

ANALISIS STARTING MOTOR INDUKSI PADA BALL MILL PLANT DENGAN LIQUID RESISTANCE STARTER DI PT CITRA PALU MINERALS

Muh Bintang Alfito¹, Ahmad Antares Adam², Martdiansyah³, Baso M⁴, Yulius S P⁵, Maryantho M⁶

Teknik Elektro, Universitas Tadulako ^{1,2,3,4,5,6}
bintangalfito9@gmail.com

ABSTRACT

The 3700 kW induction motor at the Ball Mill Plant at PT Citra Palu Minerals requires an effective starting method to prevent current surges and voltage drops during initial operation. This study aims to analyze the starting performance of induction motors using three starting methods, namely Liquid Resistance Starter (LRS), Direct On Line (DOL), and Wye-Delta. The analysis is carried out by mathematical calculations through the induction motor equivalent circuit to obtain the starting current, starting torque, starting power and starting voltage values of each starting method. The calculation results show that the LRS method produces a starting current of 421.47 A, a starting torque of 42,259.84 Nm, a starting power of 4,423.19 kW and a starting voltage of 6,374.40 V. Compared to DOL and Wye Delta, the LRS method provides better performance in terms of limiting current and maintaining voltage stability, and is able to produce higher torque and power. The calculation of the LRS method also shows conformity with the actual data in the field, so that the model used can be used as a technical reference. Based on the analysis results, the LRS method is considered the most suitable for starting high power induction motors in heavy-load applications such as Ball Mill Plant.

Keywords : Induction Motor, Liquid Resistance Starter, Direct On Line, Wye-Delta, Starting Performance, Ball Mill Plant.

INTISARI

Motor induksi 3700 kW pada Ball Mill Plant di PT Citra Palu Minerals membutuhkan metode starting yang efektif untuk mencegah lonjakan arus dan penurunan tegangan saat awal pengoperasian. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja starting motor induksi menggunakan tiga metode pengasutan, yaitu Liquid Resistance Starter (LRS), Direct On Line (DOL), dan Wye-Delta. Analisis dilakukan dengan perhitungan secara matematis melalui rangkaian ekivalen motor induksi untuk memperoleh nilai arus starting, torsi starting, daya starting dan tegangan starting dari masing-masing metode pengasutan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa metode LRS menghasilkan arus starting sebesar 421,47 A, torsi starting 42.259,84 Nm, daya starting 4.423,19 kW dan tegangan starting 6.374,40 V. Dibandingkan dengan DOL dan Wye-Delta, metode LRS memberikan kinerja yang lebih baik dalam hal membatasi arus dan menjaga kestabilan tegangan, serta mampu menghasilkan torsi dan daya yang lebih tinggi. Perhitungan metode LRS juga menunjukkan kesesuaian dengan data aktualnya di lapangan, sehingga model yang digunakan dapat dijadikan acuan teknis. Berdasarkan hasil analisis, metode LRS dinilai paling cocok untuk pengasutan motor induksi berdaya besar pada aplikasi berat seperti Ball Mill Plant.

Kata kunci: Motor Induksi, Liquid Resistance Starter, Direct On Line, Wye-Delta, Kinerja Starting, Ball Mill Plant.

I. PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan salah satu mesin listrik yang paling banyak digunakan dalam sistem industri karena kemampuannya mengubah energi listrik menjadi energi mekanik secara efisien serta memiliki desain yang kokoh dan mudah dioperasikan. Motor induksi tersedia dalam dua konfigurasi utama, yaitu satu fasa dan tiga fasa. Motor induksi satu fasa umumnya digunakan pada lingkungan perumahan karena kebutuhan dayanya relatif kecil, sedangkan motor

induksi tiga fasa lebih dominan digunakan dalam sektor industri karena mampu memberikan torsi yang lebih besar, stabil, dan handal untuk menggerakkan beban berat. Pemanfaatan motor induksi tiga fasa di industri meliputi penggerak blower berkapasitas besar pada proses sianidasi tambang emas, pengolahan material ore, penggerak pompa air industri, conveyor belt untuk pemindahan material, serta berbagai proses mekanis lainnya (Meidiasha dkk, 2020).

