

# Pengaruh Tipe Belitan Terhadap Unjuk Kerja Motor Induksi Satu Fasa

Asfari Hariz Santoso<sup>1)</sup>, Rini Nur Hasanah<sup>2)</sup>, Hadi Suyono<sup>3)</sup>

**Abstrak**— Motor induksi satu fasa banyak digunakan karena konstruksinya yang kokoh, relatif sederhana, mudah dalam perawatan, dan harga yang murah. Konfigurasi atau tipe belitan stator berpengaruh terhadap nilai impedansi motor. Pada penelitian ini dibuat dua tipe belitan atau konfigurasi yang berbeda. Tipe belitan yang diteliti adalah terbagi-skrup (Mesin A) dan terpusat terdistribusi (Mesin B). Tujuan dari penelitian adalah untuk mendapatkan tipe belitan yang menghasilkan unjuk kerja motor yang baik. Langkah yang dilakukan adalah mendapatkan beda sudut fasa arus antara kumparan utama dan bantu yang ideal dengan kumparan yang simetri. Beda sudut fasa arus yang ideal adalah sebesar  $90^\circ$ . Kumparan yang simetri yaitu jumlah kumparan utama dan bantu sama banyaknya. Hal tersebut dapat menghasilkan torsi yang optimum dan arus yang seimbang. Motor yang dirancang dianalisis menggunakan metode elemen berhingga dengan bantuan perangkat lunak FEMM 4.2. Simulasi dilakukan pada keadaan nominal. Kerapatan fluks rata-rata celah udara ( $B_{av}$ ) yang didapat dari simulasi digunakan untuk menghitung kapasitas motor. Pada penelitian ini juga dilakukan analisis daya dan torsi dengan perhitungan parameter dan pengujian beban. Hasil simulasi dan pengujian menunjukkan Mesin B memiliki torsi yang lebih tinggi dibanding Mesin A. Faktor yang berpengaruh adalah jumlah komponen harmonisa pada gaya gerak magnet (*Magnetomotive force*-MMF) dan distribusi medan yang dihasilkan kumparan stator.

**Kata Kunci**— Daya, Motor induksi satu fasa, Tipe belitan, Torsi.

## I. PENDAHULUAN

MOTOR induksi banyak digunakan karena dapat diandalkan dibandingkan dengan motor listrik jenis lain [1]. Motor kapasitor adalah salah satu jenis motor induksi satu fasa. Daya keluaran motor induksi satu fasa berasal dari kedua kumparannya, yaitu kumparan utama dan kumparan bantu. Daya yang dihasilkan masing-masing kumparan tersebut sesuai dengan jumlah kumparan statornya [11].

Performansi efisiensi dan torsi motor induksi adalah masalah yang kompleks. Salah satu contohnya adalah kebutuhan motor induksi dengan torsi tinggi yang digunakan sebagai penggerak kendaraan listrik. Untuk

mendapatkan torsi yang baik pada motor induksi satu fasa beberapa penelitian yang telah dilakukan antara lain dengan variasi kapasitansi [14] dan penggunaan parameter desain yang baik [15]. Adapun parameter desain tersebut meliputi bentuk alur stator dan rotor, material bahan inti, serta kumparan stator. Penelitian mengenai pengaruh tipe belitan untuk mendapatkan torsi yang tinggi masih jarang dibahas lebih dalam. Penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh konfigurasi atau tipe belitan yang berbeda terhadap nilai unjuk kerja motor, agar didapatkan motor untuk aplikasi kendaraan listrik yang mempunyai torsi awal tinggi. Torsi yang maksimal didapatkan melalui perbedaan fasa antara arus kumparan utama dan kumparan bantu sebesar  $90^\circ$  [2].

## II. MOTOR INDUKSI SATU FASA

Motor induksi atau motor asinkron secara konstruksi terdiri dari stator dan rotor. Motor induksi satu fasa sering digunakan pada peralatan rumah tangga karena disesuaikan dengan ketersediaan sumber listrik satu fasa. Motor induksi satu fasa umumnya memiliki daya rendah, efisiensinya relatif rendah, antara 38% sampai 70% [3]. Motor induksi satu fasa mempunyai 2 (dua) kumparan stator, yaitu kumparan utama dan kumparan bantu yang dililit pada stator dengan perbedaan sudut  $90^\circ$  listrik. Pada umumnya kumparan bantu mempunyai resistansi dan reaktansi lebih besar dari kumparan utama dan kumparan bantu diseri dengan kapasitor. Dengan demikian bisa terjadi perbedaan fasa antara arus kumparan utama Ia dengan arus kumparan bantu Ib. Motor berfungsi sebagai motor 2 fasa tidak seimbang [4], akibat terjadi medan putar pada stator yang mengakibatkan motor dapat berputar. Motor induksi tidak dapat berputar pada kecepatan sinkronnya. Pada saat tanpa beban kecepatan putar rotornya ( $n$ ) sedikit lebih rendah dari kecepatan sinkronnya ( $n_s$ ). Perbedaan antara kecepatan sinkron dan kecepatan rotor disebut slip ( $s$ ) [4]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

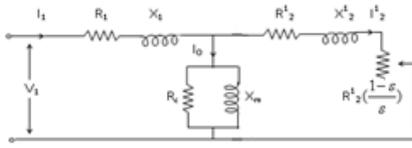
1) Asfari Hariz Santoso Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya (UB) Malang-Indonesia (email: asfari.hariz87@gmail.com).

