SainETIn (Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri), Vol. 9 No. 1, Desember 2024, pp. 11 – 18
ISSN 2548-6888 print, ISSN 2548-9445 online

Studi Estimasi Parameter Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Phasa Di PT.Pindo Deli Perawang

Elvira Zondra[1], Arohhman[2], Hazra Yuvendius[3],
[1,2,3] Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lancang Kuning
Jl. Yos Sudarso km. 8 Rumbai, Pekanbaru, Telp. (0761) 52324
*Corresponding authors e-mail : elviraz@unilak.ac.id

Submited : 09 Agustus 2022 Accepted: 04 Desember 2024

Abstrak

Motor induksi tiga phasa merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan pada dunia industri yang ada di PT.Pindo deli perawang memiliki konstruksi yang sederhana, pengoperasian dan pemeliharaan yang mudah, biaya yang murah, serta ketahanan yang tinggi. Performa motor induksi tersebut adalah arus, efisiensi, faktor daya, torsi, slip dan sebagainya. Untuk mendapatkan rangkaian ekivalen motor induksi dibutuhkan data dari 3 tes motor induksi, yaitu tes tahanan stator, tes rotor tertahan dan tes tanpa beban.. Metode dari M.H. Haque ini memiliki kelebihan yaitu hanya menggunakan data yang terdapat dari katalog atau datasheet yang diberikan oleh pabrik motor, dengan akurasi hasil estimasi peforma motor yang akurat. Dengan metoda M.H.Haque menggunakan Matlab, didapatkan parameter rangkaian ekivalen. Parameter rangkaian ekivalen yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut: R_1 = 0,006 Ohm; X_1 = 0,012Ohm; R_2 = 0,003 Ohm; X_2 = 0,012 Ohm; X_m = 0,750 Ohm dan R_c = 60,317 Ohm. Nilai-nilai tersebut didapat pada iterasi ke-7 coding m.file. Dari nilai diatas, didapatkan rata-rata persen error arus stator memiliki nilai 10,922%, rata-rata persen error faktor daya memiliki nilai 15.053%, dan rata-rata persen error efisiensi memiliki nilai 5,287%. Dari hasil persentase error, estimasi rangkaian ekivalen hanya layak digunakan pada beban 75% sampai 100%.

Kata Kunci: Tahanan Motor Induksi, Reaktansi Motor Induksi, Rangkaian Ekivalen

Abstract

The three-phase induction motor is the most widely used type of motor in e industry. The one at PT. Pindo deli perawang has a simple construction, easy operation and maintenance, low cost, and high durability. The performance of the induction motor is current, efficiency, power factor, torque, slip, etc. To obtain the equivalent circuit of an induction motor, data is needed from 3 induction motor tests, namely a stator resistance test, a resistant rotor test, and a no-load test. The method from M.H. Haque has the advantage that it only uses data from a catalog or datasheet provided by the motor manufacturer, with accurate motor performance estimation results. With the M.H.Haque method of analyzing using Matlab, the parameter of equivalent circuit is obtained. The equivalent circuit obtained from this study is as follows: R1 = 0.006 Ohm; X1 = 0.012Ohm; R2 = 0.003 Ohms; X2 = 0.012 Ohms; Xm = 0.750Ohm and Rc = 60.317 Ohms. These values are obtained in the 7th iteration of coding m.file. From the equivalent circuit above, the average percent error of the stator current has a value of 10.922%, the average percent power factor error has a value of 15.053%, and the average percent error efficiency has a value of 5.287%. From the percentage error results, the equivalent circuit estimation is only feasible to use at 75% to 100% load.

Keywords: *Induction Motor Resistance, Induction Motor Reactance, Equivalent Circuit*

1. PENDAHULUAN

Motor induksi merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan, tidak hanya di industri tetapi juga di pemakaian rumah tangga [1]. Alasan yang membuat motor induksi banyak digunakan adalah konstruksinya yang sederhana dan perawatan yang lebih mudah dari pada jenis motor yang lain. Karena pemakaian yang banyak inilah tentunya performa motor induksi menjadi hal yang menarik untuk diteliti bagi pengguna motor induksi. Performa motor induksi tersebut adalah arus, efisiensi, faktor

daya, torsi, dan slip. Dari nilai-nilai inlah pengguna motor induksi bisa mengetahui biaya pemakaian listrik serta efisiensi relatif dari motor induksi.

