

**Analisa Sistem Star-Delta pada Motor Induksi Tiga Fasa
Kompresor 9 SAP 100 pada PT PLN Nusantara Power Unit
Pelaksana Pembangkitan Bukit Asam**

Abdul Azis^{1*}, Mitra Saputra²

1,2 Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika,
Universitas PGRI Palembang, Indonesia.

*e-mail: azis@univpgri-palembang.ac.id

ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa merupakan motor listrik yang banyak digunakan pada sistem industri karena konstruksinya sederhana dan memiliki tingkat keandalan tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja motor induksi tiga fasa pada Kompresor 9 SAP 100, khususnya terkait kecepatan sinkron, slip, daya masukan dan keluaran, torsi, efisiensi, serta efektivitas sistem pengasutan star-delta. Metode analisis dilakukan berdasarkan perhitungan parameter motor menggunakan data tegangan, arus, impedansi, serta karakteristik pembebahan kompresor. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kecepatan sinkron motor adalah 1.500 rpm, sementara kecepatan rotor sebesar 1.440 rpm, sehingga slip yang terjadi adalah 4%, masih dalam rentang normal operasi beban penuh. Daya masukan motor sebesar 4.756,66 W dan daya keluaran 3.700 W menghasilkan rugi-rugi total 1.056,66 W, dengan torsi sebesar 24,55 Nm. Efisiensi motor mencapai 77,79%, yang termasuk rendah untuk motor berdaya 3,7 kW sehingga mengindikasikan adanya peningkatan rugi-rugi akibat usia motor, kondisi operasional, atau pembebahan. Analisis sistem pengasutan menunjukkan bahwa metode star-delta efektif dalam menurunkan arus start. Pada hubungan Star (Y), tegangan fasa turun menjadi 220 V sehingga arus start berkurang menjadi 49,62 A dengan torsi awal 12,844 Nm. Setelah berpindah ke Delta (Δ), motor menerima tegangan penuh 380 V dan torsi meningkat menjadi 38,320 Nm, memungkinkan motor bekerja optimal pada kondisi operasi normal. Secara keseluruhan, motor masih bekerja baik ditinjau dari slip dan torsi, namun efisiensi yang rendah memerlukan evaluasi lanjutan terhadap kondisi fisik dan pembebannya. Sistem star-delta terbukti mampu mengurangi arus start secara signifikan dan meningkatkan keandalan operasi motor.

Kata Kunci: Motor induksi tiga fasa, slip, torsi, efisiensi motor, star-delta, arus start

***Analysis of the Star-Delta Starting System on a Three-Phase Induction Motor
of the 9 SAP 100 Compressor at PT PLN Nusantara Power
Bukit Asam Generation Unit***

ABSTRACT

Three-phase induction motors are widely used in industrial applications due to their simple construction and high reliability. This study aims to analyze the performance of a three-phase induction motor used in the 9 SAP 100 Compressor, focusing on synchronous speed, slip, input and output power, torque, efficiency, and the effectiveness of the star-delta starting method. The analysis was carried out based on calculated motor parameters using voltage, current, impedance, and loading characteristics. The results show that the synchronous speed of the motor is 1,500 rpm, while the rotor speed reaches 1,440 rpm, producing a slip of 4%, which is still within the normal operating range under full load. The motor input power is 4,756.66 W, and the output power is 3,700 W, resulting in total losses of 1,056.66 W with a generated torque of 24.55 Nm. The motor efficiency is 77.79%, which is considered low for a 3.7 kW motor, indicating increased losses due to motor age, operational conditions, or loading factors. Analysis of the starting system shows that the star-delta method effectively reduces the starting current. In the Star (Y) connection, the phase voltage drops to 220 V, reducing the starting current to 49.62 A with an initial torque of 12.844 Nm. After switching to the Delta (Δ) configuration, the motor receives the full 380 V supply, increasing the torque to 38.320 Nm and allowing optimal operation under normal working

conditions. Overall, the motor operates properly in terms of slip and torque, but its relatively low efficiency requires further evaluation of its physical condition and load characteristics. The star-delta starting method significantly reduces the starting current and enhances the motor's reliability during operation.

Keywords: Three-phase induction motor, slip, torque, motor efficiency, star-delta starting, starting current

I. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu mesin listrik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri karena memiliki konstruksi yang sederhana, biaya perawatan rendah, serta kemampuan operasi yang andal dan efisien. Motor ini diaplikasikan secara luas pada berbagai sistem mekanis seperti pompa, blower, conveyor, dan khususnya kompresor industri yang membutuhkan kontinuitas operasi dan performa tinggi [1]. Keandalan kerja motor induksi sangat dipengaruhi oleh parameter operasional seperti kecepatan sinkron, slip, daya masukan, daya keluaran, torsi, dan efisiensi.

Dalam praktik industri, informasi awal mengenai karakteristik motor biasanya tercantum pada nameplate. Namun demikian, data tersebut hanya memberikan gambaran umum sehingga analisis mendalam sangat diperlukan untuk memastikan performa aktual motor sesuai dengan kebutuhan beban. Perhitungan teknis berbasis data nameplate menjadi penting untuk mengetahui apakah motor bekerja pada efisiensi optimal, tidak mengalami kelebihan beban, serta dapat menghasilkan torsi yang cukup pada berbagai kondisi operasi [2].

Salah satu faktor penting yang memengaruhi performa motor adalah konfigurasi hubungan belitan stator, yaitu hubungan Star (Y) dan Delta (Δ). Sistem Star-Delta merupakan metode starting yang paling umum digunakan untuk mengurangi arus start dan menghindari lonjakan beban listrik pada saat motor pertama kali dioperasikan. Pada hubungan Star, tegangan fasa lebih rendah sehingga arus start berkurang signifikan, sementara pada hubungan Delta, tegangan penuh diberikan ke belitan sehingga motor mampu menghasilkan torsi maksimum untuk operasi normal [3-4].

Dalam sistem penggerak kompresor seperti Kompresor 9 SAP 100 di PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Bukit Asam, keberhasilan pengoperasian motor sangat bergantung pada pengaturan hubungan Star-Delta yang tepat. Motor kompresor membutuhkan torsi besar sekaligus start yang aman agar tidak menimbulkan gangguan pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, analisis terhadap karakteristik motor pada kedua hubungan tersebut menjadi sangat penting untuk memastikan motor bekerja efisien dan andal [5].