2) Rini Nur Hasanah adosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang (email : rini.hasanah@ub.ac.id).

3) Hadi Suyono dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang (email : hadis@ub.ac.id)

### A. Rangkaian Pengganti Motor Induksi

Rangkaian pengganti motor induksi dalam keadaan mantap seperti pada Gambar 1 serupa dengan rangkaian pengganti sebuah transformator, dengan lilitan stator sebagai kumparan primer dan konduktor rotor sebagai kumparan sekunder [4].



Gambar 1. Rangkaian pengganti motor induksi tiap fasa pada keadaan mantap [4]

Untuk mendapatkan parameter – parameter mengacu pada *IEEE Standard Test Procedure for Single-Phase Induction Motors* 2010 harus dilakukan beberapa pengujian antara lain pengujian tanpa beban, pengujian rotor ditahan, dan pengujian DC. Pengujian tanpa beban dan rotor ditahan motor dicatu tegangan dan frekuensi sesuai ratingnya. Instrument pengukuran yang digunakan telah terkalibrasi dengan tingkat akurasi 0,5%.

Resistansi stator ( $R_1$ ) didapatkan dari pengujian DC sesuai dengan IEEE Std 118-1978 dengan persamaan :

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \Omega \quad (2)$$

Sedangkan untuk pengujian rotor ditahan dan pengujian tanpa beban dilakukan untuk mendapatkan nilai  $R_c$ ,  $X_m$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  dan  $R_2$ .

$$R_c = \frac{(R_{nl} - R_1)^2 + (X_{nl} - X_1)^2}{R_{nl} - R_1} \Omega \quad (3)$$

$$X_m = \frac{(R_{nl} - R_1)^2 + (X_{nl} - X_1)^2}{X_{nl} - X_1} \Omega \quad (4)$$

$$R = R_{br} - R_1 \Omega \quad (5)$$

$$R_2^1 = R \left( \frac{X_{22}}{X_m} \right)^2 = R \left( \frac{X_2^1 + X_m}{X_m} \right)^2 \Omega \quad (6)$$

Pembagian reaktansi bocor motor induksi secara empiris nilai  $X_1$  dan  $X_2^1$  dihitung dengan persamaan :

$$X_1 = X_2^1 = 0,5 \times X_{BR} \Omega \quad (7)$$

$$R_2^1 = R \left( \frac{X_{22}}{X_m} \right)^2 = R \left( \frac{X_2^1 + X_m}{X_m} \right)^2 \Omega \quad (8)$$

Nilai parameter di atas digunakan untuk menghitung nilai daya keluaran dan torsi motor dengan persamaan :

$$P_{mek} = (I_2^1)^2 \frac{R_2^1(1-s)}{s} \text{ watt} \quad (9)$$

$$I_2^1 = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2^1/s)^2 + (X_1 + X_2^1)^2}} \text{ A} \quad (10)$$

$$\tau_{mek} = \frac{P_{mek}}{\omega_s} (N - m) \quad (11)$$

Torsi motor dicari dengan pengujian berbeban dengan menggunakan rem mekanik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 [5], yaitu :

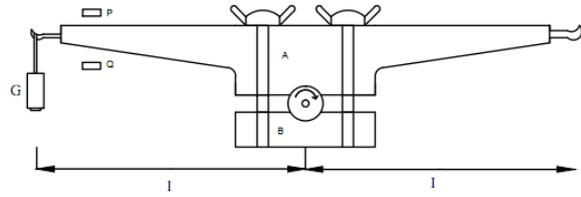
$$\tau_m = F.l (N-m) \quad (12)$$

dengan,

$\tau_m$ : Torsi motor ( $N-m$ )

$F$ : Gaya yang bekerja saat pengereman (N)

$l$ : Panjang lengan dari poros motor sampai ujung lengan (m)



Gambar 2. Rangkaian Pengujian dengan menggunakan rem mekanik

Poros motor dipasang roda pengerem yang diliputi dua lengan rem A dan B. Dua baut yang ada mur sayapnya membuat tekanan lengan rem dapat diatur. Lengan A dapat bergerak keatas dan kebawah antara titik P dan Q. Di ujung lengan digantungkan sebuah pemberat dengan timbangan G sehingga ketika motor itu berhenti kedua lengan tersebut setimbang. Jika motor berputar menurut arah anak panah dan rem terbawa oleh arah putar motor sehingga lengan sebelah kiri tertekan pada penampang P. Makin keras mur bersayap tersebut dikencangkan atau semakin kuat pengereman, maka semakin besar pula arus yang terpakai. Tekanan lengan rem sedemikian rupa sehingga besar arus yang mengalir pada motor nilainya berubah.