Tetapi, untuk mendapatkan nilai-nilai performa motor induksi membutuhkan rangkaian ekivalen motor induksi karena pabrik-pabrik motor biasanya tidak memberikan informasi yang cukup untuk nilai-nilai peforma motor induksi. Untuk mendapatkan rangkaian ekivalen motor induksi dibutuhkan data dari tiga tes motor induksi yaitu tes tahanan stator dengan memberikan tegangan DC antara terminal stator untuk mendapatkan tahanan stator, tes beban nol yaitu pengujian motor tanpa menggunakan beban, tes rotor tertahan yaitu pengujian motor dengan menahan rotor motor induksi.

Hasil pengujian-pengujian diatas dimasukkan kedalam rumus-rumus untuk mendapatkan parameter rangkaian ekivalen motor induksi tiga phasa. Prosedur-prosedur dari tahap pengujian hingga pengolahan rumus dibahas dalam IEEE standard 112 [2] serta dalam buku mesin listrik [3], [4].

Namun, pengujian-pengujian untuk mendapatkan rangkaian ekivalen ini sulit dilakukan karena tentunya pengguna motor induksi harus memiliki peralatan-peralatan laboratorium, membutuhkan personel untuk melakukan pengujian, serta harus memberhentikan pengoperasian motor induksi untuk melakukan pengujian. Hal tersebut tentunya sangat membatasi pengguna motor induksi, khususnya untuk sektor industri karena tidak semua sektor industri memiliki kebebasan untuk melakukan pengujian motor induksi. Oleh sebab itu, mendapatkan parameter rangkaian ekivalen motor induksi yang mudah dan efektif serta memiliki akurasi yang bagus tanpa melakukan serangkaian tes, sangat diminati bagi pengguna motor induksi.

Penelitian ini meneliti cara mendapatkan parameter motor induksi tiga phasa dari data yang terdapat pada *datasheet* dan motor induksi yang dicetus oleh Haque [5]. Haque menjelaskan bahwa metode ini membutuhkan rasio torsi *start* terhadap torsi beban penuh dan efisiensi dan faktor daya pada keadaan setengah beban dan beban penuh. Pada jurnal ini juga dimasukkan nilai arus stator pada keadaan penuh karena pabrik-pabrik motor memberikan informasi tersebut pada *nameplate* dan *datasheet* motor induksi tiga phasa. Setelah didapatkan parameter motor induksi tiga phasa, didapatkanlah karakteristik motor induksi tiga phasa, seperti nilai arus pada beban penuh, torsi beban penuh, dan torsi *start* yang kemudian akan dibandingkan dengan data yang terdapat pada *datasheet* motor induksi tiga phasa.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada motor induksi dengan beban pompa *vacum* yang terpasang di *Tissue Machine* unit 4 PT. Pindo Deli Perawang. Estimasi dari parameter-parameter motor induksi tiga phasa dengan metode M.H Haque menggunakan matlab.

Spesifikasi Motor Induksi Tiga Phasa

Motor induksi tiga phasa yang digunakan memiliki spesifikasi yang didapat dari katalog dan *nameplate*. Data-data tersebut dirangkum pada tabel 1.

Selain dari data katalog motor, tabel 2 memperlihatkan hasil dari *test report* yang dilakukan oleh ABB.

Tabel 1. Spesifikasi Motor berdasarkan Katalog Motor ABB

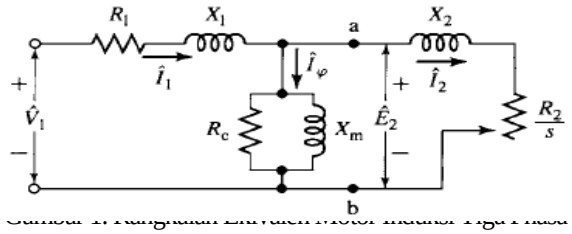
URAIAN	DATA
Merk	ABB
Tegangan (V)	400
Frekuensi (Hz)	50
Input Power (kW)	315
Kecepatan (rpm)	992
Arus Nominal (Amp)	572
Power Factor (Cos φ)	0,83
Rangkaian Hubungan Stator	Delta
Arus Line *Starting* Motor	$7 \times I_{nom}$
Torsi Nominal Motor (N.m)	3032
Torsi Input Motor	$2{,}5 \times T_{nom}$
Torsi *Breakdown* Motor	$2{,}7 \times T_{nom}$
Moment Inersia (GD^2 kgm^2)	13.500

Rangkaian Ekivalen dan Aliran Daya Motor Induksi Tiga Phasa

Rangkaian ekivalen motor induksi tiga phasa yang sering digunakan dan dijelaskan pada buku mesin listrik [3], [4], ditunjukkan pada gambar 1. Persamaan-persamaan yang digunakan pada rangkaian ekivalen motor induksi tiga phasa adalah:

Tabel 2. *Test Report* ABB Motor

Pengujian		Torsi (N.m)	Teg. Line (V)	f (Hz)	I_{In} (Amp)	P_{in} (kW)	P_{out} (kW)	N (rpm)	Cos ϕ	η (%)
Test Tanpa Beban			400 D	50	202,2	3,83		1000	0,03	
Test *Locked-Rotor*			76,6 D	50	575,7	22,19		0	0,29	
Test Beban Penuh		3029	400,2 D	50	571,5	327,6	315	992	0,83	96,2
Test Beban Parsial										
	Beban 75%	2281	400,1 D	50	446,1	244,9	236,3	995	0,79	96,5
	Beban 50%	1509	400,3 D	50	333,6	163,5	157,5	997	0,71	96,4
	Beban 25%	762,2	400,2 D	50	244,4	83,1	78,8	998	0,49	94,7
Overload Torsi		160% dengan waktu 15 detik								



Gambar 1. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Phasa

Impedansi stator:

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

Impedansi rotor yang mengacu kepada stator

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

Impedansi magnetisasi

$$Z_m = R_c \parallel jX_m = \frac{R_c \times jX_m}{R_c + jX_m} \quad (3)$$

Impedansi ekivalen, yaitu impedansi rotor parallel terhadap impedansi magnetisasi

$$Z_{eq} = Z_2 \parallel Z_m = \frac{Z_2 \times Z_m}{Z_2 + Z_m} \quad (4)$$

Impedansi total

$$Z_{tot} = Z_1 + Z_{eq} \quad (5)$$

Persamaan arus, yaitu arus stator I_1, arus rotor yang mengacu pada stator I_2 dan arus magnetisasi I_m untuk setiap nilai slip s memiliki persamaan [3]:

$$I_1 = \frac{V_{ph}}{Z_{tot}} = |I_1| \angle \varphi_1 \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{E}{Z_2} = |I_2| \angle \varphi_2 \quad (7)$$

$$I_m = \frac{E}{Z_m} = |I_m| \angle \varphi_m \quad (8)$$

Aliran daya pada motor induksi tiga phasa pada tiap-tiap tahapan ditunjukkan pada persamaan-persamaan [6]:

Daya input

$$P_{in} = 3V_{ph}|I_1| \cos \varphi_1 \quad (9)$$

Rugi daya stator

$$P_{SCL} = 3|I_1|^2 R_1 \quad (10)$$

Rugi inti

$$P_c = \frac{3E^2}{R_c} \quad (11)$$

Rugi *stray* adalah rugi tambahan dari rugi inti yang disebabkan oleh bertambahnya fluks bocor dari celah udara dengan beban dan dari fluks pada harmonisa yang lebih tinggi. Salah satu cara untuk mendapatkan rugi *stray* adalah dengan mengasumsikan rugi stray dari persentase *rating* daya output motor induksi tiga phasa [2]. Tetapi pada studi ini, rugi *stray* tidak dimasukkan ke dalam penelitian [7].

Rugi tembaga rotor

$$P_{RCL} = 3|I_2|^2 R_2 \quad (12)$$

Daya celah udara:

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_c$$

$$P_{AG} = 3|I_2|^2 \frac{R_2}{s} = \frac{P_{RCL}}{s} \quad (13)$$

Daya yang dibangkitkan

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} = (1-s)P_{AG}$$

$$P_{conv} = 3{I_2}^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (14)$$

Daya output

$$P_{out} = P_{conv} - P_{f\&w} \quad (15)$$

Rugi gesekan dan angin $P_{f\&w}$ merupakan rugi-rugi mekanis karena adanya gesekan pada *bearing* motor. Rugi gesekan dan angin serta rugi inti bisa dianggap konstan.

Efisiensi motor

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (16)$$

Faktor daya

$$pf = \cos\varphi_1 \quad (17)$$

Torsi yang terinduksi

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (18)$$

Torsi output atau torsi beban

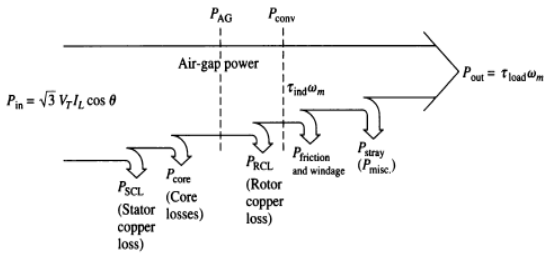
$$\tau_{ind} = \frac{P_{out}}{\omega_m} \quad (19)$$

Pada IEEE Standard 112, dilakukan tes beban nol untuk mendapatkan rugi gesekan dan angin dan rugi inti dengan cara membuatkan grafik tegangan terhadap daya input tes beban nol yang dikurangi rugi tembaga stator pada tiap-tiap tegangan uji [2]. Penjumlahan kedua rugi ini bisa disebut sebagai rugi konstan karena rugi-rugi ini tidak dipengaruhi oleh beban.

$$P_{cons} = P_{f\&w} + P_c \quad (20)$$

Gambar 2 memperlihatkan aliran daya yang digunakan pada motor induksi tiga phasa [4].