Dalam konteks pembangkitan tenaga listrik, stabilitas sistem sangat dipengaruhi oleh kualitas peralatan yang beroperasi di dalamnya. Evaluasi terhadap performa motor, termasuk efisiensi, daya masukan, torsi, serta slip, menjadi penting untuk memastikan bahwa setiap unit mesin bekerja secara optimal tanpa menimbulkan gangguan pada sistem distribusi maupun transmisi. Upaya ini bertujuan untuk menjaga keandalan dan kestabilan daya pada fasilitas PLN guna menjamin kontinuitas pelayanan listrik [6-7].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menghitung dan menganalisis parameter operasional motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100, meliputi kecepatan sinkron, slip, daya masukan, daya keluaran, torsi, efisiensi, serta performa motor pada hubungan Star dan Delta. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengoperasian sistem motor Star-Delta dan dapat mendukung peningkatan keandalan sistem mekanik dan kelistrikan di PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Bukit Asam.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa adalah mesin listrik arus bolak-balik (AC) yang paling umum digunakan dalam sistem industri karena konstruksinya sederhana, kokoh, biaya perawatan rendah, dan memiliki keandalan tinggi. Motor ini terdiri dari dua bagian utama: stator (bagian diam) yang berisi kumparan tiga fasa, dan rotor (bagian berputar), yang secara umum menggunakan rotor sangkar (squirrel cage) atau rotor belitan (wound rotor) [8-9].

Prinsip kerja motor induksi tiga fasa didasarkan pada fenomena induksi elektromagnetik. Ketika tegangan tiga fasa diberikan pada kumparan stator, arus tiga fasa mengalir dan menghasilkan medan magnet berputar (rotating magnetic field). Medan magnet ini memotong konduktor rotor sehingga menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) induksi di rotor sesuai dengan Hukum Faraday. GGL tersebut menyebabkan munculnya arus pada rotor, dan arus rotor di dalam medan magnet stator akan mengalami gaya Lorentz yang menghasilkan torsi elektromagnetik. Torsi ini menyebabkan rotor mulai berputar mengikuti arah medan magnet stator. Dengan demikian, motor menghasilkan gerakan mekanik dari energi listrik. Namun demikian, rotor tidak pernah mencapai kecepatan medan magnet stator (kecepatan sinkron), karena selalu ada selisih kecepatan yaitu slip yang memungkinkan induksi arus terus berlangsung [4,9-10].

2.1.1. Kecepatan Sinkron Motor Induksi Tiga Fasa

Kecepatan sinkron adalah kecepatan medan magnet berputar pada stator motor induksi. Kecepatan ini bergantung pada frekuensi sumber listrik dan jumlah kutub motor. Rumus untuk menghitung kecepatan sinkron adalah [4-5,11]:

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

N_s = Kecepatan sinkron (rpm)

f = Frekuensi (Hz)

P = Jumlah kutub motor

2.1.2. Slip pada Motor Induksi Tiga Fasa

Slip adalah selisih relatif antara kecepatan medan magnet stator (kecepatan sinkron, N_s) dan kecepatan aktual rotor (N_r) pada motor induksi. Slip inilah yang memungkinkan timbulnya induksi arus pada rotor sehingga motor dapat menghasilkan torsi. Slip didefinisikan sebagai [4-5,11]:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Apabila dinyatakan dalam persen (%) [4-5,11]:

$$s(%) = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

$s(%)$ = Slip (%)

N_r = Kecepatan rotor (rpm)

Pada kondisi beban normal, rotor berputar mendekati kecepatan nominal sehingga slip bernilai kecil, umumnya berada pada kisaran 2% hingga 6% tergantung desain motor, kapasitas

daya, serta tingkat pembebanan. Slip inilah yang menjadi indikator seberapa jauh kinerja motor dari kecepatan sinkronnya [4-5,11].

2.1.3. Daya Masukan Motor Induksi Tiga Fasa

Daya masukan (input power) pada motor induksi tiga fasa adalah jumlah daya listrik yang diterima motor melalui terminal tiga fasanya. Daya ini digunakan untuk menghasilkan medan magnet stator, menginduksi arus pada rotor, dan kemudian menghasilkan torsi pada poros motor. Namun, sebagian daya mengalami rugi-rugi seperti rugi tembaga, rugi inti besi, dan rugi mekanis. Motor induksi tiga fasa termasuk beban arus bolak-balik tiga fasa, sehingga daya aktif yang terserap dapat dihitung menggunakan rumus daya tiga fasa. Pada sistem tiga fasa, daya masukan dapat dihitung dengan persamaan [4-5]:

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad \dots \dots \dots (4)$$

atau dapat dituliskan sebagai [4-5]:

$$P_{in} = 3 V_{ph} I_{ph} \cos \theta \quad \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan:

- P_{in} = Daya masukan (W)
 V_L = Tegangan line-to-line (V)
 I_L = Arus line (A)
 V_{ph} = Tegangan fasa (V)
 I_{ph} = Arus fasa (A)
 $\cos \theta$ = Faktor daya

2.1.4. Daya Keluaran Poros dan Torsi Motor Induksi Tiga Fasa

Daya keluaran poros (output power) adalah daya mekanis yang dihasilkan motor pada porosnya, yaitu daya yang benar-benar digunakan untuk menggerakkan beban seperti kompresor, pompa, blower, atau mesin industri lainnya. Besarnya daya keluaran poros dipengaruhi oleh torsi yang dihasilkan motor dan kecepatan putaran rotor. Rumus daya keluaran poros adalah [4-5]:

$$P_{out} = T \omega \quad \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan:

- P_{out} = Daya keluaran poros (W)
 T = Torsi motor (Nm)
 ω = Kecepatan sudut (rad/s)

Kecepatan sudut dapat dihitung dari kecepatan rotor, yaitu [4-5]:

$$\omega = \frac{2\pi N_r}{60} \quad \dots \dots \dots (7)$$

Maka daya keluaran poros dapat dihitung dengan menggunakan torsi dan kecepatan putaran, yaitu [4-5]:

$$P_{out} = \frac{2\pi N_r T}{60} \quad \dots \dots \dots (8)$$

Torsi adalah gaya puntir yang dihasilkan motor akibat interaksi antara arus rotor dan medan magnet stator. Secara fisik, torsi menyebabkan rotor berputar dan memberikan energi mekanis pada sistem yang digerakkan. Torsi dirumuskan sebagai [4-5]:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega} = \frac{P_{out} \times 60}{2\pi N_r} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

