

Pengujian Motor Induksi Menggunakan Diagram Lingkaran

Testing of Induction Motor Induction Using Circle Diagram

Galih Permana Qisty¹, Slamet Hani², Wiwik Handajadi³

¹Penulis, Mahasiswa Alih Jalur S-1 Jurusan Teknik Elektro, IST Akprind Yogyakarta

²Pembimbing I, Dosen Jurusan Teknik Elektro, IST Akprind Yogyakarta

³Pembimbing II, Dosen Jurusan Teknik Elektro, IST Akprind Yogyakarta

S1 Teknik Elektro IST Akprind Yogyakarta

Jl. Kalisahak 28 Yogyakarta

Intisari

Selain dengan menganalisis nameplate pada motor induksi untuk mengetahui performa dari suatu motor induksi ada satu cara mudah untuk menganalisis performa dari suatu motor adalah dengan menggunakan diagram lingkaran yang diperoleh dengan melakukan suatu uji sederhana. Karakteristik motor dapat diketahui dari hasil perhitungan dan penggambaran diagram lingkaran. Yang mana penggunaan diagram tersebut dapat dibaca sifat-sifat penting motor induksi (GGL, arus, daya input/output, torsi, $\cos \phi$, dan efisiensi).

Sebelum menggambarkan diagram lingkaran, membutuhkan terlebih dahulu data hasil pengukuran pada motor tiga phasenya. Data yang dibutuhkan antara lain nilai tegangan tanpa beban, nilai tegangan hubung singkat, nilai arus tanpa beban dan nilai arus hubung singkat. Hasil pengukuran pada motor induksinya sebagai berikut ; nilai tegangan tanpa beban sebesar 340 Volt, nilai tegangan hubung singkat sebesar 100 Volt, nilai arus tanpa beban sebesar 2 Ampere, dan nilai arus hubung singkat sebesar 14 Ampere.

Data pengukuran tersebut dapat diimplementasikan menjadi diagram lingkaran, hasil penggambaran diagram lingkaran didapatkan nilai rugi-rugi daya yang ada di motor tersebut. Berikut nilai rugi-rugi daya yang didapatkan ; nilai rugi-rugi besi, gesek, dan rugi-rugi angin sebesar 58.9 Watt, nilai rugi-rugi tembaga rotor sebesar 176.7 Watt, nilai rugi-rugi tembaga stator sebesar 117.8 Watt, dan nilai daya output mekanik (P_{mk}) sebesar 2237.8 Watt.

Kata kunci : Motor induksi, diagram lingkaran, karakteristik motor

ABSTRACT

In addition to analyzing the induction motor nameplate to determine the performance of an induction motor there is an easy way to analyze the performance of a motorcycle is to use pie charts obtained by performing a simple test. Characteristics of the motor can be seen from the calculation and depiction of circle chart. Which use the diagram readable important properties induction motor (GGL, current, power input/output, torque, $\cos \phi$, and efficiency). Prior to illustrate a pie requires prior measurement data on the motor three phase, the data needed included the value of the no-load and short-circuit current value. The result of measurement on induction motors as follows; the value of no-load voltage of 340 Volts, short circuit voltage value of 100 Volts, the value of no-load current of 2 Ampere and the value of short circuit current of 14 Ampere. The measurement data can be implemented into pie chart, pie chart depiction of the result obtained value of power loss in the motor. The following power loss value is obtained; the value of iron loss, friction, and wind losses amounted to 58.9 Watt, the value of the copper rotor losses amounted to 176.7 Watt, the value of stator copper losses amounted to 117.8 watt, and the value of the mechanical output power (P_{mk}) amounted to 2237.8 watt.

Keyword : Induction motor, pie chart, the characteristics of the motor

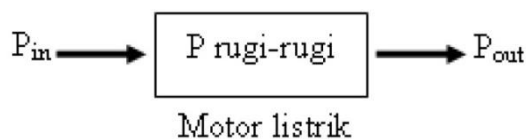
PENDAHULUAN

Motor induksi dewasa ini tak hanya digunakan dalam dunia industri, kenyataannya motor induksi juga banyak digunakan di peralatan rumah tangga, perkantoran, pabrik, bengkel, dan lain-lain. Karena beberapa keuntungan yang dimilikinya, maka performa dari suatu motor induksi merupakan hal penting yang harus diperhatikan dalam pengoperasiannya.