### B. Daya Motor Induksi

Kapasitas daya masukan mesin arus bolak-balik dalam kVA besarnya bergantung dari dimensi utama mesin diameter ( $D$ ) dan panjang ( $L$ ) inti stator, koefisien keluaran mesin arus bolak-balik ( $C_0$ ), serta kecepatan sinkron mesin ( $n_s$ ).

$$Q = C_0 \cdot D^2 \cdot L \cdot n_s \text{ kVA} \quad [6] \quad (13)$$

Koefisien keluaran mesin arus bolak-balik nilainya sebanding dengan kerapatan fluks celah udara rata-rata ( $B_{av}$ ), *specific loading* ( $AC$ ), dan faktor belitan ( $K_w$ ).

$$C_0 = 11 \cdot B_{av} \cdot AC \cdot K_w \cdot 10^{-3} \quad [6] \quad (14)$$

Besar kapasitas keluaran mesin dapat ditentukan dari perkalian antara daya masukan ( $Q$ ) dengan efisiensi ( $\eta$ ), dan faktor daya ( $\cos\phi$ )

$$P = Q \cdot \eta \cdot \cos\phi \text{ watt} \quad [6] \quad (15)$$

### C. Penentuan Diameter Konduktor

Pada kondisi normal untuk mesin standart kerapatan arus pada konduktor stator ( $I_s$ ) biasanya berkisar antara 3 sampai 4 A/mm<sup>2</sup> [6].

$$I_s = \frac{P_{in}}{V \cdot \eta \cdot \cos\phi} \text{ A} \quad (16)$$

Luas penampang konduktor stator ( $a_s$ ) dapat ditentukan dengan rasio antara arus konduktor stator dengan kerapatan arus ( $\delta_s$ ) yang ditentukan yaitu :

$$a_s = \frac{I_s}{\delta_s} \quad (17)$$

Untuk menentukan fluksi pitch ( $\Phi_m$ ) didapat melalui perkalian antara kerapatan fluks celah udara rata-rata ( $B_{av}$ ), kisar kutub ( $\tau$ ), dan panjang stator ( $L$ ) dengan persamaan:

$$\Phi_m = B_{av} \cdot \tau \cdot L \quad \text{weber} \quad [6] \quad (18)$$

Kisar kutub nilainya berbanding terbalik terhadap jumlah kutub stator ( $p$ ):

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_s}{p} \quad (19)$$

Jumlah lilit kumparan utama ( $T_m$ ) didapat melalui tegangan induksi stator ( $E$ ) dibagi dengan frekuensi sumber ( $f$ ), fluksi per kutub belitan utama ( $\Phi_m$ ), dan faktor belitan ( $K_w$ ) dengan persamaan:

$$T_m = \frac{E}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot K_w} \quad (20)$$

#### D. ANALISIS FINITE ELEMENT

Mesin-mesin listrik dengan inti besi yang berlaminasi dan frekuensi operasi yang relatif rendah, arus eddy dalam laminasi inti dan perubahan kerapatan arusnya dapat diabaikan [7]. Menurut persamaan Maxwell dan hukum ampere, kerapatan arus yang digunakan sebagai masukan untuk menghitung medan magnet yang besarnya [8].

$$\nabla \times H = J \quad (21)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (22)$$

Dimana  $H(x,y,z)$  = medan magnet dalam ampere per meter,  $B(x,y,z)$  = kerapatan fluks magnet dalam Tesla dan  $J(x,y,z)$  = kerapatan arus dalam ampere per meter persegi. Hubungan antara kerapatan fluks magnet dan medan magnet dinyatakan dengan persamaan:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \nabla \times A \quad (23)$$

dimana  $\mu_r(x,y,z)$  = permeabilitas relatif dan  $\mu_0$  = permeabilitas udara =  $4\pi 10^{-7}$ . Untuk sistem koordinat cartesian:

$$J = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ j(x,y) \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A_z(x,y) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_z}{\partial y} \\ -\frac{\partial A_z}{\partial x} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

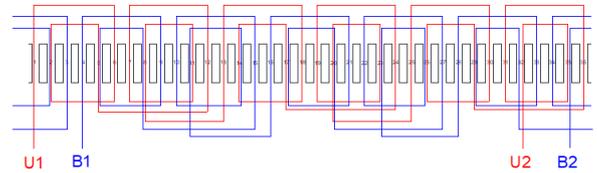
### III. METODOLOGI PEMBENTUKAN BELITAN

#### A. Perancangan Belitan

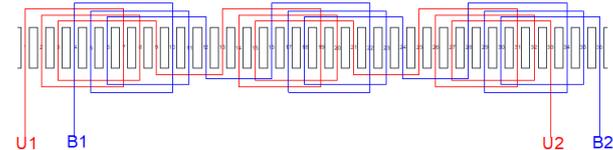
Pada penelitian ini dilakukan modifikasi belitan motor induksi satu fasa 1000 W, 220 V, kutub enam dengan dua tipe belitan. Tipe belitan yang digunakan yaitu terbagi-skrup (Mesin A) dan terpusat-terdistribusi (Mesin B). Untuk mendapatkan daya yang sama besarnya masing-masing kumparan utama dan kumparan bantu dengan pembagian jumlah alur stator yang sama.

Data masukan untuk modifikasi belitan adalah konstruksi stator. Stator motor yang digunakan mempunyai alur sebanyak 36. Langkah selanjutnya menentukan jumlah kutub, jumlah alur untuk masing-

masing kumparan, dan tipe belitan. Ditetapkan 6 kutub dan masing-masing 18 alur untuk kumparan utama dan bantu. Kumparan utama dan bantu dibuat simetri dengan tujuan digunakan pada aplikasi kendaraan listrik pada penelitian lanjutan. Tipe belitan yang digunakan adalah terbagi-skrup Gambar 3 (mesin A) dan tipe belitan terpusat-terdistribusi Gambar 4 (mesin B).



