

ANALISIS FAKTOR DAYA MOTOR INDUKSI TIGA PHASA DENGAN METODE *MEASURED CURRENT ONLY* (MCO)

Muhammad Fajar Baskoro¹, Elvira Zondra², Masnur Putra Halilintar³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning

Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324

Email: mfajarbaskoro123@gmail.com, elviraz@unilak.ac.id, masnur@unilak.ac.id

ABSTRAK

Faktor daya merupakan rasio dari daya aktif P terhadap daya semu $|S|$ pada rangkaian arus bolak-balik, yang bisa dijadikan suatu patokan efisiensi suatu alat. Faktor daya pada beban induktif selalu memiliki faktor daya yang rendah karena mengkonsumsi daya reaktif yang berlebih. Salah satu beban induktif yang banyak digunakan di dunia industri adalah motor induksi tiga phasa. Dari definisi diatas, pengukuran faktor daya memerlukan alat ukur tegangan dan arus stator. Penelitian ini menawarkan pengukuran faktor daya yang hanya memerlukan pengukuran arus stator dan nilai arus dan faktor daya *rating* yang terdapat pada *datasheet* motor yang disebut *Measured Current Only* atau MCO. Metode MCO yang dicetuskan oleh Abhisek Ukil et al menyatakan bahwa arus reaktif pada motor induksi dianggap konstan. Motor induksi tiga phasa 1 hp yang terdapat pada Laboratorium Teknik Elektro Universitas Lancang Kuning digunakan sebagai objek penelitian faktor daya metode MCO. Rata-rata error perbandingan arus stator dari data pengukuran terhadap data program .m file adalah 1,41899%, sedangkan rata-rata error arus stator data simulasi terhadap data program .m file adalah 0,42054%. Perbandingan faktor daya metode MCO terhadap faktor daya metode lain dari data pengukuran memiliki nilai rata-rata error 5,62962% - 5,71992%. Apabila beban yang digunakan dari 3,6 N.m Sampai 5,8 N.m, rata-rata error faktor daya metode MCO memiliki nilai 3,30809% - 3,61364%, sedangkan penggunaan beban dari 1,47 N.m sampai 2,9 N.m memiliki rata-rata error 9,11193% - 9,07734%.

Kata Kunci: Faktor Daya, Motor Induksi Tiga Phasa, Metode MCO, Arus Stator

ABSTRACT

Power factor is the ratio of active power P to the apparent power $|S|$ in alternating current circuit, which can be used as an efficiency standard of a device. Power factor in inductive loads always have lower values due to consuming more reactive power. One of the inductive loads that are widely used in industries is three-phase induction motor. From definition above, power factor measurement requires stator voltage and current measuring instruments. This study offers power factor measurement that only requires stator current measurement and rating values of current and power factor written in induction motor's datasheet, this method is called *Measured Current Only* or MCO. The MCO method proposed by Abhisek Ukil et al states that the reactive current in three-phase induction motor is considered constant. The 1 hp three-phase induction motor in Electrical Engineering Laboratory of Universitas Lancang Kuning is used as the object of study on power factor using MCO method. The average error of stator current comparison from measurement data to the .m file program data is 1,41899%, while the average error of the simulation data to the .m file program data is 0,42054%. From measurement data, the comparison of the power factor of the MCO method to other power factor methods has an average value of 5,62962% - 5,71992%. If the load used is from 3,6 to 5,8 N.m, the average power factor error of the MCO method has a value of 3.30809% - 3.61364%, while the use of the load from 1,47 to 2,9 N.m has an average error of 9,11193% - 9,07734%.

Keywords: Power Factor, Three-Phase Induction Motor, MCO Method, Stator Current

1. PENDAHULUAN

Motor induksi tiga phasa merupakan beban induktif yang banyak digunakan pada dunia industri. Karena berbentuk beban induktif, motor induksi tiga phasa akan memiliki daya reaktif Q yang mengakibatkan terjadinya aliran energi yang mengalir bolak-balik diantara beban dan sumber, sehingga meningkatkan rugi-rugi daya I^2R . Idealnya, suatu beban tidak memiliki daya reaktif, sehingga tidak ada rugi-rugi daya yang diakibatkan oleh daya reaktif.

Parameter yang digunakan untuk mengetahui komponen-komponen daya pada rangkaian AC adalah faktor daya. Faktor daya yang ideal memiliki nilai 1, yang tidak akan menghasilkan daya reaktif [1]. Karena itu, untuk meminimalisir rugi-rugi daya, faktor daya harus dijaga agar memiliki nilai 1 atau *unity*.

Kapasitor bank digunakan untuk mengatur nilai faktor daya agar nilai tersebut bisa mendekati nilai 1. Namun, penggunaan kapasitor bank yang optimal harus membutuhkan nilai faktor daya yang akurat pula [2]. Cara

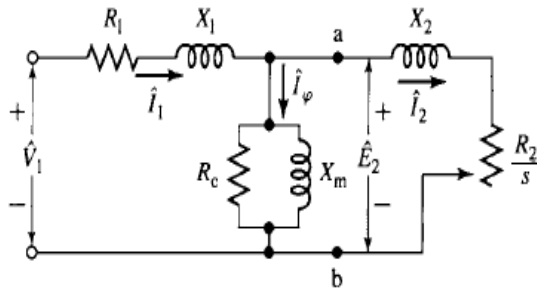
pertama untuk mendapatkan faktor daya adalah dengan membandingkan daya aktif terhadap daya semu. Cara ini memerlukan parameter rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa, yang tentunya tidak praktis karena untuk mendapatkan rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa perlu mendapatkan hasil uji tes rotor tertahan, tanpa beban, dan tahanan stator. Cara lain adalah dengan cara *Zero-Crossing*, yaitu dengan membandingkan perbedaan waktu untuk mencapai sudut 0° antara gelombang tegangan terhadap gelombang arus [3], [4].