Selain dengan menganalisis *nameplate* motor induksi untuk mengetahui performa dari suatu motor induksi ada satu cara mudah untuk menganalisis performa suatu motor adalah dengan menggunakan diagram lingkaran yang diperoleh dengan melakukan suatu uji sederhana. Karakteristik motor dapat diketahui dengan hasil dari uji perhitungan dan penggambaran diagram lingkaran tersebut yang berguna untuk mengetahui performa motor itu sendiri. Yang mana penggunaan diagram tersebut dapat dibaca sifat-sifat penting motor induksi (GGL, arus, daya *input/output*, torsi, kecepatan, $\cos \phi$, dan efisiensi).

DASAR TEORI

Motor induksi sebagai penggerak mula (*primeover*) mempunyai banyak kelebihan dibandingkan dengan motor jenis lain khususnya bila dibandingkan dengan motor DC. Sehingga dalam sistem pergerakan beban dengan mesin-mesin listrik yang berdaya besar banyak digunakan motor listrik jenis motor induksi sangkar tupai sebagai penggerak utama. Ditinjau dari rotornya motor induksi dibagi 2 yaitu motor induksi sangkar tupai (*squirrel cage induction motor*) dan motor induksi rotor lilit (*wound rotor induction motor*). Motor induksi sangkar tupai mempunyai kecepatan putar dan torsi yang hampir konstan atau sulit diatur, sedangkan motor induksi rotor lilit mempunyai kecepatan putar dan torsi yang dapat diatur (*adjustable*). Sebetulnya dengan motor induksi rotor lilit, kelemahan motor induksi sangkar tupai dapat diperbaiki, tetapi karena konstruksi motor induksi rotor lilit tidak sederhana maka pengoperasiannya cukup sulit, perlu peralatan tambahan dan harganya lebih mahal bila dibandingkan dengan motor induksi sangkar tupai. Karena daya masuk ke motor bersifat elektrik maka setelah dikurangi dengan seluruh rugi daya yang ada di dalam motor, keluarannya juga akan bersifat elektrik, lihat gambar 2.12

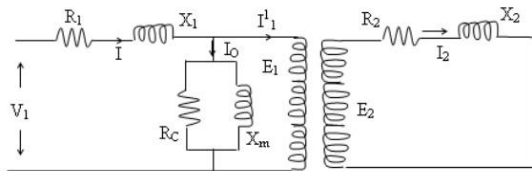


Gambar 1. Tiga macam daya pada motor listrik

Dari gambar 1 terlihat bahwa untuk menghitung besarnya daya keluar motor perlu diketahui terlebih dulu besarnya seluruh rugi daya yang ada di dalam motor. Terdapat banyak rugi-rugi daya yang ada pada motor induksi yaitu meliputi rugi inti stator, rugi lilitan stator, rugi inti rotor, rugi lilitan rotor, rugi fluks bocor, rugi gesek dan rugi angin. Jadi untuk menghitung daya keluaran motor harus diketahui seluruh rugi daya yang ada. Daya masuk ke motor bersifat elektrik dapat diketahui secara mudah dengan melakukan pengukuran secara langsung. Namun rugi-rugi daya misalnya rugi daya lilitan baik stator maupun rotor sulit untuk diketahui melalui pengukuran. Demikian juga dengan rugi daya yang bersifat mekanik seperti rugi gesek dan angin serta daya keluaran yang bersifat mekanik pada poros motor sulit untuk diketahui melalui pengukuran. Untuk itu perlu dicari cara lain untuk menghitung besarnya daya-daya tersebut khususnya bila ingin diketahui besarnya daya mekanik keluar dari motor yang terdapat pada poros motor. Salah satu cara yang banyak digunakan adalah dengan menggunakan teori diagram lingkaran motor induksi.

