

ANALISA PENGARUH PERUBAHAN FREKUENSI DAN TEGANGAN TERHADAP EFISIENSI MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK

Sulis Diantoro¹⁾, Dedi Nugroho²⁾, dan Agus Adhi Nugroho³⁾

^{1,2,3)}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung

^{1,2,3)}Jl. Kaligawe Raya Km 4, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112, Indonesia

e-mail : ¹⁾sulis_putera@std.unissula.ac.id, ²⁾dedi.nugroho@unissula.ac.id, ³⁾agusadhi@unissula.ac.id

ABSTRACT

The three-phase induction motor is one of the most widely used types of electric motor in the industrial world. In its application to regulate the speed and improve the efficiency of the motor used the method of Variable frequency drive (VFD) by changing the input frequencies. The final task uses a simulated simulation method of the simulink matlab that will analyze the influence of frequency and voltage changes on speed, slip, and motor efficiency. The results show that frequency and voltage changes have an impact on induction motor performance that includes speed, slip, and efficiency. Often, they scream and shout. From a frequency of 50 Hz, every 10 percent decrease in the Frequency then the speed also decreases by about 10 percent. Frequencies of 50 Hz and 45 Hz produce speeds of 1440 rpm and 1295 rpm. For the slip, the increase in frequency leads to a decrease in the motor slip value. At the frequencies of 50 Hz and 45 Hz produced slide values of 4% and 16%. The highest efficiency is given at a torque load of 5 Nm and a frequency of 50 Hz with an efficiency of 97%.

Keywords: 3-phase induction engine, VFD, Matlab, Frequency, Speed, Slip, Efficiency

ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa adalah salah satu jenis motor listrik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Dalam penerapannya untuk mengatur kecepatan dan meningkatkan efisiensi motor digunakan metode Variable frequency drive (VFD) dengan mengubah frekuensi masukan. Penelitian ini menggunakan metode simulasi matlab simulink yang akan menganalisa mengenai pengaruh perubahan frekuensi dan tegangan terhadap kecepatan, slip, dan efisiensi motor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan frekuensi dan tegangan mempunyai dampak terhadap kinerja motor induksi yang meliputi kecepatan, slip, dan efisiensi. Frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan dan efisiensi. Dari frekuensi 50 Hz, setiap penurunan frekuensi 10% maka kecepatan juga turun sekitar 10%. Frekuensi 50 Hz dan 45 Hz menghasilkan kecepatan 1440 Rpm dan 1295 Rpm. Untuk slip, kenaikan frekuensi menyebabkan turunnya nilai slip motor. Pada frekuensi 50 Hz dan 45 Hz menghasilkan nilai slip 4% dan 16%. Sedangkan untuk nilai efisiensi tertinggi terjadi ketika diberi beban torsi 5 N.m dan frekuensi 50 Hz dengan efisiensi sebesar 97%.

Kata Kunci: Motor Induksi 3 fasa, VFD, Matlab, Frekuensi, Kecepatan, Slip, Efisiensi.

I. PENDAHULUAN

MOTOR induksi merupakan salah satu jenis motor listrik yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Dalam dunia industri jenis motor induksi yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa, yang pemanfaatannya bisa sebagai penggerak blower, kompresor, pompa, proses produksi, dan lain sebagainya. Motor induksi tiga fasa ini banyak digunakan pada industri karena memiliki kelebihan seperti konstruksi yang kuat, desain simpel, memiliki keandalan yang baik, efisiensi yang tinggi, dan perawatannya yang mudah. Sedangkan kelemahan motor induksi adalah sulitnya mengatur kecepatan karena karakteristik motor yang sifatnya linear. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan peralatan tambahan agar motor dapat bekerja sesuai kebutuhan penggunaannya. Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengatur kecepatan motor adalah dengan menggunakan *Variable Frequency Drive* (VFD) [1].

VFD dikendalikan dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) yang berfungsi untuk mengatur

nilai frekuensi yang nantinya dapat digunakan untuk mengatur kecepatan dan meningkatkan efisiensi dari motor induksi tersebut. Dalam penerapannya, dengan mengubah frekuensi melalui VFD maka tegangan motor juga akan berubah. Dimana hubungan antara frekuensi dan tegangan berbanding lurus dengan kecepatan dan efisiensi motor [1]-[3].

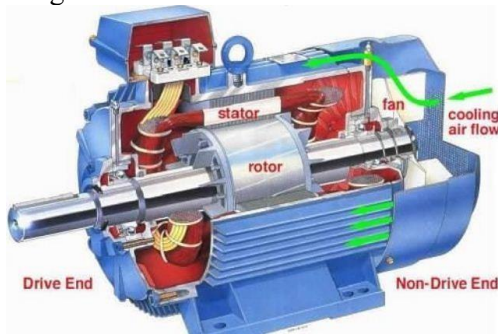
Penelitian ini, menganalisa pengaruh perubahan frekuensi dan tegangan terhadap kinerja motor induksi tiga fasa, yang meliputi kecepatan, slip, dan efisiensinya dengan menggunakan metode simulasi Matlab Simulink.

II. LANDASAN TEORI

A. Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi 3 fasa adalah salah satu jenis motor listrik yang paling umum digunakan. Motor ini disebut "induksi" karena operasinya didasarkan pada prinsip induksi elektromagnetik. Motor ini memiliki tiga fasa, yang berarti bahwa statornya memiliki tiga kumparan yang dihubungkan ke sumber tegangan 3 fasa. Motor induksi 3 fasa terdiri dari dua bagian utama [3],[4]:

- Stator: Bagian yang diam dan terdiri dari kumparan yang dihubungkan ke sumber tegangan 3 fasa. Kumparan ini menghasilkan medan magnet berputar yang menginduksi arus pada rotor.
- Rotor: Bagian yang berputar dan terdiri dari batang konduktor yang tersusun dalam slot. Arus yang diinduksi pada rotor oleh medan magnet stator menghasilkan gaya yang menyebabkan rotor berputar. Untuk mengetahui gambaran konstruksi mengenai motor induksi dapat dilihat dari gambar dibawah ini.



Gambar 1. Motor Induksi

B. Cara Kerja Motor Induksi

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi tiga-fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga-fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul emf (ggl) atau tegangan induksi. Karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator. Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus dan sesuai dengan Hukum Lenz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip yang dinyatakan dalam:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi tiga-fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga-fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron yang besarnya dinyatakan dalam persamaan dibawah ini [5]-[8]:

$$N_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{60 \cdot f}{p} \dots\dots\dots(2)$$

di mana:

- N_s = kecepatan sinkron (rpm)
- ω_s = kecepatan sinkron (rad/s)
- f = frekuensi stator pada motor induksi (Hz)
- p = jumlah pasang kutub/poles.

Garis fluks dari stator memotong rotor, menimbulkan tegangan induksi atau ggl. Arus mengalir dalam rotor yang tertutup, menghasilkan gaya Lorentz di medan stator, menciptakan torsi pada rotor. Tegangan induksi muncul karena perpotongan medan putar stator dengan konduktor rotor. Diperlukan perbedaan kecepatan antara medan stator (n_s) dan rotor (n_r) untuk menciptakan tegangan terinduksi [9].