PT Citra Palu Minerals (PT CPM), yang bergerak dalam produksi logam emas dan perak, memanfaatkan motor induksi sebagai penggerak utama berbagai mesin produksi. Salah satu motor kritis tersebut adalah motor induksi pada Ball Mill Plant. Motor ini bekerja menggiling bijih emas menjadi ukuran yang lebih halus sehingga mempermudah proses pemisahan emas dari material pengotornya. Motor induksi pada Ball Mill Plant termasuk motor tegangan menengah (medium voltage) dengan kebutuhan tegangan operasi 6,6 kV. Motor dengan kapasitas besar seperti ini umumnya menarik arus awal (starting current) yang sangat tinggi ketika dihidupkan, bahkan dapat mencapai sekitar tujuh kali arus nominal. Lonjakan arus yang begitu besar dapat memicu penurunan tegangan pada sistem distribusi (voltage drop), yang pada akhirnya dapat mengganggu performa peralatan listrik lain yang terhubung di dalam jaringan.

Untuk mencegah dampak negatif tersebut, pemilihan metode pengasutan yang tepat menjadi krusial. PT CPM saat ini menggunakan Liquid Resistance Starter (LRS) sebagai metode starting pada motor Ball Mill Plant. Berdasarkan informasi dari tim elektrikal PT CPM, terdapat beberapa alasan teknis yang mendasari pemilihan metode ini. Pertama, LRS merupakan bagian dari vendor package yang telah terintegrasi dengan motor sejak awal pembelian sehingga implementasinya langsung mengikuti rancangan pabrikan. Kedua, LRS memiliki kesesuaian dengan motor rotor belitan (wound rotor motor) yang digunakan pada Ball Mill Plant. Ketiga, teknisi di PT CPM telah familiar dalam pengoperasian dan perawatannya karena sistem serupa telah lama digunakan, termasuk pada unit mill lainnya seperti mill 500. Kombinasi faktor tersebut membuat LRS dianggap praktis, reliabel, dan sesuai untuk kebutuhan operasional.

Meskipun sistem LRS telah terbukti berjalan baik di lapangan, analisis teknis yang lebih mendalam tetap diperlukan untuk mendapatkan gambaran matematis yang komprehensif mengenai performa starting motor, terutama dalam hal arus, torsi, daya, dan tegangan starting.

Analisis matematis berdasarkan rangkaian ekivalen motor induksi dapat membantu mengukur efektivitas LRS secara kuantitatif sehingga hasilnya dapat dijadikan acuan dalam evaluasi teknis ataupun pengembangan sistem di masa depan.

Selain mengevaluasi metode LRS, penelitian ini juga menilai performa starting motor menggunakan metode Direct On Line (DOL) dan Wye-Delta secara teoritis. Kedua metode ini tidak digunakan di PT CPM, namun dianalisis untuk memberikan perbandingan objektif terhadap metode LRS. Metode DOL dikenal sebagai metode pengasutan paling sederhana yang menghubungkan motor langsung ke tegangan penuh, sehingga arus starting biasanya sangat tinggi. Sedangkan metode Wye-Delta umumnya dapat menurunkan arus starting hingga sepertiga dari DOL, namun dengan konsekuensi torsi yang juga menurun signifikan. Perbandingan perhitungan ketiga metode ini akan memperjelas karakteristik starting motor induksi pada aplikasi beban berat seperti Ball Mill Plant.

Penelitian ini diharapkan menghasilkan kontribusi ilmiah berupa pemahaman yang lebih mendalam mengenai performa starting motor induksi dengan LRS serta memberikan referensi akademik dan teknis bagi industri dalam memilih metode starting yang paling sesuai untuk motor berkapasitas besar.