Dari teori tersebut dapat diketahui besarnya seluruh daya yang bekerja pada motor induksi, baik secara langsung dengan perhitungan maupun secara tidak langsung dengan menggunakan diagram lingkaran yang telah dibuat. Disamping itu untuk mengetahui rumusan seluruh daya yang bekerja di dalam motor induksi juga dapat dilihat dari rangkaian ekivalennya dimana rangkaian ekuivalen motor induksi mirip dengan rangkaian ekuivalen dari transformator. Perbedaannya adalah terletak pada sisi sekunder pada trafo dan sisi rotor pada motor. Pada transformator, keluarannya berupa besaran listrik dan tidak ada gerakan sehingga rangkaian ekuivalen trafo pada sisi sekundernya terhubung buka. Sedangkan pada motor listrik keluarannya berupa gerakan yang timbul sebagai akibat

adanya interaksi antara rapat fluks magnet (B) dan arus yang mengalir pada rotor (I_r) sehingga rangkaian sisi rotornya harus dalam keadaan tertutup, lihat gambar 2



Gambar 2. Rangkaian ekivalen motor induksi dalam keadaan diam

Keterangan :

- V_1 : Tegangan sumber ke stator
- E_1 : GGL pada stator
- I_1 : Arus masuk ke stator
- I_1' : Ekuivalen arus rotor pada stator
- R_1 : Tahanan stator
- E_2 : GGL rotor
- X_1 : Reaktansi stator
- R_2 : Tahanan lilitan rotor
- R_c : Tahanan ekivalen inti besi
- X_2 : Reaktansi lilitan rotor
- X_m : Reaktansi ekivalen inti besi
- I_2 : Arus pada lilitan rotor
- I_o : Arus tanpa beban

Terlihat pada gambar 2 bahwa bila motor berputar dengan beban sehingga mengakibatkan terjadinya slip sebesar "s", belum dapat diekspresikan pada rangkaian ekivalen tersebut. Untuk menyatakan keadaan tersebut dilakukan perubahan terhadap rangkaian ekivalen rotor seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.a dan 3.b. Pada saat motor dibebani putarannya akan berubah sehingga slipnya juga berubah dan menurut persamaan 2.29 besarnya slip tersebut adalah

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \dots\dots\dots \text{Persamaan (1)}$$

dengan :

- n_m = Kecepatan putar motor (rpm)
- $n_s = \frac{(120 \times f_1)}{p}$ = Kecepatan putar medan sinkron (rpm)
- s = Slip
- f_1 = Frekuensi sumber (Hz)
- p = Jumlah pasang kutub

Dalam keadaan tersebut frekuensi arus rotor $f_2 = sf_1$ sehingga besar ggl rotor dan reaktansi rotor sebagai fungsi frekuensi masing-masing berubah menjadi sE_2 dan sX_2 . Dengan demikian maka rangkaian rotor pada saat motor berputar dan dibebani dengan slip "s" adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.a, dan untuk mengekspresikan besarnya beban dilakukan penjabaran sebagai berikut :

$$sE_2 = I_2(R_2 + jsX_2)$$

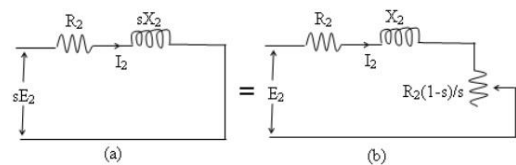
$$E_2 = I_2(R_2/s + jX_2)$$

$$= I_2(R_2/s - R_2 + R_2 + jX_2)$$

$$= I_2\{(R_2/s - R_2) + (R_2 + jX_2)\} \dots\dots\dots \text{persamaan (2)}$$

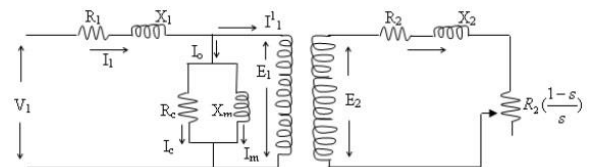
$$= I_2\left[R_2 + jX_2 + R_2\left(\frac{1-s}{s}\right)\right]$$

Dimana besaran $R_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$ merupakan ekspresi beban mekanik pada rotor, lihat gambar 3.b



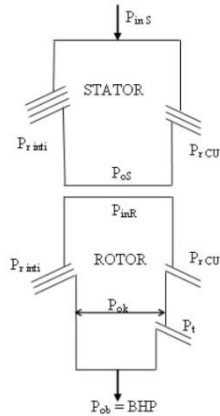
Gambar 3 Rangkaian ekivalen rotor

Sehingga rangkaian ekivalen motor listrik saat berputar dengan slip s adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian ekivalen motor saat berbeban dengan slip "s"

Dengan memperhatikan gambar 4 dapat dibuat blok diagram seluruh daya nyata (watt) yang bekerja pada motor beserta persamaannya sebagai berikut, lihat gambar 5.