2.1.5. Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa

Efisiensi menunjukkan seberapa efektif motor mengubah energi listrik menjadi energi mekanis. Karena adanya rugi-rugi, daya keluaran selalu lebih kecil daripada daya masukan. Secara matematis dinyatakan sebagai [4-5,11-12]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

Apabila dinyatakan dalam persen (%) [4-5,11-12]:

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

Keterangan:

$\eta(\%)$ = Efisiensi (%)

2.2. Sistem Star-Delta Motor Induksi Tiga Fasa

Rangkaian star-delta ($Y-\Delta$) adalah rangkaian starter yang umum digunakan untuk mengoperasikan motor induksi tiga fasa, khususnya pada motor berdaya menengah hingga besar. Motor tiga fasa memerlukan arus dan torsi awal yang relatif tinggi untuk mulai berputar, sehingga diperlukan metode pengasutan yang dapat mengurangi lonjakan arus saat start [1,3-4]. Pada metode ini, kumparan motor mula-mula dihubungkan dalam konfigurasi bintang (star) untuk menurunkan tegangan fasa dan arus start, kemudian setelah motor mencapai kecepatan tertentu hubungan diubah menjadi konfigurasi delta untuk operasi normal [5,13].

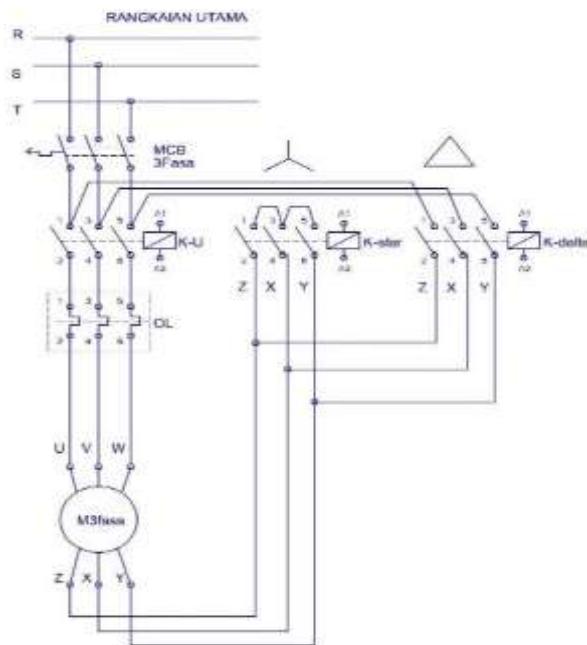
Fungsi rangkaian star-delta [1,3-5,13-14]

- Mengurangi arus start motor induksi tiga fasa dengan cara menurunkan tegangan fasa ketika motor pertama kali dihidupkan (konfigurasi star).
- Melindungi motor, kabel, dan peralatan lain dari lonjakan arus start yang terlalu besar yang dapat menyebabkan pemanasan berlebih dan penurunan tegangan pada sistem.
- Menurunkan tegangan mekanis pada kopling dan beban karena torsi start lebih kecil dibandingkan pengasutan langsung (DOL).
- Memungkinkan motor tetap beroperasi pada torsi dan daya nominal setelah peralihan ke konfigurasi delta ketika motor sudah mencapai kecepatan kerja.

Dengan demikian, rangkaian star-delta banyak diterapkan pada aplikasi industri yang menggunakan motor tiga fasa berdaya besar, seperti kompresor, pompa, dan motor penggerak konveyor, untuk memperoleh start yang lebih halus sekaligus menjaga keandalan sistem kelistrikan [1,5].

Cara kerja metode ini adalah sebagai berikut: ketika motor mulai dihidupkan, lilitan stator pertama kali dihubungkan dalam konfigurasi bintang (star). Setelah motor mencapai kondisi berputar normal, sambungan tersebut secara otomatis berubah menjadi delta. Untuk memahami prosesnya dengan lebih jelas, dapat diperhatikan pada gambar 1 [4,11].

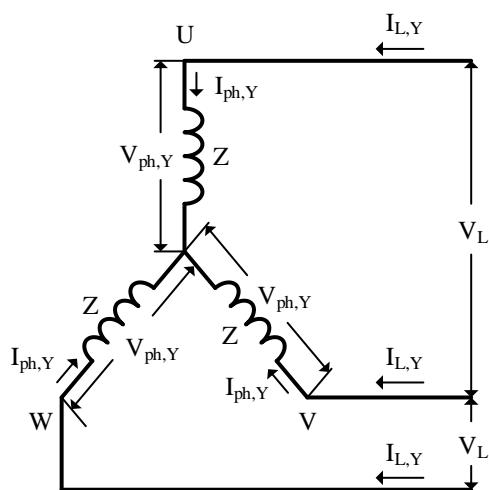
Metode starting star-delta memanfaatkan penurunan tegangan yang diterima motor saat stator berada dalam hubungan bintang. Pada tahap awal pengasutan, ketika motor masih terhubung star, arus yang mengalir hanya sekitar sepertiga dari arus yang akan terjadi jika motor di-start menggunakan metode DOL (Direct On Line) [4,14]. Karena torsi motor berbanding lurus dengan kuadrat tegangan, maka torsi yang dihasilkan saat motor berada dalam hubungan bintang juga hanya sekitar sepertiga dari torsi ketika motor terhubung dalam hubungan delta [3,5]. Hubungan antara arus, tegangan, dan torsi pada rangkaian Star-Delta ($Y-\Delta$) dapat dinyatakan sebagai berikut [4,11].



Gambar 1. Rangkaian Star-Delta

2.2.1. Hubungan Star pada Motor Induksi Tiga Fasa

Pada hubungan star, ujung-ujung kumparan stator motor induksi tiga fasa disatukan pada satu titik yang disebut titik netral (N), sedangkan ujung lainnya dihubungkan ke terminal line U, V, dan W. Konfigurasi ini menyebabkan tiap kumparan tidak langsung menerima tegangan line-to-line, tetapi hanya tegangan fasa terhadap titik netral [1,3-4].



