

# Analisis Motor *Brushless Direct Current* Aksial Fluks 3 Fasa Menggunakan Magnet Permanen *Neodymium* Sebagai *Prime Mover* Generator

Mayang Karlia Sari<sup>1</sup>, Widyono Hadi<sup>2</sup>, Widya Cahyadi<sup>3</sup>

[Submission: 26-07-2020, Accepted: 11-12-2020]

**Abstract**— The increase in the use of conventional motor causes an increase in the use of petroleum that cannot be renewed. To overcome it the use of conventional motor changes to electric motor. Electric motor that are often used is brush motor, but it has brush-loss. Electric motor created to overcome the weakness of brush motor. Electric motor that are designed has specification ie 6 slot and use 4 dan 8 magnet in rotor. The coil in every slot is 450 made by email wire with 0,3 mm diameter.

This research is doing by measurement and calculation. Measurement is included measure magnetic field, motor voltage, frekuensi and rotational speed. Calculation is included power, torque, frekuensi and rotational speed. Motor testing is using 4 and 8 magnet in no load condition and with load condition. The first test on a 24 Volt supply voltage when using 4 magnets in no-load condition result a torque value of  $1,09 \times 10^{-3}$  Nm and a speed of 2794 RPM, when in load condition motor result torque value of  $2,25 \times 10^{-3}$  Nm and rotational speed of 1171 RPM. The second test on a 24 volt supply voltage when using 8 magnet in no-load condition motor result torque value of  $3,38 \times 10^{-3}$  Nm and rotational speed of 1410 RPM, when in load condition motor result torque of  $7,4 \times 10^{-3}$  Nm and rotational speed 1410 RPM. Maximal value torque result in all test is  $7,4 \times 10^{-3}$  Nm and maximal rotational speed is 2794 RPM.

**Intisari**—Peningkatan penggunaan motor konvensional menyebabkan peningkatan minyak bumi yang merupakan sumber daya alam yang tidak bisa diperbarui. Untuk mengatasi hal tersebut maka penggunaan motor konvensional diganti dengan motor listrik. Motor listrik yang sering digunakan adalah motor brush namun masih memiliki kekurangan yaitu terdapat rugi – rugi sikat. Sehingga dibuatlah motor *brushless direct current* untuk mengatasi hal tersebut. Motor yang dirancang pada penelitian ini memiliki spesifikasi 6 kumparan dengan jumlah magnet pada rotor 4 dan 8. Lilitan pada masing – masing kumparan adalah 450 lilitan dengan kawat email berdiameter 0,3 mm.

<sup>1</sup>Mahasiswa, Universitas Jember, Jl.Kalimantan no 37, Kampus Tegalboto, Jember, Telp:081336189545; e-mail: mayangkarlias@gmail.com

<sup>2,3</sup>Dosen, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember, Jln.Kalimantan no 37 Jember 68121 INDONESIA (telp: 0361-703315); fax: 0361-4321; email:widyono.hadi1961@gmail.com, cahyadi@unej.ac.id

Penelitian dilakukan dengan cara pengukuran dan perhitungan. Pengukuran meliputi pengukuran medan magnet, nilai tegangan motor, frekuensi dan kecepatan putar. Nilai perhitungan meliputi daya, torsi, frekuensi dan kecepatan putar motor. Pengujian dilakukan menggunakan 4 (empat) dan 8 (delapan) magnet bergantian serta dalam dua kondisi yaitu berbeban dan tanpa beban. Pengujian pertama pada tegangan sumber 24 Volt saat menggunakan 4 magnet dalam kondisi tanpa beban menghasilkan nilai torsi  $1,09 \times 10^{-3}$  Nm dan kecepatan putar 2794 RPM, saat keadaan berbeban menghasilkan nilai torsi  $2,25 \times 10^{-3}$  dan nilai kecepatan putar 1171 RPM. Pengujian kedua tegan tegangan sumber 24 Volt menggunakan 8 magnet dihasilkan nilai torsi  $3,38 \times 10^{-3}$  Nm dan kecepatan putar 2484 RPM, saat keadaan berbeban dihasilkan nilai torsi  $7,4 \times 10^{-3}$  Nm dan kecepatan putar motor 1410 RPM. Nilai torsi tertinggi yang dihasilkan yaitu  $7,4 \times 10^{-3}$  Nm dan nilai kecepatan putar tertinggi yang dihasilkan yaitu 2794 RPM.

**Kata Kunci**—motor *brushless direct current*, torsi, kecepatan putar, magnet *Neodymium*

## I. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan teknologi di berbagai bidang seperti bidang informasi dan alat transportasi menjadikan penggunaan motor juga semakin dibutuhkan. Peningkatan penggunaan motor linier dengan penggunaan sumber daya alam minyak bumi yang digunakan sebagai sumber energi motor konvensional. Penggunaan minyak bumi pada tahun 2017 sebesar 56,9% dan tahun 2018 meningkat menjadi 58% [1]. Karena ketersediaan sumber daya alam tersebut tidak bisa diperbaharui maka dibuat motor listrik sebagai pengganti motor konvensional. Selain itu motor listrik juga hampir bebas perawatan, tidak membutuhkan minyak, busi baru, atau perbaikan rutin lainnya seperti pada motor bakar [2].