Gambar 3. Tipe belitan terbagi-skrup (Mesin A)



Gambar 4. Tipe belitan terpusat-terdistribusi (Mesin B)

Penentuan diameter konduktor dan jumlah lilit dilakukan dengan mempertimbangkan kerapatan arus yang mengalir dan faktor permukaan. Diameter konduktor yang dibutuhkan sebesar 1,27 mm dengan jumlah lilit sebanyak 46. Untuk memudahkan pelilitan digunakan konduktor dengan diameter 0,85 mm yang dirangkap dua. Hal ini dilakukan agar mudah dalam pelilitan dan mendapatkan faktor permukaan yang bagus. Karena semakin besar faktor permukaan akan mengurangi rugi tembaga [9]. Faktor permukaan yang didapat sebesar 0,718. Data belitan ditunjukkan pada Tabel 1. Perbedaan tipe belitan dengan dimensi yang sama akan menghasilkan distribusi MMF kumparan yang berbeda yang akan dibahas pada bagian analisis.

TABEL I  
Data Belitan

Parameter	Nilai
Jumlah kutub ( $p$ )	6
Jumlah alur ( $S_s$ )	36
Kisar alur ( $\gamma_\theta$ )	$30^\circ$
Luas penampang alur ( $A_{slot}$ )	$72,6105 \text{ mm}^2$
Luas penampang konduktor ( $A_w$ )	$0,567 \text{ mm}^2$

Pada penelitian ini dilakukan dua macam pengujian, yakni pengujian untuk mendapatkan parameter mesin dan pengujian berbeban untuk mengetahui unjuk kerja mesin. Pengujian untuk mendapatkan parameter mesin ada tiga yaitu, pengujian DC, *block rotor*, dan tanpa beban. Pengujian berbeban dilakukan dengan menghubungkan motor dengan beban mekanik sedikit demi sedikit hingga mencapai nominal.

#### B. Analisis dan Simulasi Finite Element

Tahapan ini bertujuan untuk memprediksi kapasitas dan unjuk kerja motor sebelum diuji pada laboratorium. Komponen motor dibagi menjadi element-element kecil sehingga besar medan magnet dalam element tersebut dapat diketahui. Sebagai alat bantu simulasi digunakan perangkat lunak FEMM 4.2. Parameter masukan pertama adalah geometri motor dengan diameter ( $D$ ) dan panjang

(L) inti berturut-turut 105 mm dan 92 mm. Kedua adalah material yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

TABEL 2.  
MATERIAL MOTOR INDUKSI SATU FASA

Bagian motor	Material
Inti stator dan rotor	M-19 Steel
Celah udara	Air (udara)
Konduktor kumparan stator	20 AWG
Konduktor rotor	Chopper

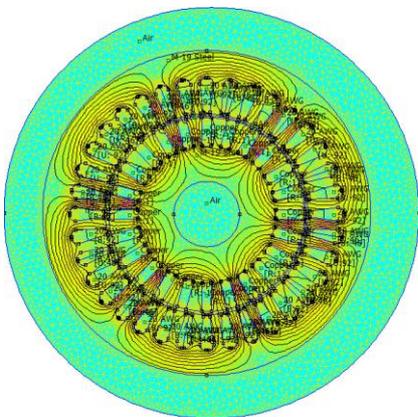
Sumber: FEMM 4.2

Material inti menggunakan baja silikon, karena kandungan silikonnya dapat menurunkan arus Eddy dan mengurangi histerisis karena volume resistivitasnya yang tinggi [10]. Konduktor kumparan stator yang dipilih adalah 20 AWG dengan diameter 0,812 mm dengan satu alur diisi 92 konduktor. Kemudian menentukan arus yang mengalir pada konduktor sebesar 2,5 A. Besar arus tersebut diasumsikan karena arus nominal motor pada perancangan sebesar 5 A untuk konduktor dengan diameter 1,2 mm. Jika konduktor dirangkap dua dengan luas setengahnya, arus yang mengalir setengahnya, sesuai dengan hukum Kirchoff arus.

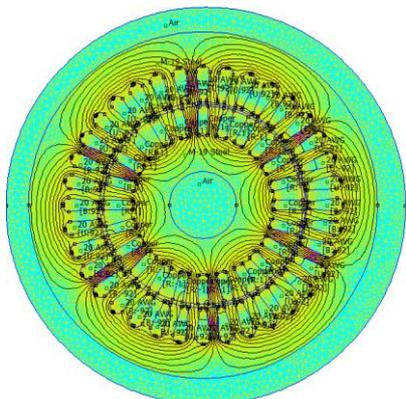
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi dengan Metode Finite Element

Tahap *meshing* pada simulasi Mesin A menghasilkan 87981 nodes dan 175600 elements sedangkan Mesin B menghasilkan 89084 nodes 177806 elements seperti yang ditunjukkan Gambar 5 dan 6 di bawah.