Gambar 2. Hubungan Star (Y)

1. Tegangan pada hubungan star

Pada saat motor induksi tiga fasa dihubungkan dalam konfigurasi star, setiap kumparan stator tidak langsung menerima tegangan line-to-line, tetapi hanya menerima tegangan fasa

terhadap titik netral. Besar tegangan fasa ini dapat dihitung dari tegangan line-to-line dengan hubungan berikut [1,4,14]:

$$V_{ph,Y} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

Keterangan:

$V_{ph,Y}$ = Tegangan fasa pada tiap kumparan motor ketika terhubung star (V)

V_L = Tegangan line-to-line (V)

2. Impedansi per fasa

Impedansi ekivalen per fasa motor induksi tiga fasa diperoleh dari penjumlahan komponen resistif dan reaktif stator serta rotor yang direferensikan ke sisi stator. Secara umum, impedansi ekivalen per fasa dinyatakan sebagai [4-5,11]:

$$Z = (R_1 + R_2'/s) + j(X_1 + X_2') \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

Untuk kondisi start, slip = 1 maka [4-5,11]:

$$Z_{start} = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2') \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

Besar (magnitudo) impedansi dihitung dengan [4-5,11]:

$$|Z_{start}| = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

Keterangan:

Z = Impedansi ekivalen per fasa motor induksi (Ω)

Z_{start} = Impedansi ekivalen per fasa pada saat start (Ω)

R_1 = Tahanan stator per fasa (Ω)

R_2' = Tahanan rotor yang direferensikan ke stator per fasa (Ω)

X_1 = Reaktansi kebocoran stator per fasa (Ω)

X_2' = Reaktansi kebocoran rotor yang direferensikan ke stator per fasa (Ω)

R_2'/s = Tahanan rotor yang direferensikan ke stator per fasa yang dibagi slip (Ω)

3. Arus pada hubungan star

Pada hubungan star, arus fasa sama dengan arus line, sehingga hasil perhitungan arus per fasa sekaligus merepresentasikan arus line motor pada saat starting, yaitu [3-4,14]:

$$I_{ph,Y} = I_{L,Y} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

Dengan mengetahui tegangan fasa dan impedansi ekivalen per fasa, dapat dihitung besarnya arus start yang mengalir pada tiap fasa ketika motor dihubungkan star, yaitu [3-4,14]:

$$I_{ph,Y} = I_{L,Y} = \frac{V_{ph,Y}}{|Z_{start}|} \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

Keterangan:

$I_{ph,Y}$ = Arus fasa yang mengalir di tiap kumparan stator (A)

$I_{L,Y}$ = Arus line yang mengalir pada konduktor line sumber (A)

4. Torsi pada hubungan star

Torsi elektromagnetik yang dihasilkan motor pada saat starting dengan hubungan star dapat dihitung berdasarkan tegangan fasa, parameter rangkaian ekivalen, dan kecepatan sudut sinkron. Persamaan torsi ini menunjukkan pengaruh penurunan tegangan fasa pada hubungan star terhadap besarnya torsi start yang dihasilkan motor, yaitu [1,4-5,11]:

$$T = \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{V_{ph}^2 (R_2'/s)}{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

Untuk kondisi start pada hubungan star, slip = 1 dan $V_{ph} = V_{ph,Y}$ maka [1,4-5,11]:

$$T_{start,Y} = \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{V_{ph,Y}^2 R_2'}{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

Keterangan:

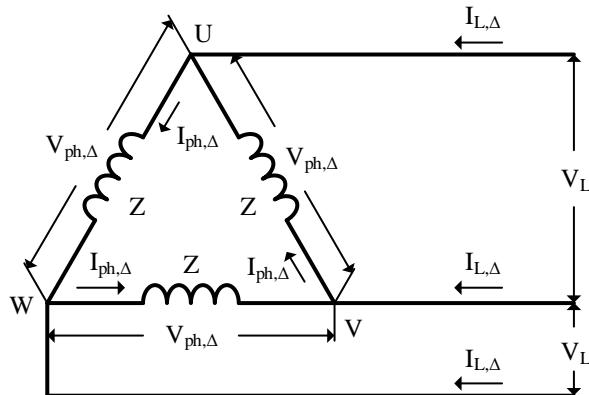
T = Torsi elektromagnetik motor (Nm)

$T_{start,Y}$ = Torsi start motor pada hubungan star (Nm)

ω_s = Kecepatan sudut sinkron, $\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60}$ (rad/s)

2.2.2. Hubungan Delta pada Motor Induksi Tiga Fasa

Pada hubungan delta, ujung-ujung kumparan stator motor induksi tiga fasa dihubungkan membentuk suatu loop tertutup: ujung kumparan pertama dihubungkan dengan awal kumparan kedua, demikian seterusnya hingga membentuk segitiga. Terminal line U, V, dan W kemudian dihubungkan pada tiga titik sudut segitiga tersebut. Konfigurasi ini membuat setiap kumparan langsung menerima tegangan line-to-line sehingga lebih cocok digunakan untuk operasi normal dengan torsi dan daya penuh [1,3-4,13].



Gambar 3. Hubungan Delta (Δ)

1. Tegangan pada hubungan delta

Pada saat motor induksi tiga fasa dioperasikan dengan hubungan delta (Δ), setiap kumparan stator langsung terhubung di antara dua sumber sumber sehingga menerima tegangan penuh line-to-line. Besar tegangan fasa pada masing-masing kumparan dapat dinyatakan sebagai berikut [4-5,13-14]:

$$V_{ph,\Delta} = V_L \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

Keterangan:

$V_{ph,\Delta}$ = Tegangan fasa pada tiap kumparan motor ketika terhubung delta (V)

V_L = Tegangan line-to-line (V)

2. Impedansi per fasa

Impedansi ekivalen per fasa motor induksi tiga fasa diperoleh dari penjumlahan komponen resistif dan reaktif stator serta rotor yang direferensikan ke sisi stator. Secara umum, impedansi ekivalen per fasa dinyatakan sebagai [4-5,11]:

$$Z = (R_1 + R_2'/s) + j(X_1 + X_2')$$

Untuk kondisi start, slip = 1 maka [4-5,11]:

$$Z_{start} = (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2')$$

Besar (magnitudo) impedansi dihitung dengan [4-5,11]:

$$|Z_{start}| = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

3. Arus pada hubungan delta

Pada hubungan delta, arus line merupakan resultan dua arus fasa sehingga nilainya lebih besar dibanding arus yang mengalir di tiap kumparan, yaitu [3-4,14]:

$$I_{L,\Delta} = \sqrt{3} I_{ph,\Delta} \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