Perbedaan antara kecepatan medan putar stator dengan kecepatan putar rotor disebut slip yang dinyatakan dengan:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \dots\dots\dots(3)$$

di mana:

- S = Slip (%)
- N_s = kecepatan sinkron (rpm)
- N_r = kecepatan sinkron (rad/s)

Kemudian medan putar stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus dan sesuai dengan Hukum Lenz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator [10].

C. Slip Rotor

Istilah lain yang digunakan untuk menggambarkan gerakan relatif adalah slip, yang merupakan kecepatan relatif yang dinyatakan dalam basis per unit atau persentase. Besaran nilai slip dipengaruhi beberapa faktor dibawah ini:

- Beban Mekanik: Semakin besar beban mekanik, semakin besar slip.
- Tegangan: Penurunan tegangan akan meningkatkan slip.
- Frekuensi: Penurunan frekuensi akan meningkatkan slip.

D. Aliran Daya Motor Induksi Tiga Fasa

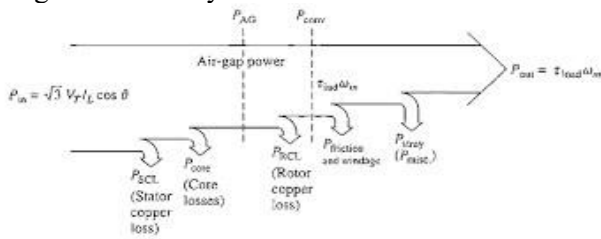
Pada motor induksi tiga fasa, rotor tidak terhubung secara langsung ke sumber tegangan karena aliran daya harus melewati stator dan celah udara sebelum sampai ke rotor. Daya masukan total pada kumparan stator dapat ditentukan dengan persamaan [11]:

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

Dengan:

- P_{in} = Daya masukan (Watt)
- V_L = Tegangan sumber (Volt)
- I_L = Arus sumber (A)
- $\cos \varphi$ = faktor daya

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat gambar 2 mengenai aliran daya motor induksi dibawah ini.



Gambar 2 Aliran Daya Motor Induksi

E. Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa

Efisiensi pada motor induksi dapat diartikan sebagai parameter yang mengukur sejauh mana motor ini dapat mengubah daya listrik yang diberikan menjadi daya mekanis yang bermanfaat tanpa banyak kerugian energy. Efisiensi motor induksi dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini [12]-[15].

$$\eta = \frac{P_{in} - \sum P_{rugi}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(6)$$

Dengan:

η = efisiensi (%)

P_{out} = daya keluaran motor (Watt)

P_{in} = daya masukan motor (Watt)

Daya output pada motor induksi berupa daya mekanik yang dapat dicari nilainya menggunakan persamaan 2.13.

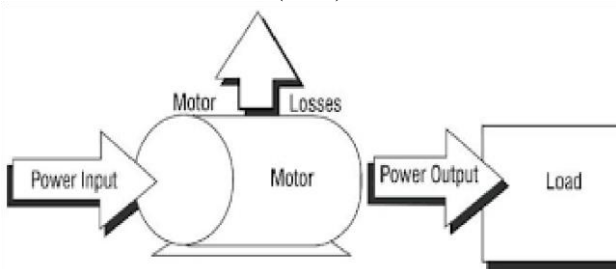
$$P_{out} = \omega \times T \dots\dots\dots(7)$$

Dengan:

P_{out} = daya keluaran motor (watt)

ω = kecepatan sudut (rps)

T = Torsi (N.m)



Gambar 3 Alur Kerja Motor Induksi

F. Tegangan dan Frekuensi pada Motor

Kecepatan motor induksi berbanding lurus dengan frekuensi sumber daya dan jumlah kutubnya. Karena jumlah kutubnya telah ditetapkan oleh desain, metode yang paling efektif untuk mengubah kecepatan motor induksi adalah dengan mengubah frekuensi sumber daya.

Dalam motor induksi, tegangan yang diberikan harus proporsional terhadap frekuensi agar motor beroperasi dengan baik. Ini berarti ketika frekuensi daya yang diberikan kepada motor berubah,

tegangan juga harus berubah secara proporsional agar perbandingan V/f tetap konstan.

Karakteristik V/f (Voltage per Frequency) konstan dalam pengendalian motor induksi tiga fasa dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan dasar sebagai berikut [15],[16]:

$$V/f \equiv \frac{V_{rms}}{f} \dots\dots\dots(8)$$

Di mana:

V/f = perbandingan tegangan terhadap frekuensi (Voltage per Frequency) konstan.

V_{rms} = tegangan root mean square (nilai efektif) yang diberikan kepada motor.

Tegangan ini biasanya dinyatakan dalam volt (V). f = frekuensi daya listrik yang diberikan kepada motor. Frekuensi ini dinyatakan dalam hertz (Hz).

G. Sistem Tegangan Tiga Fasa

Pada umumnya listrik tiga fasa memiliki tegangan 380 V dengan arus bolak-balik (AC) yang digunakan pada industri dan gedung-gedung besar. Energi listrik tiga fasa adalah listrik yang memakai tiga kawat fasa (R, S, T) sebagai penghantar dan 1 kawat netral. Pada sistem tiga fasa ada 2 macam tegangan yaitu tegangan antar fasa bernilai 380 V dan tegangan fasa-netral bernilai 220 V [16].

Jenis tegangan pada tegangan AC:

1. Tegangan maksimum (Vmax)

Pada gelombang sinus nilai tegangan maksimum diukur dari titik nol pada garis horizontal hingga ujung puncak gelombang. Adapun persamaan untuk menentukan nilai tegangan maksimum.

$$V_{max} = \sqrt{2} \times V_{rms} \dots\dots\dots(9)$$

2. Tegangan puncak ke puncak (Vpp)

Pada gelombang sinus nilai tegangan puncak ke puncak adalah jumlah tegangan antara 1 bukit dan 1 lembah. Adapun persamaan untuk menentukan nilai tegangan puncak ke puncak

$$V_{pp} = 2 \times V_{rms} \dots\dots\dots(10)$$

3. Tegangan efektif (Vrms)

Pada gelombang sinus nilai tegangan efektif (root mean square) adalah nilai tegangan tetap pada sebuah pengukuran. Adapun persamaan untuk menentukan nilai tegangan efektif

$$V_{rms} = 0,707 \times V_m \dots\dots\dots(11)$$

H. Software Matlab

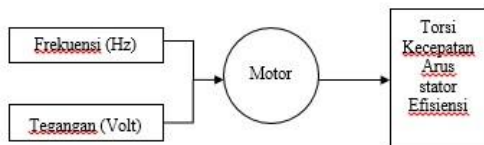
Untuk kebutuhan simulasi pada penelitian ini MATLAB memiliki library Simulink yang mencakup blok-blok khusus untuk membangun model motor induksi. Blok-blok ini meliputi elemen-elemen seperti motor induksi tiga fasa, sumber tegangan AC, konverter frekuensi (jika diperlukan), filter LC, dll. Setelah itu dapat dilakukan analisis terperinci terhadap kinerja motor

induksi seperti kecepatannya saat beban bervariasi, responsnya terhadap perubahan frekuensi input atau tegangan stator, efisiensinya pada kondisi operasional tertentu, rugi-rugi daya yang terjadi di dalamnya, dll. Salah satu keuntungan utama menggunakan MATLAB adalah kemampuan visualisasinya yang kuat. Setelah melakukan simulasi motor induksi, MATLAB memungkinkan kita untuk membuat plot grafik yang menampilkan data seperti kecepatan rotor, torsi, arus stator, atau karakteristik efisiensi dalam bentuk kurva [17].