Salah satu jenis motor listrik yang sering digunakan adalah motor DC, karena memiliki kelebihan yaitu kecepatannya mudah dikendalikan namun memiliki keandalan rendah karena menggunakan sikat atau *brush* serta motor DC membutuhkan pemeliharaan secara berkala [3]. Selain itu juga motor DC juga memiliki efisiensi sebesar 75% - 80% [4]. Penggunaan motor *brushless* DC dapat mengatasi kelemahan tersebut karena menggunakan komutasi elektrik sehingga memiliki efisiensi tinggi dan waktu operasi yang lama [5]. Efisiensi yang tinggi disebabkan karena tidak adanya gesekan oleh *brush* [6]. Selain itu motor *brushless* DC memiliki fitur



yang rapat, tidak menimbulkan percikan api dan *noise* komutator, serta mampu digunakan di berbagai aplikasi seperti pada PC (*Personal Computer*) dan peralatan rumah tangga [7].

Motor *brushless* DC (BLDC) merupakan salah satu jenis motor yang memiliki ciri khas terdapat magnet permanen pada rotor dan kumparan pada stator. Salah satu jenis magnet permanen yang digunakan yaitu magnet Neodymium, yang merupakan jenis magnet terkuat dibanding magnet lainnya. Kuat medan magnet ini bisa berbahaya apabila tidak digunakan secara tepat [8]. Dilihat dari aliran fluksnya, terdapat dua jenis motor *brushless* DC yaitu *radial flux brushless* DC dan *axial flux brushless* DC [9]. Beberapa penelitian yang sudah pernah dilakukan membuktikan bahwa motor *brushless* DC berbentuk aksial fluks memiliki nilai torsi lebih tinggi dibandingkan dengan radial fluks [10]. Motor yang berbentuk aksial fluks juga memiliki efisiensi lebih besar dari radial fluks [11]. Selain itu, motor *brushless* DC yang berbentuk radial fluks memiliki rugi daya yang lebih tinggi dibandingkan motor *brushless* DC berbentuk aksial fluks [12]. Motor *brushless* DC radial fluks memiliki efisiensi yang semakin tinggi apabila kecepatan putar juga semakin tinggi, namun pada kecepatan maksimal efisiensi tersebut akan menurun [13]. Meskipun motor ini termasuk motor sinkron AC 3 fasa, motor ini tetap disebut dengan *brushless* DC karena pada penerapannya menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian dengan inverter 3 fasa diubah menjadi tegangan AC 3. Tujuan dari pemberian tegangan AC 3 fasa pada stator *brushless* DC yaitu untuk menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor [14].

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari motor *brushless direct current* 3 fasa aksial fluks saat menggunakan rotor dengan 4 magnet dan 8 magnet serta dalam keadaan berbeban dan tanpa beban. Parameter ukuran kinerja motor pada penelitian ini yang utama yaitu nilai torsi dan kecepatan putar motor. Parameter yang lain meliputi nilai tegangan luaran, frekuensi dan daya mekanik.

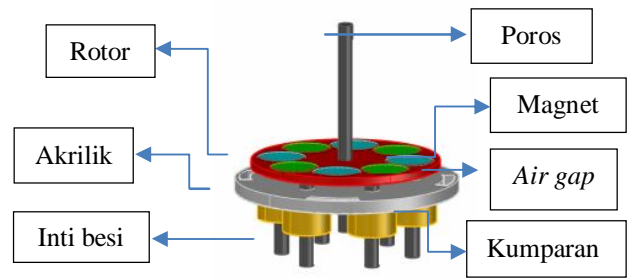
## II. METODE PENELITIAN

### A. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain multimeter merek Krisbow KW06000832, tachometer merek Extech, tesla meter merek MetroLab PT2026, *power supply* merek CODY 3005DT, Osiloskop merek Hantek DSO5102P, *driver KIT* motor merek OWO model JYQD-V7 3E1, obeng, tang kombinasi, tang potong, solder, generator aksial fluks *double* rotor dengan magnet permanen *Neodymium* DC 24 Volt. Bahan – bahan yang digunakan antara lain yaitu Magnet permanen *Neodymium* tipe koin, isolasi/selotip kertas, akrilik, baut, mur, bearing, kabel penghubung, timah.

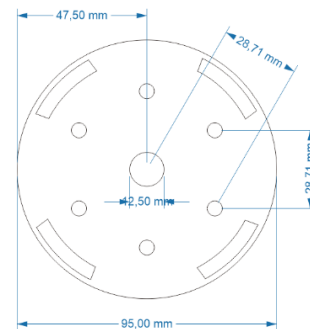
### B. Desain Motor *Brushless Direct Current*

Pada penelitian motor *brushless direct current* aksial fluks 3 fasa ini meliputi komponen utama dari motor listrik, yaitu stator dan rotor dengan desain sebagai berikut:



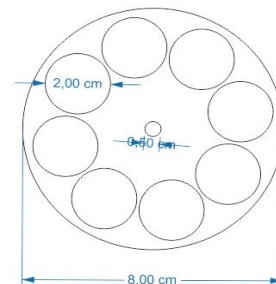
Gambar 1: Desain Motor *Brushless Direct Current* Aksial Fluks 3 Fasa