Kedua cara untuk mendapatkan faktor daya diatas memerlukan pembacaan tegangan dan arus. Abhisek Ukil dkk mengusulkan suatu metode untuk mendapatkan faktor daya yang hanya memerlukan pembacaan arus stator pada keadaan berbeban dengan referensi arus dan faktor daya *rating* yang didapat dari data katalog dan *nameplate* motor induksi tiga fasa yang digunakan, yang tentunya dapat menghemat pengeluaran. Metode ini disebut sebagai *Measured Current Only*, yang selanjutnya disingkat menjadi Metode MCO, menyatakan bahwa arus reaktif pada sisi stator motor induksi tiga fasa bisa dianggap konstan, sehingga faktor daya bisa diperoleh [4].

2. METODE PENELITIAN

Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa

Pada dasarnya, motor induksi dapat diumpamakan sebagai transformator yang berputar karena pada saat motor induksi diberi tegangan pada sisi stator, tegangan akan terinduksi pada sisi rotor yang mengakibatkan motor berputar. Pada gambar 2 ditunjukkan rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa [5].



Gambar 1. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa

Terlihat pada gambar 1, R_1 adalah tahanan stator dan X_1 adalah reaktansi stator. Sedangkan R_2 adalah tahanan rotor dan X_2 adalah reaktansi rotor. Nilai s disana adalah slip, yang didapat dari rasio kecepatan sinkron terhadap pengurangan dari kecepatan sinkron terhadap kecepatan motor. Sehingga, dapat dikatakan bahwa besarnya beban akan mempengaruhi slip, yang akan mempengaruhi nilai tahanan rotor R_2 . X_m dan R_c masing-masing adalah reaktansi magnetisasi dan tahanan rugi inti [6]. Tahanan rugi inti R_c menurut IEEE Standar 112 bisa diabaikan untuk analisis motor induksi tiga fasa [7].

Seperti layaknya transformator, arus stator dapat dibagi menjadi dua komponen, yaitu komponen beban dan komponen eksitasi, magnetisasi atau reaktif. Komponen beban I_2 yaitu komponen aktif

menghasilkan suatu ggm yang sesuai dengan ggm arus rotor. Komponen eksitasi I_ϕ atau komponen reaktif merupakan arus stator tambahan yang dibutuhkan untuk menimbulkan resultan fluks celah udara dan merupakan fungsi dari E_2 [8]. Pada keadaan tanpa beban, komponen aktif akan memiliki nilai yang kecil, yang digunakan untuk menyuplai rugi angin dan gesekan. Komponen reaktif akan memiliki nilai yang besar, yang digunakan untuk membangkitkan daya reaktif yang cukup besar. Daya reaktif yang cukup besar ini digunakan untuk membangkitkan medan putar dan karena itu, pada keadaan tak berbeban, faktor dayanya sangat rendah. Pada keadaan berbeban, total daya reaktif yang dibangkitkan dalam keadaan berbeban akan lebih besar dibandingkan daya reaktif pada keadaan beban nol. Tetapi, daya aktif yang diserap oleh motor akan meningkat proporsional terhadap beban mekanis motor. Sehingga faktor daya akan bertambah besar seiring meningkatnya beban [9].

Rumus-rumus yang digunakan untuk menganalisis motor induksi tiga fasa yang didapat dari rangkaian ekuivalen adalah [6], [8]:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (1)$$

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (2)$$

$$Z_F = Z_2 \parallel jX_m = \frac{Z_2 \times jX_m}{Z_2 + jX_m} \quad (3)$$

$$Z_{tot} = Z_1 + Z_F \quad (4)$$

$$I_1 = \frac{V_{1-LN}}{Z_{tot}} = |I_1| \angle \varphi_1 \quad (5)$$

Keterangan:

Z_1 = Impedansi stator (Ω)

Z_2 = Impedansi rotor (Ω)

Z_F = Impedansi paralel ekuivalen (Ω)

Z_{tot} = Impedansi total motor induksi tiga fasa (Ω)

I_1 = Arus stator (A)

V_{1-LN} = Tegangan fasa-netral stator (V)

φ_1 = Sudut fasa stator ($^\circ$)

Faktor Daya Motor Induksi Tiga Fasa

Faktor daya adalah rasio dari daya aktif P dengan daya semu S . Faktor daya juga bisa didefinisikan sebagai nilai kosinus dari perbedaan sudut tegangan dan sudut arus. Faktor daya diekspresikan hanya sebagai bilangan saja atau dalam persentase [10]. Rumus faktor daya pada motor induksi tiga fasa adalah [6]:

$$pf = P_{in}/|S|_{in} = \cos \varphi_1 \quad (6)$$

Dengan:

$$P_1 = \sqrt{3}V_{1-LN}|I_1| \cos \varphi_1 \quad (7)$$

$$|S|_{in} = \sqrt{3}V_{1-LN}|I_1| \quad (8)$$

Keterangan:

pf = Faktor daya

P_{in} = Daya aktif input motor induksi tiga fasa (W)

$|S|_{in}$ = Daya semu motor induksi tiga fasa (VA)

V_{1-LL} = Tegangan fasa-fasa stator (V)

Karena beban aktif tidak bisa melebihi daya semu sesuai dengan kaidah bilangan kompleks, maka faktor daya tidak bisa melebihi nilai 1 atau 100%, yang biasa disebut *unity*. Faktor daya pada rangkaian berbeban resistif akan memiliki nilai 1 atau 100%, karena daya semu nya sama dengan daya aktif. Sedangkan faktor daya dengan beban induktif ideal, dimana tidak ada resistansi nya, akan bernilai 0, karena rangkaian tidak menggunakan daya aktif [10]. Beban yang memiliki faktor daya yang rendah akan memiliki biaya pengoperasian yang mahal, karena pada keadaan faktor daya yang rendah dibutuhkan arus yang besar. Kondisi ideal suatu beban yaitu ketika daya semu S memiliki nilai yang sama dengan daya aktif P, dengan faktor daya *unity*. Ketika suatu beban memiliki daya reaktif Q, terjadinya aliran energi bolak-balik dari diantara beban dan sumber, sehingga meningkatnya rugi-rugi daya I^2R . Karena hal itu biasanya perusahaan listrik mendorong pelanggan-pelanggan untuk memiliki faktor daya dengan nilai mendekati *unity* dan memberikan denda jika hal tersebut tidak terpenuhi [1].