Rugi yang dibangkitkan pada saat starting, yaitu τ_{st}, dapat diperoleh dari persamaan (18) dengan cara menggunakan nilai P_{AG} pada s = 1. Perkiraan nilai torsi *starting* bisa juga didapatkan dari rangkaian ekivalen motor induksi tiga phasa, dengan mengabaikan nilai Z_m (karena $Z_m \gg Z_2$pada s = 1) [8]:



Gambar 2. Aliran Daya Motor Induksi

$$\tau_{st} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3{V_{ph}}^2 R_2}{(R_1+R_2)^2+(X_1+X_2)^2} \quad (21)$$

Estimasi Parameter Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Phasa

Estimasi dari parameter-parameter motor induksi tiga phasa yang ditawarkan oleh metode M.H Haque [5] ini memerlukan informasi atau data dari motor, yaitu:

a. Data *nameplate*: daya *rating* dalam satuan hp, tegangan, kecepatan motor pada beban *rating*, desain NEMA serta jenis hubungan (wye atau delta).
b. Rasio torsi *start* terhadap torsi beban *rating*.
c. Efisiensi dan faktor daya (atau arus) pada beban 50% dan 100% dari beban *rating*.

Pada metode ini, hal pertama yang dilakukan adalah menentukan tahanan rotor R_2 pada keluaran beban dan slip (atau kecepatan) *rating*. Tahanan stator R_1 dan rugi-rugi daya konstan P_{cons} (yaitu P_c+P_{rot} yang pada akhirnya akan mendapatkan nilai tahanan rugi inti P_c) didapatkan dari persamaan keseimbangan daya aktif pada keadaan beban *rating* dan setengah beban *rating*. Reaktansi bocor stator dan rotor X_1 dan X_2 didapatkan untuk memenuhi kriteria torsi *start* dan desain NEMA. Terakhir, persamaan keseimbangan daya reaktif pada keadaan beban *rating* digunakan untuk mendapatkan nilai reaktansi magnetisasi X_m. Untuk mendapatkan nilai-nilai yang lebih akurat, dilakukan perhitungan iteratif. Perhitungan iteratif ini menggunakan program.m file MATLAB.

Subskrip F adalah keadaan beban penuh (*rating*). Subskrip H adalah keadaan beban setengah penuh.

Tahanan rotor R_2 didapatkan dari persamaan daya yang terkonversi P_{conv} yang terdapat pada rumus (14) yang mengatakan bahwa P_{conv} adalah daya yang terdisipasi pada tahanan rotor R_2 dan dengan membalikkan rumus (15) yang mengatakan bahwa P_{conv} adalah penjumlahan P_{out} terhadap $P_{F\&W}$ [3]:

$$R_2 = \frac{(P_{out}+P_{rot})S_F}{3{I_{2F}}^2(1-S_F)} \quad (22)$$

I_{2F} dan S_F berturut-turut adalah arus rotor dan *slip* pada keadaan beban penuh.

Dengan membalikkan persamaan (15), daya input terdiri dari penjumlahan daya output, rugi tembaga stator, rugi tembaga rotor, dan rugi daya konstan. Dari persamaan efisiensi pada persamaan (16), didapatkan $P_{in} = P_{out}/\eta$, dengan membalikkan rumus tersebut. Mengaitkan 2 fakta yang telah disebutkan, didapatkan persamaan [3]:

$$\begin{bmatrix} 3{I_{1F}}^2 & 1 \\ 3{I_{1H}}^2 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R_1 \\ P_{cons} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 746\ hp\left(\frac{1}{\eta_F}-1\right) - 3{I_{2F}}^2R_2 \\ 746\frac{hp}{2}\left(\frac{1}{\eta_H}-1\right) - 3{I_{2H}}^2R_2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Dari persamaan (23), didapatkanlah tahanan stator R_1 dan rugi daya konstan P_{cons}, dengan penyelesaiannya bisa menggunakan Metode Cramer atau Eliminasi Gauss-Jordan.

