

EVALUASI KINERJA MOTOR LISTRIK PADA SISTEM MEKANIK BERBASIS KELISTRIKAN DI DEPO KERETA API BLITAR

Muhammad Kholil¹⁾, dan Royb Fatkhur Rizal²⁾

^{1,2)}Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Universitas Negeri Malang
Jl. Cakrawala No.5, Sumbersari, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145
e-mail: muhammad.kholil.2309346@students.um.ac.id¹⁾, dan fatkhurizal.fv@um.ac.id²⁾

ABSTRACT

This study was motivated by the importance of electric motor performance as the primary drive in electrically powered mechanical systems in industrial settings, particularly in the air compressor system at the Blitar Railway Depot. A decline in motor performance due to operational and environmental factors can impact energy efficiency and system reliability. The objective of this study is to evaluate the performance of three-phase induction motors through the analysis of electrical and mechanical parameters to determine the motor's efficiency level and operational condition. The methodology employed includes direct measurements of parameters such as input power, output power, current, voltage, power factor ($\cos \phi$), and rotational speed (RPM), followed by calculations of efficiency and power losses. The results of the study indicate that the motor is still operating in fairly good condition; however, there are indications of a decline in efficiency due to power losses occurring during operation. The conclusion of this study emphasizes that periodic evaluations are essential to maintain motor performance and prevent premature failure. The contribution of this research is to provide practical analysis as a basis for predictive maintenance and energy efficiency improvements in industrial systems based on electric motors.

Keywords: three-phase induction motor, efficiency, input power, output power, power losses, motor performance

ABSTRAK

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh pentingnya kinerja motor listrik sebagai penggerak utama pada sistem mekanik berbasis kelistrikan di lingkungan industri, khususnya pada sistem kompresor udara di Depo Kereta Api Blitar. Penurunan performa motor akibat faktor operasional dan lingkungan dapat berdampak pada efisiensi energi serta keandalan sistem. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja motor induksi tiga fasa melalui analisis parameter kelistrikan dan mekanik guna mengetahui tingkat efisiensi dan kondisi operasional motor. Metodologi yang digunakan meliputi pengukuran langsung terhadap parameter seperti daya input, daya output, arus, tegangan, faktor daya ($\cos \phi$), dan kecepatan putar (RPM), kemudian dilakukan perhitungan efisiensi serta rugi-rugi daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa motor masih beroperasi dalam kondisi yang cukup baik, namun terdapat indikasi penurunan efisiensi akibat rugi-rugi daya yang terjadi selama operasi. Kesimpulan penelitian ini menegaskan bahwa evaluasi berkala sangat diperlukan untuk menjaga performa motor dan mencegah kerusakan dini. Kontribusi penelitian ini adalah memberikan analisis praktis sebagai dasar pemeliharaan prediktif dan peningkatan efisiensi energi pada sistem industri berbasis motor listrik.

Kata Kunci: motor induksi tiga fasa, efisiensi, daya input, daya output, rugi-rugi daya, kinerja motor

I. PENDAHULUAN

MOTOR listrik merupakan salah satu komponen utama dalam sistem industri modern yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Peran motor listrik sangat vital karena hampir seluruh proses mekanis dalam industri bergantung pada kinerja motor, baik untuk penggerak utama maupun sistem pendukung. Dalam konteks fasilitas transportasi, khususnya depot kereta api, keberadaan motor listrik menjadi sangat krusial karena mendukung berbagai aktivitas pemeliharaan, perbaikan, dan operasional sarana perkeretaapian [1].

Depo Kereta Api Blitar merupakan salah satu fasilitas penting yang berfungsi sebagai pusat perawatan dan kesiapan operasional kereta api. Di dalam depot ini terdapat berbagai sistem mekanik berbasis kelistrikan yang bekerja secara terpadu, seperti sistem kompresor udara, sistem pendingin, pompa, serta peralatan

pengangkat. Semua sistem tersebut sangat bergantung pada motor listrik sebagai penggerak utamanya. Oleh karena itu, keandalan dan efisiensi motor listrik secara langsung memengaruhi kelancaran operasional depot, tingkat keselamatan kerja, serta efisiensi penggunaan energi listrik [2].

Salah satu sistem yang paling vital dalam depot kereta api adalah sistem kompresor udara. Sistem ini berperan penting dalam mendukung pengoperasian rem udara pada kereta api serta menyediakan sumber tenaga untuk berbagai peralatan pneumatik yang digunakan dalam proses perawatan. Kompresor udara umumnya digerakkan oleh motor induksi tiga fasa karena jenis motor ini memiliki konstruksi yang sederhana, tingkat keandalan yang tinggi, serta kemampuan beroperasi secara kontinu dalam berbagai kondisi beban. Motor induksi tiga fasa juga dikenal memiliki efisiensi yang relatif baik dan perawatan yang lebih mudah dibandingkan jenis motor lainnya, sehingga sangat

sesuai untuk aplikasi industri berat seperti di lingkungan depot kereta api [3].

Namun demikian, pengoperasian motor induksi tiga fasa pada sistem kompresor udara tidak terlepas dari berbagai permasalahan yang dapat memengaruhi kinerjanya. Motor yang beroperasi secara terus-menerus dalam jangka waktu yang panjang cenderung mengalami penurunan performa akibat faktor keausan komponen, peningkatan suhu operasi, ketidakseimbangan tegangan, serta kondisi beban yang tidak stabil. Selain itu, faktor eksternal seperti kualitas pasokan listrik dan kondisi lingkungan kerja juga dapat memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi dan umur pakai motor.

Penurunan kinerja motor listrik, khususnya pada sistem kompresor udara, dapat berdampak langsung pada meningkatnya konsumsi energi listrik dan menurunnya efisiensi operasional. Hal ini tidak hanya menyebabkan pemborosan energi, tetapi juga meningkatkan biaya operasional depot secara keseluruhan. Selain itu, apabila tidak dilakukan pemantauan dan evaluasi secara berkala, kerusakan motor dapat terjadi secara tiba-tiba yang berpotensi mengganggu proses operasional, bahkan dapat menyebabkan terhentinya layanan kereta api. Oleh karena itu, diperlukan suatu evaluasi kinerja yang komprehensif untuk mengetahui kondisi aktual motor listrik yang digunakan.

Evaluasi kinerja motor listrik umumnya dilakukan dengan menganalisis beberapa parameter utama, seperti daya input, daya output, efisiensi, faktor daya ($\cos \phi$), arus, tegangan, serta kecepatan putar (RPM). Parameter-parameter tersebut dapat digunakan untuk menentukan tingkat performa motor serta mengidentifikasi adanya penyimpangan dari kondisi normal. Pada motor induksi tiga fasa, efisiensi menjadi salah satu indikator utama yang menunjukkan seberapa besar energi listrik yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik secara efektif. Selain itu, analisis terhadap rugi-rugi daya juga penting untuk mengetahui sumber kehilangan energi yang terjadi selama proses operasi.