Dengan mengetahui impedansi ekivalen per fasa dan tegangan fasa pada hubungan delta, arus yang mengalir di tiap kumparan, yaitu [3-4,14]:

$$I_{ph,\Delta} = \frac{V_{ph,\Delta}}{|Z_{start}|} = \frac{V_L}{|Z_{start}|} \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

Kemudian arus line dari hubungan delta adalah [3-4,14]:

$$I_{L,\Delta} = \sqrt{3} I_{ph,\Delta} = \sqrt{3} \frac{V_L}{|Z_{start}|} \quad \dots \dots \dots \quad (24)$$

Keterangan:

$I_{L,\Delta}$ = Arus line yang mengalir pada konduktor line sumber (A)

$I_{ph,\Delta}$ = Arus fasa yang mengalir di tiap kumparan motor (A)

4. Torsi pada hubungan delta

Torsi elektromagnetik pada hubungan delta dihitung dengan persamaan torsi umum motor induksi, dengan tegangan fasa yang sama dengan tegangan line-to-line. Hal ini menyebabkan torsi start pada hubungan delta menjadi beberapa kali lebih besar dibandingkan pada hubungan star, sehingga hubungan delta digunakan untuk operasi normal setelah motor mencapai kecepatan kerja [1,3-5,13].

$$T = \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{V_{ph}^2 (R_2'/s)}{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)$$

Untuk kondisi start pada hubungan delta, slip = 1 dan $V_{ph,\Delta} = V_L$ maka [1,3-5,13]:

$$T_{start,\Delta} = \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{V_L^2 R_2'}{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

Keterangan:

$T_{start,\Delta}$ = Torsi elektromagnetik motor pada hubungan delta (Nm)

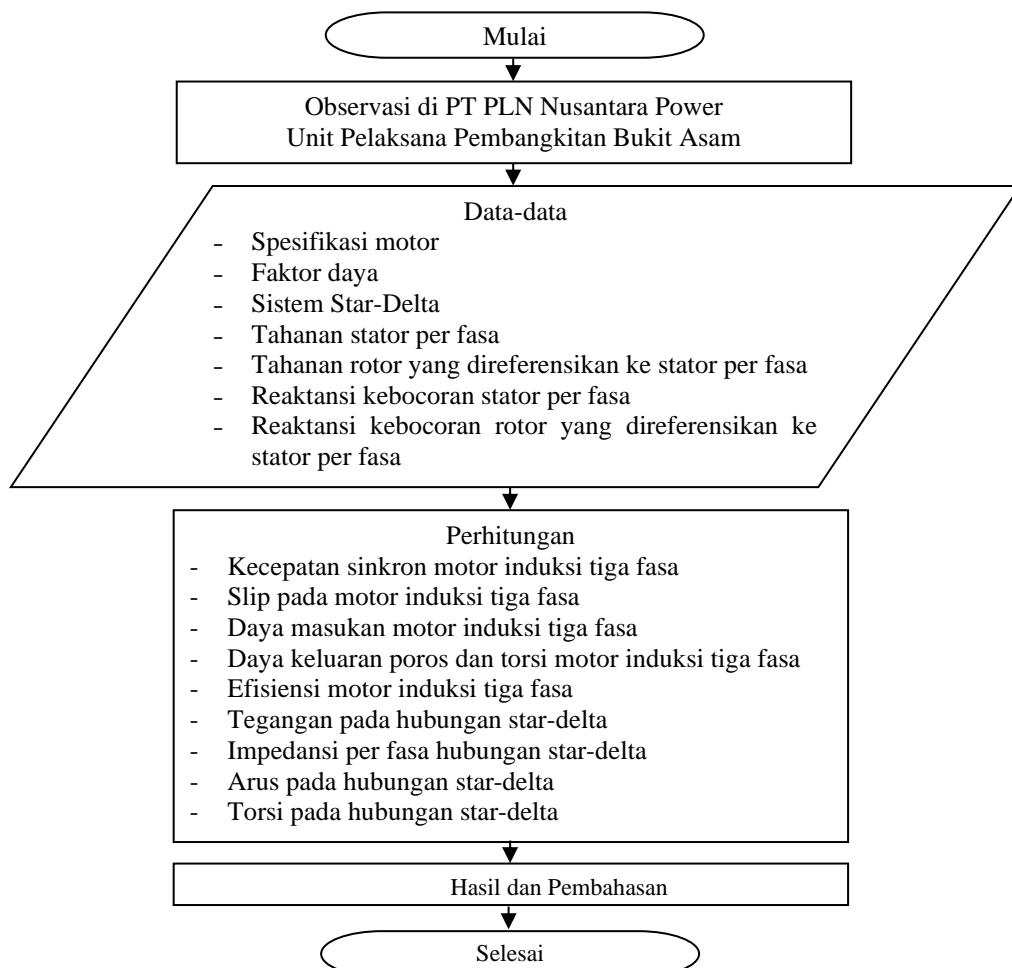
III. METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada PT PLN (Persero) Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Bukit Asam, beralamat di Jalan Lingga Raya, Kelurahan Tanjung Enim, Kecamatan Lawang Kidul, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan, Indonesia 31711. Objek penelitian adalah motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 yang dioperasikan pada PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Bukit Asam, yang menggunakan sistem pengasutan (starting) Star-Delta. Penelitian dilaksanakan mulai tanggal 9 September 2024 sampai dengan 13 Desember 2024.

3.2. Tahapan Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder. Data sekunder dalam penelitian ini adalah data spesifikasi motor, faktor daya, sistem star-delta, tahanan stator per fasa, tahanan rotor yang direferensikan ke stator per fasa, reaktansi kebocoran stator per fasa, reaktansi kebocoran rotor yang direferensikan ke stator per fasa. Tahapan yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Penelitian

Data yang digunakan dalam pengujian ini berasal dari motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 yang dioperasikan pada PT PLN Nusantara Power Unit Pelaksana Pembangkitan Bukit Asam, yang menggunakan sistem pengasutan (starting) Star-Delta. Spesifikasi motor dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Nameplate motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100

Berdasarkan nameplate tersebut, detail spesifikasi teknis motor dirangkum dalam Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Nameplate Motor Induksi Tiga Fasa Kompresor 9 SAP 100