II. LANDASAN TEORI

A. Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi adalah perangkat listrik yang mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Motor ini juga dikenal sebagai motor asinkron dan dapat dibagi menjadi motor induksi satu fasa dan motor induksi fasa banyak. Motor induksi tiga fasa lebih sering digunakan dalam konteks industri karena memiliki struktur yang tangguh dan hanya membutuhkan sedikit perawatan. Motor jenis ini banyak dipilih sebagai penggerak utama di sektor industri karena strukturnya yang sederhana, harganya terjangkau,

bobotnya ringan, dan kemudahan dalam pemeliharaannya.

B. Konstruksi Motor Induksi

Secara umum, motor induksi memiliki struktur dasar yang terdiri dari dua komponen utama yakni stator dan rotor, dengan celah udara (air gap) yang memisahkan keduanya. Stator adalah bagian motor yang diam dan berperan menciptakan medan elektromagnetik, terdiri dari laminasi inti yang ditata dalam alur untuk menampung kumparan silindris dengan setiap belitan fasa terpisah 120 derajat (Aulia dkk, 2023). Rotor terbagi atas dua jenis: rotor sangkar tupai (squirrel cage rotor) dengan konstruksi sederhana dan pemeliharaan minimal, serta rotor belitan (wound rotor) yang dapat menghasilkan torsi awal tinggi melalui tahanan eksternal (Nizar dan Baihaqi, 2020). Celah udara berperan sebagai jalur bagi fluks listrik dari stator menuju rotor (Aulia dkk, 2023).

C. Rangkaian Ekivalen dan Parameter Starting Motor Induksi

Pada kondisi start, kecepatan putar rotor (N_r) = 0, sehingga slip bernilai 1. Dengan menggunakan teori Thevenin, rangkaian ekivalen motor induksi dapat disederhanakan (Aqute Prima, 2022). Berikut adalah persamaan-persamaan yang digunakan:

Tegangan Thevenin:

$$V_{th} = V_{in} \times [jX_m / (R_1 + j(X_1 + X_m))]$$

Impedansi Thevenin:

$$Z_{th} = [jX_m(R_1 + jX_1)] / [R_1 + j(X_1 + X_m)]$$

Arus Starting:

$$|I_{start}| = V_{th} / \sqrt{[(R_e + R_2)^2 + (X_e + X_2)^2]}$$

Torsi Starting:

$$|T_{start}| = (3/\omega_s) \times [V_{th}^2 \times R_2] / [(R_e + R_2)^2 + (X_e + X_2)^2]$$

Daya Starting:

$$P_{start} = |T_{start}| \times \omega_s$$

D. Persamaan Slip dan Resistansi LRS Terhadap Waktu

Pada proses starting motor induksi dengan LRS, nilai slip maupun resistansi eksternal rotor mengalami penurunan terhadap waktu secara non-linier. Model matematis eksponensial digunakan untuk merepresentasikan perubahan ini karena percepatan motor bersifat non-linier.

Slip terhadap waktu:

$$S(t) = S_{ss} + (S_a - S_{ss}) \times e^{-k \cdot t}$$

$$k = -\ln(\varepsilon) / t$$

Kecepatan rotor:

$$N_r = N_s \times (1 - S)$$

Resistansi LRS terhadap waktu:

$$R_{LRS}(t) = R_{ss} + (R_a - R_{ss}) \times e^{-k \cdot t}$$

Torsi starting dengan pengaruh slip:

$$|T_{start}(S)| = (3/\omega_s) \times [V_{th}^2 \times (R_2/S)] / [(R_e + R_2/S)^2 + (X_e + X_2)^2]$$

E. Motor Induksi Medium Voltage dan Ball Mill Plant

Motor induksi medium voltage didesain untuk operasi pada tegangan 1000 hingga 11000 volt, umumnya digunakan dalam aplikasi industri yang memerlukan daya keluaran tinggi (Gamak, 2023). Salah satu aplikasinya adalah pada ball mill plant, yaitu mesin penggiling untuk memperkecil ukuran material guna memisahkan mineral dari batuan tandus melalui mekanisme bola baja yang menekan material di dalam grinding (Cik dkk, 2020).

