25 siklus bersesuaian tepat dengan event Undervolt/Low Supply Voltage Shutdown; 2 siklus bersesuaian dengan event Low Supply Voltage Lockout (kondisi lockout menyusul percobaan restart otomatis yang gagal berulang kali setelah trip tegangan pada 19–20 Juli 2025, sehingga tetap tergolong akibat under voltage namun tidak bertanda "Shutdown"); dan 3 siklus bersesuaian dengan event "Manual Off" yang seluruhnya terjadi pada Oktober 2025 (2 dan 9 Oktober), yaitu penghentian motor oleh operator secara manual yang tidak berkaitan dengan under voltage.

Temuan ini sekaligus menjelaskan anomali pada data downtime Oktober 2025: meskipun tidak tercatat satu pun event Undervolt/Low Supply Voltage Shutdown pada bulan tersebut, total downtime mencapai 169,5 jam. Downtime ini sepenuhnya berasal dari 3 siklus Manual Off tersebut (169,04 jam + 0,11 jam + 0,40 jam), bukan akibat gangguan tegangan. Downtime terbesar (169,04 jam, atau sekitar 7 hari) terjadi antara 2–9 Oktober 2025 dan kemungkinan besar terkait aktivitas operasional terjadwal seperti workover atau perbaikan lapangan yang

berada di luar cakupan data log kelistrikan; hal ini perlu dikonfirmasi lebih lanjut ke laporan operasi lapangan. Dengan demikian, total downtime yang secara valid dapat diatribusikan pada gangguan tegangan (25 shutdown + 2 lockout susulan = 27 siklus) adalah 103,98 jam, dengan median 30 menit per siklus — namun turut mencakup beberapa siklus dengan downtime signifikan yang murni disebabkan under voltage, yaitu pada 25–27 Agustus 2025 (37,43 jam) dan 11 September 2025 (19,86 jam), yang diduga terkait kegagalan restart otomatis berulang sebelum akhirnya berhasil pulih.

Tabel 5. Distribusi Kejadian Under Voltage per Bulan, Dinormalisasi per Hari (*Oktober hanya mencakup 9 hari)

Bulan	Hari Tercakup	Total Event Tegangan	Event / Hari	Shutdown Tegangan
Maret 2025	31	2	0,06	1
April 2025	30	2	0,07	0
Mei 2025	31	15	0,48	3
Juni 2025	30	2	0,07	0
Juli 2025	31	76	2,45	3
Agustus 2025	31	75	2,42	12
September 2025	30	26	0,87	6
Oktober 2025*	9	17	1,89	0



*Oktober hanya mencakup 9 hari (1–9 Okt 2025); nilai dinormalisasi per hari untuk perbandingan yang adil.

Gambar 4. Frekuensi Kejadian Terkait Tegangan per Hari, per Bulan

Normalisasi per hari pada Tabel 5 dan Gambar 4 penting dilakukan mengingat cakupan Oktober 2025 yang hanya 9 hari; tanpa normalisasi, perbandingan angka mentah (17 event) akan tampak rendah dan menyesatkan dibandingkan bulan lain yang tercakup penuh. Setelah dinormalisasi, laju kejadian Oktober (1,89 event/hari) justru lebih tinggi dibandingkan September (0,87 event/hari), meskipun jumlah shutdown eksplisit pada Oktober tetap nol. Pola menunjukkan lonjakan tajam pada Juli–Agustus 2025 (2,45 dan 2,42 event/hari), termasuk 12 dari 25 shutdown terjadi pada Agustus 2025 saja, lima di antaranya terkonsentrasi pada 14–16 Agustus 2025.

Tabel 6. Downtime Riil yang Distribusikan pada *Under Voltage* dan Estimasi Losses

Bulan	Downtime Akibat Tegangan (jam)*	Estimasi Losses (bbl)**
Maret 2025	0,5	15,0
Mei 2025	16,9	507,8
Juli 2025	23,0	691,3
Agustus 2025	41,3	1.237,9
September 2025	22,2	667,3
Oktober 2025***	0,0	0,0

Dengan mengeluarkan downtime Manual Off Oktober yang tidak terkait tegangan, total downtime yang secara valid diatribusikan pada gangguan *under voltage* sepanjang periode penelitian adalah 103,98 jam, dengan estimasi losses ilustratif sekitar 3.119 barrel pada asumsi $Q_{baseline}$ 720 BFPD. Angka ini menegaskan bahwa meskipun durasi downtime per kejadian umumnya singkat (median 30 menit), akumulasi frekuensi kejadian yang tinggi tetap berkontribusi signifikan terhadap potensi hilangnya produksi.