Untuk menentukan batas toleransi dari faktor daya motor induksi tiga fasa, bisa digunakan persamaan yang berada pada Standar IEC 60034-1, yaitu [11]:

$$-1/6 (1 - \cos \varphi) \quad (9)$$

Nilai Absolut Minimal 0,02
Nilai Absolut Maksimal 0,07

Nilai $\cos \varphi$ adalah nilai faktor daya yang terdapat pada katalog motor induksi tiga fasa yang digunakan. Maksud dari nilai-nilai absolut diatas adalah apabila nilai faktor daya *rating* motor induksi tiga fasa dimasukkan kedalam persamaan (9), hasilnya tidak boleh lebih rendah dari 0,02 dan tidak boleh lebih tinggi dari 0,07.

Faktor Daya Motor Induksi Tiga Fasa Metode Zero-Crossing

Zero-crossing detection adalah metode yang mengukur perubahan tegangan dan arus terhadap waktu pada sistem AC. Pada metode ini, didapat nilai sinyal logika "HIGH" (atau 1) ketika gelombang tegangan atau arus kembali ke sudut 0° . Karena motor induksi tiga fasa merupakan beban induktif, maka gelombang arus akan tertinggal dari gelombang tegangan, sehingga perbedaan waktu untuk mencapai sudut 0° akan berbeda. Faktor daya selanjutnya dapat dicari dengan cara menghitung perbedaan waktu antara sudut 0° tegangan dan sudut 0° arus menggunakan rumus [3], [4]:

$$\varphi_1 = \frac{|\Delta t|}{1/f} \times 360^\circ$$

Sehingga:

$$pf = \cos\left(\frac{|\Delta t|}{1/f} \times 360^\circ\right) \quad (10)$$

Keterangan:

Δt = Perbedaan waktu antara gelombang tegangan dan gelombang arus (s)

f = Frekuensi sumber (Hz)

Faktor Daya Motor Induksi Tiga Fasa Metode Measured Current Only (MCO)

Seperti yang telah dijelaskan pada bagian rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa, arus yang masuk kedalam motor induksi tiga fasa adalah arus aktif (I_{aktif}) dan arus reaktif ($I_{reaktif}$). Arus aktif digunakan untuk memikul beban, dimana besarnya I_{aktif} akan berubah menyesuaikan dengan torsi yang digunakan sebagai beban. Arus reaktif digunakan untuk menimbulkan resultan fluks celah udara, dimana besarnya $I_{reaktif}$ bisa diasumsikan bernilai konstan karena tidak terlalu banyak berubah dari keadaan tidak berbeban hingga beban penuh [4], [8].

Rumus arus, dengan kaitan arus aktif dan arus reaktif adalah [4]:

$$I = \sqrt{I_{aktif}^2 + I_{reaktif}^2} \quad (11)$$

$$I_{aktif} = I \cos \varphi \quad (12)$$

$$I_{reaktif} = I \sin \varphi \quad (13)$$

Dengan I dan $\cos \varphi$ masing masing adalah arus dan faktor daya yang didapat dari *nameplate* dan katalog motor induksi tiga fasa. Nilai $\sin \varphi$ didapat dengan mencari sudut φ . Mengalikan nilai I dengan $\sin \varphi$ menghasilkan konstanta $I_{reaktif}$ untuk persamaan selanjutnya.

Dari persamaan (13) didapat:

$$I_{reaktif} = I \sin(\cos^{-1} \varphi) \quad (14)$$

$$I_{reaktif} / I_1 = \sin \varphi \quad (15)$$

Dengan I_1 adalah arus stator yang terukur. Mengingat identitas trigonometri:

$$\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi = 1 \quad (16)$$

Persamaan (15) bisa juga dibuat menurut persamaan (16) menjadi:

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} \quad (17)$$

Substitusikan persamaan (15) kedalam persamaan (17), sehingga faktor daya motor induksi tiga phasa menjadi:

$$pf = \sqrt{1 - (I_{reaktif}/I_1)^2} \quad (18)$$

Karena komponen reaktif dianggap tetap konstan, komponen reaktif dapat diestimasi dari data motor induksi tiga phasa yang terdapat pada katalog dan *nameplate* dengan menggunakan persamaan (14). Saat motor diberi beban, arus I_1 akan naik, sedangkan $I_{reaktif}$ motor akan tetap konstan. Dengan demikian, perbandingan $(I_{reaktif}/I_1)$ pada persamaan (18) akan menurun. Sehingga akan mengakibatkan nilai faktor daya motor menjadi naik menuju nilai 1. Sedangkan pada keadaan tanpa beban, arus aktif yang dihasilkan I_1 kecil, sedangkan arus reaktif yang dihasilkan akan besar. karena itu nilai I_1 akan hampir sama dengan $I_{reaktif}$, sehingga faktor daya akan mendekati 0 atau kecil.

Terlihat dari rumus (6) dan (10) bahwa pengukuran faktor daya tidak membutuhkan hasil pengukuran tegangan. Sedangkan dari turunan rumus (17) menyatakan bahwa metode pengukuran faktor daya metode MCO hanya membutuhkan arus yang terukur dari motor dan arus dan faktor daya *rating* yang didapat dari katalog, sehingga metode MCO dapat menghemat biaya untuk alat pengukuran faktor daya [4].