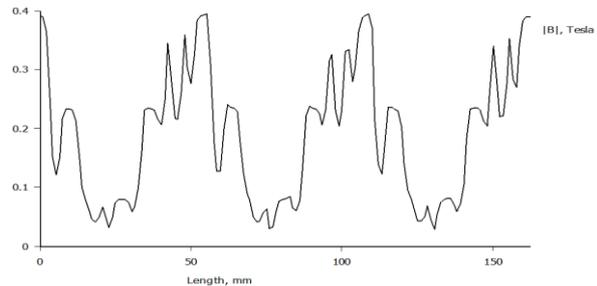


Gambar 5. Distribusi medan magnet Mesin A

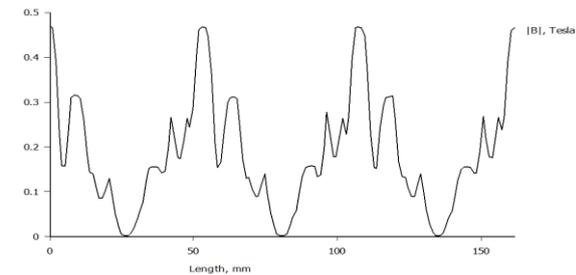


Gambar 6. Distribusi medan magnet Mesin B

Pola distribusi rapat fluks magnet yang tinggi terdapat pada sisi-sisi kutub. Kerapatan medan magnet Mesin B lebih merata dibanding Mesin A. Fluktuasi kerapatan medan magnet celah udara sebagai fungsi panjang kondisi batas yang ditentukan pada keadaan beban nominal ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8.



Gambar 7. Fluktuasi kerapatan fluks magnet pada celah udara Mesin A



Gambar 8. Fluktuasi kerapatan fluks magnet pada celah udara Mesin B

Kerapatan medan magnet celah maksimum ( $B_g$ ) mesin A dan mesin B masing-masing 0,391 T dan 0,468 T. Sehingga nilai kerapatan medan magnet rata-rata celah udara ( $B_{av}$ ) mesin A dan mesin B berturut-turut 0,261 T dan 0,312 T. Kerapatan fluks yang dihasilkan Mesin A lebih rendah dibanding Mesin B. Hal ini akibat adanya dua sisi kumparan dalam satu alur dengan arah arus yang berlawanan, sehingga fluksi saling menghilangkan. Besar nilai kerapatan medan magnet rata-rata ( $B_{av}$ ) disubstitusikan pada persamaan (13) sampai (15) untuk mendapatkan kapasitas motor. Kapasitas daya *input* Mesin A dan Mesin B masing-masing 1,5355 kVA dan 2,274 kVA, sedangkan daya keluarannya 689,67 W dan 1018,78 W. Nilai kapasitas daya motor sebanding dengan kerapatan fluks yang dihasilkan kumparan stator dengan dimensi motor yang sama [6].

B. Hasil Pengujian

Hasil pengujian dan parameter kedua mesin masing-masing ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

TABEL 3.  
HASIL PENGUJIAN MESIN A DAN MESIN B

	MESIN A		MESIN B	
	Kumparan Utama	Kumparan Bantu	Kumparan Utama	Kumparan Bantu
$R_{DC}$ ( $\Omega$ )	3,08	3,12	3,1	3,14
$R_{NL}$ ( $\Omega$ )	8,875	9,06	6,8	6,88
$X_{NL}$ ( $\Omega$ )	43,61	43,06	41,64	41,83
$Z_{NL}$ ( $\Omega$ )	44,5	44	42,2	42,2
$R_{BR}$ ( $\Omega$ )	6	6	6	6,16
$X_{BR}$ ( $\Omega$ )	11,42	11,08	11,96	11,58
$Z_{BR}$ ( $\Omega$ )	12,9	12,6	13,38	13,12

Nilai hasil pengujian dihitung dengan menggunakan persamaan (2) sampai persamaan (8) maka didapatkan nilai parameter motor seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

TABEL 4.  
NILAI PARAMETER MESIN A DAN MESIN B

	MESIN A		MESIN B	
	Kumparan Utama	Kumparan Bantu	Kumparan Utama	Kumparan Bantu
$R_1 (\Omega)$	3,08	3,12	3,1	3,14
$X_1 (\Omega)$	5,71	5,54	5,98	5,79
$R_c (\Omega)$	2,92	2,88	2,9	3,02
$X_m (\Omega)$	37,9	37,52	35,66	36,04
$R_2 (\Omega)$	3,87	3,79	3,95	4,07
$X_2 (\Omega)$	5,71	5,54	5,98	5,79

Susunan belitan pada kedua mesin memberikan perbedaan nilai parameter. Hal ini dikarenakan dalam setiap pasang kutub pada masing-masing tipe belitan memiliki bentuk belitan yang berbeda. Perbedaan tersebut terletak pada jarak antara sisi kumparan untuk setiap kutubnya. Pada mesin A terdapat dua belitan yang mempunyai jarak sisi kumparan yang berbeda antara lain sebesar lima dan tiga alur untuk setiap kutubnya. Sedangkan pada mesin B mempunyai jarak sisi kumparan yang sama setiap belitannya yakni enam alur untuk setiap kutubnya. Konfigurasi kumparan pada Mesin A mempunyai enam alur yang ditempati dua sisi kumparan yang arah arusnya berlawanan, sehingga fluks yang dihasilkan saling menghilangkan. Oleh sebab itu nilai reaktansi pada mesin A nilainya lebih kecil dibanding reaktansi mesin B. Dampaknya nilai  $R_2'$  mesin B lebih besar yang menghasilkan daya *output* lebih besar dibanding mesin A. Untuk mendapatkan nilai daya *output* dan torsi motor, parameter pada Tabel 4 dimasukkan pada persamaan 9 dan 11, nilai daya *output* dan torsi kedua Mesin ditunjukkan pada Tabel 5.