Dalam konteks sistem kompresor udara di Depo Kereta Api Blitar, evaluasi kinerja motor induksi tiga fasa menjadi sangat penting karena sistem ini bekerja secara intensif dan memiliki beban kerja yang cukup tinggi. Dengan melakukan analisis yang tepat, dapat diketahui apakah motor masih beroperasi dalam kondisi optimal atau sudah mengalami penurunan performa. Hasil evaluasi ini nantinya dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan terkait perawatan, perbaikan, atau bahkan penggantian motor jika diperlukan.

Selain itu, evaluasi ini juga dapat memberikan rekomendasi terkait upaya peningkatan efisiensi energi, seperti perbaikan faktor daya, penyeimbangan beban, atau optimasi sistem kelistrikan. Dengan demikian, tidak hanya meningkatkan keandalan sistem, tetapi juga

dapat menekan biaya operasional dan mendukung program efisiensi energi yang berkelanjutan.

Penelitian terkait evaluasi kinerja motor induksi telah banyak dilakukan sebelumnya. Penelitian oleh Herrera-Guachamin dan Antonino-Daviu [4] menunjukkan bahwa efisiensi motor induksi dapat menurun akibat ketidakseimbangan tegangan dan variasi beban yang tidak stabil, sehingga diperlukan analisis berbasis parameter kelistrikan secara komprehensif. Selain itu, penelitian oleh Kim dan Kang [3] menekankan pentingnya pemanfaatan data sensor dalam sistem kompresor udara untuk meningkatkan keandalan serta mendeteksi penurunan performa secara dini. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa efisiensi motor induksi sangat dipengaruhi oleh variasi beban dan kondisi operasi dinamis, di mana efisiensi optimal dicapai pada kondisi beban mendekati nominal [5],[6]. Perkembangan teknologi monitoring modern memungkinkan deteksi dini gangguan motor berbasis data real-time sebagaimana dijelaskan dalam penelitian [7],[8].

Studi oleh Huang dkk. [9] juga menunjukkan bahwa variasi tegangan suplai memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi motor, khususnya dalam meningkatkan rugi-rugi daya pada kondisi tertentu. Penelitian lain oleh Pillay dan Manyage [10] serta Saidur [11] mengungkapkan bahwa faktor operasional seperti beban, kualitas daya, dan kondisi lingkungan kerja sangat memengaruhi performa dan umur pakai motor induksi dalam aplikasi industri.

Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih dilakukan pada lingkungan laboratorium atau industri umum dan belum secara spesifik mengkaji kinerja motor induksi pada sistem kompresor udara di lingkungan depot kereta api yang memiliki karakteristik beban dinamis serta pola operasional yang intensif dan fluktuatif. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi celah tersebut dengan melakukan evaluasi kinerja motor induksi tiga fasa berbasis data lapangan secara langsung di Depo Kereta Api Blitar. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai kondisi operasional motor serta menjadi dasar dalam upaya peningkatan efisiensi energi dan keandalan sistem pada lingkungan perkeretaapian.

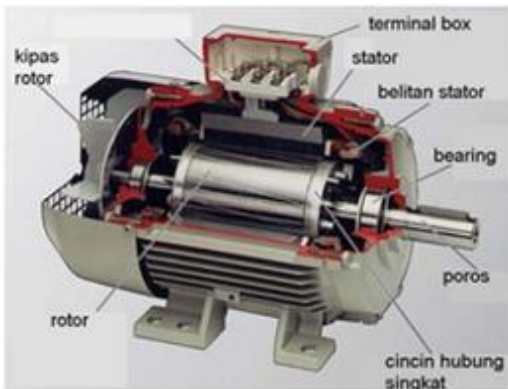
Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi kinerja motor listrik pada sistem mekanik berbasis kelistrikan di Depo Kereta Api Blitar, dengan fokus utama pada motor induksi tiga fasa yang digunakan pada sistem kompresor udara. Evaluasi ini dilakukan dengan menganalisis parameter-parameter kelistrikan dan mekanik yang relevan untuk memperoleh gambaran kondisi aktual motor. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi yang akurat mengenai tingkat efisiensi dan kinerja motor, serta menjadi dasar dalam upaya peningkatan keandalan dan efisiensi operasional di lingkungan depot kereta api. Peningkatan efisiensi

motor listrik dapat berkontribusi signifikan terhadap pengurangan biaya operasional dan peningkatan kinerja sistem mekanik di depot kereta api [4].

II. LANDASAN TEORI

A. Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu jenis motor listrik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri karena memiliki konstruksi yang sederhana, keandalan tinggi, serta biaya perawatan yang relatif rendah. Motor ini bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana energi listrik diubah menjadi energi mekanik melalui interaksi medan magnet antara stator dan rotor [12] pada contoh Gambar 1.



Gambar 1. Motor induksi

Ketika kumparan stator dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa, akan mengalir arus pada masing-masing fasa yang berbeda sudut sebesar 120°. Hal ini menyebabkan terbentuknya medan magnet berputar atau *Rotating Magnetic Field (RMF)* di dalam stator seperti halnya Gambar 1 Medan magnet tersebut berputar pada kecepatan sinkron yang dirumuskan sebagai:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \dots\dots\dots(1)$$

di mana n_s adalah kecepatan sinkron (RPM), f adalah frekuensi (Hz), dan p adalah jumlah kutub motor [13]. Medan magnet yang berputar ini akan memotong konduktor pada rotor sehingga menginduksi tegangan. Karena rangkaian rotor tertutup, arus akan mengalir dan menghasilkan medan magnet rotor. Interaksi antara medan magnet stator dan rotor menghasilkan gaya elektromagnetik yang menimbulkan torsi sehingga rotor berputar [14].

Kecepatan rotor tidak pernah mencapai kecepatan sinkron. Perbedaan antara keduanya disebut *slip (s)*, yang dinyatakan sebagai:

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \dots\dots\dots(2)$$

Slip sangat penting dalam motor induksi karena memungkinkan terjadinya induksi arus pada rotor. Pada kondisi normal, slip berkisar antara 1% hingga 5% tergantung beban motor [12].

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan pada sistem kompresor udara di industri karena kemampuannya bekerja secara kontinu, tahan terhadap beban berat, serta memiliki karakteristik torsi yang stabil [15].

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa integrasi sistem monitoring cerdas memungkinkan analisis kondisi motor secara lebih akurat dan *real-time*, terutama dalam mendeteksi potensi gangguan sejak dini [7], [8].

B. Parameter Kinerja Motor Induksi

Kinerja motor induksi dapat dianalisis melalui beberapa parameter utama yang berkaitan dengan aspek kelistrikan dan mekanik. Parameter ini penting dalam mengevaluasi efisiensi dan performa motor, khususnya pada aplikasi sistem kompresor udara.

1) Daya Input (p_{in})

Daya input merupakan daya listrik yang diserap oleh motor dari sumber listrik tiga fasa. Besarnya daya input dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots(3)$$

di mana V adalah tegangan antar fasa, I adalah arus, dan $\cos \phi$ adalah faktor daya. Faktor daya menunjukkan tingkat efisiensi penggunaan energi listrik dalam sistem.