Jumlah lilitan sebanyak 450 lilitan dan total jumlah spul 6 buah sebagai kumparan. Perancangan menggunakan 4 dan 8 ini berdasarkan nilai minimum *cogging torsi* yang bisa didapatkan [15]. Kutub disusun melingkar dengan masing – masing kutub terdapat inti besi, dipasang pada akrilik yang sekaligus berfungsi sebagai sekat antara rotor dan stator. Pada poros rotor dan stator dihubungkan menggunakan *shaft* sebagai transfer energi mekanik [16]. Pada titik tengah stator terdapat *bearing* yang berguna sebagai bantalan agar poros busa berputar tanpa gesekan yang berlebihan. Bearing yang digunakan memiliki ukuran diameter 1,5 cm dengan lebar lubang 0,5 cm. Pada stator juga dipasang *hall effect* yang terletak di antara celah stator. Karena rangkaian stator menggunakan konfigurasi *star* maka dibutuhkan 3 sensor yang akan bekerja bergantian sebagai *on* dan *off* pada kumparan [17]. Pada penelitian sebelumnya, kemampuan sensor *hall effect* tetap efektif meskipun salah satu sensornya rusak atau tidak berfungsi [18].

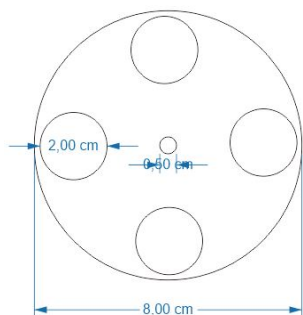


Gambar 2: Desain Stator Motor *Brushless Direct Current* Aksial Fluks 3 Fasa menggunakan 6 Kumparan

Perancangan rotor ada dua kondisi yaitu rotor dengan 4 magnet dan rotor dengan 8 magnet. Magnet yang digunakan berjenis *Neodymium* berbentuk koin berukuran 20x3 mm. Pemasangan magnet secara bersilang yaitu kutub utara (U) dan selatan (S).



Gambar 3 : Desain Rotor Motor *Brushless Direct Current* Aksial Fluks 3 Fasa menggunakan 8 Magnet



Gambar 4 : Desain Rotor Motor Brushless Direct Current Aksial Fluks 3 Fasa menggunakan 4 Magnet

### C. Pengumpulan Data

#### 1. Perhitungan

##### a. Nilai Medan Magnet

$$B = Br \frac{im}{im + \Delta}$$

Keterangan:

B	= Kuat medan magnet	(T)
Br	= Nilai medan magnet pengukuran	(T)
im	= Tebal magnet	(m)
Δ	= Lebar celah udara	(m)

##### b. Gaya pada Motor [17]

$$F = k \frac{M1 \cdot M2}{r^2}$$

Keterangan:

F	= Gaya	(N)
M1	= Total kuat medan magnet pada rotor	(T)
M2	= Total kuat medan magnet pada stator	(T)
k	= Konstanta	(10 <sup>-7</sup> )
r	= jarak antara rotor dan stator	(m)

dapat dijabarkan menjadi:

M1 = A x H1, dimana H1 yaitu:

$$H1 = B \times 1 \text{ Tesla}$$

Keterangan:

A	= Total luas permukaan magnet	(m <sup>2</sup> )
B	= Nilai medan magnet	(T)
H1	= Kuat medan magnet pada rotor	(A/m)
H2	= Kuat medan magnet pada stator	(A/m)
1 Tesla	= 795774,715482221	

Penjabaran dari nilai M2 yaitu:

M2 = A x H2, dimana nilai H2 yaitu:

$$H2 = \frac{2xNxIa}{l}$$

Keterangan:

A	= Total luas permukaan magnet	(m <sup>2</sup> )
N	= Jumlah lilitan stator	
Ia	= Arus motor	(A)
l	= panjang penampang kumparan	(m)

##### c. Torsi Motor [19]

$$T = F r$$

(3)

Keterangan:

T	= Torsi	(Nm)
F	= Gaya	(N)
r	= jari – jari rotor	(m)

##### d. Daya Mekanik [19]

$$P = \omega T$$

(4)

Keterangan:

P	= Daya	(W)
T	= Torsi	(Nm)
ω	= Kecepatan sudut	(rad/s)

##### e. Kecepatan Sudut [19]

$$(1) \quad \omega = \frac{2\pi n_r}{60}$$

(5)

Keterangan:

ω	= kecepatan sudut	(rad/s)
n <sub>r</sub>	= kecepatan putaran motor	(rpm)

##### f. Kecepatan Putar Motor

Kecepatan putar motor dapat dihitung dari pengukuran frekuensi luaran *driver* dan jumlah kutub [20]

$$n_r = \frac{120 f}{p}$$

(6)

(2) Keterangan :

n <sub>r</sub>	= kecepatan putaran motor	(rpm)
f	= frekuensi	(Hz)
p	= jumlah pole	

##### g. Nilai Error [15]

$$E\% = \left| \frac{HT - Hp}{HT} \right| \times 100\%$$

(7)

Keterangan:

Ht = hasil perhitungan nilai frekuensi (Hz) dan kecepatan putar motor (RPM)

HP = hasil perhitungan nilai frekuensi (Hz) dan kecepatan putar motor (RPM)

### 2. Pengukuran

#### a. Pengukuran kuat medan magnet

Pengukuran medan magnet Neodymium yang digunakan pada penelitian, menggunakan alat Tesla meter, dengan cara sensor pada Teslameter diletakkan di atas magnet setelah itu akan didapatkan nilai medan magnet pada magnet Neodymium pada layar Teslameter.