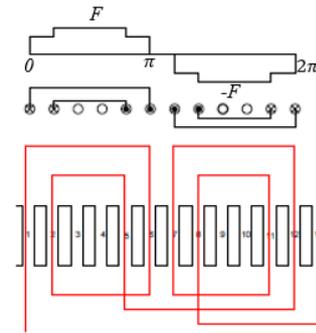
TABEL 5. NILAI DAYA *OUTPUT* DAN TORSI MOTOR

	Mesin A	Mesin B
Daya <i>output</i> (W)	535,858	546,596
Torsi (Nm)	5,12	5,22

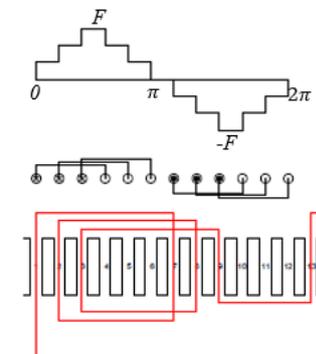
Pengujian berbeban dilakukan dengan memberikan beban mekanik pada motor hingga pada keadaan nominal. Motor dibebani dengan generator DC dengan transmisi mekanik *pulley-belt*. Hasil pengujian didapatkan daya nominal mesin A dan mesin B sebesar 336,568 watt dan 490,1 watt. Torsi nominal yang dihasilkan masing-masing 3,371 Nm dan 4,992 Nm.

### C. Analisis

Arus yang mengalir pada konduktor kumparan stator menghasilkan MMF ( $F$ ) yang nilainya merupakan perkalian arus yang mengalir pada konduktor dan jumlah lilit kumparan. Distribusi MMF pada celah udara yang dihasilkan oleh kumparan mesin A dan mesin B ditunjukkan pada Gambar 9 dan 10.

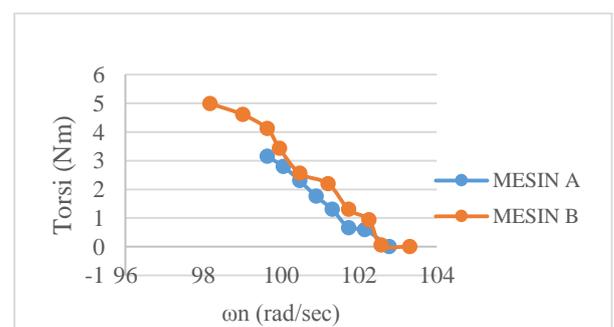


Gambar 9. Bentuk MMF dari tipe belitan terbagi-skrup mesin A



Gambar 10. Bentuk MMF dari tipe belitan terpusat-terdistribusi mesin B

Bentuk distribusi MMF belitan dapat diuraikan menjadi gelombang sinusoida fundamental dan komponen harmonisanya [11]. Bentuk distribusi MMF mesin A, jika diuraikan akan mempunyai lebih banyak komponen harmonisa dibanding dengan mesin B. Hal tersebut akan berakibat pada unjuk kerja mesin. Hal ini telah dibuktikan sebelumnya dari perhitungan dan pengujian bahwa mesin B memiliki daya *output* dan torsi yang lebih baik dibanding mesin A. Susunan belitan pada inti stator mesin B lebih terdistribusi dibandingkan dengan susunan belitan pada mesin A. Hal ini mengakibatkan bentuk distribusi MMF belitan stator mesin B lebih baik jika dibandingkan dengan distribusi MMF belitan stator mesin A, karena komponen harmonisa dapat turun jika belitan terdistribusi [12]. Disamping itu komponen harmonisa fluks magnet pada celah udara menghasilkan torsi parasit yang menyebabkan gaya pada rotor tidak terkompensasi [13]. Ketika dilakukan pengujian berbeban, Mesin B menghasilkan torsi yang lebih baik dibanding Mesin A. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 11.

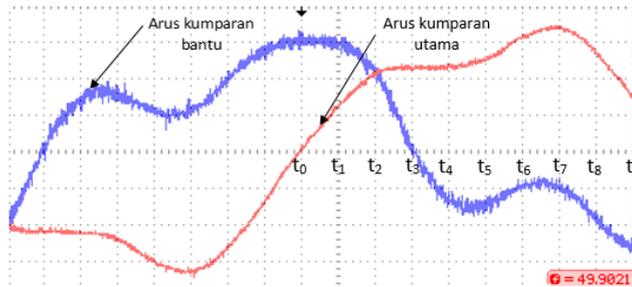


Gambar 11. Grafik torsi fungsi kecepatan

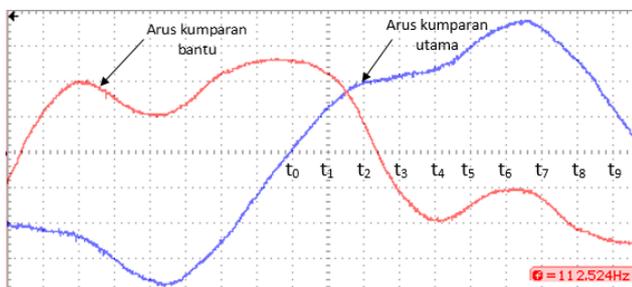
Ketika kedua motor dibebani dengan beban yang sama hingga mencapai kecepatan sudut sekitar 99-100 *rad/sec*

mesin B menghasilkan torsi sebesar 4,608 Nm dan mesin A menghasilkan torsi sebesar 3,37 Nm. Ketika beban ditambah Mesin B memiliki torsi sebesar 4,992 Nm sedangkan Mesin A sudah tidak bisa bekerja optimal.