Pembebanan Motor Induksi Tiga Phasa

Pengujian berbeban motor induksi tiga phasa dilakukan untuk mengetahui nilai arus, daya input, dan faktor daya sisi stator, kecepatan putar motor, torsi elektris, torsi beban dan efisiensi motor. Pada percobaan ini, beban yang digunakan adalah metode pengereman konfigurasi pulley dengan pendingin air seperti gambar 2. Pulley dihubungkan dengan motor, dengan sabuk mengelilingi pulley tersebut. Timbangan pegas dihubungkan ke tiap-tiap ujung sabuk [12].

Torsi adalah besaran vektor yang digunakan untuk mengukur suatu gaya yang diberikan kepada benda untuk memutar benda tersebut terhadap sumbu porosnya. Rumus torsi adalah [13]:

$$\tau = FR$$

$$\tau = mgR \quad (19)$$

Keterangan:

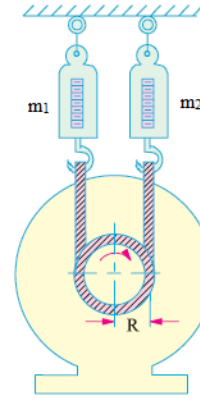
τ = Torsi (N.m)

F = Gaya (N)

R = Jari-jari pulley (m)

m = Massa (kg)

g = Gaya gravitasi, yaitu 9,81 m/s²



Gambar 2. Pembebanan Motor Induksi Tiga Phasa

Kembali ke pembahasan rangkaian pembebanan, tensi sabuk dapat diatur dengan menggunakan *swivel* atau pemutar. Gaya yang bekerja secara tangensial pada pulley sama dengan perbedaan dari pembacaan 2 timbangan pegas. Sehingga rumus (19) bisa dibuat menjadi [12]:

$$\tau_{load} = (F_1 - F_2)R$$

$$\tau_{load} = (m_1 - m_2)gR = \Delta m g R \quad (20)$$

Keterangan:

τ_{load} = Torsi beban (N.m)

m_1 = Massa yang ditunjukkan timbangan 1 (kg)

m_2 = Massa yang ditunjukkan timbangan 2 (kg)

Δm = Perbedaan pembacaan timbangan 1 dan timbangan 2 (kg)

Torsi yang didapatkan adalah torsi yang bekerja pada as motor atau torsi beban. Sehingga daya output dari motor induksi tiga phasa adalah [12]:

$$P_{out} = \tau_{load} \omega_r \quad (21)$$

Keterangan:

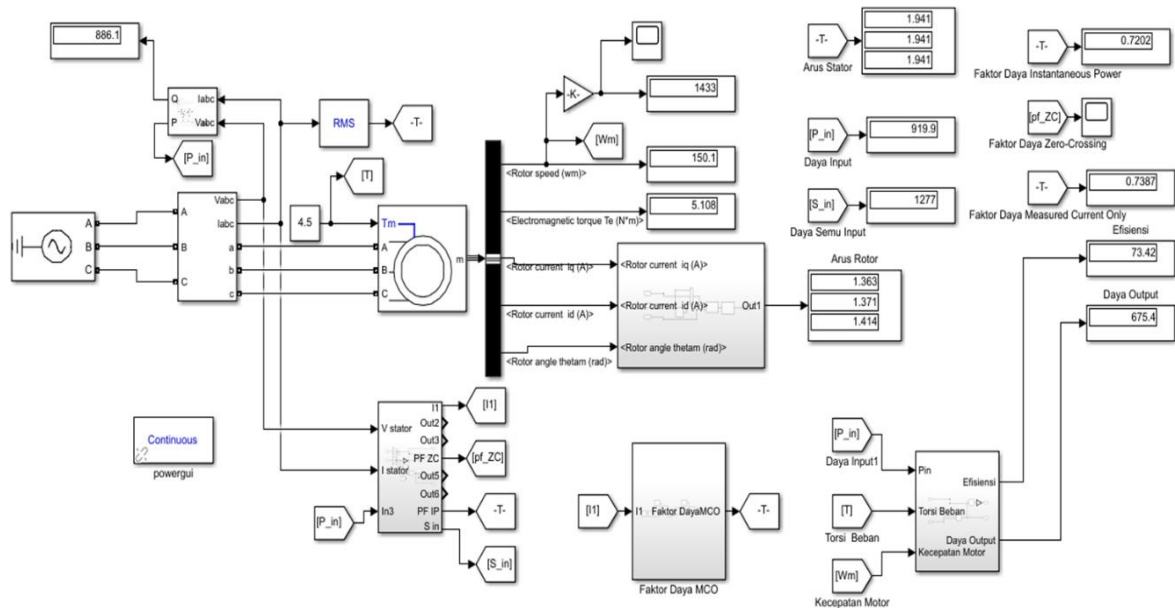
P_{out} = Daya keluaran (W)

ω_r = Kecepatan angular motor (rad/s)

Karena itu, besarnya daya output dapat ditentukan dari kancangannya sabuk dari konfigurasi tersebut [12].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Objek dari penelitian ini adalah motor induksi tiga phasa yang berada pada Laboratorium Teknik Elektro Universitas Lancang Kuning. Sumber tiga phasa diatur menggunakan autotransformator. Untuk mengetahui faktor daya tiap-tiap beban, digunakan metode pengereman konfigurasi pulley sebagai beban dari motor induksi tiga phasa. Pulley memiliki jari-jari 10 cm. Sedangkan untuk pembacaan daya aktif, daya semu, dan arus stator menggunakan *power analyzer* LT-Lutron Model DW-6092. Gambar 2 dan 3 menunjukkan rangkaian pembebanan motor induksi tiga phasa yang diteliti.