Gambar 5. Blok diagram daya-daya yang bekerja pada motor

Untuk sisi stator :

- $P_{in\ s}$ = $V_1 I_1 \cos \phi_1$: Daya masuk ke motor melalui stator
- $P_{r\ inti}$ = $V_1 I_0 \cos \phi_0$: Rugi daya inti stator
- $P_{r\ CU}$ = $I_1^2 R_1$: Rugi daya lilitan stator
- $P_{o\ s}$ = $P_{in\ s} - P_{r\ inti} - P_{r\ CU} = V_1 I_1 \cos \phi_1 - V_1 I_0 \cos \phi_0 - I_1^2 R_1$ (daya keluar stator)

Untuk sisi rotor :

- $P_{in\ R}$ = $P_{o\ s}$ (dengan asumsi rugi bocor fluks magnet dari stator ke rotor diabaikan)
- $P_{o\ inti}$ = Rotor kecil dan diabaikan
- $P_{r\ CU}$ = $I_2^2 R_2$: Rugi daya lilitan rotor
- P_{ok} = Daya keluar motor (Rugi daya tambahan disebabkan oleh angin)
- P_t = gesek dan fluks bocor

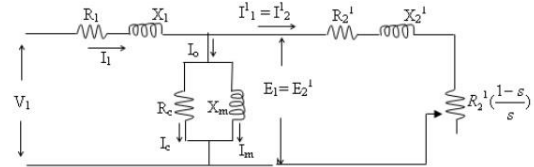
Dari persamaan 3, daya keluar motor dapat dihitung secara cepat bila diketahui daya keluar dari stator atau daya masuk ke rotor dengan rumus sebagai berikut, lihat rangkaian rotor pada gambar 5.

$$P_{in\ R} : P_{r\ CU} : P_{ok} = I_2^2 R_2 / s : I_2^2 R_2 : I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) = 1/s : 1 : \left(\frac{1-s}{s}\right) = 1 : s : (1-s) \quad \text{persamaan (3)}$$

Jadi bila s dan salah satu dari ketiga daya tersebut diketahui maka daya yang lain dapat dihitung dengan cepat.

Perhitungan yang dilakukan dengan cara di atas belum dapat dipakai untuk menghitung daya-daya mekanis secara langsung sehingga seri dipakai metode diagram lingkaran motor induksi. Untuk

keperluan tersebut, rangkaian ekivalen motor pada gambar 4 kemudian diubah dengan memindahkan rangkaian rotor ke sisi stator seperti yang ditunjukkan pada gambar 5



Gambar 5 Rangkaian ekivalen motor saat berbeban dengan slip "s" rotor dipindah ke stator

Arus tanpa beban (I_0) pada umumnya kecil dibandingkan dengan arus beban penuh dari motor terutama untuk yang berdaya besar maka diabaikan terhadap arus masuk I_1 . Dengan demikian dari gambar 4, $I_1' = I_1 = I_2'$ dan

$$Z_t = (R_1 + R_2' + R_2'(1-s)/s) + j(X_1 + X_2')$$

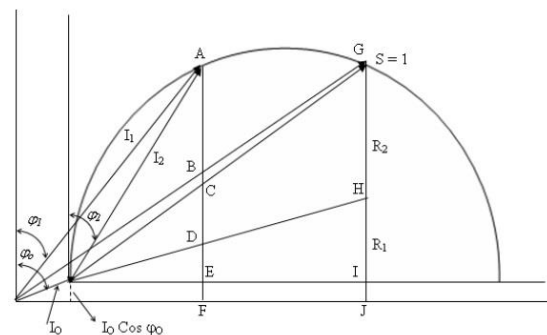
$$r = (R_1 + R_2'/s) + j(X_1 + X_2')$$

$$\text{Karena } \sin \phi = \frac{\text{reak tan si}}{\text{impedansi}} = \frac{X}{Z}$$

$$I_1 = \frac{V_1}{|Z_t|} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}}$$

$$P = \frac{V_1}{X_1 + X_2'} \sin \phi$$

Persamaan 4 di atas merupakan persamaan polar I_1 dengan garis tengah $V_1/(X_1+X_2)$ dan sudut ϕ , Jadi dalam diagram lingkaran tersebut merupakan tempat kedudukan dari I_1 , lihat gambar 6