Parameter	Nilai
Type	TECO ELEC. & MACH. PTE. LTD.
Serial Number	15755537- 2
Pole	4
Hubungan	Δ-Y
Tegangan	220-380 V
Frekuensi	50 Hz
Daya	3,7 kW
Cos θ	0,90
Arus	13,87-8,03 A
N	1.440 Rpm
Weight	43 kg
R_1	0,464 Ω
R_2'	0,273 Ω
X_1	2,186 Ω
X_2'	2,186 Ω

4.2. Hasil

4.2.1. Motor Induksi Tiga Fasa

4.2.1.1. Kecepatan Sinkron Motor Induksi Tiga Fasa

Kecepatan sinkron motor induksi tiga fasa ditentukan oleh frekuensi sumber dan jumlah kutub. Untuk motor tiga fasa kompresor 9 SAP 100 dengan frekuensi 50 Hz dan 4 kutub, maka kecepatan sinkron adalah:

$$N_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 50}{4} = 1.500 \text{ rpm}$$

4.2.1.2. Slip pada Motor Induksi Tiga Fasa

Slip menyatakan selisih relatif antara kecepatan sinkron dan kecepatan rotor. Slip pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$s(\%) = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% = \frac{1.500 - 1.440}{1.500} \times 100\% = 4\%$$

4.2.1.3. Daya Masukan Motor Induksi Tiga Fasa

Daya masukan pada motor induksi tiga fasa adalah daya listrik total yang diserap dari sistem tiga fasa melalui terminal stator, yang ditentukan oleh tegangan line-to-line, arus line, dan faktor daya motor. Daya masukan pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = \sqrt{3} \times 380 \times 8,03 \times 0,9 = 4.756,662 W$$

4.2.1.4. Daya Keluaran Poros dan Torsi Motor Induksi Tiga Fasa

Daya keluaran poros adalah daya mekanis yang tersedia pada poros motor dan dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan beban. Besar daya mekanis ini berhubungan langsung dengan torsi yang dihasilkan dan kecepatan putar rotor. Daya keluaran poros pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$P_{out} = 3,7 kW = 3.700 W$$

Maka torsi pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$T = \frac{P_{out} \times 60}{2\pi N_r} = \frac{3.700 \times 60}{2 \times 3,14 \times 1.440} = 24,55 Nm$$

4.2.1.5. Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa

Efisiensi motor induksi tiga fasa menunjukkan seberapa besar persentase daya listrik masukan yang berhasil dikonversi menjadi daya mekanis pada poros motor. Dengan membandingkan daya keluaran terhadap daya masukan hasil perhitungan. Efisiensi pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{3.700}{4.756,66} \times 100\% = 77,79\%$$

4.2.2. Sistem Star-Delta Motor Induksi Tiga Fasa**4.2.2.1. Hubungan Star pada Motor Induksi Tiga Fasa**

1. Tegangan pada hubungan star

Tegangan fasa pada hubungan star pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$V_{ph,Y} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 V$$

2. Impedansi per fasa

Impedansi per fasa pada kondisi start pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$\begin{aligned} Z_{start} &= (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2') \\ &= (0,464 + 0,273) + j(2,186 + 2,186) = 0,737 + j4,372 \end{aligned}$$

Maka besar impedansi adalah:

$$|Z_{start}| = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} = \sqrt{(0,737)^2 + (4,372)^2} = 4,434 \Omega$$

3. Arus pada hubungan star

Arus start yang mengalir pada tiap fasa ketika motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 dihubungkan star adalah:

$$I_{ph,Y} = I_{L,Y} = \frac{V_{ph,Y}}{|Z_{start}|} = \frac{220}{4,434} = 49,62 \text{ A}$$

4. Torsi pada hubungan star

Torsi start yang dihasilkan motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 ketika dihubungkan star adalah:

$$\begin{aligned} T_{start,Y} &= \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{V_{ph,Y}^2 R_2'}{(R_1+R_2')^2 + (X_1+X_2')^2} \right) = \frac{3}{\frac{2\pi N_S}{60}} \left(\frac{V_{ph,Y}^2 R_2'}{(R_1+R_2')^2 + (X_1+X_2')^2} \right) \\ &= \frac{3}{\frac{2 \times 3,14 \times 1.500}{60}} \left(\frac{220^2 \times 0,273}{(0,737)^2 + (4,372)^2} \right) = \frac{3}{157} \left(\frac{13.213,2}{19,658} \right) = 12,844 \text{ Nm} \end{aligned}$$

4.2.2.2. Hubungan Delta pada Motor Induksi Tiga Fasa

1. Tegangan pada hubungan delta

Tegangan pada hubungan delta pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$V_{ph,\Delta} = V_L = 380 \text{ V}$$

2. Impedansi per fasa

Impedansi per fasa pada kondisi start pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$\begin{aligned} Z_{start} &= (R_1 + R_2') + j(X_1 + X_2') \\ &= (0,464 + 0,273) + j(2,186 + 2,186) = 0,737 + j4,372 \end{aligned}$$

Maka besar impedansi adalah:

$$|Z_{start}| = \sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2} = \sqrt{(0,737)^2 + (4,372)^2} = 4,434 \Omega$$

3. Arus pada hubungan delta

Arus fasa pada tiap kumparan motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 adalah:

$$I_{ph,\Delta} = \frac{V_{ph,\Delta}}{|Z_{start}|} = \frac{380}{4,434} = 85,708 \text{ A}$$

Maka arus line pada hubungan delta adalah:

$$I_{L,\Delta} = \sqrt{3} I_{ph,\Delta} = \sqrt{3} \times 85,708 = 148,450 \text{ A}$$

4. Torsi pada hubungan delta

Torsi start yang dihasilkan motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 ketika dihubungkan delta adalah:

$$\begin{aligned} T_{start,\Delta} &= \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{V_L^2 R_2'}{(R_1+R_2')^2 + (X_1+X_2')^2} \right) = \frac{3}{\frac{2\pi N_S}{60}} \left(\frac{V_L^2 R_2'}{(R_1+R_2')^2 + (X_1+X_2')^2} \right) \\ &= \frac{3}{\frac{2 \times 3,14 \times 1.500}{60}} \left(\frac{380^2 \times 0,273}{(0,737)^2 + (4,372)^2} \right) = \frac{3}{157} \left(\frac{39.421,2}{19,658} \right) = 38,320 \text{ Nm} \end{aligned}$$