F. Metode Starting Motor Induksi

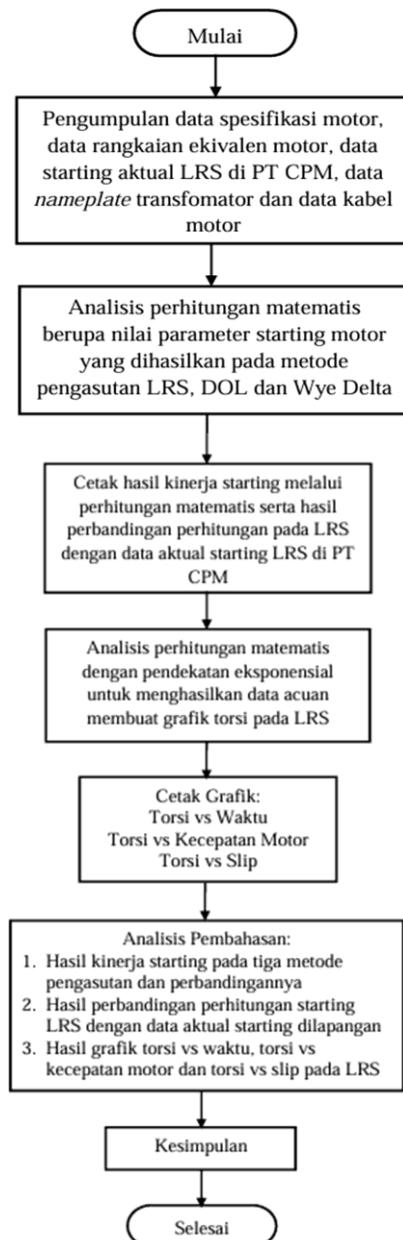
Pengasutan langsung (Direct On Line/DOL) adalah metode pemberian tegangan secara langsung, biasanya untuk motor berdaya di bawah 22 kW karena arus awal mencapai 5-6 kali arus nominal. Metode Wye Delta mengurangi tegangan sebesar $1/\sqrt{3}$ (57,7%) pada konfigurasi Wye di tahap awal, kemudian diubah ke Delta setelah mencapai 80% kecepatan maksimum untuk mengurangi arus start yang mencapai 7 kali arus nominal (Kurniawan & Yandri, 2020).

G. Liquid Resistance Starter (LRS)

Liquid Resistance Starter (LRS) memanfaatkan cairan elektrolit Na_2CO_3 untuk meredam arus start up pada motor ball mill plant yang dihubungkan ke kumparan rotor melalui slip ring. Komponen utama meliputi tanki elektrolit, elektroda (tiga gerak dan tiga diam), tabung keramik, heater (suhu kerja 5-85°C), busbar couple, level indikator, motor penggerak elektroda, dan panel kontrol PLC. Prinsip kerjanya dimulai dengan pencampuran cairan selama 10 menit, elektroda dinaikkan ke posisi maksimum, kemudian setelah motor berputar, elektroda diturunkan perlahan sehingga arus starting menurun secara bertahap hingga kondisi normal. Kelebihan LRS meliputi torsi starting tinggi, pengurangan arus starting, dan pengoperasian halus, sedangkan kekurangannya adalah hanya untuk motor rotor belitan, memerlukan perawatan rutin, dan ukuran fisik yang besar (Herwin, 2017).