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4, keterkaitan antara *under voltage* dengan proteksi ikutan (Overload, Stall, Underload) diperkuat dengan analisis kuantitatif: dari 29 event Stall, seluruhnya (100%) memiliki timestamp identik dengan event "Contactor On", menunjukkan bahwa Stall secara konsisten terjadi pada momen restart motor, bukan sebagai kejadian independen. Dari 31 event Overload, 29 event (93,5%) juga bersesuaian dengan momen restart. Sebaliknya, dari 50 event Underload, hanya 30 event (60,0%) yang bersesuaian dengan restart; sisanya (40%) merupakan kejadian underload yang berdiri sendiri, kemungkinan mengindikasikan kondisi arus rendah akibat penurunan laju alir fluida (misalnya pada kondisi pump-off) yang tidak berkaitan langsung dengan siklus restart tegangan. Pola Stall dan Overload yang hampir seluruhnya terjadi bersamaan dengan restart ini sesuai dengan karakteristik arus start (inrush current) motor induksi, yang dapat mencapai beberapa kali arus nominal secara sesaat saat motor kembali dienergikan setelah kondisi *under voltage* teratasi.

Secara keseluruhan, sistem proteksi *under voltage* pada motor controller ESP sumur 5C-58N bekerja sesuai setting yang dikonfigurasi. Sejalan dengan Persamaan (1) serta hubungan torsi-tegangan kuadratik ($T \propto V^2$) yang dibahas pada bagian Pendahuluan, tingginya frekuensi kejadian *under voltage* berpotensi mempercepat penuaan isolasi motor akibat siklus pemanasan berulang, meskipun proteksi telah mencegah kerusakan akut melalui shutdown dini — sejalan dengan temuan Habib dan Zakri [8] serta Mahmud [11] bahwa kualitas tegangan yang buruk berkontribusi terhadap risiko gangguan operasi ESP. Perlu ditegaskan bahwa kesimpulan ini bersifat hipotesis yang didukung oleh pola temporal data controller, bukan kesimpulan yang dikonfirmasi oleh pengukuran kualitas daya langsung pada jaringan suplai eksternal, karena penelitian ini tidak mencakup instrumentasi power quality meter pada sisi jaringan. Verifikasi langsung melalui pengukuran kualitas

daya pada titik suplai Area Tiga Minas diperlukan sebelum kesimpulan ini dapat digeneralisasi sebagai penyebab pasti.

PENUTUP Simpulan

Selama periode 1 Maret–9 Oktober 2025, motor ESP sumur 5C-58N mengalami 25 kali shutdown akibat *under voltage*, ditambah 2 siklus lockout susulan akibat kegagalan restart berulang, dengan konsentrasi tertinggi pada Agustus 2025 (12 kejadian; 2,42 event/hari pada Juli dan Agustus). Sistem proteksi bertingkat (graded protection) bekerja sesuai setting yang dikonfigurasi, dengan median downtime 30 menit per siklus trip untuk kejadian yang teratasi otomatis. Kejadian *under voltage* secara konsisten beririsan dengan proteksi Stall (100%) dan Overload (93,5%) saat restart motor, sesuai karakteristik arus start motor induksi. Downtime signifikan pada Oktober 2025 (169,5 jam) terkonfirmasi berasal dari Manual Off yang tidak berkaitan dengan *under voltage*, bukan kegagalan proteksi. Pola waktu kejadian yang terkonsentrasi tajam pada Juli–Agustus 2025 mengindikasikan kemungkinan sumber gangguan dari sisi jaringan suplai listrik eksternal.