4.3. Pembahasan

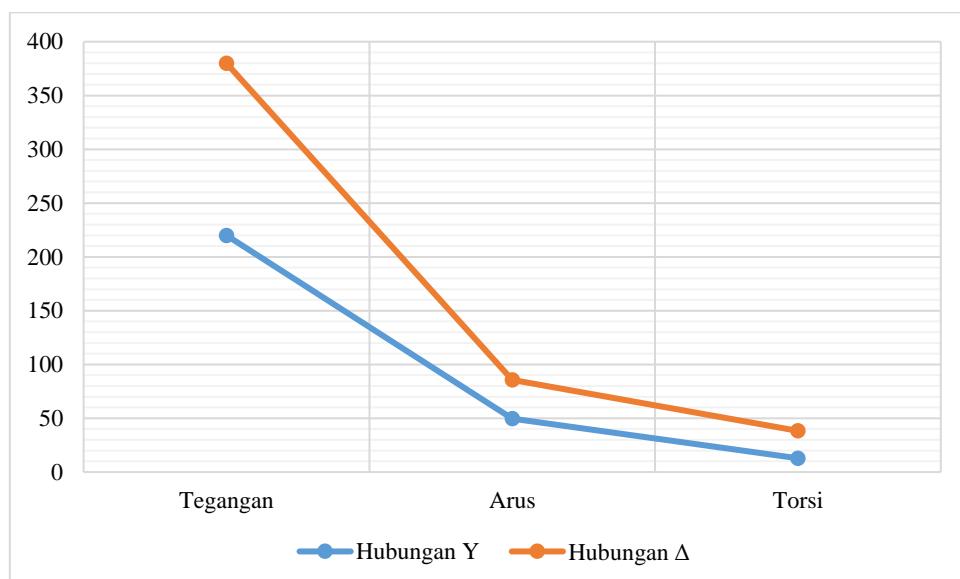
4.3.1. Motor Induksi Tiga Fasa

Berdasarkan hasil perhitungan, kecepatan sinkron atau kecepatan medan putar stator pada motor induksi tiga fasa adalah 1.500 rpm. Nilai ini merupakan kecepatan putaran medan magnet pada stator yang sepenuhnya ditentukan oleh frekuensi sumber dan jumlah kutub motor. Kecepatan rotor yang diperoleh dari hasil perhitungan adalah 1.440 rpm, sehingga slip motor sebesar 4%. Perbedaan antara kecepatan stator (1.500 rpm) dan kecepatan rotor (1.440 rpm) menunjukkan adanya selisih putaran yang menjadi sumber terjadinya gaya gerak listrik (GGL)

induksi pada rotor sehingga motor dapat menghasilkan torsi. Nilai slip 4% termasuk dalam rentang slip normal motor induksi, yaitu 3-5% pada beban penuh, sehingga dapat disimpulkan bahwa motor bekerja sesuai karakteristik operasi standarnya.

Daya masukan motor sebesar 4.756,66 W menunjukkan jumlah daya listrik yang diserap motor dari sistem tiga fasa, sedangkan daya keluaran mekanis pada poros sebesar 3.700 W mencerminkan daya yang berhasil dikonversi menjadi energi mekanis untuk menggerakkan kompresor. Selisih antara daya masukan dan daya keluaran menunjukkan adanya rugi-rugi daya sebesar 1.056,66 W yang berasal dari rugi tembaga stator dan rotor, rugi inti, gesekan mekanis, serta rugi ventilasi. Besar torsi motor yang dihitung adalah 24,55 Nm, nilai yang sesuai dengan karakteristik beban kompresor. Efisiensi motor sebesar 77,79% menandakan bahwa sekitar 22,21% daya masukan hilang sebagai rugi-rugi energi. Nilai efisiensi ini tergolong cukup rendah untuk motor berdaya 3,7 kW sehingga memungkinkan adanya peningkatan rugi-rugi akibat kondisi fisik motor yang menurun, faktor daya yang kurang optimal, atau kondisi kerja yang tidak ideal. Secara keseluruhan, motor masih berfungsi dengan baik berdasarkan nilai slip dan torsi yang diperoleh, namun efisiensi yang relatif rendah menunjukkan perlunya evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi motor untuk meningkatkan kinerjanya dan mengurangi rugi-rugi energi.

4.3.2. Sistem Star-Delta Motor Induksi Tiga Fasa



Gambar 6. Perbandingan tegangan, torsi dan arus Sistem Star-Delta

Berdasarkan hasil perhitungan, ketika motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 dihubungkan dalam konfigurasi Star (Y) pada saat starting, tegangan fasa yang diterima setiap kumparan adalah 220 V. Tegangan ini lebih rendah dibandingkan hubungan Delta karena adanya pembagian tegangan sebesar $1/\sqrt{3}$ dari tegangan line. Dengan impedansi total per fasa sebesar $4,434 \Omega$, arus starting yang mengalir pada tiap fasa tercatat sebesar 49,62 A. Nilai arus ini relatif lebih kecil karena konfigurasi star memang digunakan untuk menurunkan arus start demi melindungi jaringan dan motor dari lonjakan arus yang terlalu tinggi. Torsi start yang dihasilkan pada hubungan star adalah sebesar 12,844 Nm. Nilai torsi ini tergolong rendah,

sesuai karakteristik hubungan star yang memprioritaskan pengurangan arus masuk dengan konsekuensi torsi awal yang lebih kecil.

Pada saat motor beralih ke hubungan Delta (Δ) untuk kondisi operasi normal, tegangan fasa yang diterima kumparan meningkat menjadi sama dengan tegangan line yaitu 380 V. Dengan impedansi per fasa yang tetap sama yaitu $4,434 \Omega$, arus fasa meningkat menjadi 85,708 A, dan arus line mencapai 148,45 A. Arus yang jauh lebih besar ini sejalan dengan karakteristik hubungan delta yang memberikan suplai tegangan penuh ke tiap kumparan sehingga motor dapat menghasilkan torsi yang lebih besar. Hal ini terlihat dari hasil perhitungan torsi start pada hubungan delta yang mencapai 38,320 Nm, atau hampir tiga kali lebih besar dibandingkan torsi pada hubungan star. Perbandingan ini sesuai dengan teori bahwa torsi berbanding lurus dengan kuadrat tegangan, sehingga ketika tegangan fasa naik, torsi start meningkat secara signifikan.