#### b. Pemberian tegangan pada motor

Pada penelitian ini tegangan yang diberikan pada motor sebesar 12 volt sampai 24 volt. Tegangan didapatkan dari *power supply* yang dihubungkan ke *kit driver motor*.

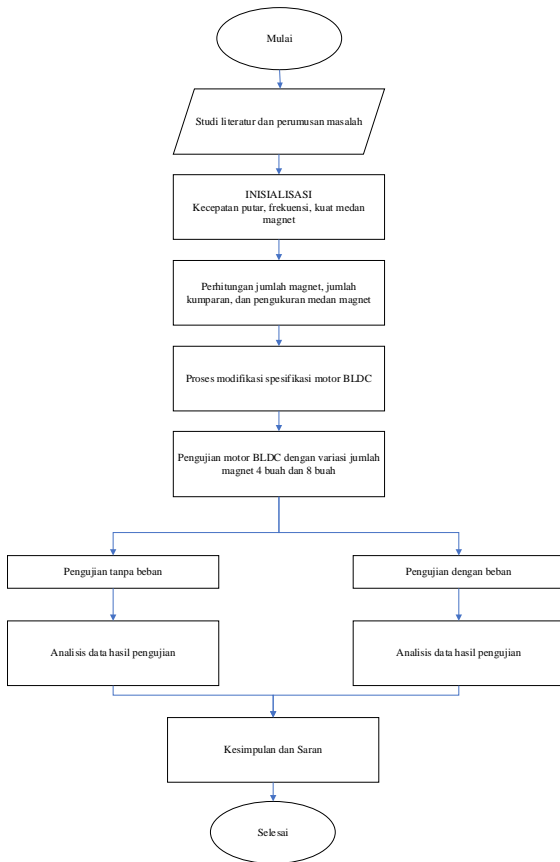
#### c. Pengukuran kinerja motor

Pengukuran pada motor *brushless direct current* aksial fluks 3 fasa yaitu dengan mengukur pada setiap variasi tegangan menggunakan *multimeter*, kemudian setelah motor berputar akan diukur kecepatannya menggunakan *tachometer*,



setelah itu arus dan tegangan pada motor diukur dengan *multimeter*, untuk arus diukur secara seri dan tegangan secara paralel. Setelah mendapatkan data tegangan, arus, dan kecepatan (RPM) maka dapat dihitung daya dan torsi.

D. Tahapan Penelitian



Gambar 5. Flowchart Penelitian

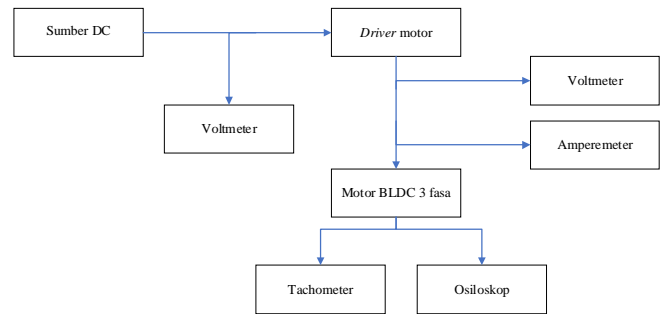
Tahapan yang dilakukan pada penelitian perancangan dan pembuatan motor BLDC aksial fluks:

1. Studi literatur  
Pencarian literature dari hasil penelitian sebelumnya, buku maupun internet bertujuan untuk mengetahui karakteristik komponen, prinsip kerja serta teori yang menunjang lainnya guna diterapkan pada penelitian yang akan dilakukan. Setelah didapatkan literature yang sesuai selanjutnya adalah menentukan rumusan masalah dan juga dilakukan inialisasi data – data yang akan digunakan pada penelitian, antara lain kecepatan putar, frekuensi, dan kuat medan magnet.
2. Melakukan perancangan motor BLDC meliputi menentukan jumlah magnet, jumlah kumparan dan melakukan pengukuran medan magnet. Luaran motor adalah 3 fasa, untuk menentukan jumlah magnet digunakan persamaan:  
 $N_s = (p \cdot N_{ph})/2$
3. Melakukan modifikasi terhadap motor BLDC  
Memodifikasi motor BLDC dari penelitian terdahulu menjadi memiliki diameter stator 95 mm dan rotor 80 mm serta memiliki 6 kumparan. Magnet menggunakan

Neodymium bentuk koin dengan ukuran 20x3 mm sebanyak 4 (empat) magnet dan 8 (delapan) magnet.

4. Pengujian motor BLDC Aksial Fluks  
Menguji performa motor tersebut dan mendapatkan data yang akan dipakai. Pengujian dilakukan dalam keadaan berbeban yaitu dikopel dengan generator dan ditambah resistor dan ketika tanpa beban, serta dalam dua kondisi yaitu menggunakan rotor dengan 4 magnet dan rotor dengan 8 magnet.
5. Penarikan kesimpulan  
Pada tahapan akhir penelitian, hasil pengambilan data dan perhitungan dimasukkan ke pembahasan. Kemudian, dapat ditarik beberapa kesimpulan yang menyangkut kinerja dari alat yang telah dibuat.