III. METODE PENELITIAN

A. Model Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode simulasi software Matlab simulink. Diawali dengan melakukan studi literatur dengan mempelajari hal-hal yang berkaitan dengan motor induksi tiga fasa yang mempunyai relevansi dengan topik tugas akhir ini yang berasal mulai dari buku, jurnal, website, youtube, dan sumber-sumber lainnya. Hal yang perlu dipelajari diantaranya adalah cara kerja motor induksi, pengaruh tegangan dan frekuensi pada motor, cara kerja variable frequency drive, dan karakteristik motor induksi tiga fasa. Selanjutnya mengumpulkan data-data yang akan menjadi bahan penelitian berupa parameter-parameter blok matlab seperti sumber tegangan AC, rectifier, Inverter, PWM, sample motor induksi, dan blok-blok lain yang digunakan dalam penelitian. Setelah itu dilakukan pemodelan pada Matlab Simulink mengenai pengaruh perubahan frekuensi dan tegangan terhadap efisiensi motor induksi dengan menggunakan Variable frequency drive yang nantinya frekuensi dan tegangannya dapat di variasi sesuai dengan kebutuhan. Setelah disimulasikan, tahapan selanjutnya adalah pengolahan data hasil dari pengukuran dan pengamatan pada simulasi. Terakhir adalah untuk mencari nilai kombinasi dari frekuensi dan tegangan yang menghasilkan efisiensi yang maksimal. Model penelitian yang dilakukan bisa dilihat pada gambar dibawah ini:



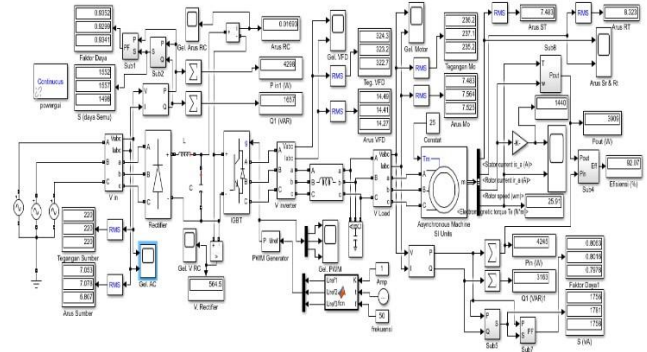
Gambar 4 Model penelitian

B. Obyek penelitian

Objek pada penelitian ini menggunakan motor induksi (asinkron) tiga fasa jenis sangkar tupai yang terdapat pada matlab simulink library dengan spesifikasi berupa 5,4 HP (4 KW); 400 V; 50 Hz; 1430 Rpm. Dalam penelitian ini nantinya motor induksi akan diberikan beban torsi mekanik sebesar

5 N.m sampai 25 N.m. Sedangkan untuk me-variasi nilai frekuensi dan tegangan digunakan rangkaian VFD yang berisi rangkaian rectifier, inverter dan PWM (Pulse Width Modulation).

Berikut merupakan model rangkaian simulasi yang telah di buat dan akan disimulasikan menggunakan matlab simulink :



Gambar 5 rangkaian simulasi menggunakan matlab simulink

C. Tahapan penelitian

1. Menentukan model penelitian

Tahap ini meliputi penentuan model penelitian dan membuat model rangkaian menggunakan matlab simulink seperti gambar 3.2 yang akan disimulasikan untuk memperoleh pengaruh dari perubahan frekuensi dan tegangan terhadap efisiensi motor induksi tiga fasa. Termasuk mengumpulkan informasi teknis terkait motor induksi, termasuk spesifikasi teknis, data lembar spesifikasi, dan karakteristik motor.

2. Perancangan input simulasi

Dilanjutkan dengan menentukan nilai input frekuensi dan tegangan dengan batas kinerja motor induksi yang diizinkan. Kemudian menentukan nilai beban torsi sesuai spesifikasi motor induksi tiga fasa yang digunakan.

3. Pengambilan data

Pengambilan data dilakukan dengan cara pengamatan pada saat simulasi selesai dilakukan. Kemudian diambil nilai yang telah ditampilkan oleh display dan scope berupa parameter yang meliputi kecepatan, torsi, arus stator dan efisiensi motor induksi tiga fasa. Data ini diambil dari berbagai kondisi input frekuensi dan beban torsi mekanik yang telah di tentukan sebelumnya.

4. Hasil dan analisa

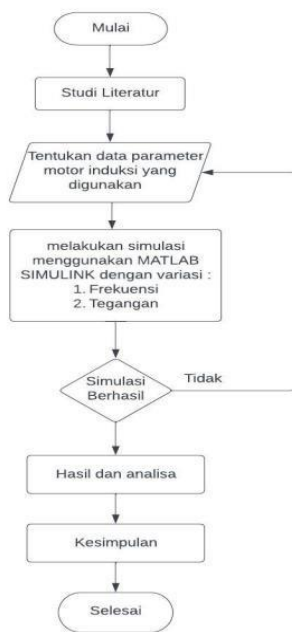
Pada tahap ini akan membahas mengenai hasil data yang diperoleh dari pengamatan kemudian dilakukan perbandingan dari berbagai nilai input frekuensi dan tegangan selanjutnya dilakukan analisa untuk mengetahui pengaruh perubahan frekuensi dan tegangan terhadap kinerja motor induksi tiga fasa yang meliputi tegangan dan arus motor,

kecepatan, slip dan efisiensi motor. Setelah melakukan analisa tersebut penulis dapat membuat kesimpulan mengenai bagaimana pengaruh perubahan frekuensi dan tegangan terhadap efisiensi motor induksi tiga fasa.

5. Penulisan laporan tugas akhir

Setelah pengambilan data dan melakukan analisa tahapan selanjutnya adalah pembuatan laporan tugas akhir. Dari penjelasan tentang pendahuluan sampai pada kesimpulan akhir dari penelitian ini.

D. Flow Chart



Gambar 6 Flow Chart Pembuatan Laporan

IV. DATA DAN ANALISA

A. Variasi Frekuensi

Penelitian ini memfokuskan pada variasi frekuensi masukan untuk menganalisis efisiensi motor induksi 3 fasa. Rentang frekuensi dari 10 Hz hingga 55 Hz digunakan dengan kenaikan 5 Hz, meneliti kondisi under hingga over frequency dengan beban torsi mekanik antara 5 N.m hingga 25 N.m. Tujuannya adalah menemukan frekuensi optimal yang menghasilkan efisiensi tertinggi. Analisis juga mencakup variasi beban torsi mekanik untuk memetakan karakteristik motor secara menyeluruh. Data empiris yang diperoleh akan memberikan pemahaman komprehensif tentang pengaruh frekuensi terhadap efisiensi motor.