Perbedaan arus dan torsi antara hubungan star dan delta menunjukkan bahwa metode Star-Delta sangat efektif untuk mengurangi arus start tanpa mengorbankan kemampuan motor dalam menghasilkan torsi pada kondisi operasi normal. Dengan torsi delta yang lebih besar, motor dapat menjalankan beban kompresor secara optimal setelah mencapai putaran tertentu, sementara hubungan star pada awal operasi membantu menghindari gangguan pada sistem kelistrikan akibat arus start yang tinggi. Secara keseluruhan, hasil perhitungan ini membuktikan bahwa penggunaan starter Star-Delta pada motor induksi tiga fasa Kompresor 9 SAP 100 sudah sesuai baik secara teknis maupun operasional.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa yang dilakukan, kecepatan sinkron motor induksi tiga fasa adalah 1.500 rpm yang menunjukkan kecepatan medan magnet stator sesuai dengan frekuensi sumber dan jumlah kutub motor. Kecepatan rotor sebesar 1.440 rpm menghasilkan slip 4%, yang masih berada pada batas normal operasi motor induksi beban penuh, sehingga motor dapat dikatakan bekerja sesuai karakteristik desainnya.

Daya masukan motor sebesar 4.756,66 W dan daya keluaran mekanis sebesar 3.700 W menunjukkan bahwa terdapat rugi-rugi total sebesar 1.056,66 W, yang meliputi rugi tembaga stator dan rotor, rugi inti besi, serta rugi mekanis dan ventilasi. Torsi motor sebesar 24,55 Nm sesuai dengan kebutuhan beban kompresor yang digerakkan. Efisiensi motor diperoleh sebesar 77,79%, menunjukkan bahwa sekitar 22,21% energi hilang sebagai rugi-rugi. Nilai ini tergolong lebih rendah dibandingkan motor standar pada daya 3,7 kW sehingga mengindikasikan adanya potensi penurunan performa akibat faktor usia motor, kondisi isolasi, atau karakteristik pembebahan yang kurang optimal.

Sistem star-delta efektif digunakan untuk mengurangi arus start yang sangat tinggi ketika motor pertama kali dihidupkan. Pada posisi Star (Y), tegangan fasa motor menjadi lebih rendah sehingga arus start turun hingga sekitar sepertiga dari arus start kondisi Delta, yang membantu mengurangi kejutan arus pada sistem tenaga dan memperpanjang umur peralatan. Setelah motor mencapai kecepatan tertentu, perpindahan ke Delta (Δ) memberikan tegangan penuh pada belitan motor sehingga torsi motor meningkat dan motor dapat beroperasi pada kapasitas normal.

Dengan demikian, motor induksi tiga fasa yang dianalisis masih bekerja cukup baik dari sisi slip dan torsi, namun efisiensi yang rendah menunjukkan perlunya evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi fisik dan pembebanannya. Sementara itu, sistem star-delta terbukti mendukung performa motor, khususnya dalam mengurangi arus start dan menjaga stabilitas sistem selama proses starting.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Addawami, F., & Putra, A. Y. W. (2022). Sistem Kerja Rangkaian Kontrol Star Delta Pada Motor 3 Fasa. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, 1(4), 56-65.
- [2] Muhamzib, M., Al Amin, M. S., & Nurdiana, N. (2025). Analisis Daya dan Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Pada Sistem Distribusi Air PDAM Desa Babat. *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 19(3), 331-338.
- [3] Amanda, R. R., & Turnip, H. (2023). Analisa Pengasutan Motor Dahlander Dengan Motor Listrik 3 Fasa Star-delta. *Prosiding Konferensi Nasional Social & Engineering Polmed (KONSEP)*, 4(1), 404-415.
- [4] RAMADHAN, R. R. (2019). *Analisa Pengasutan Star-Delta Motor Induksi Tiga Phasa* (Doctoral dissertation, FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA).
- [5] Gianto, R., & Hiendro, A. Evaluasi Kinerja Motor Induksi 3 Fasa 100 Hp/75 Kw Pada Panel Star-Delta Di Pdam Tirta Raya Adi Sucipto Kubu Raya. *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, 8(2).
- [6] Azis, A., & Febrianti, I. K. (2018). Evaluasi Ketersediaan Daya pada PT. PLN (Persero) Gardu Induk Bungaran Palembang. *Jurnal Ampere*, 3(2), 166-175.
- [7] Azis, A., & Pebrianti, I. K. (2019). Analisis Penyaluran Daya Listrik pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV dari PLTU Bukit Asam ke Gardu Induk Keramasan Palembang. *Jurnal Surya Energy*, 3(2), 282-290.
- [8] Gerong, R. U. I. P. S. Analisis Tahanan Isolasi dan Indeks Polaritas pada Motor Induksi 3 Fasa FC-PM-6A di FCCU Maintenance Area 3 PT Kilang Pertamina Internasional Refinery Unit III Plaju-Sungai Gerong.
- [9] Dahlani, A., Al Amin, M. S., Perawati, P., & Irwansi, Y. (2024). Evaluasi Sistem Proteksi Motor Induksi 3 Fasa sebagai Mesin Bubut di CV. Multi Teknik Perkasa (MTP). *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Informatika*, 3(3), 109-118.
- [10] Darmawan, E., Said, S., Agustini, S., Sinambela, R., Azis, A., Puspasari, F., Boli, R. H., Sunardi, Abidin, Z., Fitriyanti, Noor, N. C., & Maika, S. H. (2025). *Medan elektromagnetik*. CV GETPRESS INDONESIA.
- [11] Muzani, A. I. ANALISIS PENGUJIAN MOTOR INDUKSI 3 PHASE SUBMERSIBLE SUMUR DALAM YANG TERHUBUNG STAR DELTA DENGAN RANGKAIAN SISTEM TDR PADA PDAM TIRTA BARIBIS BREBES.
- [12] Emidiana, E. (2020). Efisiensi Motor Induksi Jenis Shaded Pole Sebagai Penggerak Blower. *Jurnal Ampere*, 5(2), 85-91.
- [13] Andreansyah, R. (2019). Perencanaan Dan Pembuatan Rangkaian Daya Starting Motor 3 Fasa, 380 Volt, 50 Hz, 3 Hp Dengan Metoda Bintang (Y) "Segitiga (Δ)". *Cyclotron*.
- [14] TITL, A. D. (2023). Studi Perbandingan Arus Start Motor Induksi Sistem Pengasutan Dol Dan Star Delta Menggunakan Automation Studio. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*.