Dari nilai P_{cons} yang didapatkan, nilai rugi inti P_c bisa diasumsikan dengan pendekatan yang mencukupi bahwa [5]:

$$P_c = P_{F\&W} = 0{,}5P_{cons} \quad (24)$$

Sehingga didapatkan tahanan rugi inti R_c:

$$R_c = \frac{3{E_F}^2}{0{,}5P_{cons}} \quad (25)$$

Rumus torsi beban penuh pada persamaan (19) bisa dibuat menjadi:

$$\tau_F = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{746\ hp}{\omega_m}$$

Rumus torsi beban penuh dikaitkan dengan rumus torsi *start* pada persamaan (21) untuk mendapatkan rumus rasio torsi beban penuh terhadap torsi *start* [5]:

$$\frac{\tau_F}{\tau_{st}} = \frac{1}{746\ hp}\frac{\omega_s}{\omega_m}\frac{3V^2R_2}{{R_T}^2+{X_T}^2}$$

Dimana $R_T = R_1 + R_2$ dan $X_T = X_1 + X_2$, sehingga untuk pencarian X_T:

$$X_T = \sqrt{\left(\frac{\tau_F}{\tau_{st}}\frac{3V^2R_2}{746\ hp}(1-S_F)\right) - {R_T}^2} \quad (26)$$

Jika nilai X_T telah didapat dari persamaan (25), nilai X_1 dan X_2 bisa didapat dari tabel reaktansi NEMA yang terdapat pada tabel 3.

Tabel 3. Tabel Reaktansi NEMA

Desain Rotor	X_1	X_2
Rotor Belitan	$0.5X_T$	$0.5X_T$
Kelas A	$0.5X_T$	$0.5X_T$
Kelas B	$0.4X_T$	$0.6X_T$
Kelas C	$0.3X_T$	$0.7X_T$
Kelas D	$0.5X_T$	$0.5X_T$

Daya reaktif masukan pada motor merupakan penjumlahan dari daya reaktif yang diserap oleh X_1, X_2, dan X_m sehingga persamaan keseimbangan daya reaktif pada keadaan beban penuh [4]:

$$3\ V\ I_{1F}\sin\varphi_{1F} = 3{I_{1F}}^2X_1 + 3{I_{2F}}^2X_2 + 3{E_F}^2/X_m$$

Rumus diatas bisa digunakan untuk mencari nilai X_m, sehingga rumus tersebut adalah [4]:

$$X_m = \frac{{E_F}^2}{\left(VI_{1F}\sin\varphi_{1F} - {I_{1F}}^2X_1 - {I_{2F}}^2X_2\right)} \quad (27)$$

Rumus-rumus estimasi diatas dari metode yang ditawarkan Haque memerlukan nilai-nilai dari arus stator dan rotor pada keadaan beban penuh dan setengah beban. Untuk mencari arus-arus ini bisa digunakan rumus [5]:

$$I_{1F} = \frac{746\ hp}{3V\ pf_F\ \eta_F} \quad (28a)$$

$$I_{1H} = \frac{746\ hp/2}{3V\ pf_H\ \eta_H} \quad (28b)$$

Apabila *datasheet* atau *nameplate* motor induksi yang digunakan menyertakan arus pada keadaan beban penuh atau arus *rating*, maka abaikan rumus 27a.

Tegangan yang terinduksi pada rotor E dan arus rotor I_2 memiliki rumus-rumus yang didapat dari persamaan (2.10) dan (2.18) [3]:

$$\boldsymbol{E_F = V - I_{1F}Z_1} \quad (29a)$$

$$\boldsymbol{E_H = V - I_{1H}Z_1} \quad (29b)$$

Dan

$$\boldsymbol{I_{2F} = I_{1F} - E_F/Z_m} \quad (30a)$$

$$\boldsymbol{I_{2H} = I_{1H} - E_H/Z_m} \quad (30b)$$

Persamaan diatas ditebalkan karena menandakan bahwa persamaan ini merupakan persamaan bilangan kompleks.