B. Perhitungan Nilai Torsi Mekanik (Tm)

Dalam penelitian ini akan digunakan nilai torsi mekanik minimal dan maksimal. Untuk mencari Nilai torsi mekanik (Tm) maksimal yang dimasukkan pada simulasi harus sesuai dengan spesifikasi motor induksi yang digunakan. Untuk menghitung nilai

torsi mekanik (Tm) maksimal dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$n_s = 60 \times \frac{\omega_s}{2\pi} = \frac{120}{p} f$$

$$n_s = \frac{120}{4} 50 = 1500 \text{ Rpm}$$

$$\omega_s = 1500 \times \frac{2\pi}{60} = 157 \text{ rad/s}$$

Maka sesuai dengan tabel 1, torsi nominal Tn adalah

Diketahui :

$$P_{out} = 4000$$

$$W \omega_s =$$

$$157 \text{ rad/s}$$

Jawab :

$$T_{sh} = \frac{P_{out}}{\omega_s}$$

$$T_{sh} = \frac{4000}{157}$$

$$= 25,47 \text{ N.m} \approx 25 \text{ N.m}$$

C. Perhitungan Arus Maksimum

Setelah menghitung torsi mekanik (Tm), langkah berikutnya adalah menghitung arus maksimal motor berdasarkan daya output, tegangan motor, dan faktor daya sesuai spesifikasi motor. Ini untuk menjaga motor tetap beroperasi dalam kondisi aman. Arus maksimal pada motor induksi dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

Diket :

$$P = 4000 \text{ Watt}$$

$$V = 380 \text{ Volt}$$

$$\text{Cos } \vartheta = 0,8$$

Jawab :

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \vartheta$$

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \text{Cos } \vartheta}$$

$$I = \frac{4000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,8}$$

$$I = \frac{4000}{526,5}$$

$$I = 7,6 \text{ A}$$

D. Hasil Simulasi pada Matlab Simulink

Setelah melakukan simulasi dengan berbagai variasi torsi mekanik (Tm) 5 N.m – 25 N.m dan variasi frekuensi 10 Hz – 50 Hz. Maka didapatkan data yang mencakup bahan daripada penelitian ini. Berikut ini adalah data yang diperoleh setelah melakukan simulasi penelitian perubahan frekuensi terhadap kinerja motor induksi 3 fasa tipe sangkar menggunakan matlab simulink dengan beban torsi mekanik minimal 0 N.m dan maksimal 25 N.m. adapun aspek data yang diambil sesuai dengan hasil penelitian yang sudah ditentukan.

TABEL I
HASIL PENGUJIAN SIMULASI RANGKAIAN DENGAN TORSI MEKANIK 5 N.M DAN FREKUENSI 10 – 50 HZ.

<i>f</i>	(V)	(A)	(Watt)	Speed (Rpm)	Slip (%)	Te (N.m)	(Watt)	(%)
10	343	17,8	1502	300	80	4,8	150	10
15	352	12,2	871	449	70	5,	236	27
20	365	9,3	693	600	60	5,4	340	49
25	369	8,7	729	744	50	5,6	440	60
30	373	6,6	674	896	40	5,1	485	72
35	387	7	625	979	27	4,9	510	82
40	398	5,2	781	1190	20	5,4	677	87
45	415	4,9	917	1339	10	5,8	822	90
50	432	4,5	968	1491	0,3	6	942	97
55	458	4,5	1168	1650	- 9,4	5,7	985	84

TABEL II
HASIL PENGUJIAN SIMULASI RANGKAIAN DENGAN TORSI MEKANIK 10 N.M DAN FREKUENSI 10 – 50 HZ.

<i>f</i>	(V)	(A)	(Watt)	Speed (Rpm)	Slip (%)	Te (N.m)	(Watt)	(%)
10	343	17,4	1923	301	80	17,2	542	28
15	348	11,9	1563	440	71	15,8	729	46
20	353	9,3	1637	591	60	15,1	937	57
25	364	7,7	1850	742	51	16,8	1307	70
30	366	6,9	2140	882	41	16,4	1518	71
35	376	6,6	2595	1045	31	18,2	1998	77
40	387	6,4	2752	1168	22	19	2329	85
45	402	6,4	3065	1316	12	19,2	2654	87
50	413	6,2	3408	1455	3	21	3202	94
55	436	6,5	3692	1600	- 6,9	17,9	3003	81

TABEL III
HASIL PENGUJIAN SIMULASI RANGKAIAN DENGAN TORSI MEKANIK 15 N.M DAN FREKUENSI 10 – 50 HZ.

<i>f</i>	(V)	(A)	(Watt)	Speed (Rpm)	Slip (%)	Te (N.m)	(Watt)	(%)
10	343	17,7	1647	300	79	8,6	271	16,4
15	349	12,2	1115	452	70	9,7	460	41
20	361	9,2	992	600	60	8,3	526	53
25	365	7,5	1112	740	50	8,2	634	56
30	370	7,5	1206	893	40	8,8	828	69
35	382	6,8	1041	965	26	8,3	836	80
40	395	5,5	1455	1184	20	10,2	1266	87
45	410	5,2	1608	1337	10	10,1	1419	88
50	426	4,9	1754	1479	1,4	10,9	1685	96
55	451	5,1	2067	1634	- 8,5	9,7	1671	81

TABEL IV
HASIL PENGUJIAN SIMULASI RANGKAIAN DENGAN TORSI MEKANIK 20 N.M DAN FREKUENSI 10 – 50 HZ.

<i>f</i>	(V)	(A)	(Watt)	Speed (Rpm)	Slip (%)	Te (N.m)	(Watt)	(%)
10	341	17,5	1773	301	80	12,1	380	21
15	350	12	1306	445	70	12,2	570	44
20	357	9,3	1312	586	60	12	742	56
25	366	7,7	1449	745	50	12	929	64
30	368	6,7	1649	885	41	12,2	1134	69
35	379	6,2	1752	1000	31	13,4	1404	80
40	392	5,8	2072	1177	21	14,4	1775	86
45	406	5,6	2325	1321	11	14,8	2047	88
50	423	5,6	2557	1469	2	15,7	2410	94
55	443	5,5	2829	1618	-7,7	13,4	2276	80

TABEL V
HASIL PENGUJIAN SIMULASI RANGKAIAN DENGAN TORSI MEKANIK 25 N.M DAN FREKUENSI 10 – 50 HZ.

<i>f</i>	(V)	(A)	(Watt)	Speed (Rpm)	Slip (%)	Te (N.m)	(Watt)	(%)
10	342	17,5	2048	298	80	21,5	675	32
15	347	11,9	1783	444	71	18,7	873	49
20	353	9,5	1960	585	60	19,3	1187	60
25	359	8,5	2273	740	50	20,6	1598	70
30	360	7,3	2631	871	41	20,7	1897	72
35	370	7,1	2947	996	32	21,4	2235	76
40	382	7,1	3412	1158	22	24	2916	85
45	393	7,4	3856	1305	16	24,1	3301	87
50	403	7,5	4245	1440	4	26	3909	92
55	424	7,7	4642	1586	-5	22,5	3737	81

E. Perhitungan Nilai Slip

Setelah simulasi, slip dihitung untuk setiap frekuensi dengan menggunakan rumus yang sama, hanya berbeda nilai kecepatan rotor. Dua sampel diambil dengan nilai torsi mekanik (T_m) 25 N.m.