Bentuk kerapatan fluks celah udara yang dihasilkan oleh kumparan stator yang ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8 dapat direpresentasikan dengan bentuk gelombang arus. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12 dan 13 di bawah.



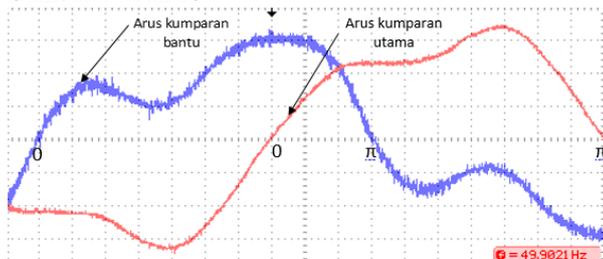
Gambar 12. Bentuk gelombang arus kumparan utama mesin A



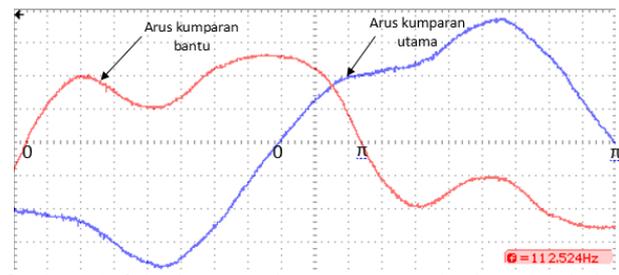
Gambar 13. Bentuk gelombang arus kumparan utama mesin B

Pada gambar di atas dapat dijelaskan bahwa bagian puncak dari gelombang arus kumparan utama mesin B lebih curam dibandingkan bentuk gelombang arus dari mesin A yang lebih landai seperti yang ditunjukkan pada gambar 12 dan 13 di atas ketika  $t_4$  hingga  $t_7$ . Hal ini dikarenakan tipe belitan dari masing-masing mesin menghasilkan bentuk distribusi MMF yang berbeda. Dimana bentuk distribusi MMF mesin B puncaknya lebih tajam dibanding mesin A. Selain itu bentuk gelombang arus juga dipengaruhi oleh komponen impedansi dari belitan masing-masing mesin yang mengakibatkan cacat gelombang.

Pada keadaan tanpa beban, beda sudut fasa arus kumparan utama dan kumparan bantu kedua motor induksi sudut fasanya belum mencapai  $90^\circ$ , seperti pada Gambar 14 dan 15.

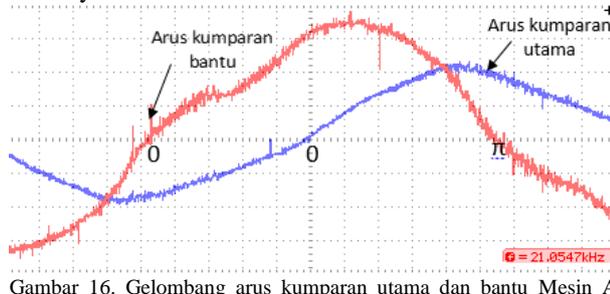


Gambar 14. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin A (tanpa beban)

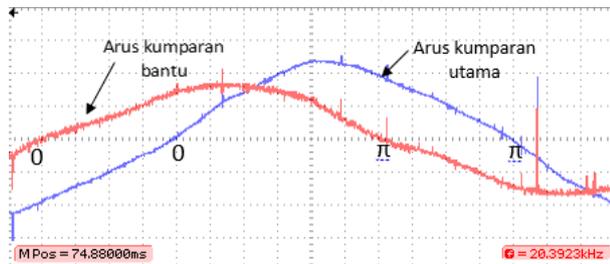


Gambar 15. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin B (tanpa beban)

Ketika kondisi beban mendekati nominal terlihat perbedaan pada masing-masing motor Mesin A mempunyai beda sudut fasa yang cukup baik yakni mendekati  $90^\circ$ . Dalam hal ini terlihat pada gelombang yang direkam melalui osiloskop seperti pada Gambar 16 dan 17. Selain itu arus yang mengalir pada kedua kumparan nilainya hampir sama. Jika dibandingkan dengan mesin B, mesin A daya keluaran yang dihasilkan dari masing-masing kumparan adalah relatif sama besarnya.