2) Daya Output (p_{out})

Daya output merupakan daya mekanik yang dihasilkan motor untuk menggerakkan beban. Daya ini dihitung berdasarkan torsi dan kecepatan putar:

$$P_{out} = \tau \times \frac{2\pi n}{60} \dots\dots\dots(4)$$

di mana T adalah torsi (Nm) dan n adalah kecepatan putar (RPM) [3].

3) Efisiensi Motor (η)

Efisiensi motor menunjukkan perbandingan antara daya output terhadap daya input. Efisiensi dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

Efisiensi yang tinggi menunjukkan bahwa motor mampu mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik dengan baik. Motor induksi modern dapat memiliki efisiensi di atas 90% tergantung kelasnya [15]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa efisiensi motor induksi sangat dipengaruhi oleh variasi beban dan kondisi operasi dinamis, di mana efisiensi optimal dicapai pada kondisi beban mendekati nominal [5].

4) Faktor Daya ($\cos \phi$)

Faktor daya merupakan rasio antara daya aktif dan daya semu. Nilai faktor daya yang rendah menunjukkan adanya daya reaktif yang tinggi, yang dapat menyebabkan pemborosan energi. Pada motor induksi, faktor daya cenderung meningkat seiring dengan peningkatan beban[5].

5) Rugi-Rugi Daya pada Motor Induksi

Dalam pengoperasiannya, motor induksi mengalami berbagai rugi-rugi energi yang menyebabkan tidak semua daya input dapat dikonversi menjadi daya output. Rugi-rugi tersebut meliputi:

- Rugi Tembaga Stator (P_{cu_s}): disebabkan oleh resistansi belitan stator.
- Rugi Tembaga Rotor (P_{cu_r}): terjadi akibat arus rotor.
- Rugi Inti (*Core Loss*): terdiri dari rugi *histeresis* dan arus *eddy*.
- Rugi Mekanis: akibat gesekan bearing dan hambatan udara.
- Rugi Beban Sasar (*Stray Load Loss*): akibat distribusi medan yang tidak sempurna.

Secara umum, rugi-rugi daya dapat dihitung dengan:

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} \dots \dots \dots (6)$$

Besarnya rugi-rugi ini sangat memengaruhi efisiensi motor. Oleh karena itu, analisis rugi-rugi sangat penting dalam evaluasi kinerja motor, terutama pada sistem yang bekerja secara kontinu seperti kompresor udara [13].

C. Klasifikasi Efisiensi Motor

Motor induksi diklasifikasikan berdasarkan tingkat efisiensinya sesuai standar IEC 60034-30. Klasifikasi tersebut meliputi IE1 (*standard efficiency*), IE2 (*high efficiency*), IE3 (*premium efficiency*), dan IE4 (*super premium efficiency*) [8].

Motor dengan kelas efisiensi yang lebih tinggi memiliki rugi-rugi yang lebih kecil, sehingga lebih hemat energi dan cocok untuk aplikasi industri dengan beban kerja tinggi seperti sistem kompresor udara.

D. Sistem Kompresor Udara pada Depot Kereta Api

Sistem kompresor udara merupakan salah satu sistem vital dalam depot kereta api yang digunakan untuk mendukung sistem pengereman udara serta pengoperasian peralatan pneumatik. Kompresor ini umumnya digerakkan oleh motor induksi tiga fasa karena kemampuannya beroperasi secara stabil dalam jangka waktu lama [16].

Dalam pengoperasiannya, motor kompresor sering mengalami variasi beban dan bekerja secara terus-menerus, sehingga rentan terhadap penurunan kinerja. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi berkala terhadap parameter seperti daya, efisiensi, dan rugi-rugi untuk memastikan sistem tetap bekerja secara optimal dan efisien [15].

III. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Objek Penelitian



Gambar 2. Lokasi Penelitian Depo Kereta Api Blitar

Penelitian ini dilaksanakan di Depo Kereta Api (KAI) Blitar yang merupakan salah satu fasilitas vital bagi PT Kereta Api Indonesia (Persero) untuk perawatan dan pemeliharaan sarana perkeretaapian di wilayah pada Gambar 2 Depo ini dilengkapi dengan berbagai sistem mekanik berbasis kelistrikan untuk mendukung operasional harian. Objek utama penelitian adalah salah satu motor listrik yang digunakan untuk menggerakkan sistem kompresor udara. Sistem kompresor udara ini sangat krusial untuk menyediakan pasokan udara bertekanan bagi sistem rem kereta api, alat bantu pneumatik, serta keperluan Bengkel Depo lainnya.

Motor yang menjadi fokus penelitian adalah jenis motor induksi tiga fasa. Motor ini dipilih karena perannya yang strategis dalam operasional depo dan karakteristik operasionalnya yang representatif untuk evaluasi kinerja motor listrik industri. Lingkungan kerja motor ini meliputi fluktuasi beban yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan udara bertekanan, serta kondisi lingkungan Depo yang dapat mempengaruhi performa motor.

B. Spesifikasi Motor Listrik

Spesifikasi motor listrik yang dievaluasi diambil dari label nama *nameplate* motor yang terpasang pada unit kompresor udara di Depo Kereta Api Blitar seperti Gambar 3 dan Tabel 1 [17].



Gambar 3. Name Plate motor listrik

Motor ini dirancang untuk memberikan performa optimal dalam pengoperasian industri, terutama dalam aplikasi yang memerlukan kontrol yang presisi dan efisiensi energi tinggi. Motor ini juga memiliki fitur yang mendukung penghematan energi, sesuai dengan standar internasional yang ditetapkan oleh IEC 60034-30-1, yang mengatur efisiensi motor listrik. Motor ini diharapkan dapat memenuhi klasifikasi efisiensi yang lebih tinggi, seperti IE4, untuk meningkatkan performa dan mengurangi biaya operasional dalam aplikasi industri [18]. Detail spesifikasi teknis motor ada pada Tabel 1.

TABEL I
SPESIFIKASI NAMEPLATE MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Parameter Spesifikasi	Nilai	Satuan
Tipe Motor	Induksi 3 Fasa	-
Manufaktur	MELCO	-
Model	MMI 160L-4	-
Tegangan Nominal (V)	380/400	V
Arus Nominal (A)	23.5 / 22.8	A
Daya Nominal (kW)	11	kW
Daya Nominal (HP)	15	HP
Frekuensi (Hz)	50	Hz
Kecepatan Nominal (RPM)	1460	rpm
Jumlah Kutub (p)	4	-
Faktor Daya ($\cos \phi$)	0.85	-
Kelas Efisiensi	IE2 (<i>High Efficiency</i>)	-
Efisiensi Nominal (η_{nom})	88,4	%
Kelas Isolasi	F	-
Kelas Proteksi (IP)	IP55	-

Spesifikasi pada Tabel 1 akan menjadi perbandingan untuk pengukuran lapangan apakah kinerja motor sesuai dengan *nameplate* atau malah melebihi atau kurang dari *nameplate*.