III. METODE PENELITIAN

A. Alur Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

Proses penelitian ini diawali dengan pengumpulan data spesifikasi motor dan data aktual starting Liquid Resistance Starter (LRS) di PT CPM, yang kemudian digunakan sebagai dasar analisis perhitungan matematis parameter starting pada metode LRS, Direct On Line (DOL), dan Wye Delta. Hasil perhitungan teoritis pada metode LRS selanjutnya divalidasi dengan membandingkannya terhadap data aktual lapangan, dilanjutkan dengan analisis pendekatan

eksponensial untuk memvisualisasikan grafik karakteristik torsi terhadap waktu, kecepatan, dan slip. Rangkaian proses ini diakhiri dengan pembahasan komprehensif mengenai perbandingan kinerja ketiga metode pengasutan serta analisis grafik torsi tersebut untuk merumuskan kesimpulan akhir penelitian.

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Data yang Diperoleh

Tabel 4.1 Data Spesifikasi Motor Induksi

Parameter	Nilai
Standar	IEC
Merek	WEG
Jenis Motor	Motor Induksi Tipe Rotor Belitan
Daya Motor	3700 kW
Rating Torsi	35.584 Nm
Rating Tegangan	6600 V (Koneksi Y)
Rating Arus	383,1 A
Tegangan Rotor	2922 V (Koneksi Y)
Arus Rotor	753 A
Jumlah Kutub	6
Kecepatan Motor	993 rpm
Frekuensi	50 Hz
Slip	0,007
Power Faktor	0,88
Efisiensi	0,96

Tabel 4.2 Data Spesifikasi Motor Induksi

Parameter	Parameter	Nilai
$R_1 = 0,055 \Omega$	$R_2 = 0,069 \Omega$	$RLRS = 8,3 \Omega$
$X_1 = 1,475 \Omega$	$X_2 = 1,144 \Omega$	$X_m = 42,43 \Omega$

Tabel 4.3 Data Rangkaian Ekivalen

Parameter	Parameter	Nilai
$R_1 = 0,055 \Omega$	$R_2 = 0,069 \Omega$	$RLRS = 8,3 \Omega$
$X_1 = 1,475 \Omega$	$X_2 = 1,144 \Omega$	$X_m = 42,43 \Omega$

Tabel 4.4 Parameter Starting Aktual LRS di PT CPM

Arus Start	Torsi Start	Daya Start	Tegangan Start	Waktu Start
427 A	41.787,76 Nm	4.371.000 W	6.443 V	38 Detik

Tabel 4.5 Data Transformator

Parameter	Nilai
Standar	IEC
Merek	B&D
Operating Type	Outdoor
Rating Primer	20.000 V
Rating Sekunder	6.600 V
Kapasitas	6000 kVA
Cooling	ONAN
HV Current	173,21 A
LV Current	524,86 A
Impedansi	7,31 %
Frekuensi	50 Hz

Tabel 4.6 Kabel Motor Induksi

Parameter	Nilai
Jenis Kabel	N2XSEY
Ukuran	3 x 240 mm ²
Panjang Kabel ke Motor	60 Meter
Isolasi	XLPE
Rating Tegangan	6/10 (12 kV)
Resistansi Kabel	0,0754 Ω/km
Reaktansi Kabel	0,08164 Ω/km

B. Perhitungan Matematis Kinerja Starting Motor Induksi

B.1 Perhitungan pada LRS

a. Tegangan Thevenin

Untuk menghitung tegangan thevenin (V_{th}) digunakan data tegangan dan rangkaian ekivalen. Hasil perhitungan didapat tegangan thevenin sebesar 3.682,49 Volt.

b. Impedansi Thevenin

Hasil perhitungan didapat impedansi thevenin ($R_e + jX_e$) adalah $0,051 + j1,425 \Omega$.

c. Arus Starting

Hasil perhitungan didapat arus starting LRS sebesar 421,47 A.

d. Torsi Starting

Hasil perhitungan didapat torsi starting LRS sebesar 42.259,84 Nm.

e. Daya Starting

Hasil perhitungan didapat daya starting LRS sebesar 4.423.196,58 Watt atau 4.423,19 kW.

f. Tegangan Starting

Hasil perhitungan didapat tegangan starting per-fasa sebesar 3.584,91 Volt dan tegangan antar-fasa sebesar 6.374,40 Volt.