E. Blok Diagram



Gambar 6. Blok Diagram Sistem

Prinsip kerja dari penelitian ini dapat digambarkan pada blok diagram seperti gambar 6. Sumber yang digunakan adalah sumber DC yang berasal dari *power supply*. Pada motor *brushless direct current* aksial fluks 3 fasa, digunakan rotor yang terdapat magnet di tengahnya dan terdapat stator tunggal di bagian bawah. Di antara sumber DC dan driver motor diukur tegangan masukan, kemudian dari driver motor ke motor BLDC diukur tegangan luaran motor dan arus masukan. Pengukuran dari motor BLDC 3 fasa diberi tachometer untuk mengukur kecepatan putar dan osiloskop untuk mengukur frekuensi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

TABEL 1  
SPESIFIKASI MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* 3 FASA AKSIAL FLUKS

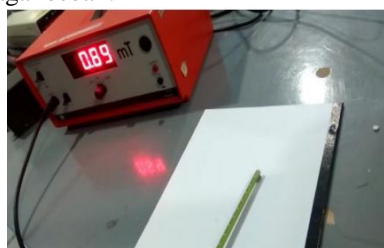
Parameter	Simbol	Nilai
Jumlah fasa	$N_{ph}$	3 fasa
Medan Magnet	$B_r$	0,089 T
Dimensi Magnet	$r$	1 cm
	$l_m$	0,3 cmm
Ukuran Rotor	$D$	8 cm
Jari - jari Rotor	$r$	4 cm
Ukuran Stator	$D$	9,5 cm
Jumlah Lilitan (tiap kumparan)	$N$	450
Jumlah Kumparan	$N_s$	6
Jumlah Magnet	$N_m 1$	4 buah
	$N_m 2$	8 buah

Diameter Kawat Email	D	0,3 mm
Inti Besi	Ya	
Lebah Celah Udara	$\delta$	5 mm
Jarak antar magnet	$\tau f1$	35,00 mm
	$\tau f2$	26,79 mm

TABEL 2  
 SPESIFIKASI GENERATOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT 3 FASA AKSIAL FLUKS DOUBLE STATOR

Parameter	Simbol	Nilai
Jumlah fasa	Nph	3 fasa
Medan magnet	Br	0,089 T
Ukuran Magnet	r	0,75 cm
	lm	2 cm
Ukuran Rotor	D	7,2 cm
Ukuran stator	p	8 cm
	l	8 cm
Diamter kawat	D	0,5 mm
Jarak antar magnet	$\tau f$	2 cm
Jumlah magnet	Nm	8 buah
Jumlah lilitan (tiap kumparan)	N	375 lilitan
Jumlah kumparan	Ns	12 kumparan
Inti besi	Ya	
Lebar celah udara	$\delta$	0,4 mm

Tabel 1 menunjukkan spesifikasi motor brushless direct current yang digunakan pada penelitian dan tabel 2 menunjukkan spesifikasi generator yang digunakan pada penelitian sebagai beban.



Gambar 7. Pengujian Medan Magnet



Gambar 8. Motor Brushless Direct Current 3 Fasa Aksial Fluks



Gambar 9. Motor Brushless Direct Current 3 Fasa Aksial Fluks dikopel dengan Generator Tampak Depan

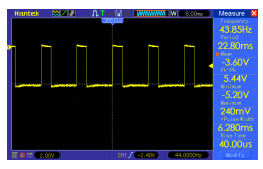
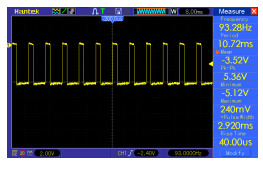
Gambar 7 menunjukkan hasil pengukuran medan magnet yaitu senilai 0,89 mT, gambar 8 menunjukkan motor brushless direct current 3 fasa aksial fluks tampak depan dan saat tidak berbeban. Pada gambar tersebut juga ditunjukkan penempatan 3 sensor hall effect di antara stator dan rotor. Gambar 9 menunjukkan motor brushless direct current 3 fasa aksial fluks saat dikopel dengan generator brushless direct current.

A. Pengujian Motor Brushless Direct Current 3 Fasa Aksial Fluks tanpa Beban

TABEL 3  
 HASIL PENGUJIAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN 4 MAGNET TANPA BEBAN

Tegangan Sumber (V)	Arus Motor (mA)	Tegangan Line to Line (V)	Torsi (Nm)	Daya (W)
12	121	7,78	$7,3 \times 10^{-4}$	0,098
24	181	15,24	$1,09 \times 10^{-3}$	0,319

TABEL 4  
 GRAFIK FREKUENSI PENGUJIAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN 4 MAGNET TANPA BEBAN

Tegangan Masukan (V)	Kecepatan Putar (RPM)	Frekuensi (Hz)	Gelombang
12	1289	43,85	
24	2794	93,28	

Hasil pengujian saat tidak berbeban menggunakan 4 magnet ditunjukkan tabel 3. Ketika tegangan masukan makin tinggi, maka nilai tegangan luaran makin tinggi diikuti peningkatan nilai kecepatan putar motor dan nilai torsi. Nilai kecepatan putar motor mempengaruhi nilai frekuensi, seperti ditunjukkan pada tabel 4. Makin tinggi nilai frekuensi motor maka sinyal akan makin rapat, sehingga sinyal pada tegangan

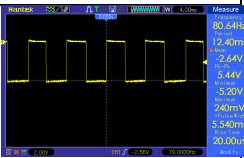
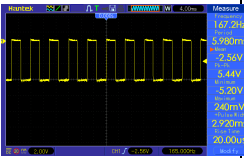


masukannya 24 volt lebih rapat dibandingkan saat tegangan masukannya 12 volt.