C. Metode Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan secara langsung pada sistem motor kompresor udara di Depo Kereta Api Blitar selama jam operasional normal. Tujuannya adalah untuk mendapatkan Gambaran akurat mengenai kinerja motor pada kondisi kerja sesungguhnya. Data yang diambil meliputi parameter kelistrikan utama:

- **Tegangan (V):** Tegangan fasa-ke-fasa diukur pada terminal input motor.
- **Arus (I):** Arus yang mengalir pada setiap fasa diukur menggunakan penjepit arus.
- **Kecepatan Putar (RPM):** Kecepatan putar aktual motor diukur menggunakan tachometer non-kontak, meskipun untuk motor induksi yang terhubung langsung ke beban kompresor, kecepatan putar cenderung stabil namun sedikit berbeda dari kecepatan sinkron.

Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Clamp Meter Digital Digunakan sebagai alat bantu untuk verifikasi pengukuran arus dan tegangan.
- tachometer non-kontak digunakan untuk mengukur kecepatan putaran motor

Karena keterbatasan alat dan tidak adanya data dari pihak mitra peneliti hanya menggunakan alat clamp meter digital atau sejenisnya dan tachometer non kontak untuk mengukur tagangan, arus, RPM untuk Nilai P_{in} , dan P_{out} menggunakan perhitungan yang di mana nanti akan dibantu oleh software Matlab agar mendekati nilai yang sesungguhnya.

Pendekatan pengukuran langsung ini sejalan dengan metode monitoring berbasis kondisi nyata (*real-time condition monitoring*) yang banyak digunakan dalam penelitian modern untuk meningkatkan akurasi evaluasi kinerja motor [6].

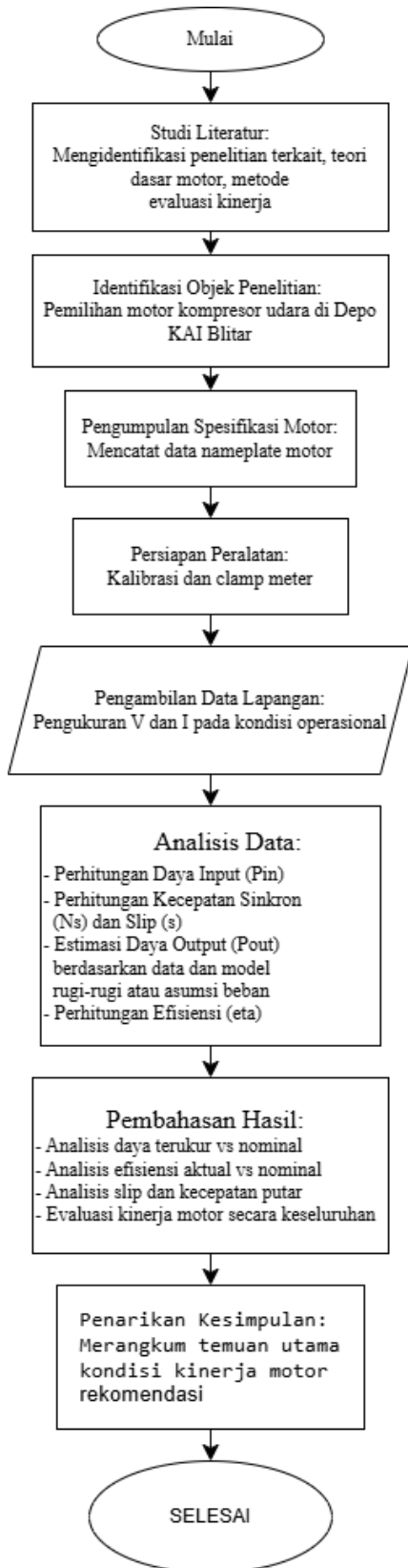
Pengambilan data dilakukan dalam beberapa sesi pengukuran yang mencakup variasi beban operasional selama kurang lebih satu bulan kerja, untuk mendapatkan representasi kinerja motor yang komprehensif. Data dicatat setiap 1 menit selama periode operasional kompresor untuk menangkap dinamika beban. Interval pengambilan data selama 1 menit dipilih karena kompresor sudah dipasang dengan sensor tekanan udara berbentuk kotak valve di mana jika tekanan di dalam tabung sudah mencapai 10 bar sensor itu akan mengirim sinyal ke kontaktor dan akan memutus arus listrik.



Gambar 4. sensor tekanan udara otomatis

D. Diagram Alur Penelitian

Proses penelitian ini diorganisasikan dalam serangkaian langkah yang sistematis, digambarkan dalam diagram alur penelitian di Gambar 5



Gambar 5. Flowchart alur penelitian

Diagram alur pada Gambar 5 memastikan bahwa setiap tahapan penelitian dilakukan secara terstruktur, mulai dari identifikasi masalah hingga perumusan kesimpulan dan rekomendasi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk bagian ini, data akan disajikan dalam bentuk Tabel diagram dan Tabel grafik

A. Analisis Daya Motor Listrik

Berdasarkan data pengukuran yang dilakukan pada motor kompresor udara di Depo KAI Blitar, diperoleh rata-rata parameter operasional pada Tabel 2, Tabel 3, Tabel 4 dan Tabel 5.

TABEL II
DATA HASIL PENGUJIAN TEGANGAN DAN ARUS MOTOR

tanggal	Tegangan (V)			Rata-Rata	Arus (I)			Rata-Rata
	RS	ST	RT		R	S	T	
02 Feb 2026	376	398	380	384,67	23	26	26,5	25,17
03 Feb 2026	377	395	376	382,33	14	18	18	16,7
10 Feb 2026	376	390	383	383	23	25	27	25
12 Feb 2026	371	382	377	377	16	17	18	17
13 Feb 2026	380	380	395	385	16	20	20	18,7
14 Feb 2026	374	380	389	381	22	26,5	26	24,8
24 Feb 2026	374	389	380	381	23	26	26	25
25 Feb 2026	379	380	389	383	22	25	26	24,3
26 Feb 2026	390	405	395	397	22	25	25,5	24,2
27 Feb 2026	393	411	404	403	22	25	27	24,7
02 Mar 2026	377	395	385	386	22	24	26	24
03 Mar 2026	371	372	376	373	22	25	26	24,3
04 Mar 2026	372	391	377	380	23	25	26	24,7
05 Mar 2026	373	383	380	379	22	25	26	24,3
09 Mar 2026	371	372	376	373	22	25,5	25,7	24,4
10 Mar 2026	376	390	383	383	22	24	26	24
11 Mar 2026	393	411	404	403	22	23	25	23,3
12 Mar 2026	372	373	375	373	22	25	26	24,33
16 Mar 2026	380	400	390	390	23	24	25	24
17 Mar 2026	374	377	375	375	24	24	26	24,7
25 Mar 2026	393	400	408	400	23	24	25	24
26 Mar 2026	377	400	379	385	24	25	25	24,7
27 Mar 2026	384	388	382	385	23	26	28	25,7
30 Mar 2026	390	404	394	396	22	25	26	24,3
31 Mar 2026	380	411	405	399	16	21	25	20,7
01 Apr 2026	383	410	404	399	22	26	25	23,3
02 Apr 2026	379	399	395	391	22	25	25	24
Total Rata-Rata		386,14		386,14		23,5		23,5