Persamaan untuk menghitung slip adalah

$$n_{slip} = \frac{n_s - n_m}{n_s} \times 100 \%$$

Diket : $n_s = 1500$ Rpm
 $n_m (10Hz) = 298$ Rpm

$n_m (15Hz) = 435$ Rpm
 $n_m (20Hz) = 598$ Rpm
 $n_m (25Hz) = 736$ Rpm
 $n_m (30Hz) = 872$ Rpm
 $n_m (35Hz) = 1008$ Rpm

- $n_m (40Hz) = 1158 \text{ Rpm}$
- $n_m (45Hz) = 1295 \text{ Rpm}$
- $n_m (50Hz) = 1440 \text{ Rpm}$
- $n_m (55Hz) = 1586 \text{ Rpm}$

Jawab:

Persamaan mencari nilai slip: $n - n$

$$n_{slip} = \frac{s}{ns} \times 100 \%$$

a. $n_{slip} (10Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 298}{1500} \times 100 \%$
 $= 80 \%$

b. $n_{slip} (15Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 435}{1500} \times 100 \%$
 $= 71 \%$

c. $n_{slip} (20Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 598}{1500} \times 100 \%$
 $= 60 \%$

d. $n_{slip} (25Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 736}{1500} \times 100 \%$
 $= 50 \%$

e. $n_{slip} (30Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 872}{1500} \times 100 \%$
 $= 41 \%$

f. $n_{slip} (35Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 1008}{1500} \times 100 \%$
 $= 32 \%$

g. $n_{slip} (40Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 1158}{1500} \times 100 \%$
 $= 22 \%$

h. $n_{slip} (45Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 1295}{1500} \times 100 \%$
 $= 16 \%$

i. $n_{slip} (50Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 1440}{1500} \times 100 \%$
 $= 4 \%$

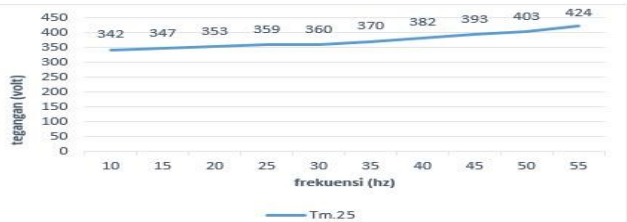
j. $n_{slip} (55Hz) = \frac{n_s - n_m}{ns} \times 100 \%$
 $= \frac{1500 - 1586}{1500} \times 100 \%$

F. Analisa Hasil Simulasi

□ Pengaruh frekuensi terhadap tegangan dan arus motor

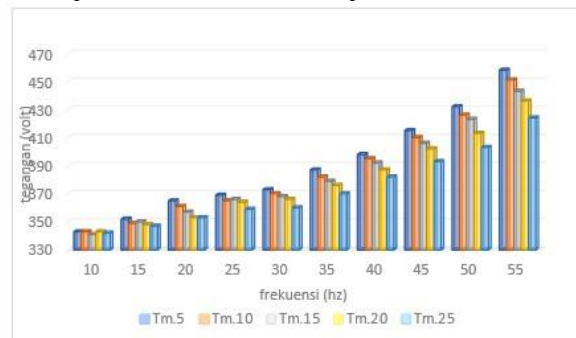
Frekuensi memengaruhi tegangan masukan motor secara linier. Kenaikan frekuensi meningkatkan tegangan karena kecepatan putaran medan magnet stator juga meningkat. Frekuensi rendah menghasilkan medan magnet yang lambat, sehingga tegangan dan arus induksi rotor rendah. Sebaliknya, frekuensi tinggi membuat medan

magnet stator berputar lebih cepat, meningkatkan tegangan induksi rotor karena fluks magnetik yang meningkat. Tegangan dinaikkan seiring dengan frekuensi untuk menjaga fluks magnet tetap dalam batas aman. Grafik pengaruh perubahan frekuensi terhadap tegangan masukan motor dengan beban 25 N.m.



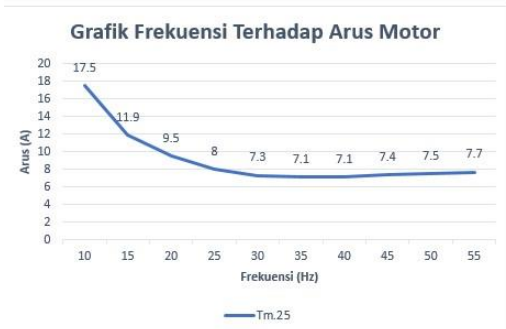
Gambar 6 Grafik Frekuensi Terhadap Tegangan Dengan Tm 25 N.M

Grafik percobaan menunjukkan bahwa pada frekuensi 10 Hz, tegangan motor mencapai 341 Vac, sedangkan pada 20 Hz, tegangan naik menjadi 352 Vac. Begitu pula, pada frekuensi 55 Hz, tegangan mencapai 424 VAC. Kenaikan signifikan terjadi pada frekuensi 55 Hz, dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti impedansi motor dan timbulnya harmonik yang menyebabkan distorsi tegangan dan arus. Selain grafik tegangan dengan beban torsi 25 T.m, grafik pengaruh frekuensi dengan beban torsi 5 N.m sampai 25 N.m. akan ditampilkan.



Gambar 7 Grafik Frekuensi Terhadap Tegangan Dengan Tm 5 N.m-25 N.m

Grafik menunjukkan bahwa perbedaan nilai torsi mekanik (Tm) juga memengaruhi nilai tegangan masukan motor. Pada frekuensi 50 Hz, dengan variasi nilai torsi mekanik (Tm) dari 5 N.m hingga 25 N.m, tegangan motor menunjukkan variasi. Ketika Tm adalah 5 N.m, tegangan motor adalah 432 Vac; pada Tm 10 N.m, tegangan turun menjadi 426 Vac; dan pada Tm 25 N.m, tegangan menjadi 403 Vac. Penurunan tegangan terjadi saat Tm meningkat dari 5 N.m hingga 25 N.m. Namun, pengaruh frekuensi terhadap arus cenderung menurun. Grafik 4.3 menunjukkan pengaruh perubahan frekuensi terhadap arus motor.

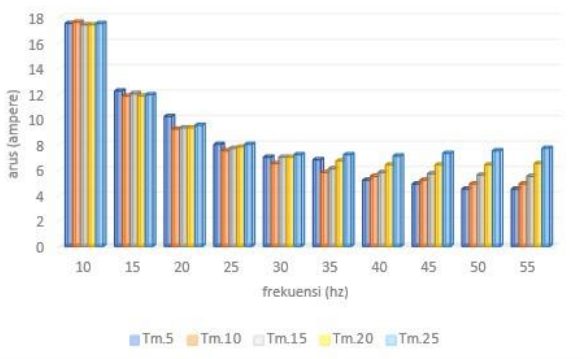


Gambar 8 Grafik Frekuensi Terhadap Arus Dengan Tm 25 N.M

Pada grafik hasil percobaan, saat frekuensi 10 Hz, arus motor mencapai 17,5 Ampere, dan saat frekuensi dinaikkan menjadi 15 Hz, arus motor turun menjadi 12 Ampere. Fluktuasi arus yang signifikan terjadi pada frekuensi rendah seperti 10 Hz sampai 20 Hz, yang dapat disebabkan oleh peningkatan impedansi (resistansi AC) motor. Impedansi motor, yang terdiri dari resistansi dan reaktansi (induktansi dan kapasitansi), dipengaruhi oleh frekuensi. Oleh karena itu, arus motor dapat meningkat sebagai respons terhadap peningkatan impedansi.