B.2 Perhitungan pada Direct On Line (DOL)

Pada metode DOL, nilai tegangan thevenin dan impedansi thevenin sama dengan LRS. Perbedaannya adalah tidak menggunakan resistansi eksternal ($R_2 = 0,069 \Omega$). Hasil perhitungan:

- Arus Starting: 1.431,87 A
- Torsi Starting: 4.054,80 Nm
- Daya Starting: 424.402,40 Watt (424,40 kW)
- Tegangan Starting (L-L): 5.833,58 Volt

B.3 Perhitungan pada Wye Delta

Pada metode Wye Delta, hasil perhitungan identik dengan DOL karena motor sudah terkoneksi Y, sehingga tegangan input sudah dibagi $\sqrt{3}$.

C. Hasil Perhitungan Matematis Kinerja Starting Motor Induksi

Tabel 4.7 Kabel Motor Induksi

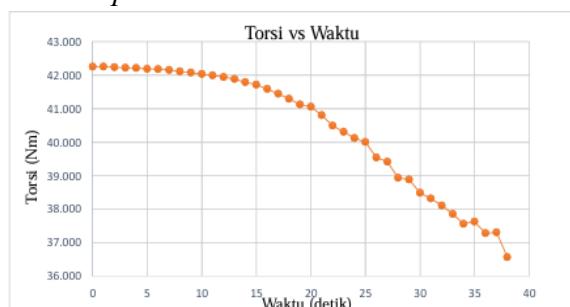
Parameter Kinerja	LRS	DOL	Wye Delta
Arus Starting	421,47 A	1.431,87 A	1.431,87 A
Torsi Starting	42.259,84 Nm	4.054,80 Nm	4.054,80 Nm
Daya Starting	4.423,19 kW	424,40 kW	424,40 kW
Tegangan Starting (L-N)	3.584,91 V	3.044,09 V	3.044,09 V
Tegangan Starting (L-L)	6.374,40 V	5.833,58 V	5.833,58 V

D. Perbandingan Hasil Perhitungan Matematis dengan Data Starting Aktual LRS di PT CPM

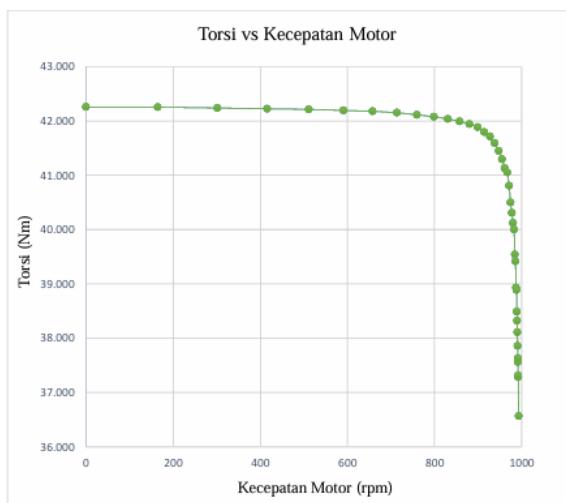
Tabel 4.8 Perbandingan Hasil Kinerja Starting Aktual dengan Perhitungan

Parameter	Data Aktual PT CPM	Hasil Perhitungan
Arus Starting	427 A	421,47 A
Torsi Starting	41.787,76 Nm	42.259,84 Nm
Daya Starting	4.371 kW	4.423,19 kW
Tegangan Starting (L-L)	6.443 V	6.374,40 V