Gambar 5. Simulasi SIMULINK Motor Induksi Tiga Fasa pada $\tau_{load} = 4,5 \text{ N.m}$

Tabel 3. Hasil Pengukuran Motor Induksi Tiga Fasa

Kecepatan (rpm)	I_1 (A)	P_{in} (W)	Δm (kg)	τ_{load} (N.m)
1410	2,244	1154	5,9	5,8
1417	2,163	1102	5,6	5,5
1425	2,057	1005	5,1	5
1432	1,922	905	4,6	4,5
1442	1,839	832	4,1	4
1446	1,798	779	3,7	3,6
1457	1,669	655	3	2,9
1464	1,595	562	2,45	2,4
1470	1,519	460	1,9	1,85
1475	1,486	404	1,5	1,47

Berikut merupakan contoh perhitungan torsi beban menggunakan rumus (20) pada kecepatan 1432 rpm: Diketahui $R = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$ dan $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Sehingga:

$$\tau_{load} = 4,6 \times 9,81 \times 0,1 = 4,5216 \text{ N.m}$$

$$\tau_{load} \approx 4,5 \text{ N.m}$$

Nilai dari torsi beban dibulatkan karena pada pengukuran di laboratorium, terjadi fluktuasi pada jarum-jarum pembacaan timbangan. Perhitungan torsi dilakukan untuk tiap-tiap kecepatannya dan dimasukkan ke dalam tabel 3. Hasil dari torsi beban τ_{load} ini akan menjadi patokan beban-beban untuk analisis faktor daya metode MCO. Contoh-contoh analisis faktor daya diberikan untuk torsi beban memiliki nilai 4,5 N.m.

Selain dari hasil pengukuran, program .m file digunakan sebagai pengganti analisis faktor daya yang didapat dari perhitungan manual. Rumus-rumus pada persamaan (1) hingga (21). Berikut diberi contoh hasil program .m file pada gambar 5.

Hasil Analisis Berbeban pada Torsi Beban = 4.5 N.m

Hasil Perhitungan Arus Stator dan Rotor Motor Induksi Tiga Fasa

Kecepatan Motor	= Nm	= 1432 rpm
slip	= slip	= 0.045333
Arus Stator	= I1	= 1.4193-1.3481i A
Arus Magnitud Stator	= I1mag	= 1.9575 A
Arus Rotor	= I2	= 1.4039-0.067416i A
Arus Magnitud Rotor	= I2mag	= 1.4056 A

Hasil Perhitungan Faktor Daya Motor Induksi Tiga Fasa

Faktor Daya Instantaneous Power	= pf	= 0.72505
Faktor Daya Measured Current Only	= pf MCO	= 0.74399

Gambar 6. Hasil Analisis .m File pada $\tau_{load} = 4,5 \text{ N.m}$

Terakhir, dilakukan simulasi menggunakan SIMULINK MATLAB untuk motor induksi tiga fasa yang digunakan. Fungsi dari simulasi selain untuk melihat apakah hasil pengukuran dan hasil analisis program .m file memiliki nilai yang mendekati atau sama dengan hasil dari simulasi, juga untuk mendapatkan faktor daya metode zero-crossing. Adapun contoh simulasi menggunakan SIMULINK ditunjukkan pada gambar 6.

Analisis faktor daya metode MCO menggunakan arus stator I_1 sebagai masukan dari persamaannya, maka sebelumnya dibandingkan terlebih dahulu arus stator yang didapat dari hasil pengukuran, hasil program .m file dan hasil simulasi. Arus stator hasil dari pengukuran, simulasi, dan program .m file selanjutnya akan dimasukkan pada tabel 5 untuk menghitung persen error tiap-tap titik beban. Untuk mencari persen error, digunakan arus stator hasil program .m file sebagai patokan karena program .m file menggunakan nilai-nilai rangkaian ekivalen pada tabel 2. Berikut merupakan contoh perhitungan persen error untuk

torsi beban 4,5 N.m dengan arus pengukuran didapat dari tabel 3, arus .m file didapat dari gambar 5 dan arus simulasi didapat dari gambar 6:

$$\% error_{pengukuran} = \left| \frac{1,9575 - 1,922}{1,9575} \right| \times 100\%$$

$$\% error_{pengukuran} = 1,81354\%$$

$$\% error_{simulasi} = \left| \frac{1,9575 - 1,941}{1,9575} \right| \times 100\%$$

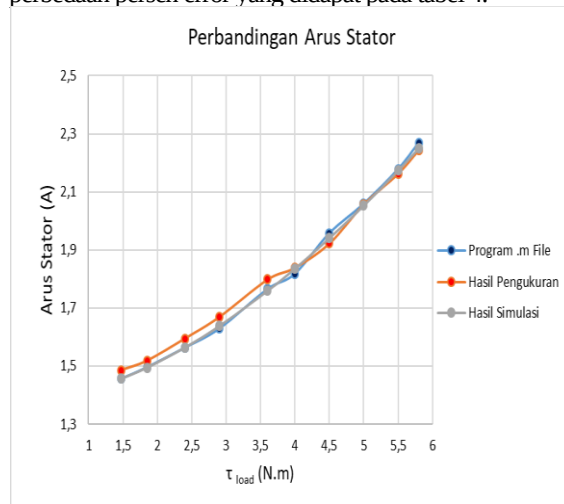
$$\% error_{simulasi} = 0,84291\%$$

Hasil perhitungan persen error dilakukan untuk tiap-tiap torsi beban untuk perbandingan arus stator yang selanjutnya dimasukkan kedalam tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis Perbandingan Arus Stator

τ_{load} (N.m)	Arus Stator I_1 (A)			Persen Error (%)	
	.m File	Pengukuran	Simulasi	Pengukuran	Simulasi
5,8	2,2694	2,244	2,25	1,11924	0,85485
5,5	2,1786	2,163	2,174	0,71606	0,21114
5	2,0593	2,057	2,053	0,11169	0,30593
4,5	1,9575	1,922	1,941	1,81354	0,84291
4	1,818	1,839	1,836	1,15512	0,9901
3,6	1,7649	1,798	1,759	1,87546	0,3343
2,9	1,6292	1,669	1,638	2,44292	0,54014
2,4	1,5636	1,595	1,564	2,00819	0,02558
1,85	1,4964	1,519	1,495	1,51029	0,09356
1,47	1,4559	1,486	1,456	2,06745	0,00687
Rata-Rata Persen Error (%)				1,48199	0,42054