Ketika frekuensi dinaikkan hingga 35 Hz, arus menurun menjadi 7,2 Ampere, dan pada frekuensi normal 50 Hz, arus hampir mencapai arus maksimum sebesar 7,5 Ampere. Meskipun peningkatan arus terjadi pada frekuensi rendah, hal ini tidak selalu merugikan. Penyesuaian pada kontrol dan perangkat perlindungan motor dapat membantu memitigasi dampak negatif dan memastikan operasi yang aman dan efisien.

Selain grafik arus dengan beban torsi 25 T.m, grafik pengaruh frekuensi dengan beban torsi 5 N.m sampai 25 N.m. akan ditampilkan.

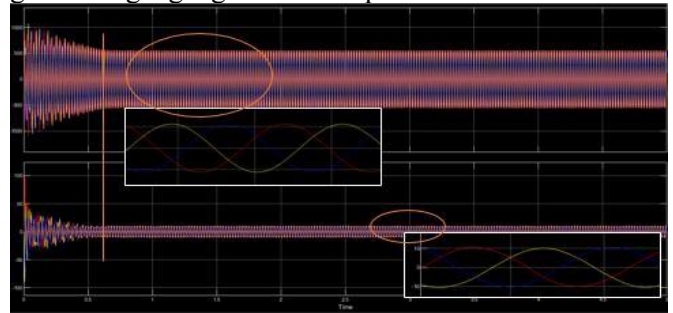


Gambar 9 Grafik Frekuensi Terhadap Arus Dengan Torsi Mekanik Bervariasi (5 N.m -25 N.m)

Grafik tersebut menunjukkan pengaruh perubahan frekuensi terhadap nilai arus dengan variasi torsi mekanik (Tm) 5 N.m – 25 N.m. Pada frekuensi rendah, 10 Hz-25 Hz, nilai arus motor cenderung stabil dengan perbedaan yang kecil. Misalnya, pada frekuensi 10 Hz, nilai arus untuk beban torsi 5 N.m-25 N.m berkisar antara 17,5 Ampere hingga 17,8 Ampere. Fenomena arus yang tinggi pada frekuensi 10 Hz-25 Hz disebabkan oleh penurunan impedansi motor. Penurunan ini

disebabkan oleh reaktansi motor yang turun, yaitu hambatan karena induksi elektromagnetik. Penurunan reaktansi mengakibatkan penurunan impedansi, yang menyebabkan kenaikan arus untuk menjaga torsi yang sama.

Pada frekuensi 35 Hz, nilai arus meningkat menjadi 6,3 Ampere-7,3 Ampere untuk beban torsi 5 N.m-25 N.m, namun masih di bawah arus maksimum 7,6 Ampere. Selain itu, nilai tegangan dan arus selalu mencapai level yang tinggi pada semua frekuensi. Di bawah ini, terlampir gambar gelombang tegangan dan arus pada frekuensi 50 Hz.



Gambar 10 Gelombang V Dan I Motor

Gambar diatas adalah hasil dari tegangan dan arus masukan motor pada saat frekuensi 50 Hz, terlihat bahwa tegangan dan arus start mengalami lonjakan sampai 800 Vac dan arusnya mencapai 100 Ampere sebelum pada waktu 0,5 s nilai tegangan dan arus menjadi stabil sebesar 403 Vac dan arusnya sebesar 7,5 A. Terjadinya lonjakan tegangan dan arus diawal dikarenakan beberapa faktor diantaranya :

1. Rotor Motor Masih Diam.
Rotor yang diam akan menghasilkan medan magnet yang berlawanan dengan medan magnet stator. Hal ini menyebabkan arus yang besar mengalir melalui motor.
2. Beban Tinggi pada Awalnya
Jika motor dimulai dengan beban yang sangat tinggi, seperti saat mencoba untuk memutar beban berat atau saat belt penggeraknya kencang, ini dapat menyebabkan lonjakan arus yang lebih tinggi pada saat start.
3. Torsi Awal Tinggi (High Starting Torque):
Jika motor memerlukan torsi awal yang tinggi, misalnya, untuk mengatasi inersia yang besar atau beban awal yang tinggi, ini dapat menyebabkan lonjakan arus pada saat start.

□ Pengaruh Frekuensi Terhadap Kecepatan

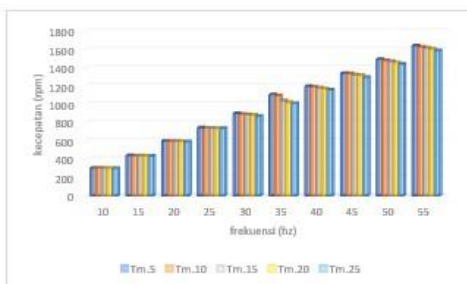
Setelah melihat data hasil simulasi maka dapat di lihat bahwa perubahan frekuensi memiliki pengaruh yang besar terhadap kecepatan. Pada motor induksi 3 fasa, kecepatan motor ditentukan oleh frekuensi sumber listrik dan jumlah kutub motor. Semakin tinggi frekuensi, maka semakin tinggi pula kecepatan motor. Hal ini disebabkan oleh hubungan antara kecepatan dan frekuensi yang berbanding lurus. Dibawah ini adalah grafik pengaruh

perubahan frekuensi terhadap kecepatan motor ketika diberi beban torsi 25 N.m.



Gambar 11 Grafik Frekuensi Terhadap Kecepatan Dengan Torsi Mekanik 25 N.m

Terlihat pada grafik diatas, dimana kecepatan motor pada frekuensi 10 Hz sampai 55 Hz berkisar dari 298 Rpm - 1586 Rpm. Dimana setiap kenaikan frekuensi sebesar 10% atau 5 hz dari frekuensi normalnya (50 Hz) diikuti juga kenaikan kecepatan motor sebesar 10% juga. Misalnya ketika motor induksi diberi frekuensi 50 Hz dengan beban torsi 25 N.m kecepatan motor yang dihasilkan sebesar 1440 Rpm dan ketika frekuensi diturunkan 10% menjadi 45 Hz maka kecepatan yang dihasilkan adalah 1295 Rpm. Dari hasil tersebut maka menurunnya nilai kecepatan seiring dengan penurunan frekuensinya. Hubungan ini tercermin dalam hukum sinkronisasi motor, yang mengaitkan kecepatan motor dengan frekuensi daya listrik dan jumlah kutub motor. Hal ini juga terjadi ketika motor diberi beban torsi mekanik 5 N.m sampai 25 N.m. dibawah ini adalah grafik pengaruh frekuensi terhadap kecepatan dengan variasi beban torsi mulai dari 5 N.m – 25 N.m.