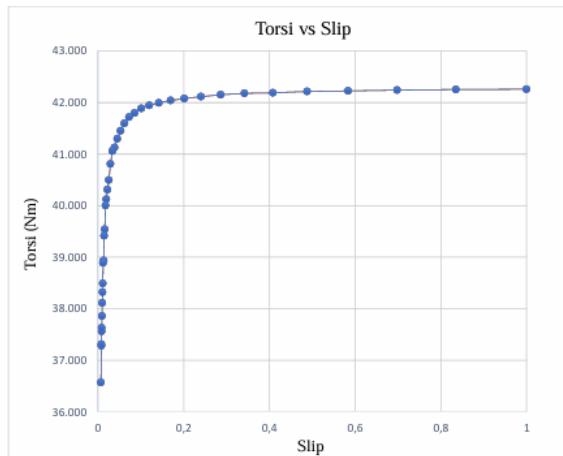
E. Grafik Torsi vs Waktu, Slip dan Kecepatan Motor pada LRS



Gambar 4.1 Grafik Torsi vs Waktu pada LRS



Gambar 4.2 Grafik Torsi vs Kecepatan Motor pada LRS



Gambar 4.3 Grafik Torsi vs Slip pada LRS

V. KESIMPULAN

Hasil analisis starting motor induksi pada Ball Mill Plant PT Citra Palu Minerals menunjukkan bahwa Liquid Resistance Starter (LRS) memberikan performa pengasutan paling optimal. Perhitungan matematis menunjukkan bahwa metode LRS mampu menekan arus starting hingga 421,47 A, mempertahankan tegangan pada 6.374,40 V, serta menghasilkan torsi awal 42.259,84 Nm dan daya starting 4.423,19 kW. Kombinasi ini menegaskan bahwa LRS efektif dalam mengendalikan lonjakan arus sekaligus menyediakan torsi besar yang diperlukan untuk

beban berat seperti Ball Mill. Sementara itu, metode Direct On Line (DOL) dan Wye-Delta memberikan hasil starting yang hampir identik akibat konfigurasi stator motor yang sudah berbentuk bintang (Y). Kedua metode ini menunjukkan arus starting tinggi dan torsi awal rendah, sehingga kurang cocok untuk motor berdaya besar. Dengan demikian, LRS menjadi metode pengasutan paling sesuai karena mampu menyeimbangkan kestabilan tegangan, menurunkan arus starting, dan menghasilkan torsi serta daya awal yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aquate Prima. (2022). Arus Start Pada Motor Induksi [Videorecording]. www.youtube.com.
- [2] Aulia, S. A., Soedjarwanto, N., & Safaruddin, S. (2023). Analisis Starting Main Motor Coal Mill Dengan Liquid Resistance Starter Di Pt Semen Baturaja Tbk. Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan, 11(3s1).
- [3] Cik, A., Mardiah, & Guskarnali. (2020). Kajian Produksi Ball Mill Dalam Menentukan Efektivitas Penggerusan Bijih Timah Primer Di CV Persada Tambang Intitama TK 4.218 Paku Kabupaten Bangka Selatan. Jurnal Mineral, 5(2), 1–6.
- [4] GAMAK. (2023). Medium Voltage Electric Motors. GAMAK Power To Energize Life.
- [5] Herwin. (2017). Analisis Perbandingan Starting Motor Induksi 3-Fasa Menggunakan Liquid Rotor Starter (LRS) dan Oil Rotor Starter (ORS) 101 (Studi Kasus di Pabrik Indarung V PT Semen Padang) [Skripsi Sarjana]. Universitas Andalas.
- [6] Kurniawan, A. R. I., & Yandri, W. (2020). Operasi Motor Listrik Dengan Sistem Kendali Star Delta Menggunakan Plc Zelio Sr3B101Fu. Ensiklopedia of Journal, 2(5), 1–6.
- [7] Meidiasha, D., Rifan, M., & Subekti, M. (2020). Alat Pengukur Getaran, Suara Dan Suhu Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Indikasi Kerusakan Motor Induksi Berbasis

- Arduino. Journal of Electrical Vocational Education and Technology, 5(1), 27–31.
- [8] Nizar, R., & Baihaqi, I. (2020). Studi Inspeksi Kelayakan Instalasi Dan Instrumen Tenaga Listrik. Sinusoida, 22(2), 21–33.