Gambar 6. Diagram lingkaran sebagai tempat kedudukan arus I_1 dan I_2

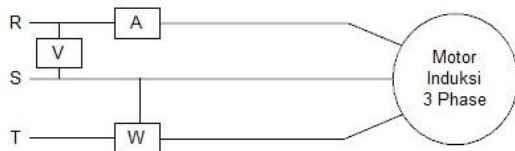
Dengan menggunakan diagram lingkaran motor pada gambar 6, dapat diketahui besarnya seluruh daya nyata yang

bekerja pada motor listrik, termasuk daya mekanik keluar kotor dari motor (P_{ok}), rugi daya tambahan (P_t) dan daya keluar motor bersih (P_{ob}) dengan cara mengukur panjang proyeksi arus dikalikan dengan besarnya tegangan sumber.

PEMBAHASAN

Penujian Tanpa Beban (No-Load Test)

Pengujian tanpa beban ini dilakukan dengan cara motor induksi tiga phase beroperasi sesuai dengan *rating* tegangannya. Blok *line* diagram pengujian tanpa beban ditunjukkan pada gambar 7 berikut ini :



Gambar 7. Line diagram pengujian tanpa beban (*No-Load Test*)

Pada gambar 7 terdapat simbol A menunjukkan penggunaan Amperemeter untuk mendapatkan nilai arus tanpa bebannya, simbol V menunjukkan penggunaan Voltmeter untuk mendapatkan nilai tegangan tanpa beban, dan simbol W menunjukkan penggunaan Wattmeter untuk mendapatkan nilai daya yang terjadi saat pengujian motor induksi tanpa beban. Sehingga, didapatkan nilai pengujian tanpa beban sebagai berikut :

Tabel 1 Hasil pengujian pengukuran tanpa beban

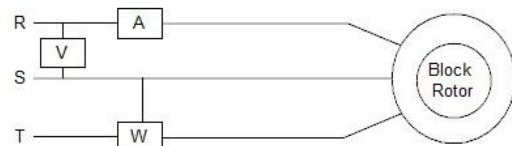
Percobaan Ke-	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
1	340	2	32
2	340	1.8	32
3	335	1.5	31.8
4	338	1.7	30
5	338	1.7	31.5

Tabel 2 Persentase kesalahan pada pengukuran tegangan, arus, dan daya

Percobaan Ke-	Persentasi Kesalahan		
	Tegangan	Arus	Daya
Ke-1 terhadap ke-2	0	10	0
Ke-1 terhadap ke-3	1.47	25	0.62
Ke-1 terhadap ke-4	0.58	15	6.25
Ke-1 terhadap ke-5	0.58	15	1.56
Rata-rata kesalahan	0.6575	16.25	2.1075

Pengujian Hubung Singkat (Short Circuit Test)

Pengujian hubung singkat ini dilakukan dengan cara menahan atau memblokir rotor motor induksinya selama beberapa detik saja, agar tidak terjadi kerusakan pada motor induksinya berupa isolator yang terbakar. Blok *line* diagram pengujian hubung singkatnya ditunjukkan pada gambar 4.4 berikut ini :



Gambar 8. Line diagram pengujian tanpa beban (*No-Load Test*)

Pada gambar 8 menunjukkan bahwa pada pengujian singkat ini data-data yang ingin didapatkan berupa nilai tegangan, arus serta dayanya. Sehingga dipasanglah alat

ukur, untuk simbol A merupakan Amperemeter dipasang secara seri yang mana nilai arus akan didapatkan, simbol V merupakan Voltmeter dipasang secara parallel yang mana nilai tegangan yang akan didapatkan, dan simbol W merupakan Wattmeter untuk mendapatkan nilai daya. Berikut hasil pengukuran nilai tegangan, arus, dan daya yang ditunjukkan pada tabel 3 :

Tabel 3 Hasil pengukuran pada pengujian hubung singkat

Percobaan Ke-	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
1	100	14	550
2	90	13.8	545
3	90	13.5	547
4	95	13.5	545
5	95	14	550