TABEL III
DATA HASIL PENGUJIAN RPM, TORSI, *COS PHI* MOTOR

tanggal	Kecepatan Putaran Motor (RPM)	TORSI (N.M)	cos phi
02 Feb 2026	1449	65.04	0,67
03 Feb 2026	1449	61.83	1
10 Feb 2026	1454	57.44	0,67
12 Feb 2026	1453	58.31	1
13 Feb 2026	1455	64.52	0,89
14 Feb 2026	1454	53.61	0,68
24 Feb 2026	1453	63.03	0,67
25 Feb 2026	1452	64.49	0,69
26 Feb 2026	1451	55.69	0,67
27 Feb 2026	1457	60.35	0,65
02 Mar 2026	1456	62.17	0,7
03 Mar 2026	1452	52.50	0,7
04 Mar 2026	1454	61.80	0,69
05 Mar 2026	1453	63.87	0,7
09 Mar 2026	1453	63.77	0,7
10 Mar 2026	1452	63.94	0,7
11 Mar 2026	1454	64.49	0,69
12 Mar 2026	1451	53.34	0,7
16 Mar 2026	1456	64.34	0,69
17 Mar 2026	1452	60.26	0,68
25 Mar 2026	1452	60.81	0,67
26 Mar 2026	1453	64.14	0,68
27 Mar 2026	1452	64.48	0,64
30 Mar 2026	1455	62.31	0,67
31 Mar 2026	1454	62.54	0,8
01 Apr 2026	1456	58.98	0,71
02 Apr 2026	1456	60.69	0,69
Total Rata-Rata	1453.26	61.06	0.72

Berdasarkan data Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan hasil rata-rata sebagai berikut:

- Tegangan rata-rata (V): 386,14 V
- Arus rata-rata (I): 23,5 A
- Cos Phi : 0.72

TABEL IV
DATA KONVERSI KECEPATAN DARI RPM KE M/S

Kecepatan Putaran Motor (RPM)	Kecepatan (m/s)
1452	30.41
1449	30.35
1454	30.45
1453	30.43
1455	30.47
1454	30.45
1453	30.43
1452	30.41
1451	30.39
1457	30.52
1456	30.49
1452	30.41
1454	30.45

Kecepatan Putaran Motor (RPM)	Kecepatan (m/s)
1453	30.43
1453	30.43
1452	30.41
1454	30.45
1451	30.45
1456	30.49
1452	30.41
1452	30.41
1453	30.43
1452	30.41
1455	30.47
1454	30.45
1456	30.49
1456	30.49

TABEL V
DATA HASIL PERHITUNGAN BERDASARKAN HASIL PENGUJIAN MOTOR PADA TABEL II DAN TABEL III

tanggal	Daya input (W)	Daya output (W)	Efisiensi (%)	rugi-rugi daya (w)
02 Feb 2026	11235.88	9889.5	88.02	1346.4
03 Feb 2026	11058.99	9382.0	84.84	16.770
10 Feb 2026	11111.54	8746.0	78.71	2365.5
12 Feb 2026	11100.71	8872.3	79.93	2228.4
13 Feb 2026	11098.21	9830.7	88.58	1267.5
14 Feb 2026	11128.75	8162.8	73.35	2965.9
24 Feb 2026	11053.52	9590.5	86.76	1463.0
25 Feb 2026	11122.82	9805.9	88.16	1316.9
26 Feb 2026	11149.14	8462.0	75.90	2687.1
27 Feb 2026	11206.65	9208.0	82.17	1998.6
02 Mar 2026	11232.00	9479.2	84.39	1752.8
03 Mar 2026	10989.39	7982.8	72.64	3006.6
04 Mar 2026	11217.35	9409.8	83.89	1807.6
05 Mar 2026	11166.17	9718.3	87.03	1447.9
09 Mar 2026	11034.62	9703.1	87.93	1331.5
10 Mar 2026	11144.71	9722.3	87.24	1422.4
11 Mar 2026	11222.01	9819.4	87.50	1402.6
12 Mar 2026	10989.39	8104.9	73.75	2884.5
16	11186.28	9810.0	87.70	1376.3

tanggal	Daya input (W)	Daya output (W)	Efisiensi (%)	rugi-rugi daya (w)
Mar 2026				
17				
Mar 2026	10909.32	9162.7	83.99	1746.6
25				
Mar 2026	11140.55	9246.3	83.00	1894.2
26				
Mar 2026	11200.24	9759.4	87.14	1440.8
27				
Mar 2026	10968.18	9804.4	89.39	1163.8
30				
Mar 2026	11167.01	9494.0	85.02	1673.0
31				
Mar 2026	11444.42	9522.5	83.21	1921.9
01				
Apr 2026	11432.67	8992.8	78.66	2439.9
02				
Apr 2026	11214.96	9253.5	82.51	1961.5
Total Rata-Rata	11145.39	9293.89	83.39	1851.49

1) Analisis daya input

Secara sistematis dapat diperhitungkan Dengan menggunakan persamaan (3) pada data tanggal (02/02/2026) daya input

$$P_{in} = \sqrt{3} \bar{X} 384,67 \times 25,17 \times 0,67 = 11235.88 \text{ Watt} = 11,23 \text{ KW} \dots \dots \dots (6)$$

Daya input sebesar kW 11,23 lebih besar dari daya nominal motor sebesar 11 kW yang tertera pada Tabel 1, yang menunjukkan bahwa motor beroperasi pada kondisi beban tinggi dan cenderung mengalami overload ringan. Kondisi ini menunjukkan bahwa motor bekerja melebihi kapasitas nominalnya, yang dapat meningkatkan suhu operasi, mempercepat degradasi isolasi, dan menurunkan umur pakai motor dalam jangka panjang. Namun, nilai daya input tersebut belum dapat dijadikan acuan utama dalam menentukan efisiensi motor secara keseluruhan.

Tegangan dan arus sangat mempengaruhi daya input. Tegangan di bawah nilai nominal akan menyebabkan arus meningkat untuk mempertahankan daya mekanik, sehingga meningkatkan rugi-rugi dan efisiensi. Sebaliknya, tegangan yang sedikit lebih tinggi dapat membantu menurunkan arus, tetapi harus tetap di bawah batas toleransi agar tidak merusak sistem isolasi motor [9].

Hasil ini sejalan dengan penelitian oleh Huang et al. [9] yang menyatakan bahwa variasi tegangan suplai dan arus dapat meningkatkan rugi-rugi daya serta memengaruhi efisiensi motor secara signifikan, terutama pada kondisi operasi yang tidak stabil.