Dari hasil tabel 4 ini, dibuatkan grafik perbandingan arus stator pada gambar 7 untuk memvisualisasikan perbedaan persen error yang didapat pada tabel 4.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Arus Stator

Hasil dari perhitungan rata-rata persen error menyatakan bahwa arus stator rangkaian simulasi memiliki nilai yang hampir sama dengan program .m file dan arus pengukuran hanya memiliki rata-rata persen error 1,48199

% dari program .m file yang dibuktikan pada gambar 7. Karena perbedaannya hanya 1,48199 %, maka selanjutnya analisis faktor daya metode MCO dilakukan hanya untuk hasil data pengukuran.

Analisis Faktor Daya

Seperti yang telah disebutkan, faktor daya Metode *Measured Current Only* (MCO) akan dibandingkan terhadap faktor daya metode daya sesaat dan faktor daya metode *zero-crossing*. Perbandingan ini menggunakan batas toleransi yang telah diberikan pada persamaan (9) yang sesuai dengan standar yang digunakan oleh pabrikan motor induksi tiga fasa. Data yang digunakan untuk analisis adalah data hasil pengukuran, kecuali untuk faktor daya *zero-crossing* yang menggunakan simulasi SIMULINK.

Untuk menganalisis faktor daya metode daya sesaat, digunakan data pada tabel 3 dengan menggunakan persamaan (6) dan (8). Contoh perhitungan faktor daya metode daya sesaat menggunakan torsi beban 4,5 N.m, yaitu:

$$pf_{daya\ sesaat} = P_{in}/|S|_{in} = P_{in}/\sqrt{3}V_{1-LL}|I_1|$$

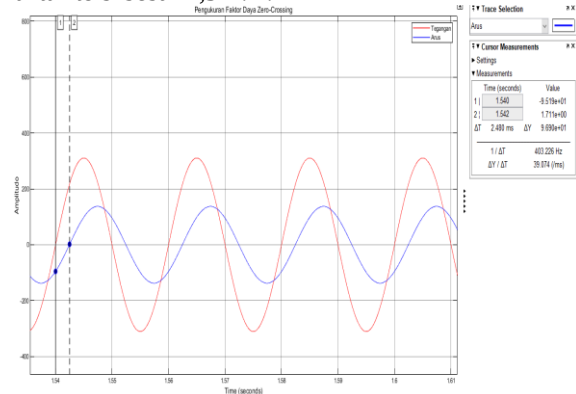
Sehingga:

$$pf_{daya\ sesaat} = 905/(\sqrt{3} \times 380 \times 1,922)$$

$$pf_{daya\ sesaat} = 0,715$$

Perhitungan faktor daya metode daya sesaat ini akan dihitung untuk tiap-tiap bebannya yang hasilnya akan direkap pada tabel 5 untuk semua metode faktor daya.

Untuk faktor daya metode *zero-crossing*, berikut pada gambar 8 diberikan contoh perbandingan gelombang untuk torsi beban 4,5 N.m.



Gambar 8. Gelombang Pengukuran Faktor Daya Zero-Crossing pada $\tau_{load} = 4,5$ N.m

SIMULINK menyediakan pengukuran perbandingan waktu yang ditunjukkan pada tab "*Cursor Measurements*". Pada tab tersebut, perbandingan waktu antara gelombang tegangan terhadap gelombang arus adalah 2,48 ms atau $\Delta t = 2,48$ ms. Selanjutnya, menggunakan rumus (10), didapat faktor daya *zero-crossing* yang memiliki nilai:

$$pf_{zero-crossing} = \cos\left(\frac{2,48 \times 10^{-3}}{1/50} \times 360^\circ\right)$$

$$pf_{zero-crossing} = \cos 44,64^\circ = 0,71154$$

Seperti halnya dengan faktor daya metode daya sesaat, faktor daya metode *zero-crossing* akan dihitung untuk tiap-tiap bebanya dan akan direkap apada tabel 5.

Untuk mencari nilai faktor daya metode MCO memerlukan arus reaktif yang diasumsikan konstan. Untuk mencari nilai arus reaktif ini menggunakan data arus dan faktor daya *rating* yang terdapat pada tabel 1 dengan menggunakan rumus (14). Hasil dari perhitungan arus reaktif tersebut adalah:

$$I_{reaktif} = 2,05 \sin(\cos^{-1}(0,77))$$

$$I_{reaktif} = 1,30799 \text{ A}$$

Setelah didapatkannya nilai arus reaktif, selanjutnya faktor daya Metode MCO akan dihitung. Perhitungan ini menggunakan data arus stator I_1 yang terdapat pada tabel 3 dengan menggunakan rumus (18). Contoh perhitungan faktor daya metode MCO menggunakan torsi beban 4,5 N.m.

$$pf_{MCO} = \sqrt{1 - (1,30799/1,922)^2}$$

$$pf_{MCO} = 0,73282$$

Hasil perhitungan faktor daya metode MCO untuk tiap-tiap beban ditampilkan pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Faktor Daya Motor Induksi Tiga Phasa

τ_{load} (N.m)	Kecepatan (rpm)	Hasil Pengukuran		pf Zero-Crossing
		pf Daya Sesaat	pf MCO	
5,8	1410	0,781	0,81256	0,78043
5,5	1417	0,774	0,79644	0,77051
5	1425	0,742	0,77179	0,74174
4,5	1432	0,715	0,73282	0,71154
4	1442	0,687	0,70294	0,67995
3,6	1446	0,658	0,68628	0,66131
2,9	1457	0,596	0,62095	0,58779
2,4	1464	0,535	0,57204	0,53583
1,85	1470	0,46	0,50878	0,46515
1,47	1475	0,413	0,47459	0,41438