Tabel 4. Persentase kesalahan pada pengukuran tegangan, arus, dan daya

Percobaan Ke-	Persentasi Kesalahan		
	Tegangan	Arus	Daya
Ke-1 terhadap ke-2	10	1.43	0.9
Ke-1 terhadap ke-3	10	3.57	0.54
Ke-1 terhadap ke-4	5	3.57	0.9
Ke-1 terhadap ke-5	5	0	0
Rata-rata kesalahan	7.5	2.14	0.585

Perhitungan dan Menggambar Diagram Lingkaran

Setelah didapatkan data-data dari hasil kedua pengujian, selanjutnya diolah menggunakan beberapa formula agar didapatkan gambar diagram lingkarannya. Berikut perhitungan dari tabel 4.1 dan tabel 4.2 menggunakan percobaan ke-1:

$$\text{Test tanpa beban} : \cos \phi_0 = \frac{32}{\sqrt{3} \times 240 \times 2} = 0.027 \text{ maka, } \phi_0 = 88^\circ$$

$$\text{Test hubung singkat} : \cos \phi_{sc} = \frac{550}{\sqrt{3} \times 100 \times 14} = 0.377 \text{ maka, } \phi_{sc} = 67^\circ$$

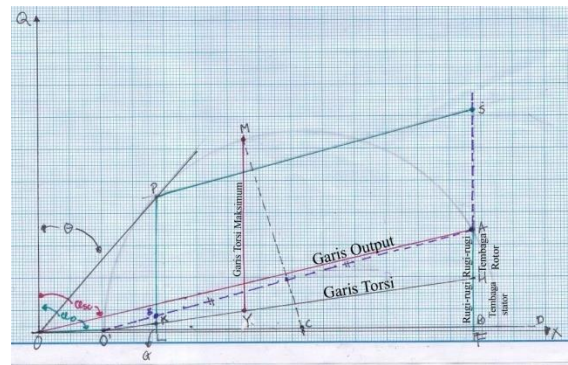
Nilai arus hubung singkat pada tegangan normal :

$$(I_{sc})_n = I_{sc} \times \frac{V_1}{V_{sc}} = 14 \times \frac{340}{100} = 47.6 \text{ Ampere}$$

Nilai daya input rotor hubung singkat pada tegangan normal :

$$P_{sc} = 550 \times \left(\frac{(I_{sc})_n}{I_{sc}}\right)^2 = 550 \times \left(\frac{47.6}{14}\right)^2 = 6358 \text{ Watt}$$

Dari hasil perhitungan di atas maka dapat digambarkan diagram lingkarannya yang ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Diagram lingkaran manual

Asumsikan skala arus 1 cm = 1 Ampere. Prosedur pembuatan diagram lingkaran dilakukan sebagai berikut:

- Garis OO' (I_0) = $\frac{2 \text{ Ampere}}{1} = 2 \text{ cm}$ dan ditarik dengan sudut $\phi_0 = 88.8^\circ$.
- Garis OA mewakili I_{sc} yaitu 14 A dan diukur = $\frac{14 \text{ Ampere}}{1} = 14 \text{ cm}$.
- $O'A$ mewakili garis *output*.

- d. Untuk menetapkan letak titik pusat lingkaran C, maka suatu garis tegak lurus pada pertengahan garis O'A ditarik.
- e. Dengan C sebagai pusat lingkaran dan radius CO', suatu lingkaran dapat dibuat yang akan melalui titik-titik O' dan C. Dari titik A, suatu garis tegak lurus dengan sumbu X ditarik.
- f. AF mewakili daya *input* dalam keadaan rotor ditahan dengan tegangan normal. Disini terukur 2.1 cm dan ini bernilai 6538 Watt. Sehingga skala daya 1 cm = $\frac{6538 \text{ watt}}{2.1 \text{ cm}} = 3113.3 \text{ Watt}$. *Output* motor beban penuh = 2 HP x 746 Watt = 1492 Watt, dan garis PE adalah menunjukkan *output* motor beban penuh. Titik P adalah titik *operating point* beban penuh. Untuk mendapatkan titik P ini dengan memperpanjang garis FA dan membuat garis SP // O'A.
- g. Arus *line* ditunjukkan oleh garis OP bila diukur = 5.6 cm ini berarti arus *line* beban penuh = 5.5 cm x 1 Ampere = 5.5 Ampere. Untuk nilai ϕ , ditunjukkan oleh besar sudut garis OP terhadap OQ sehingga dengan pengukuran didapatkan nilai $\phi = 40^\circ$. Maka $\text{Cos } 40^\circ = 0.76$ atau dengan cara seperti berikut:

$$\text{Cos } \phi = \frac{\text{Garis PL}}{\text{Garis OP}} = \frac{4.2 \text{ cm}}{5.5 \text{ cm}} = 0.76$$
- h. Untuk mencari slip pada diagram lingkaran dengan cara sebagai berikut :

$$\text{Slip} = \frac{\text{Garis EK}}{\text{Garis PK}} = \frac{0.2 \text{ cm}}{4 \text{ cm}} = 0.05 \text{ atau } 5\%$$
- i. Untuk mencari efisiensi pada diagram lingkaran dengan cara sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Garis PE}}{\text{Garis PL}} = \frac{3.7 \text{ cm}}{4.2 \text{ cm}} = 0.88 \text{ atau } 88\%$$
- j. AB yang mewakili rugi-rugi tembaga total pada rotor dan stator, dibagi dua yang sama panjang pada titik H untuk memisahkan kedua rugi-rugi. Garis O'H mewakili garis torsi. Dari gambar 4.1 dapat dihitung nilai rugi-rugi dayanya antara lain sebagai berikut :

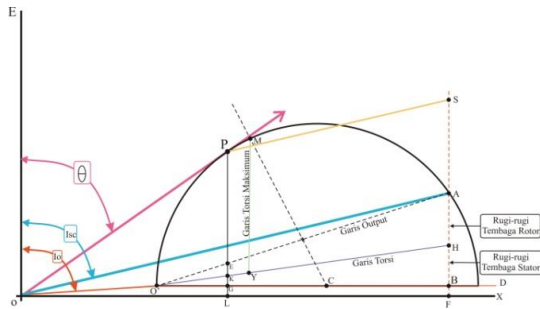
Tabel 5. Nilai rugi-rugi daya yang terjadi pada motor induksi

No	Rugi-rugi yang Terjadi	Persamaan dan Hasil Perhitungan
1.	Rugi-rugi besi, gesek dan angin	$= \sqrt{3} \times V_1 \times GL$ (Fixed Losses)

		$= \sqrt{3} \times 340 \text{ Volt} \times 0.1 \text{ cm}$ = 58.9 Watt
2.	Rugi-rugi tembaga rotor	$= \sqrt{3} \times V_1 \times EK$ = $\sqrt{3} \times 340 \text{ Volt} \times 0.3 \text{ cm}$ = 176.7 Watt
3.	Rugi-rugi tembaga stator	$= \sqrt{3} \times V_1 \times KG$ = $\sqrt{3} \times 340 \text{ Volt} \times 0.2 \text{ cm}$ = 117.8 Watt
4.	Daya output mekanik (P_{mk})	$= \sqrt{3} \times V_1 \times PE$ = $\sqrt{3} \times 340 \text{ Volt} \times 3.8 \text{ cm}$ = 2237.8 Watt
5	Torsi maksimum (T_{max})	= 5.3 cm x 3113.3 watt = 16500,5 <i>synchronous watts</i> .

- k. Titik M yang bersesuaian torsi maksimum diperoleh sebagai berikut:
- Dari pusat lingkaran C, suatu garis CM ditarik sedemikian rupa sehingga tegak lurus pada garis torsi O'H.
 - Garis ini memotong lingkaran di titik C yang merupakan titik yang dikehendaki.
 - MY ditarik secara tegak lurus dan ini mewakili torsi maksimum.
- l. Dari diagram lingkaran (kondisi beban penuh) diperoleh:
- Torsi maksimum yang ditunjukkan oleh garis MY. Garis MY menunjukkan torsi maksimum *in synchronous watts*. Garis MY bila diukur = 5.3 cm perhitungannya dapat dilihat pada tabel 5.

Adapun hasil gambar diagram lingkaran menggunakan *software* ditunjukkan oleh gambar 4.2 berikut



Gambar 10. Diagram lingkaran menggunakan software

Berdasarkan dari hasil pengukuran dan perhitungan diagram yang ada pada tabel 5 maka dapat dibandingkan dengan hasil perhitungan nilai rugi-rugi dayanya berdasarkan rangkaian ekivalen (gambar 4).