2) Analisis daya output

Dalam menentukan efisiensi motor induksi, parameter utama yang harus diketahui adalah daya output (P_{out}), yaitu daya mekanik yang dihasilkan oleh poros motor. Nilai P_{out} dihitung berdasarkan hubungan

antara torsi dan kecepatan putar rotor, secara sistematis bisa di ketahui sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (4) Berdasarkan data hasil pengujian pada tanggal (02/02/2026), diperoleh nilai torsi sebesar 65,04 Nm dan kecepatan putar sebesar 1449 rpm. Dengan mensubstitusikan nilai tersebut ke dalam persamaan (4), diperoleh:

$$P_{out} = 65.04 \times 2\pi \frac{1449}{60} = 9889.5 \text{ Watt} = 9,89 \text{ kW} (7)$$

Hasil perhitungan pada (7) menunjukkan bahwa motor menghasilkan daya mekanik sebesar 9,89 kW pada kondisi operasi tersebut. Nilai ini mencerminkan kemampuan aktual motor dalam mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik pada beban tertentu. Temuan ini konsisten dengan penelitian Kim dan Kang [3] yang menunjukkan bahwa performa motor pada sistem kompresor sangat dipengaruhi oleh kondisi beban aktual dan karakteristik mekanik sistem yang digerakkan. Selanjutnya, nilai P_{out} ini digunakan sebagai dasar dalam analisis efisiensi dengan membandingkannya terhadap daya input (P_{in}), sehingga dapat diperoleh tingkat performa motor secara keseluruhan.

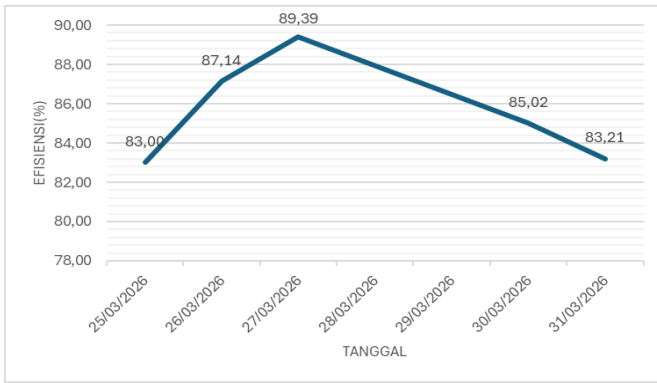
3) Analisis Efisiensi Motor

Efisiensi motor adalah rasio antara daya keluaran (P_{out}) dan daya masukan (P_{in}), yang mencerminkan sejauh mana motor dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Secara matematis, efisiensi dapat dituliskan dengan menggunakan Persamaan (5). Di ketahui nilai daya output (P_{out}) sebesar 9889,5 Watt yang di hitung sebelumnya dan nilai daya input (P_{in}) sebesar 11235,88 Watt pada tanggal (02/02/2026), yang dapat disubstitusikan ke dalam persamaan 5:

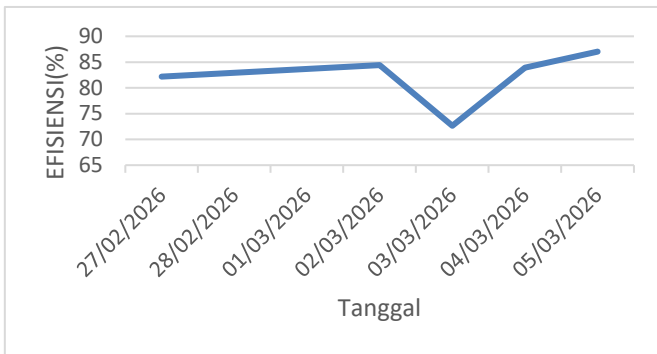
$$\eta = \frac{9889.5}{11235.88} = 88.02 \% \dots \dots \dots (8)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi operasi tersebut, motor memiliki efisiensi sebesar 88,02%, yang cukup tinggi. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi listrik yang disuplai ke motor diubah menjadi energi mekanik, dan sisanya menghilang menjadi rugi-rugi seperti rugi tembaga, inti, dan mekanis.

Hasil ini juga sejalan dengan penelitian Herrera-Guachamin dan Antonino-Daviu [4] yang menyatakan bahwa efisiensi motor induksi cenderung berada pada nilai optimal ketika beroperasi mendekati beban nominal, dan akan menurun secara signifikan pada kondisi beban tidak stabil. Oleh karena itu, pada saat operasi ini, kinerja motor dapat dikatakan baik, dan efisiensi tetap berada di batas normal motor induksi tiga fasa.



Gambar 6. Grafik puncak tertinggi Efisiensi



Gambar 7. Grafik puncak terendah Efisiensi

Analisis yang lebih komprehensif dengan mengacu pada data Tabel 5 menunjukkan bahwa fluktuasi efisiensi yang divisualisasikan pada Gambar 6 dan Gambar 7 memiliki keterkaitan yang kuat dengan pola variasi efisiensi selama periode pengujian. Secara keseluruhan, efisiensi motor berada pada kisaran 72,64% hingga 89,39%, dengan nilai rata-rata sekitar 83,39%, yang masih termasuk dalam kategori normal untuk motor induksi tiga fasa.

Hasil ini konsisten dengan penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa fluktuasi beban merupakan faktor utama yang menyebabkan variasi efisiensi motor induksi dalam aplikasi industri [5],[6].

Pada Gambar 6, tren peningkatan efisiensi dari 83,00% (25/03/2026) menjadi 89,39% (27/03/2026) menunjukkan adanya perbaikan kondisi operasi yang signifikan. Berdasarkan data Tabel 5, kenaikan ini terjadi secara bertahap (87,14% → 89,39%), yang mengindikasikan bahwa motor bergerak menuju kondisi beban yang lebih ideal. Setelah mencapai puncak, efisiensi kembali menurun menjadi 85,02% (30/03/2026) dan 83,21% (31/03/2026), yang menunjukkan bahwa kondisi optimal tersebut tidak dapat dipertahankan secara kontinu. Hal ini menegaskan bahwa titik efisiensi maksimum bersifat temporer dan sangat bergantung pada kestabilan beban.

Sementara itu, pada Gambar 7, penurunan efisiensi dari 84,39% (02/03/2026) menjadi 72,64% (03/03/2026) merupakan penurunan paling signifikan dalam keseluruhan data. Jika dikaitkan dengan Tabel 5,

penurunan ini termasuk yang paling ekstrem (sekitar 11,75% dalam satu interval pengukuran), yang mengindikasikan adanya gangguan atau perubahan kondisi operasi secara tiba-tiba (*sudden disturbance*). Namun demikian, efisiensi kembali meningkat menjadi 83,89% (04/03/2026) dan 87,03% (05/03/2026), yang menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan untuk pulih dengan cepat (*self-recovery behavior*).

Selain itu, keseluruhan data Tabel 5 menunjukkan beberapa masalah efisiensi rendah lainnya, seperti:

- 73,35% (14/02/2026)
- 75,90% (26/02/2026)
- 73,75% (12/03/2026)

Keberadaan beberapa titik ini memperkuat indikasi bahwa sistem operasi motor belum sepenuhnya stabil. Jika dikaitkan dengan teori motor induksi, kondisi efisiensi rendah ini umumnya terjadi saat motor beroperasi di luar titik beban nominal, baik pada kondisi *underload* maupun *overload*, yang menyebabkan distribusi rugi-rugi menjadi tidak seimbang.