Sebelum menghitung persen error dari faktor daya yang terdapat pada tabel 5, batas toleransi dari persen error harus dihitung terlebih dahulu yang bertujuan untuk mengetahui apakah faktor daya metode MCO layak digunakan sesuai dengan toleransi yang ditetapkan standar IEC. Perhitungan batas toleransi menggunakan data faktor daya yang terdapat pada tabel 1 dan menggunakan rumus (9), yang memiliki nilai:

$$|-1/6(1 - 0,77)| = 0,03833$$

Hasil dari perhitungan diatas sesuai dengan ketentuan toleransi, yaitu nilai absolut tidak boleh kurang dari 0,02 dan tidak boleh lebih dari 0,07. Cara menggunakan toleransi ini adalah menjumlahkannya dengan faktor daya *rating* lalu dicari nilai persen error dari kedua nilai tersebut, sehingga:

$$\% \text{ error} = \frac{|0,77 - (0,77 + 0,03833)|}{0,77} \times 100\%$$

$$\% \text{ error} = 4,97835 \%$$

Hasil persen error diatas merupakan batas maksimum untuk hasil perbandingan faktor daya MCO dengan faktor daya metode lainnya. Selanjutnya, faktor daya Metode MCO dibandingkan dengan faktor daya metode yang lain. Contoh perhitungan persen error faktor daya metode MCO terhadap metode-metode lainnya menggunakan torsi beban 4,5 N.m.

Untuk % error antara faktor daya MCO terhadap faktor daya metode daya sesaat:

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{(0,715 - 0,73282)}{0,715} \right| \times 100\%$$

$$\% \text{ Error} = 2,45289 \%$$

Untuk % error antara faktor daya MCO terhadap faktor daya metode *zero-crossing*:

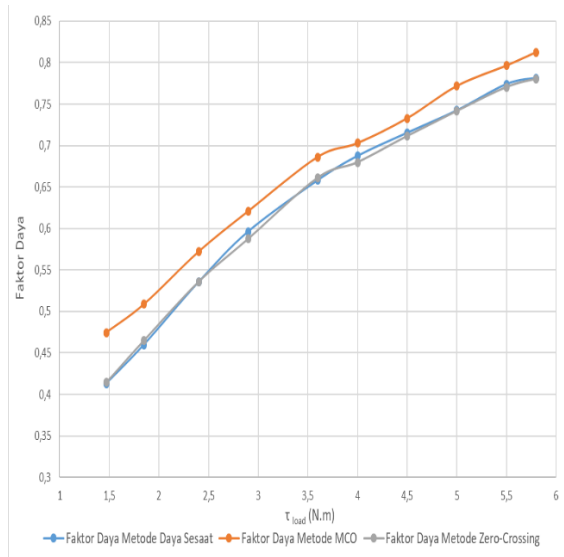
$$\% \text{ Error} = \left| \frac{(0,71154 - 0,73282)}{0,71154} \right| \times 100\%$$

$$\% \text{ Error} = 2,99193 \%$$

Hasil perhitungan persen error untuk tiap-tiap faktor daya dilakukan untuk setiap beban. Hasil dari perhitungan ini dapat dilihat pada tabel 6. Dari tabel 6, dibuatkan grafik perbandingan yang ditunjukkan pada gambar 9.

Tabel 6. Hasil Analisis Perbandingan Faktor Daya Data Pengukuran

τ_{load} (N.m)	Kecepatan (rpm)	Persen Error (%)	
		pf Daya Sesaat dan MCO	pf Zero- Crossing dan MCO
5,8	1410	3,9955	4,11639
5,5	1417	2,89041	3,36551
5	1425	3,97139	4,05158
4,5	1432	2,45289	2,99193
4	1442	2,26333	3,38039
3,6	1446	4,27501	3,77601
2,9	1457	4,11812	5,64164
2,4	1464	6,83214	6,75782
1,85	1470	10,60339	9,37925
1,47	1475	14,89405	14,53064
Rata-Rata (%)		5,62962	5,79912



Gambar 9. Grafik Perbandingan Faktor Daya Data Pengukuran

Telah ditetapkan batas toleransi error faktor daya motor induksi tiga phasa bernilai 4,97835 %. Bila dilihat rata-rata error yang terdapat pada tabel 6, persen error faktor daya MCO telah melewati batas toleransi error. Namun, jika dilihat dari torsi beban 5,8 sampai 3,6 N.m, error faktor daya yang didapat tidak melebihi batas toleransi. Bila dihitung rata-rata error analisis faktor daya metode MCO beban 5,8 sampai 3,6 N.m akan memiliki nilai:

Rata-rata persen error perbandingan faktor daya MCO dengan faktor daya metode daya sesaat:

$$\% \text{ Error} = 3,30809 \%$$

Rata-rata persen error perbandingan faktor daya MCO dengan faktor daya metode zero-crossing:

$$\% \text{ Error} = 3,61364 \%$$

Sehingga penggunaan faktor daya metode MCO dengan beban diatas 3,6 N.m atau diatas 72 % dari beban *rating* (yaitu 5 N.m) dapat dilakukan dengan hasil yang cukup memuaskan, karena jika dibandingkan analisis faktor daya metode MCO dengan metode lainnya, rata-rata error tidak melebihi batas error toleransi.

Sedangkan pada beban 2,9 sampai 1,47 N.m memiliki error yang melebihi batas toleransi. Bila dihitung rata-rata error analisis faktor daya metode MCO dari 2,9 sampai 1,47 N.m:

Rata-rata persen error perbandingan faktor daya MCO dengan faktor daya metode daya sesaat:

$$\% \text{ Error} = 9,11193 \%$$

Rata-rata persen error perbandingan faktor daya MCO dengan faktor daya metode zero-crossing:

$$\% \text{ Error} = 9,07734 \%$$

Sehingga penggunaan faktor daya metode MCO dengan beban dibawah 2,9 N.m atau dibawah 58% dari

beban *rating* tidak dapat dilakukan karena telah melebihi batas toleransi yang telah ditetapkan.