Karena nilai E, I_2 dan P_{rot} pada awalnya tidak diketahui, metode ini mengestimasi nilai-nilai parameter secara iteratif (dari persamaan

(22) hingga (27)). Pada akhir dari cara iteratif ini nilai-nilai E, I_2 dan P_{rot} diperbarui menggunakan persamaan (29), (30) dan (24). Perkiraan awal untuk nilai E, I_2 dan P_{rot} untuk memulai langkah-langkah penyelesaian iteratif adalah [5]:

$$E_F = E_H = V,\ I_{2F} = I_{1F} pf_{F,}\ I_{2H} = I_{1H} pf_{H,}\ P_{rot} = 0 \quad (31)$$

Langkah-langkah untuk mencari estimasi nilai-nilai parameter motor induksi tiga phasa yang diajukan metode ini adalah sebagai berikut::

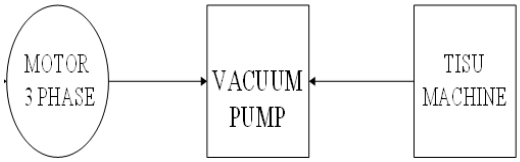
a. Cari nilai arus I_{1F} dan I_{1H} dari persamaan (28). Asumsikan juga nilai-nilai E, I_2 dan P_{rot} sesuai dengan persamaan (31)
b. Carilah tahanan R_2 menggunakan rumus (22). Selesaikan persamaan matriks pada persamaan (23) untuk mendapatkan tahanan R_1 dan P_{cons}. Lalu carilah R_c menggunakan persamaan (24) dan (25). Hitung X_T pada persamaan (26) untuk mendapatkan nilai reaktansi X_1 dan X_2. Dan terakhir cari reaktansi X_m menggunakan persamaan (27).
c. Perbarui nilai E, I_2 dan P_{rot} menggunakan persamaan (29), (30) dan (24).
d. Ulangi langkah 2 dan 3 hingga perhitungan yang dilakukan konvergen dengan toleransi yang dapat diterima.

Asumsi yang dibuat untuk menyelesaikan Metode Haque ini adalah [5]:

a. Rugi *stray* diabaikan
b. Rugi rotasi dianggap konstan
c. Rugi inti dianggap 50% dari rugi daya konstan
d. Reaktansi magnetisasi diabaikan untuk pencarian torsi *start* karena pada slip = 1, Z_m dan Z_2
e. Reaktansi bocor stator dan rotor dibagi menurut tabel NEMA yg diberikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan dengan diagram alir pengoperasian motor dapat dilihat pada gambar 3. Penelitian ini memerlukan data-data yang ada pada katalog motor, yang selanjutnya akan digunakan sebagai input program .m file sesuai dengan rumus-rumus yang terdapat pada metode penelitian.



Gambar 3. Diagram Alir Operasi Motor

Estimasi rangkaian ekivalen metode M.H. Haque yang didapat dari data-data katalog motor selanjutnya akan dibandingkan lagi dengan nilai-nilai nominal yang terdapat pada hasil tes motor dan juga nilai yang terdapat pada katalog motor.

Hasil Estimasi Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Phasa Metode M.H. Haque

Data-data yang terdapat pada tabel 1 dan 2 akan dimasukkan ke dalam program .m file MATLAB versi 2018a. Pada penelitian M.H Haque [5] menyatakan bahwa metode iteratif memiliki kecepatan konvergensi yang bergantung dari *initial guess* pada persamaan (31). M.H. Haque menyatakan bahwa estimasi rangkaian ekivalen ini hanya membutuhkan 3 kali iterasi agar nilai rangkaian ekivalen tersebut akan konvergen. Pada penlitian ini, dibutuhkan 7 kali iterasi agar nilai rangkaian ekivalen konvergen, yang dapat dilihat pada tabel 4.

Apabila "iterasi" pada program .m file diubah menjadi 8, hasilnya akan sama dengan iterasi 7, sehingga dapat disimpulkan bahwa parameter rangkaian ekivalen akan memiliki nilai-nilai yang konvergen pada iterasi ke-7.

Tabel 4. Hasil Estimasi Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Phasa

Iterasi	R1(Ω)	X1(Ω)	R2(Ω)	X2(Ω)	Xm(Ω)	Rc(Ω)
1	0,00670	0,01271	0,003751	0,01271	0,79966	63,68498
2	0,00668	0,01268	0,003734	0,01268	0,75074	59,85523
3	0,00672	0,01271	0,003751	0,01271	0,75083	60,32944
4	0,00672	0,01270	0,003750	0,01270	0,75066	60,31510
5	0,00672	0,01270	0,003750	0,01270	0,75066	60,31731
6	0,00672	0,01270	0,003750	0,01270	0,75066	60,31723
7	0,00672	0,01270	0,003750	0,01270	0,75066	60,31724