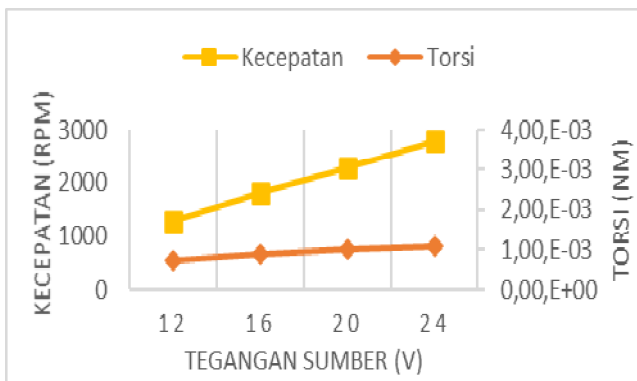
TABEL 5  
HASIL PENGUJIAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN 8 MAGNET TANPA BEBAN

Tegangan Sumber (V)	Arus Motor (mA)	Tegangan Line to Line (V)	Torsi (Nm)	Daya (W)
12	91,37	8,09	$2,21 \times 10^{-3}$	0,276
24	140,04	16,29	$3,38 \times 10^{-3}$	0,879

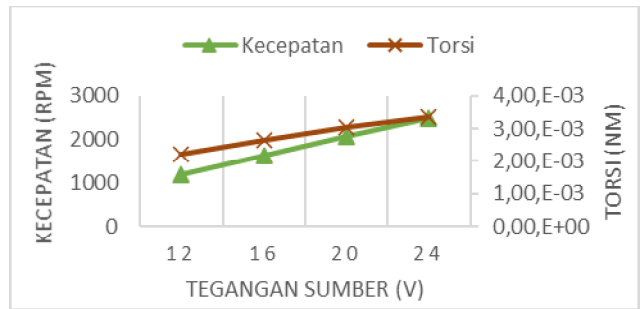
TABEL 6  
GRAFIK FREKUENSI PENGUJIAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN 8 MAGNET TANPA BEBAN

Tegangan Masukan (V)	Kecepatan Putar (RPM)	Frekuensi (Hz)	Gelombang
12	1197	80,64	
24	2484	167,2	

Hasil pengujian motor saat tidak berbeban dan menggunakan 8 magnet ditunjukkan pada tabel 5. Nilai - nilai parameter saat pengujian juga makin naik saat nilai tegangan masukannya makin tinggi. Dibandingkan dengan pengujian menggunakan 4 magnet, pengujian menggunakan 8 magnet memiliki nilai torsi yang lebih tinggi namun memiliki nilai kecepatan putar yang lebih rendah. Perbedaan ini terlihat jelas jika ditunjukkan dalam bentuk grafik seperti gambar 10 dan gambar 11.



Gambar 10. Grafik Hubungan Kecepatan Putar Motor dengan Torsi pada Pengujian tanpa Beban menggunakan 4 Magnet



Gambar 11. Grafik Hubungan Kecepatan Putar Motor dengan Torsi pada Pengujian tanpa Beban menggunakan 8 Magnet

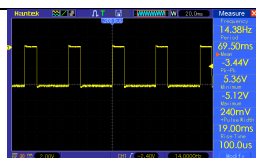
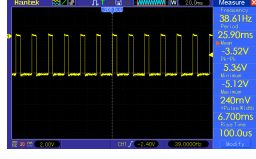
Grafik pada gambar 10 menunjukkan hubungan nilai torsi dan kecepatan putar motor saat pengujian dengan 4 magnet tanpa beban. Nilai kecepatan yang dihasilkan cukup tinggi yaitu maksimal 2794 RPM, merupakan nilai tertinggi dari semua pengujian dan nilai torsi maksimal yaitu  $1,09 \times 10^{-3}$  Nm. Gambar 11 menunjukkan grafik hubungan nilai torsi dan kecepatan putar motor saat menggunakan 8 magnet tanpa beban. Grafik menunjukkan nilai torsi yang lebih tinggi dibandingkan pada gambar 10. Maka saat pengujian dengan 8 magnet dihasilkan nilai torsi yang lebih tinggi namun nilai kecepatan lebih rendah jika dibandingkan dengan pengujian menggunakan 4 magnet. Karena nilai torsi dipengaruhi oleh jumlah magnet, sehingga makin banyak magnet yang digunakan akan menghasilkan nilai torsi yang makin tinggi.