Dengan menggunakan data-data pengukuran yang ada, maka dapat perhitungan sebagai berikut :

Tabel 6. Perhitungan menggunakan persamaan rangkaian ekivalen

No	Daya dan Rugi-rugi Daya	Persamaan dan Hasil Perhitungan
1.	Daya masuk pada motor	$= \sqrt{3} \times V_1 \times I_1 \times \cos \phi_1$ $= \sqrt{3} \times 100 \text{ Volt} \times 14 \times 0.39$ $= 945.7 \text{ Watt}$
2.	Rugi daya inti pada saat tanpa beban	$= \sqrt{3} \times V_0 \times I_0 \times \cos \phi_0$ $= \sqrt{3} \times 340 \text{ Volt} \times 2 \times 0.035 =$ 41.22 Watt
3.	Rugi daya lilitan stator	$= I^2 \times R_1 \text{ (} R_1 = 2.8 \Omega, \text{ dari pengukuran)}$ $= 14^2 \times 2.8 = 548.8 \text{ Watt}$
4.	Rugi daya lilitan rotor	$= \text{Slip} \times \text{rugi daya lilitan stator}$ $= 0.41 \times 548.8 = 225.01 \text{ Watt}$

5.	Daya keluar motor kotor	$= (1 - s) \times P_{inR}$ $= (1 - 0.41) \times 548.8 =$ 323.792 Watt
----	-------------------------	---

KESIMPULAN

Setelah melakukan berbagai percobaan dan analisis terhadap gambar diagram lingkaran yang telah dirancang dan dibuat, maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Dari hasil pengujian, bahwa cara menggambar diagram lingkaran dilakukan pengujian terlebih dahulu terhadap motor induksi. Pengujian yang dilakukan antara lain pengujian tanpa beban (*no-load test*) dan pengujian hubung singkat (*short-circuit test*).
2. Dari hasil pengujian, didapatkan nilai-nilai sebagai berikut :
 - Nilai arus tanpa beban sebesar 2 Ampere
 - Nilai arus hubung singkat sebesar 14 Ampere
 - Nilai daya tanpa beban sebesar 32 Watt
 - Nilai daya hubung singkat sebesar 550 Watt
 - Nilai efisiensi pada motor sebesar 88%
3. Dari hasil perhitungan, didapatkan nilai rugi-rugi daya antara lain sebagai berikut :
 - Nilai rugi-rugi besi, gesek, dan rugi-rugi angin sebesar 58.9 Watt
 - Nilai rugi-rugi tembaga rotor sebesar 176.7 Watt
 - Nilai rugi-rugi tembaga stator sebesar 117.8 Watt
 - Nilai daya *output* mekanik (P_{mk}) sebesar 2237.8 Watt

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim. 2012. Konstruksi Diagram Lingkaran Pada Motor Induksi Rotor Sangkar. Bandung : Politeknik Negeri Bandung.
- [2] Anonim, 2011. Pengujian Motor Induksi. Surabaya ; Universitas Kristen Petra.

- [3] Gunawan, Hanapi (Ed.). 1993. Mesin dan Rangkaian Listrik. Edisi Keenam. Jakarta Penerbit Airlangga.
- [4] Kostenko, M dan L. Piotrovsky. 1969. Electrical Machines. Jilid Kedua. Moscow : MIR Publisher.
- [5] MA, Sumanto. 1989. Motor Arus Bolak-Balik (Motor AC). Edisi Pertama. Yogyakarta : ANDI OFFSET.
- [6] M Fernandez, Francis. 2011. *Construction of Circle Diagram*. Selection Grade Lecturer. College of Engineering Trivandrum.
- [7] Marten. 2010. Perencanaan dan Pengujian Kumparan Motor Induksi Tiga Fasa. Makassar : Pendidikan Teknik Otomotif, Universitas Negeri Makassar.
- [8] Isnanto. 2013. Analisis Motor Induksi 3 Fasa dengan Metode Kerangka Referensi. Semarang : Jurusan Teknik Elektro, UNDIP.
- [9] Shekhawat, RS. 2013. *Mathematical Modeling of Electrical Machines using Circle Diagram*. India ; Electrical Engineering Department, BKBIET.
- [10] Suyamto. 2010. Analisis Daya dan Torsi Pada Motor Induksi. Yogyakarta : Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Indonesia.
- [11] Syafriyudin dan Joko Waluyo, 2012. Pengantar Mesin Mesin Listrik. Yogyakarta : AKPRIND PRESS.