Meskipun nilai efisiensi cenderung kembali ke kisaran normal setelah terjadi penurunan, pola fluktuasi yang berulang menunjukkan bahwa sistem belum memiliki kontrol operasi yang optimal. Hal ini mengindikasikan bahwa faktor eksternal, seperti variasi beban, kestabilan tegangan, dan faktor daya, memiliki pengaruh dominan terhadap performa efisiensi motor.

Fenomena fluktuasi ini juga didukung oleh penelitian oleh hanao [19] yang menyatakan bahwa variasi beban dan kualitas daya merupakan faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan efisiensi pada motor induksi dalam aplikasi industri.

B. Analisis Kecepatan dan RPM

Berdasarkan spesifikasi nameplate motor dengan frekuensi $f = 50\text{Hz}$ dan jumlah kutub $p = 4$, maka kecepatan sinkron (N_s) dapat dihitung menggunakan persamaan (1):

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{ rpm} \dots \dots \dots (9)$$

Pengukuran kecepatan putar aktual (N_m) menggunakan tachometer dan pada tanggal (02/02/2026) menunjukkan nilai sebesar 1449 RPM pada kondisi beban operasional. Berdasarkan nilai tersebut, slip (s) motor dapat dihitung dengan persamaan (2):

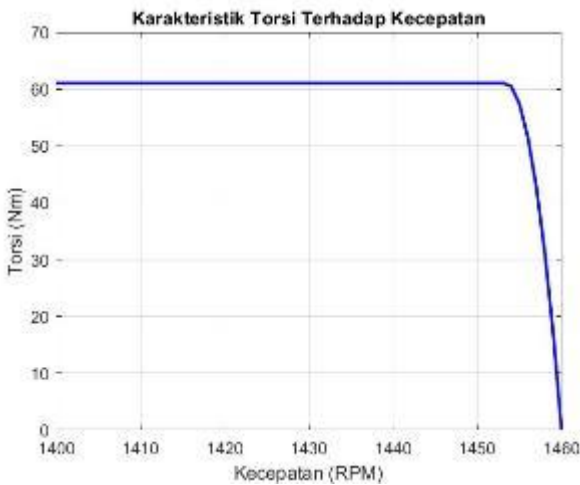
$$s = \frac{1500 - 1449}{1500} \times 100\% = \frac{50}{1500} \times 100\% = 3.40\% \dots (10)$$

Nilai slip sebesar 3,40% masih tergolong wajar untuk motor induksi tiga fasa yang beroperasi pada kondisi beban penuh atau mendekati beban penuh. Hal ini sesuai dengan teori yang dijelaskan oleh Chapman [12], di mana motor induksi pada kondisi beban penuh umumnya memiliki nilai slip dalam rentang 1% hingga

5%. Jika dibandingkan dengan data nameplate, kecepatan nominal motor adalah 1460 RPM, sehingga slip nominalnya:

$$s_{nom} = \frac{1500-1460}{1500} \times 100\% = 2,67 \% \dots \dots \dots (11)$$

Kecepatan aktual yang terukur (1449 RPM) sedikit lebih rendah dibandingkan kecepatan nominal (1460 RPM). Hal ini menunjukkan bahwa motor bekerja pada kondisi beban yang sedikit lebih tinggi dari nominal atau berada pada kondisi *full load*. Secara karakteristik, peningkatan beban pada motor induksi akan menyebabkan kenaikan slip (penurunan kecepatan rotor) untuk menghasilkan torsi yang lebih besar.



Gambar 8. Karakteristik Torsi Terhadap Kecepatan Motor

Pada Gambar 8 Grafik menjelaskan rata-rata kondisi kecepatan maksimum pada 1453.37 dengan torsi 61.06

C. Evaluasi Kinerja Motor

Evaluasi kinerja motor induksi tiga fasa pada sistem kompresor udara di Depo Kereta Api Blitar dilakukan dengan mengintegrasikan seluruh parameter hasil pengukuran dan perhitungan, meliputi daya input, daya output, efisiensi, faktor daya ($\cos \phi$), serta kecepatan putar (RPM). Evaluasi ini bertujuan untuk menilai apakah motor masih bekerja dalam kondisi optimal atau telah mengalami penurunan performa [20]. Pada sistem kompresor modern, penggunaan teknologi monitoring berbasis IoT memungkinkan peningkatan efisiensi dan deteksi gangguan secara lebih cepat, sebagaimana ditunjukkan dalam penelitian [16]

Berdasarkan hasil analisis, daya input rata-rata motor sebesar 11.1454 kW yang tertera pada Tabel 5 sedikit lebih tinggi dibandingkan daya nominal sebesar 11 kW yang berada pada name plate atau Tabel 1. Kondisi ini menunjukkan bahwa motor bekerja pada beban yang relatif tinggi atau mendekati kondisi overload ringan. Meskipun demikian, daya output yang dihasilkan sebesar 9,89 kW masih menunjukkan kemampuan motor dalam menghasilkan energi mekanik yang cukup baik untuk menggerakkan sistem kompresor udara.

Dari sisi efisiensi, nilai efisiensi sesaat sebesar 88,02% serta rata-rata efisiensi sebesar 83,39% menunjukkan bahwa motor masih beroperasi dalam rentang efisiensi normal untuk motor induksi tiga fasa kelas IE2. Namun, adanya fluktuasi efisiensi yang cukup signifikan (72,64% hingga 89,39%) mengindikasikan bahwa kondisi operasi motor belum sepenuhnya stabil. Fluktuasi ini umumnya disebabkan oleh variasi beban kompresor, perubahan kondisi tegangan, serta faktor daya yang relatif rendah ($\cos \phi = 0,72$).

Kondisi ini juga diperkuat oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa ketidakseimbangan beban dan rendahnya faktor daya dapat meningkatkan arus sistem dan memperbesar rugi-rugi daya, sehingga berdampak langsung pada penurunan efisiensi motor [10], [11].

Faktor daya yang berada di bawah nilai nominal (0,85) menunjukkan bahwa sistem masih mengandung daya reaktif yang cukup besar. Hal ini berdampak pada meningkatnya arus yang mengalir dalam sistem, yang pada akhirnya memperbesar rugi-rugi daya, khususnya rugi tembaga pada stator. Kondisi ini juga berkontribusi terhadap penurunan efisiensi pada beberapa titik pengukuran.

Selain itu, hasil pengukuran kecepatan menunjukkan bahwa motor beroperasi pada kecepatan 1449 RPM, sedikit di bawah kecepatan nominal 1460 RPM. Nilai slip sebesar 3,40% masih berada dalam batas normal, namun menunjukkan bahwa motor bekerja pada kondisi beban yang cukup tinggi. Secara karakteristik, peningkatan slip ini berkorelasi dengan kebutuhan torsi yang lebih besar untuk menggerakkan beban kompresor.