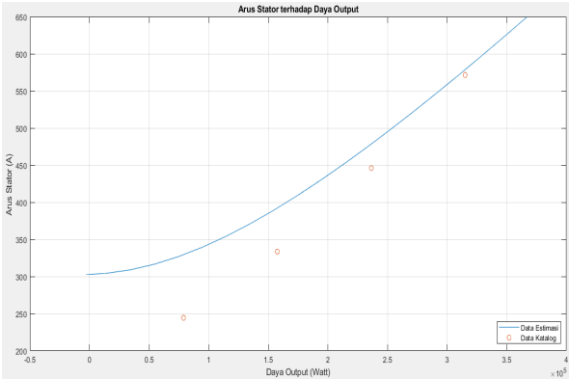
Karena itu juga, maka analisis rangkaian ekivalen menggunakan nilai-nilai yang ada pada iterasi ke-7. Dan efisiensi dan faktor daya (arus stator) pada beban 50% dan 100% dari beban rating. Setelah mendapatkan nilai parameter rangkaian ekivalen, dilakukan perbandingan pada efisiensi, faktor daya dan arus stator pada beban 25% 50% 75% 100% dari beban *rating*. Dilakukan perbandingan dari data hasil pengujian katalog dengan hasil perhitungan dari nilai matlab. Cara yang digunakan untuk melakukan perbandingan nya adalah dengan cara menghitung persen *error*.

Adapun perhitungan persen *error* arus adalah;

$$\%error_{I\ 100\%} = \left|\frac{571{,}5 - 572{,}405}{57}\right| \times 100\%$$
$$\%error_{I\ 100\%} = 0{,}158\%$$
$$\%error_{I\ 75\%} = \left|\frac{446{,}1 - 430{,}255}{446{,}1}\right| \times 100\%$$
$$\%error_{I\ 75\%} = 3{,}551\%$$
$$\%error_{I\ 50\%} = \left|\frac{244{,}4 - 226{,}83}{244{,}4}\right| \times 100\%$$
$$\%error_{I\ 50\%} = 6{,}248\%$$
$$\%error_{I\ 25\%} = \left|\frac{244{,}4 - 226{,}8372}{244{,}4}\right| \times 100\%$$
$$\%error_{I\ 25\%} = 3{,}730\%$$

Rata-rata persen *error*:
$$\%error_{I\ Avg} = 10{,}9222\%$$

Untuk hasil analisis perbandingan arus stator motor induksi tiga phasa ditunjukan pada tabel 5, dengan grafik perbandingan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik arus stator terhadap daya output

Tabel 5. Hasil Analisis Perbandingan arus stator

Beban	Arus stator (I_1)		Persen *error*
	Data dari pengujian	Hasil Perhitungan	
100%	571,5	572,405	0,158%
75%	446,1	430,255	3,551%
50%	333,6	354,444	6,248%
25%	244,4	326,8372	33,730%
Rata-Rata persen *error*			10,922%

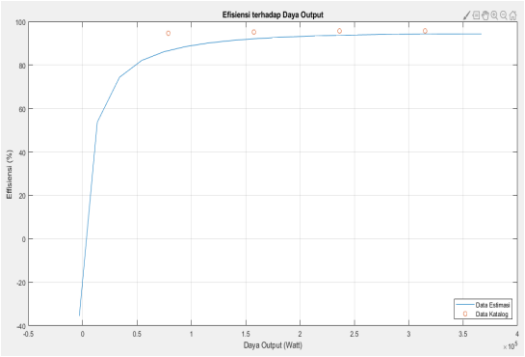
Adapun perhitungan persen *error* efisiensi adalah

$$\%error_{eff\ 100\%} = \left|\frac{96{,}2 - 94{,}2645}{96{,}2}\right| \times 100\%$$
$$\%error_{eff\ 100\%} = 2{,}011\%$$
$$\%error_{eff\ 75\%} = \left|\frac{96{,}5 - 93{,}0748}{96{,}5}\right| \times 100\%$$
$$\%error_{eff\ 75\%} = 3{,}549\%$$
$$\%error_{eff\ 50\%} = \left|\frac{96{,}4 - 90.1097}{96{,}4}\right| \times 100\%$$
$$\%error_{eff\ 50\%} = 6{,}525\%$$
$$\%error_{eff\ 25\%} = \left|\frac{94{,}7 - 86{,}1156}{94{,}7}\right| \times 100\%$$
$$\%error_{eff\ 25\%} = 9{,}064\%$$

Rata-rata persen *error* efisiensi

$$\%error_{eff\ Avg} = 5{,}287\%$$

Berikutnya hasil analisis perbandingan efisiensi dari data pengujian dengan faktor daya hasil perhitungan. dapat dilihat pada Tabel 6. dengan grafik perbandingannya pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik efisiensi terhadap daya output

Tabel 6. Hasil Analisis Perbandingan Efisiensi

Beban	Efisiensi		Persen *error*
	Dari data pengujian	Hasil Perhitungan	
100%	96,2	94,264	2,011%
75%	96,5	93,074	3,549%
50%	96,4	90.109	6,525%
25%	94,7	86,115	9,064%
Rata-Rata Persen *Error*			5,287%