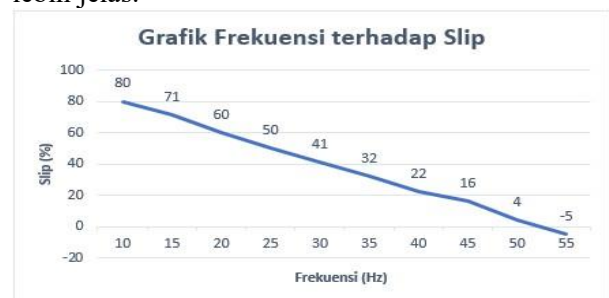
Gambar 12 Grafik Frekuensi Terhadap Kecepatan Dengan Torsi Mekanik 5 N.M - 25 N.m

Grafik menunjukkan pengaruh perubahan frekuensi terhadap kecepatan motor dengan variasi beban torsi mekanik (Tm) 5 N.m – 25 N.m. Perbedaan nilai beban torsi mekanik (Tm) memengaruhi kecepatan motor, di mana kecepatan cenderung lebih tinggi saat beban torsi lebih rendah. Misalnya, pada frekuensi 50 Hz, kecepatan adalah 1495 Rpm untuk beban torsi 5 N.m, 1479 Rpm untuk 10 N.m, dan 1440 Rpm untuk 25 N.m. Penurunan kecepatan disebabkan oleh karakteristik torsi-kecepatan motor, di mana kecepatan akan menurun

dengan peningkatan beban torsi. Dalam proses perubahan frekuensi, fluktuasi dalam nilai kecepatan dan torsi terjadi bahkan pada frekuensi standar 50 Hz karena proses switching rangkaian Variable Frequency Drive menghasilkan harmonik yang tak terhindarkan. Gambar di bawah menampilkan nilai kecepatan dan torsi pada frekuensi 50 Hz.

□ Pengaruh Frekuensi Terhadap Slip Motor

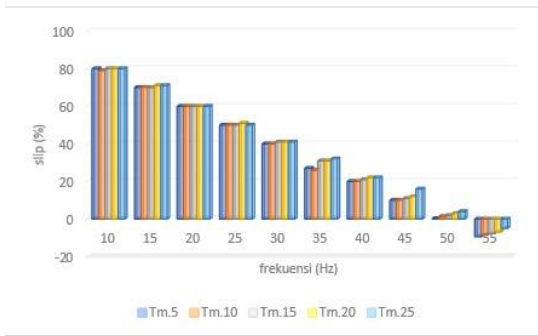
Berdasarkan hasil perhitungan, frekuensi memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai slip motor induksi. Nilai slip cenderung menurun seiring dengan peningkatan frekuensi. Misalnya, pada frekuensi 10 Hz, nilai slip adalah 80%, namun saat frekuensi naik menjadi 20 Hz, nilai slip menurun menjadi 60%. Penurunan nilai slip berlanjut hingga mencapai 4% pada frekuensi 50 Hz. Namun, pada frekuensi di atas 50 Hz, seperti pada 55 Hz, nilai slip menjadi negatif (5%), karena kecepatan motor melebihi kecepatan sinkronnya (1586 Rpm). Grafik yang menunjukkan pengaruh frekuensi terhadap slip akan disajikan di bawah ini untuk penjelasan yang lebih jelas.



Gambar 13 Grafik Frekuensi Terhadap Slip

Grafik tersebut menggambarkan bahwa slip pada motor induksi 3 fasa menurun seiring dengan kenaikan frekuensi. Penurunan slip terkait dengan peningkatan kecepatan motor. Nilai slip tertinggi terjadi pada frekuensi 10 Hz (80%), sedangkan nilai slip terendah terjadi pada frekuensi 55 Hz (-5%). Meskipun slip yang rendah menandakan kinerja motor yang baik, nilai slip di bawah 0 dapat mengakibatkan overheating dan penurunan efisiensi motor. Peningkatan frekuensi menyebabkan penurunan slip karena dua faktor utama:

- Kecepatan rotor: Kecepatan rotor meningkat seiring dengan kenaikan frekuensi, yang mengurangi nilai slip.
- Kerapatan fluks magnet: Kerapatan fluks magnet juga meningkat seiring dengan kenaikan frekuensi, yang menghasilkan torsi lebih besar dan mengurangi slip. Penelitian ini juga menganalisis pengaruh perubahan beban torsi mekanik (Tm) terhadap nilai slip, yang akan ditunjukkan dalam grafik nilai slip dengan variasi beban torsi mekanik dari 5 N.m sampai 25 N.m.



Gambar 14 Grafik Frekuensi Terhadap Slip Dengan Beban Torsi 5 N.m-25 N.m

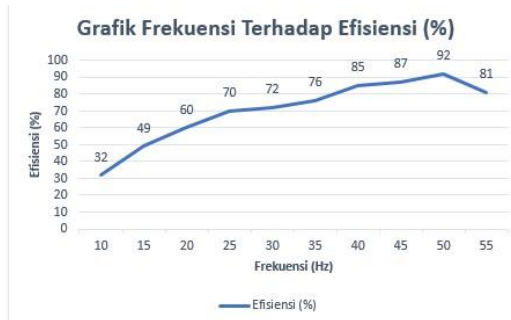
Grafik menunjukkan bahwa perbedaan nilai beban torsi mekanik pada motor memiliki dampak yang kurang signifikan. Nilai slip cenderung memiliki selisih yang kecil dari beban torsi 5 N.m sampai 25 N.m pada berbagai frekuensi. Misalnya, pada frekuensi 10 Hz, nilai slip berkisar sekitar 80% untuk semua beban torsi. Namun, pada frekuensi 35 Hz dan di atasnya hingga 50 Hz, terjadi kenaikan nilai slip seiring dengan kenaikan beban torsi.

Kenaikan nilai slip seiring dengan kenaikan beban torsi disebabkan oleh beberapa faktor utama:

1. Rugi-rugi motor: Kenaikan beban torsi mekanik meningkatkan rugi-rugi motor seperti rugi-rugi tembaga dan besi, yang menyebabkan penurunan efisiensi motor dan memperlambat kecepatan motor, sehingga nilai slip meningkat.
2. Kecepatan motor: Peningkatan beban torsi mekanik menyebabkan penurunan kecepatan motor, yang juga berkontribusi pada peningkatan nilai slip.
3. Torsi motor: Torsi motor induksi berbanding lurus dengan slip. Ketika slip meningkat, torsi motor juga meningkat, memungkinkan motor untuk mengatasi beban torsi mekanik yang lebih tinggi.

□ Pengaruh Frekuensi Terhadap Efisiensi Motor

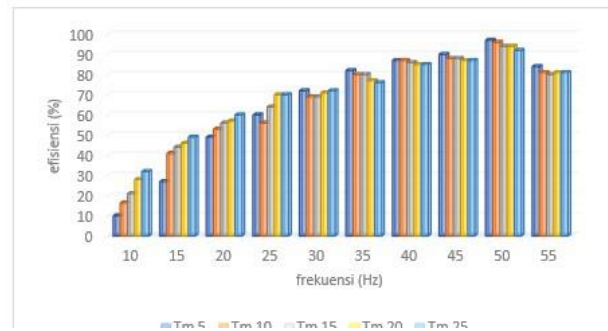
Berdasarkan hasil percobaan, frekuensi memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai efisiensi motor induksi. Efisiensi dipengaruhi oleh faktor seperti daya input, rugi-rugi motor, dan daya output. Pengaruh perubahan frekuensi terhadap nilai efisiensi motor induksi dapat dilihat dari grafik berikut.