Jika ditinjau secara keseluruhan, kinerja motor dapat dikategorikan masih baik, namun terdapat beberapa indikasi yang perlu diperhatikan, antara lain:

- Adanya kecenderungan operasi pada beban tinggi (overload ringan)
- Fluktuasi efisiensi yang menunjukkan ketidakstabilan sistem
- Nilai faktor daya yang relatif rendah
- Variasi performa akibat perubahan kondisi beban

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, beberapa upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja motor antara lain:

1. Perbaikan faktor daya, misalnya dengan pemasangan kapasitor bank untuk mengurangi daya reaktif.
2. Pengaturan beban operasional, agar motor bekerja mendekati titik beban optimal.
3. Pemeliharaan rutin, terutama pada sistem mekanis seperti bearing dan sistem pendinginan untuk mengurangi rugi-rugi mekanis.
4. Monitoring berkala, untuk mendeteksi penurunan performa sejak dini.

Dengan melakukan evaluasi dan perbaikan secara berkelanjutan, diharapkan motor induksi tiga fasa pada sistem kompresor udara dapat beroperasi lebih efisien, andal, serta memiliki umur pakai yang lebih panjang, sehingga mendukung kelancaran operasional di Depo Kereta Api Blitar.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan berbagai studi sebelumnya, namun memberikan kontribusi tambahan berupa analisis berbasis data lapangan pada lingkungan depot kereta api yang memiliki karakteristik operasional yang lebih dinamis dibandingkan lingkungan laboratorium.

Secara umum, hasil penelitian ini sejalan dengan tren penelitian terkini yang menekankan pentingnya integrasi monitoring cerdas dan optimasi efisiensi energi pada motor induksi dalam sistem industri [7],[5], [16].

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kinerja motor induksi tiga fasa pada sistem kompresor udara di Depo Kereta Api Blitar secara umum masih berada dalam kondisi operasional yang baik, namun belum sepenuhnya optimal dalam aspek efisiensi dan kestabilan performa. Temuan penelitian menunjukkan bahwa motor cenderung beroperasi pada kondisi beban tinggi yang berdampak pada meningkatnya konsumsi energi serta memicu terjadinya fluktuasi kinerja selama periode pengujian. Variasi efisiensi yang terjadi mengindikasikan adanya pengaruh signifikan dari faktor eksternal, seperti perubahan beban operasional, kualitas tegangan suplai, serta nilai faktor daya yang belum optimal.

Selain itu, karakteristik kecepatan putar dan slip motor menunjukkan bahwa motor bekerja mendekati kondisi beban penuh, yang secara teoritis berkontribusi terhadap peningkatan rugi-rugi daya dalam sistem. Oleh karena itu, penelitian ini menegaskan pentingnya evaluasi kinerja motor secara berkala sebagai upaya untuk menjaga efisiensi energi dan keandalan sistem. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyajian analisis komprehensif berbasis data lapangan yang dapat menjadi referensi dalam pengelolaan dan optimasi kinerja motor induksi tiga fasa pada aplikasi industri, khususnya pada sistem kompresor udara di lingkungan perkeretaapian.

VI. PENGAKUAN

Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada pihak Depo Kereta Api Blitar atas dukungan dan izin yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini, khususnya dalam proses pengambilan data dan observasi lapangan pada sistem kompresor udara. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada teknisi dan operator lapangan yang telah membantu

dalam proses pengukuran parameter kelistrikan dan mekanik, serta memberikan informasi teknis yang diperlukan selama penelitian berlangsung. Selain itu, penulis mengakui kontribusi pihak institusi akademik yang telah memberikan dukungan dalam bentuk fasilitas dan arahan ilmiah sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus dari lembaga pendanaan publik, komersial, maupun nirlaba.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Shevkunova dan N. Shevkunov, "Improving the efficiency and quality of the technological process of repairing traction motors by reducing production defects," *E3S Web Conf.*, vol. 402, hal. 1–8, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202340204003.
- [2] A. L. Mikraj, "Perencanaan Perawatan Motor Penggerak Wesel Type T84M dengan Menggunakan," vol. 4, no. 1, hal. 4491, 2023.
- [3] M.-J. Kim dan C.-G. Kang, "Dynamic Analysis of a Piston Air Compressor in a Railway Vehicle Using Sensor Data," in *2023 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2023, hal. 1084–1086. doi: 10.23919/ICCAS59377.2023.10316800.
- [4] J. Herrera-Guachamin dan J. Antonino-Daviu, "Laboratory experiments for the evaluation of the efficiency of induction motors operating under different electrical and mechanical faults," in *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2019, hal. 6319–6322. doi: 10.1109/IECON.2019.8927328.
- [5] Y. Zhang, J. Yang, dan H. Wang, "Energy efficiency optimization of three-phase induction motors under variable load conditions," *Energy Reports*, vol. 8, hal. 1234–1242, 2022.
- [6] A. Singh dan B. Kumar, "Performance analysis of induction motor under different loading conditions using real-time monitoring," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 140, hal. 108065, 2022.
- [7] M. E. H. Benbouzid dan G. Kliman, "Advanced fault diagnosis and monitoring of induction motors: A review," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 12, hal. 10421–10431, 2020.
- [8] S. Nandi, H. A. Toliyat, dan X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, no. 1, hal. 1–15, 2021.
- [9] H. Huang, X. Weng, H. Xu, H. Zheng, dan J. Xiang, "Efficiency analysis of motor by B method at different voltages," in *Proc.SPIE*, Jan. 2024, hal. 129831D. doi: 10.1117/12.3017714.
- [10] P. Pillay dan R. Manyage, "Definitions of voltage unbalance," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 21, no. 5, hal. 50–51, 2001.
- [11] R. Saidur, "A review on electrical motors energy use and energy savings," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 3, hal. 877–898, 2010.
- [12] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.
- [13] C. A. Gross, *Electric Machines*. 2006. doi:

10.1201/9780429464997-4.

- [14] W. Theodore, *Electrical Machines, Drives And Power Systems*, 6/E. 2006. [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Electrical+Machines,+Drives+and+Power+Sytems#0>
- [15] J. Lemmens dan W. Deprez, *Electric Motors*. 2012. doi: 10.1002/9781119990048.ch7.
- [16] L. Gao, X. Li, dan Z. Chen, "Smart monitoring system for industrial air compressors using IoT-based approach," *J. Clean. Prod.*, vol. 366, hal. 132847, 2022.
- [17] A. Khayoon dan K. S. Faraj, *Three - Phase Induction Motor*. 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.13632.66568.
- [18] M. Enokizono, "Vector Magnetic Technology for Development of High Efficiency Machines in Oita National Project," *J. Japan Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 21, hal. 334–339, Jan. 2013, doi: 10.14243/jsaem.21.334.
- [19] H. Henao *dkk.*, "Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 15, no. 1, hal. 46–64, 2021, doi: 10.1109/MIE.2020.3038120.
- [20] D. A. Pratama, M. Anisah, dan K. A. Setiyadi, "The Three Phase Induction Motor Test Using MATLAB 2021b/SIMULINK at Bukit Energi Servis Terpadu, Ltd," *Int. J. Res. Vocat. Stud.*, vol. 1, no. 4, hal. 60–65, 2022, doi: 10.53893/ijrvocas.v1i4.84.