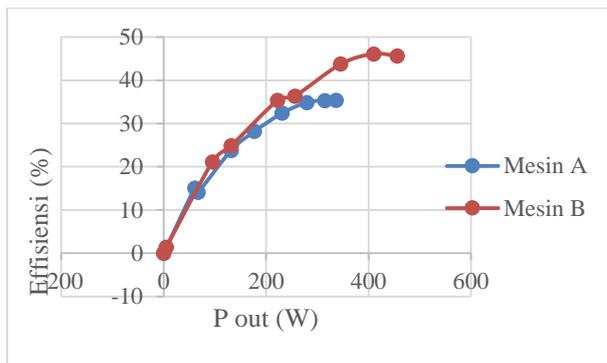


Gambar 16. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin A (mendekati beban nominal)



Gambar 17. Gelombang arus kumparan utama dan bantu Mesin B (mendekati beban nominal)

Pada penelitian ini kedua Mesin mempunyai beda sudut fasa antara kumparan utama dan bantu sebesar  $90^\circ$ . Adapun hal yang membedakan adalah Mesin A memiliki kekurangan dibanding mesin B pada daya keluaran dan torsi. Faktor penyebabnya adalah tidak terdistribusinya kumparan Mesin A, sehingga kerapatan fluksi yang dihasilkan lebih banyak mengandung harmonisa dibanding mesin B. Hal ini berdampak pada efisiensi motor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Grafik perbandingan daya keluaran dan efisiensi

Mesin B ketika pada keadaan beban nominal torsiya relatif lebih baik dibandingkan dengan mesin A. Hal ini karena kerapatan fluks yang diinduksikan oleh kumparan stator mesin B cukup baik. Sebagaimana terlihat pada simulasi FEMM 4.2, kerapatan fluks celah udara yang dihasilkan oleh kumparan stator mesin B lebih tinggi dibandingkan dengan mesin A. Adanya alur stator yang diisi oleh dua sisi kumparan dari kumparan utama dan bantu yang mana arah arusnya berlawanan menjadi penyebab kurang baiknya nilai kerapatan fluks pada mesin A.

#### V. KESIMPULAN

Motor induksi satu fasa dengan tipe belitan yang berbeda memberikan perbedaan nilai parameter motor. Pada penelitian yang telah dilakukan menunjukkan nilai resistansi cenderung sama. Namun nilai reaktansi mesin A dengan tipe belitan terbagi-skrup lebih kecil dibanding mesin B dengan tipe belitan terpusat-terdistribusi. Dampaknya besar daya keluaran Mesin A lebih rendah dibanding Mesin B. Pada simulasi FEMM kerapatan fluksi yang dihasilkan mesin B lebih baik, karena ada Mesin A terdapat enam alur yang terisi dua kumparan yang berbeda dengan arah arus yang berlawanan. Ditinjau dari unjuk kerja motor baik torsi maupun daya keluaran mesin B memiliki keunggulan. Penyebabnya adalah distribusi MMF dari konfigurasi kumparan mesin A memiliki lebih banyak komponen harmonisa dibanding mesin B. Hal ini dibuktikan melalui perancangan dan analisis *finite element*, perhitungan parameter, dan pengujian eksperimen. Adanya perbedaan nilai daya keluaran dan torsi antara hasil perhitungan parameter dan pengujian berbeban perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui penyebabnya.

#### REFERENSI

- [1] G Abhisek Pal dan Sukanta Das. 2016. A New Sensorless Speed Estimation Strategy for Induction Motor Driven Electric Vehicle with Energy Optimization Scheme. *IEEE*.
- [2] Ion Boldea dan Syed A. Nasar. 2001. *The Induction Machine Handbook*. CRC Press.
- [3] Mismail Budiono 2011. *Dasar Teknik Elektro*. Malang :Universitas Brawijawa Press.
- [4] Zuhaf, 1993. *Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya*. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.
- [5] Sujud Abdul. 1953. *Mesin Arus Searah*. Jakarta: Tehnik H. Stam
- [6] Sawhney A.K, 1990. *Electrical Machine Design*. New Delhi : Dhanfat Rai & Sons.Gonen, Turan. 1987. *Electric Power Distribution Sistem Engineering*. Singapore: McGraw-Hill Book Company.
- [7] D. Meeker, *Finite Element Methode Magnetics Version.*, 2008.
- [8] G. Mahalingam, A. Keyhani, "Design of 42v/3000w permanent magnet synchronous generator," Electrical Engineering Department, Ohio State University, Columbus Ohio, Technical Report 2000.
- [9] A. O. Di Tommaso, F. Genduso, R. Miceli, *Member, IEEE*, dan C. Nevoloso. 2017. Fast Procedure for the Calculation of Maximum Slot Filling Factors in Electrical Machines. *IEEE*.
- [10] Pudji Irasari, Hilman Syaeful Alam, dan Muhammad Kasim. 2012. *Magnetic Simulation and Analysis of Radial Flux Permanent Magnet Generator Using Finite Element Method*. Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology 03 : 23-30
- [11] Jimmie J. Cathey, 2001. *Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB*. Singapore. The McGraw-Hill Companies, Inc.,
- [12] P. C. Sen. 1997. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. United States of America. John Wiley And Sons, Inc.
- [13] Vladimir Kindl, Karel Hruska, Jan Sobra and Miroslav Byrtus. 2014. *Effect of Induction Machine's Load and Rotor Eccentricity on Space Harmonics in the Air Gap Magnetic Flux Density*. *IEEE*
- [14] Andreas Michaelides and Thanos Nicolaou. 2017. *Starting and Running the Induction Motor with a Variable Capacitor*. International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)
- [15] Sobhan Sobhani, Hamid Yaghoobi, and Mehdi Samakoosh. 2013. *Optimize Efficiency and Torque in The Single-Phase Induction Motor by Adjusting The Design Parameters*. *IEEE*