B. Pengujian Motor Brushless Direct Current 3 Fasa Aksial Fluks dikopel dengan Generator

TABEL 7  
HASIL PENGUJIAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT 3 FASA AKSIAL FLUKS MENGGUNAKAN 4 MAGNET NEODYMIUM DIKOPEL DENGAN GENERATOR

Tegangan Sumber (V)	Arus Motor (mA)	Tegangan Line to Line (V)	Torsi (Nm)	Daya (W)
12	213	7,07	$1,29 \times 10^{-3}$	0,060
24	373	15,09	$2,25 \times 10^{-3}$	0,276

TABEL 8  
GRAFIK FREKUENSI PENGUJIAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN 4 MAGNET DIKOPEL DENGAN GENERATOR

Tegangan Masukan (V)	Kecepatan Putar (RPM)	Frekuensi (Hz)	Gelombang
12	448	14,38	
24	1171	38,61	

Pengujian selanjutnya yaitu motor dikopel dengan generator, dimana generator difungsikan sebagai beban. Pengujian pertama motor menggunakan 4 magnet dihasilkan data seperti pada tabel 7. Nilai torsi maksimal yang dihasilkan adalah  $2,25 \times 10^{-3}$  Nm dan kecepatan putar maksimal yang dihasilkan adalah 1171 RPM. Pada tabel 8 menunjukkan bahwa semakin besar nilai tegangan masukan, maka nilai frekuensi juga semakin besar dan sinyal semakin rapat.

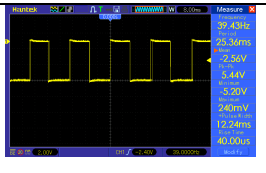
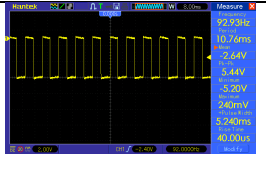
TABEL 9

HASIL PENGUJIAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT 3 FASA AKSIAL FLUKS MENGGUNAKAN 8 MAGNET NEODYMIUM DIKOPEL DENGAN GENERATOR

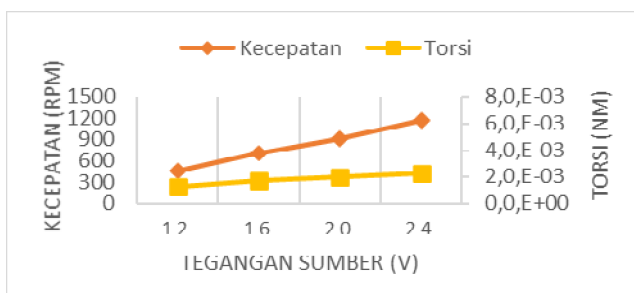
Tegangan Sumber (V)	Arus Motor (mA)	Tegangan Line to Line (V)	Torsi (Nm)	Daya (W)
12	196	7,67	$4,7 \times 10^{-3}$	0,288
24	308	16,41	$7,4 \times 10^{-3}$	1,097

TABEL 10

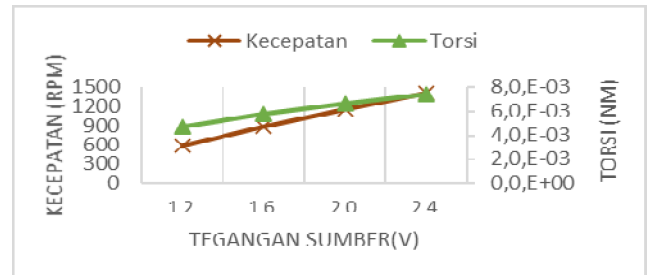
GRAFIK FREKUENSI PENGUJIAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN 8 MAGNET DIKOPEL DENGAN GENERATOR

Tegangan Masukan (V)	Kecepatan Putar (RPM)	Frekuensi (Hz)	Gelombang
12	581	39,43	
24	1410	92,93	

Pengujian selanjutnya adalah pengujian motor menggunakan 8 magnet dikopel dengan generator. Data hasil pengujian ditunjukkan pada tabel 9. Pada pengujian ini nilai data yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan saat pengujian menggunakan 4 magnet dengan beban. Perbandingan dengan grafik ditunjukkan pada gambar 12 dan gambar 13.



Gambar 12. Grafik Hubungan Kecepatan Putar Motor dengan Torsi pada Pengujian dengan Kopel Generator menggunakan 4 Magnet



Gambar 13. Grafik Hubungan Kecepatan Putar Motor dengan Torsi pada Pengujian dengan Kopel Generator menggunakan 8 Magnet

Gambar 12 menunjukkan grafik hubungan torsi dan kecepatan putar saat pengujian motor menggunakan 4 magnet dikopel dengan generator. Jika dibandingkan dengan gambar 13 yaitu grafik hubungan torsi dan kecepatan putar saat pengujian motor menggunakan 8 magnet dikopel dengan generator, pengujian saat menggunakan 4 magnet menghasilkan nilai torsi dan kecepatan yang lebih rendah. Nilai torsi tertinggi pada semua pengujian dihasilkan saat pengujian menggunakan 8 magnet dikopel dengan generator, yaitu  $7,4 \times 10^{-3}$  Nm.

#### IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah:

- Hasil pengujian dari motor dengan jumlah magnet yang berbeda, pada pengaplikasian motor sebagai *prime mover* generator ketika menggunakan 4 magnet hasilnya kurang maksimal karena menghasilkan nilai torsi yang kecil yaitu  $2,25 \times 10^{-3}$  Nm, sedangkan ketika menggunakan 8 magnet motor sebagai *prime mover* generator bekerja secara maksimal dengan nilai torsi paling tinggi dari semua pengujian yaitu  $7,4 \times 10^{-3}$  Nm.
- Hasil pengujian *prototype* motor *brushless direct current* 3 fasa aksial fluks sebagai *prime mover* generator menggunakan magnet *Neodymium* dalam keadaan berbeban dan tanpa beban berhasil dilakukan dengan hasil ketika motor dalam keadaan tidak berbeban didapatkan nilai kecepatan putar tertinggi dari semua pengujian yaitu 2794 RPM saat pengujian menggunakan 4 magnet, sedangkan ketika pengujian berbeban nilai kecepatan putar motor maksimal adalah 1410 RPM. Sehingga nilai kecepatan putar tertinggi yaitu saat motor dslam keadaan tidak berbeban.

#### REFERENSI

- Prabowo, Susetyo Edi et al. 2018. *Handbook of Energy & Economic Statistics*. Indonesia: Ministry of Energy and Mineral Resources.
- Naser Azizi, Reihaneh Kardehi Moghaddam. 2013. *Permanent Magnet Brushless DC Motor Optimal Design and Determination of Optimum PID Controller Parameters for the Purpose of Speed Control by Using the TLBO Optimization Algorithm*. *American Journal of Research Communication*.
- Bagia, I Nyoman dkk. 2018. *Motor - Motor Listrik*. Kupang: CV Rasi Terbit.
- Gifary, Heristo Bramasta. 2017. *Rancang Bangun Motor BLDC Tiga Fasa Sensorless dengan Tipe Konstruksi Out-Runner*. Jember: Universitas Jember.



- [5]. Zainal, Nur Roin. 2018. Pengaruh Posisi Sudut Optimum *Reed Switch* pada Motor *Brushless DC Axial Flux*. Jember: Universitas Jember.
- [6]. Bashir Sheikh, Priti. S. 2016. *Manware Brushless DC Motor Design for Electric Traction System*. *Journal for Research*.
- [7]. Nidec. 2019. *Brushless DC Motors Exhibit Reduced Energy Use, Long Life, Low Noise, Compact Size and Light Weight Characteristics* diakses tanggal 9 Desember 2020, dari Nidec Corporation: <https://www.nidec.com/en/technology/capability/brushless>
- [8]. Hill, A. (2019, Oktober 29<sup>th</sup>). *What are Neodymium Magnets?*. B. Haris, Editor) diakses tanggal 9 Desember 2020, dari Wisegeek: <https://www.wisegeek.com/what-are-neodymium-magnets.htm>
- [9]. Janardana, Gede Bayu Anugrah. 2015. Desain dan Analisis Motor *Axial Flux Brushless DC* Berbasis 3D *Finite Element Method* untuk Aplikasi Kendaraan Listrik. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [10]. Simsir, N. B., & Erthan. H. B. 1999. *A Comparison of Torque Capabilities of Axial Flux and Radial Flux Type of Brushless DC (BLDC) Drives for Wide Speed Range Applications*. (1999 *International Conference on Power Electronics and Drive Systems*). Hongkong: IEEE.
- [11]. Clemens, K. (2018, Mei 23<sup>rd</sup>). *A New Generation of Axial Flux EV Motors*. Diakses tanggal 9 Desember 2020, dari Magnax: <https://www.magnax.com/blog/a-new-generation-of-axial-flux-evmotors>
- [12]. Aydin, M. 2008. *Magnet Skew in Cogging Torque Minimization of Axial Gap Permanent Magnet Motors*. (18th *International Conference of Electrical Machines*). Vilmoura: IEEE.
- [13]. Alberti, L., & Berardi, G. 2018. *Design of a Low Power Synchronous Motor for High Efficiency Applications*. XIII *International Conference Electrical Machines (ICEM)*. Alexandroupoli: IEEE.
- [14]. Dharmawan, Abe. 2009. Pengendali Motor DC *Brushless* dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATMega 16. Depok: Universitas Indonesia.
- [15]. Reqzy, Muhammad. 2019. Rancang Bangun Motor *Brushless Direct Current 3 Phase Fluks Axial*. Jember: Universitas Jember.
- [16]. Krstic, M. (2011, Desember 21<sup>st</sup>). *Axial Flux Motor*. Diakses tanggal 9 Desember 2020 dari Flyingv: [http://flyingv.ucsd.edu/nima/Axial\\_Flux/Axial\\_Flux.html](http://flyingv.ucsd.edu/nima/Axial_Flux/Axial_Flux.html)
- [17]. Nurtiantono, Agus. 2014. Rancang Bangun Dan Uji Performa Axial Brushless DC Motor Dengan Daya Output 2000 Watt. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [18]. Nama, T., Gogoi, A.K., & Tripathy, P. 2017. *Application of a Smart Hall Effect Sensor System for 3-phase BLDC Drives*. 2017 *IEEE Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*. Ottawa: IEEE.
- [19]. Miller, Tje. 1994. *Design of Brushless Permanent-Magnet Motor*. Oxford: Oxford University Press.
- [20]. Chapman, S. J. 2012. *Electric Machinery Fundamentals, 5th Edition*. Melbourne: McGraw-Hill.