Kenapa pada beban dibawah 2,9 N.m atau dibawah 58 % dari beban *rating*, persen error dari faktor daya metode MCO memiliki nilai yang rendah? Seperti yang telah dijelaskan pada bagian rangkaian ekivalen, pada keadaan tanpa beban, tahanan R_2 memiliki nilai yang sangat besar yang menyebabkan tidak adanya nilai reaktansi ekivalen rotor X_2 sehingga arus input pada keadaan tanpa beban hanya terdiri dari arus magnetisasi. Karena X_2 tidak memiliki nilai, nilai induktansi total motor induksi tiga phasa menjadi berubah. Analisis faktor daya metode MCO bergantung dari induktansi motor yang dianggap konstan, sehingga arus reaktif $I_{reaktif}$ juga bernilai konstan. Karena itu pada keadaan tanpa beban atau menuju keadaan tanpa beban, arus input stator tidak menunjukkan hasil $I_{reaktif}$ yang bagus, sehingga faktor daya MCO memiliki error yang jauh, yang ditunjukkan oleh tabel 6 dan gambar 9.

Ada beberapa alasan yang dinilai dapat mempengaruhi hasil error dan rata-rata error dari analisis faktor daya metode MCO, diantaranya:

- Seperti yang telah dijelaskan, pengukuran faktor daya menggunakan metode MCO menganggap arus reaktif pada motor induksi tiga phasa bernilai konstan. Pada kenyataannya, pada keadaan beban menuju beban nol, arus reaktif akan berubah sehingga akan mempengaruhi analisis faktor daya. Dalam konteks penelitian ini, pada gambar 4.20. terlihat bahwa pada beban dibawah 2,9 N.m faktor daya metode MCO memiliki nilai error yang jauh dibanding faktor daya yang lain.
- Datasheet motor induksi yang diuji menyatakan pada keadaan *rating* yaitu pada torsi beban 5 N.m dan kecepatan rotor 1425 rpm memiliki nilai faktor daya sebesar 0,77. Namun dilihat dari tabel 5, hasil pengujian pada keadaan *rating* didapat faktor daya bernilai 0,742. Hal ini berdampak terhadap perhitungan langsung karena analisis faktor daya metode MCO menggunakan faktor daya dan arus yang didapat pada katalog pada keadaan *rating*.
- Perubahan hasil pengujian *rating* terhadap data spesifikasi yang diberikan bisa saja terjadi karena turunnya performa dari motor induksi tiga phasa tersebut, pengaruh dari akurasi alat ukur yang digunakan, adanya pengaruh dari autotransformator yang digunakan, atau gabungan dari semua alasan yang diberikan diatas.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian, perhitungan, dan analisis yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

- Analisis faktor daya metode MCO menggunakan arus yang terukur. Perbandingan arus hasil pengukuran terhadap hasil program .m file memiliki rata-rata error 1,41899% sedangkan perbandingan arus hasil simulasi terhadap program .m file memiliki rata-rata error 0,42054%.
- Pada data hasil pengukuran, analisis faktor daya metode MCO memiliki rata-rata error diantara 5,62962% - 5,79912 %. Namun, ketika melihat rata-

- rata error analisis faktor daya metode MCO pada pembebanan 3,6 sampai 5,8 N.m (72%-116%) memiliki nilai diantara 3,30809%-3,61364% yang tidak melampaui nilai batas error motor induksi, yaitu 4,97835%. Sedangkan pada pembebanan 1,47 sampai 2,9 N.m (<72%) memiliki rata-rata error diantara 9,11193%-9,07734%. Turunnya akurasi pada pembebanan dibawah 72% dari beban rating dikarenakan metode MCO menganggap arus reaktif bernilai konstan.
3. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi analisis faktor daya metode MCO adalah adanya perbedaan data yang didapat antara katalog motor induksi terhadap pengujian *rating*, turunnya peforma motor, pengaruh dari autotransformator, pengaruh toleransi alat ukur yang digunakan, atau gabungan dari salah satu atau semua alasan yang diberikan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. K. Alexander and M. N. O. Sadiku, *Fundamentals of Electric Circuits*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [2] M. Khodapanah, A. F. Zobaa, and M. Abbod, "Estimating Power Factor of Induction Motors at Any Loading Conditions using Support Vector Regression (SVR)," *Electr. Eng.*, vol. 100, no. 4, pp. 2579–2588, 2018, doi: 10.1007/s00202-018-0723-7.
- [3] C. T. Singh, "Cost Effective Power Factor Measurement Using Microcontroller ATmega8," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 8, no. 7, pp. 384–388, 2019.
- [4] A. Ukil, R. Bloch, and A. Andenna, "Estimation of Induction Motor Operating Power Factor From Measured Current and Manufacturer Data," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 2, pp. 699–706, 2011, doi: 10.1109/TEC.2010.2098408.
- [5] D. V. Richardson, *Rotating Electric Machinery and Transformer Technology*. New Jersey: Prentice Hall, 1977.
- [6] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [7] IEEE, *IEEE Standard 112 Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: IEEE, 2017.
- [8] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., and S. D. Umans, *Electric Machinery*, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [9] T. Wildi, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*, 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [10] M. Nahvi and J. A. Edminister, *Schaum's Outlines of Theory and Problems of Electric Circuit*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [11] IEC, *IEC International Standard 60034-1*
- [12] B. L. Theraja and A. K. Theraja, *A Textbook of Electrical Technology Volume II AC and DC Machines*, Multicolor. New Delhi: S. Chand & Company Ltd., 2007.
- [13] H. A. Radi and J. O. Rasmussen, *Principles of Physics For Scientists and Engineers*. Berlin: Springer, 2013.