Adapun perhitungan persen *error* faktor daya adalah

$$\%eror_{pf\ 100\%} = \left|\frac{0{,}83 - 0{,}83}{0{,}83}\right| \times 100\% = 0\%$$

$$\%eror_{pf\ 75\%} = \left|\frac{0{,}79 - 0{,}70014}{0{,}79}\right| \times 100\%$$

$$\%eror_{pf\ 100\%} = 11{,}374\%$$

$$\%eror_{pf\ 50\%} = \left|\frac{0{,}71 - 083{,}988}{0{,}71}\right| \times 100\%$$

$$\%eror_{pf\ 50\%} = 26{,}889\%$$

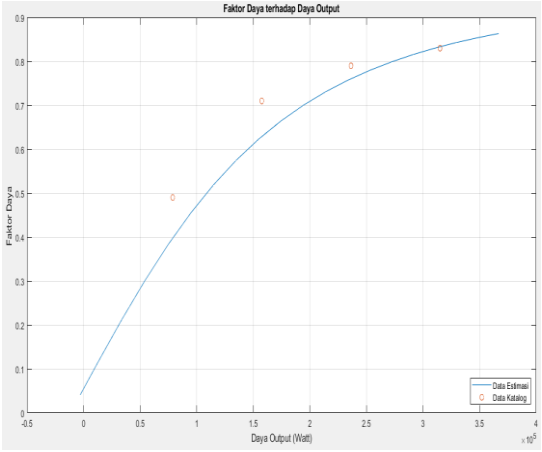
$$\%eror_{pf\ 25\%} = \left|\frac{0{,}49 - 0{,}3824}{0{,}49}\right| \times 100\%$$

$$\%eror_{pf\ 25\%} = 21{,}949\%$$

Rata-rata persen *error* faktor daya

$$\%error_{pf\ Avg} = 15{,}053\%$$

Berikutnya hasil analisis perbandingan faktor daya dari data pengujian dengan faktor daya hasil perhitungan. dapat dilihat pada Tabel 7. dengan grafik perbandingannya pada Gambar 6.



Gambar 5. Grafik Faktor Daya terhadap daya output

Tabel 7. Hasil Analisis Perbandingan Faktor Daya

Berbeban	Faktor daya (pf)		Persen *error*
	Data dari pengujian	Hasil Perhitungan	
100%	0,83	0,83	0%
75%	0,79	0,700	11.374%
50%	0,71	0.510	26,889%
25%	0,49	0,382	21,949%
Rata-Rata Persen *Error*			15,053%

4. KESIMPULAN

Berdasarakan hasil estimasi parameter rangkaian ekivalen di dapatkanlah kesimpulan:

1. Rangkaian ekivalen yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:R_1=0,006 Ohm; X_1=0,012Ohm; R_2 =0,003 Ohm; X_2 = 0,012 Ohm; X_m=0,750 Ohm dan R_c= 60,317Ohm. Nilai-nilai tersebut didapat pada iterasi ke-7.
2. Dari rangkaian ekivalen diatas, didapat rata-rata persen error arus stator memiliki nilai 10,922%, rata-rata persen error faktor daya memiliki nilai 15.053%, dan rata-rata persen error efisiensi memiliki nilai 5,287%. Dari hasil ketiga persen error, estimasi rangkaian ekivalen hanya layak digunakan pada beban 100-75%.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Saya ucapkan terima kasih kepada tim editor dan staff dari Jurnal SaineTIn, serta rekan-rekan dari Teknik Elektro Universitas Lancang Kuning

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] D. V. Richardson, *Rotating Electric Machinery and Transformer Technology*. New Jersey: Prentice Hall, 1977.

[2] IEEE, *IEEE Standard 112 Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. New York: IEEE, 2017.

[3] S. J. Chapman, *Electric Machine Fundamentals, Fifth Edition*, 5th Editio. New York: McGraw-Hill, 2012. doi: 10.1142/9789813270282_0001.

[4] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., and S. D. Umans, *Electric Machinery*, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

[5] M. H. Haque, "Estimation of three-phase induction motor parameters," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 187–193, 1993, doi: 10.1016/0378-7796(93)90012-4.

[6] D. k. . Sudibyo, "Analisis Efisiensi Motor Induksi Pada Kondisi Tegangan Non Rating Dengan Metode Segregated Loss," *Teknosia*, vol. II, pp. 32–40, 2016.

[7] 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.

[8] T. Wildi, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*, 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.