Saran

Disarankan dilakukan pengukuran kualitas daya (power quality measurement) secara langsung pada jaringan distribusi/pembangkitan di Area Tiga Minas untuk mengonfirmasi atau menyanggah hipotesis gangguan jaringan eksternal, khususnya pada periode Juli–Agustus; pelengkapan data produksi aktual (Daily Production Report) untuk menggantikan nilai asumsi $Q_{baseline}$ pada penelitian ini; konfirmasi rasio Potential Transformer (PT) pada dokumen desain switchboard untuk merekonsiliasi nilai tegangan pada controller dengan tegangan nominal nameplate motor; pertimbangan pemasangan Automatic Voltage Regulator (AVR) atau soft-starter tambahan; serta pengembangan sistem monitoring dan analisis log berkala (predictive maintenance), termasuk verifikasi kapasitas penyimpanan log controller untuk memastikan cakupan historis data yang dianalisis pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Al-Hejjaj, M. A., Sadeq, D. J., & Al-Fatlawi, O. (2023). A Review of the Electrical Submersible Pump Development Chronology. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 24(2), 123–135.
- [2] Diantoro, S., Nugroho, D., & Nugroho, A. A. (2024). Analisa Pengaruh Perubahan Frekuensi dan Tegangan terhadap Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan MATLAB Simulink. *Elektrika*, 16(2), 127–137.
<https://doi.org/10.26623/elektrika.v16i2.8852>
- [3] Hafis, Z., Erhaneli, Anugrah, A., & Bandri, S. (2023). Analisa Pengaruh Ketidakseimbangan Sudut Fasa pada Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan MATLAB. *Rang Teknik Journal*, 6(2), 133–141.
<https://doi.org/10.31869/rtj.v6i2.4144>
- [4] Sartika, L., Prasetya, A. M., & Nicholas, I. E. N. (2023). Analisis Pengaruh Beban terhadap Kinerja Motor Induksi 3 Fasa Scraper Conveyor di PT. Citra

- Siwit Lestari. Jurnal Elektro Telekomunikasi Terapan, 10(1), 7–16.
- [5] Yuwendius, H. (2022). Analisis Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Penggerak Vacuum di PT. Pindo Deli Perawang. *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, 6(2), 73–80. <https://doi.org/10.31849/sainetin.v6i2.9734>
- [6] Rizqi, M. R. P. (2024). Analisis Kinerja Motor Induksi 3 Fasa dari Aspek Besaran Daya dan Efisiensi Motor dalam Menggerakkan Mesin (Studi Kasus pada Mesin Jaw Crusher di PT. Alam Tunggal Semester). *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3).
- [7] Apribowo, C. H. B., Faradiba, G., Adriyanto, F., & Listiyanto, O. (2019). Study Analysis of Voltage Drop in a Typical Office Building Lighting System: A Case Study of FEM IPB Building Electrical Installation. *Journal of Electrical, Electronic, Information, and Communication Technology*, 1(1), 26. <https://doi.org/10.20961/jeeict.v1i1.34510>
- [8] Habib, K. H. S., & Zakri, A. A. (2024). Analysis of Power and Voltage Losses in Electric Submersible Pump Motor Installations. *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering*, 7(1), 22–36. <https://doi.org/10.31258/ijeepse.7.1.22-36>
- [9] Lingom, P. M., Song-Manguelle, J., Betoka-Onyama, S. P., Nyobe-Yome, J. M., & Doumbia, M. L. (2023). A Power Quality Assessment of Electric Submersible Pumps Fed by Variable Frequency Drives under Normal and Failure Modes. *Energies*, 16(13), 5121. <https://doi.org/10.3390/en16135121>
- [10] Lyakhomskii, A., Petrochenkov, A., Romodin, A., Perfil'eva, E., Mishurinskikh, S., Kokorev, A., Kokorev, A., & Zuev, S. (2022). Assessment of the Harmonics Influence on the Power Consumption of an Electric Submersible Pump Installation. *Energies*, 15(7), 2409. <https://doi.org/10.3390/en15072409>
- [11] Mahmud, W. M. (2026). Integrated Evaluation of Electric Submersible Pump Failures under Diverse Field Operating Conditions. *Journal of Energy and Power Technology*, 8(1), 006. <https://doi.org/10.21926/jept.2601006>
- [12] Rahman, H., & Kartohardjono, S. (2024). Examining the Utilization of Various Types of Electric Submersible Pump (ESP) Motors for Energy Efficiency in the Mature Offshore Oil Field Indonesia. *International Journal of Applied Engineering & Technology*, 6(1), 38–46.
- [13] Gibran, M. T. A., Purnomosidi, Indriani, E., & Djumpa, A. K. (2025). Analisis Pengaruh Sensitivitas Frekuensi Motor Electric Submersible Pump terhadap Produksi Sumur AZ-28. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi dan Mineral*, 5(1).
- [14] Abhista, K., Wicaksono, A., & Rosiani, D. (2025). Evaluasi Kinerja Electric Submersible Pump (ESP) pada Sumur LAN Menggunakan Nodal Analysis. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi dan Mineral*, 5(1), 1806–1816.
- [15] National Electrical Manufacturers Association. (2016). NEMA MG-1: Motors and Generators Standard. NEMA.