Gambar 15 Grafik Frekuensi Terhadap Efisiensi

Grafik menunjukkan pengaruh frekuensi terhadap efisiensi motor induksi 3 fasa dengan beban torsi 25 N.m. Terlihat bahwa efisiensi motor meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi masukan. Peningkatan efisiensi paling mencolok terjadi pada frekuensi rendah, di mana arus motor tetap tinggi. Saat frekuensi meningkat, arus motor cenderung menurun, mengurangi kerugian pada motor, dan meningkatkan efisiensi. Sebagai contoh, pada frekuensi 10 Hz, efisiensi sebesar 32,9% dengan daya output 675 watt, sedangkan pada 15 Hz, efisiensi naik menjadi 64,5% dengan daya output 1157 watt. Pada frekuensi tinggi, peningkatan efisiensi cenderung lebih kecil. Efisiensi tertinggi terjadi pada frekuensi 50 Hz, mencapai 92%. Peningkatan frekuensi meningkatkan kecepatan sinkron motor, mengurangi perbedaan kecepatan antara rotor dan medan magnet stator (slip), yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi motor. Efisiensi juga dipengaruhi oleh beban dan rugi-rugi motor induksi.

Penelitian ini juga menganalisis pengaruh perubahan beban torsi mekanik terhadap efisiensi motor, yang ditunjukkan dalam grafik efisiensi motor dengan variasi beban torsi mekanik dari 5 N.m sampai 25 N.m.



Gambar 16 Grafik Frekuensi Terhadap Efisiensi Dengan Beban Torsi 5 N.m – 25 N.m

Grafik menunjukkan bahwa perubahan nilai beban torsi mekanik pada motor memiliki dampak signifikan pada efisiensi. Setiap kenaikan beban torsi pada setiap frekuensi menyebabkan peningkatan nilai efisiensi. Misalnya, pada frekuensi 10 Hz, efisiensi naik dari 10% untuk beban torsi 5 N.m menjadi 1432% untuk beban torsi 10 N.m hingga 25 N.m. Hal ini juga terjadi pada frekuensi 15 Hz hingga 55 Hz, di mana efisiensi meningkat seiring dengan kenaikan beban torsi mekanik. Efisiensi tertinggi dicapai pada frekuensi 50 Hz, dengan nilai antara 90% hingga 96%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi dan beban torsi mekanik secara bersama-sama berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi motor.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan mengenai pengaruh perubahan frekuensi terhadap

efisiensi motor induksi 3 fasa menggunakan matlab simulink, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Frekuensi pada Variable Frequency Drive (VFD) berbanding lurus dengan kecepatan motor. Penurunan frekuensi 10% dari 50 Hz mengakibatkan penurunan kecepatan motor sebesar 10%, misalnya dari 1440 Rpm menjadi 1295 Rpm. Namun, dengan variasi beban torsi mekanik, kecepatan justru mengalami penurunan. Pada frekuensi 50 Hz, kecepatan dengan beban 5 N.m adalah 1495 Rpm, namun dengan beban 25 N.m, kecepatan menjadi 1440 Rpm.
2. Frekuensi berpengaruh pada efisiensi motor. Kenaikan frekuensi meningkatkan efisiensi. Misalnya, pada frekuensi 10 Hz dengan beban 25 N.m, efisiensi 32%, dan pada 15 Hz, efisiensi naik menjadi 64%. Namun, efisiensi menurun seiring peningkatan beban torsi mekanik. Pada 50 Hz, efisiensi dengan beban 5 N.m adalah 97%, tetapi dengan beban 25 N.m, efisiensi turun menjadi 92% karena rugi-rugi motor yang meningkat.
3. Kombinasi frekuensi dan tegangan motor yang menghasilkan efisiensi tinggi adalah pada beban torsi 5 N.m, frekuensi 50 Hz, dan tegangan 432 Vac, menghasilkan efisiensi 97% dan kecepatan 1495 Rpm.

VI. SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disampaikan beberapa saran yaitu sebagai berikut:

1. Melakukan percobaan secara langsung menggunakan Variable Frequency Drive (VFD)
2. Melakukan analisis mengenai harmonic yang dihasilkan VFD

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Kumar, "Performance analysis of three-phase induction motor with AC direct and VFD," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 331, no. 1, hlm. 12025.
- [2] D. Andri, "Analisa Perubahan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Jenis Rotor Sangkar Tupai Dalam Keadaan Pembebanan dan Membandingkannya Dengan Program Matlab Simulink," 2016.
- [3] A. Muhammad *dkk.*, "Analisa Rugi-Rugi Energi Listrik Pada Jaringan Distribusi (JTM) Di PT. PLN (Persero) Area Gorontalo," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 7, no. 3, hlm. 295–302, 2019.
- [4] A. Kurnia Pratama, E. Zondra, and H. Yuvendius, "Analisis Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Akibat Perubahan Tegangan," *J. Sain, Energi, Teknol. Ind.*, vol. 5, no. 1, pp. 35–43, 2020.
- [5] Z. Anthony, D. Jurusan, dan T. Elektro, "Studi Pengaruh Perubahan Frekwensi Sumber Terhadap

- Faktor Daya Motor Induksi 3-Fasa Jurnal Teknik Elektro ITP," vol. 2, no. 2, hlm. 49–52, 2013.
- [6] F. Y. Nanda, "Pengaruh Perubahan Frekuensi Terhadap Efisiensi Dan Torsi Pada Motor Induksi 3 Fase 0,25 Kw 380 Volt Di Pt Djarum Kudus," 2019.
 - [7] A. Puspitasari, "Analisa Distorsi Harmonik Pada Inverter Svpwm 3 Fasa Dengan Beban Induktif." Universitas Islam Sultan Agung, 2019.
 - [8] Zuhail, "Dasar Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya." hlm. 264, 2000.
 - [9] B. Muslim, "Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler Fuzzy-PID," *J. Tek. Elektro ITS*, vol. 3, no. 1, hlm. 1–10, 2015.
 - [10] I Nyoman Bagia & I Made Parsa, *Motor-motor Listrik*. 2018.
 - [11] S. J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals," *Electr. Mach. Fundam. fourth Ed.*, vol. 6, no. August, hlm. 128, 2016.
 - [12] M. M. Ibrahim, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Metode V/F Konstan Dan Kontrol PID-CHR," *Energi & Kelistrikan*, vol. 14, no. 1, hlm. 62–71, 2022, doi: 10.33322/energi.v14i1.1632.
 - [13] K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Passive Filter Design for Three-Phase Inverter Interfacing in Distributed Generation," in *2007 Compatibility in Power Electronics*, 2007, hlm. 1–9. doi: 10.1109/CPE.2007.4296511.
 - [14] M. Ali, "Aplikasi Elektronika Daya pada Sistem Tenaga Listrik," *UNY Pers*, hlm. 1–149, 2018.
 - [15] T. L. Wibowo, J. T. Elektro, dan F. T. Industri, "Penghematan Energi Pada Penggunaan Inverter Sebagai Pengendal Kecepatan Motor Induksi," vol. 1, no. 1, hlm. 1–8, 2010.
 - [16] A. D. Baringbing, "Analisa Performa Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Variable Frequency Drive (VFD) Menggunakan Pulse Generator Pwm Dan Svpwm," hlm. 198, 2022.
 - [17] H. D. Laksono, *Pengantar Pemrograman Dengan Matlab*. 2017.