

Unjuk Kerja Motor *Brushless Direct Current* 3 Phase Tipe *Axial Flux* dengan Perbedaan Bentuk Magnet *Neodymium*

Eka Fitrianiingsih Adelina

ekaadelina20@gmail.com
Universitas Jember

Widyono Hadi

widyono@unej.ac.id
Universitas Jember

Andi Setiawan

setiawan.teknik@unej.ac.id
Universitas Jember

Abstrak

Meningkatnya penggunaan kendaraan konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil berdampak pada lingkungan. Salah satu solusi dari masalah tersebut yaitu dengan merubah mesin penggerak utamanya dari motor bakar yang berbahan bakar fosil menjadi motor listrik. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh perbedaan magnet terhadap kinerja motor BLDC. Pada penelitian ini menggunakan magnet *neodymium* dengan penampang berbentuk persegi dengan ukuran 15 mm x 15 mm x 5 mm dan 10 mm x 10 mm x 2 mm. Pengujian pada penelitian ini juga dilakukan dengan memberikan variasi tegangan sumber sebesar 11 V hingga 24 V. Metode pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan dua cara yaitu dengan pengukuran dan perhitungan. Dari pengukuran didapat data berupa nilai arus sumber, V_{pp} , frekuensi, dan kecepatan motor. Sedangkan dari perhitungan, didapat data berupa nilai tegangan motor, arus motor, daya input, daya *output*, efisiensi daya, kecepatan hitung, error persen kecepatan, dan torsi motor. Pengujian pada penelitian ini dilakukan sebanyak empat kali. Dari keempat pengujian yang dilakukan, pengujian dengan hasil performa motor terbaik terdapat pada pengujian motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* ketika nilai tegangan sumber dan frekuensi berbeda.

Kata Kunci — axial flux, magnet neodymium, motor BLDC

Abstract

The increasing use of conventional vehicles using fossil fuels has an impact on the environment. One solution to the problem is to convert its main drive engine from a fossil fuel motor into an electric motor. The purpose of this study is to determine the influence of magnetic differences on BLDC motor performance. In this study, neodymium magnets with a square-shaped cross-section with a size of 15 mm x 15 mm x 5 mm and 10 mm x 10 mm x 2 mm. Testing in this study was also conducted by providing a variety of source voltages of 11 V to 24 V. The data collection method in this study uses two ways, namely by measurement and calculation. From the measurement obtained data in the form of the value of the source

current, V_{pp} , frequency, and speed of the motor. While from the calculation, in the form of data in the form of motor voltage value, motor current, input power, output power, power efficiency, calculate speed, error percent speed, and torque motor. The tests in this study were conducted four times. Of the four tests conducted, testing with the best motor performance results is found in BLDC 3 ϕ *axial Flux* motor tests when the source voltage and frequency values differ.

Keywords — axial flux, neodymium magnet, BLDC motor

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi di bidang transportasi khususnya pada kendaraan listrik berkembang cukup pesat. Meningkatnya penggunaan kendaraan konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil berdampak pada lingkungan. Kerusakan ekosistem timbul karena emisi gas buang yang dihasilkan oleh pembakaran motor bakar [1]. Salah satu solusi dari masalah tersebut yaitu dengan merubah mesin penggerak utamanya dari motor bakar yang berbahan bakar fosil menjadi motor listrik. Penggunaan motor listrik akan menghemat penggunaan Bahan Bakar Minyak dan impor BBM akan berkurang. [2]

Motor listrik merupakan alat konversi energi listrik menjadi energi mekanik. [3]. Berdasarkan sumber tegangannya, motor listrik dibedakan menjadi dua yaitu motor AC dan motor DC. Dari beberapa kelemahan yang terdapat pada motor DC membuat motor BLDC (*Brushless direct current*) dipilih sebagai salah satu alternatif. Sebenarnya, motor BLDC merupakan motor sinkron AC 3 fasa tetapi motor ini tetap disebut dengan BLDC karena sumber energi utama yang digunakan adalah sumber DC yang nantinya diubah menjadi tegangan AC oleh inverter 3 fasa [4].

Pada penelitian ini menggunakan magnet *neodymium* dengan penampang berbentuk persegi dengan ukuran 15 mm x 15 mm x 5 mm dan 10 mm x 10 mm x 2 mm. Jumlah kumparan pada stator sebanyak 6 buah dan magnet permanen yang digunakan pada masing-masing rotor sebanyak 8 magnet. Jumlah lilitan yang digunakan pada tiap-tiap kumparan stator sebanyak 450 lilitan dengan menggunakan kawat email berukuran 0,3 mm.

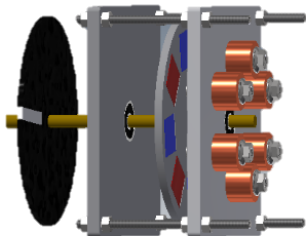
Penelitian ini dilakukan dengan menguji kinerja motor saat motor BLDC 3 ϕ *axial flux* menggunakan magnet dengan dimensi 15 mm x 15 mm x 5 mm dan magnet dengan dimensi 10 mm x 10 mm x 2 mm. Pengujian pada penelitian ini juga dilakukan dengan memberikan variasi tegangan sumber sebesar 11 V hingga 24 V. Metode pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan dua cara yaitu dengan pengukuran dan perhitungan. Dari pengukuran didapat data berupa nilai arus sumber, V_{pp} , frekuensi, dan kecepatan motor. Sedangkan dari perhitungan, didapat data berupa nilai tegangan motor, arus motor, daya *input*, daya *output*, efisiensi daya, kecepatan hitung, error persen kecepatan, dan torsi motor. Pengujian pada penelitian ini dilakukan sebanyak empat kali.

II. METODE PENELITIAN

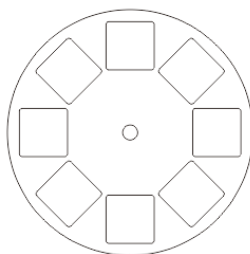
A. Desain Alat

Perancangan motor *brushless direct current 3 phase flux axial* ini menggunakan rotor dan stator tunggal. Kumparan pada stator diletakkan berhadapan langsung dengan magnet pada rotor. *Air gap* atau jarak antar rotor dan stator disesuaikan dengan penelitian sebelumnya. Rancangan motor terdiri dari stator, rotor, as motor, dan encoder.

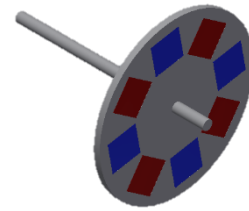
Pada rotor ini menggunakan magnet neodmium sebanyak 8 buah sehingga jumlah pole yang digunakan yaitu sebanyak 8 pole. Magnet neodmium yang digunakan mempunyai panjang 15 mm, lebar 15 mm, dan tebal 5 mm dan pada magnet lainnya mempunyai panjang 10 mm, lebar 10 mm, dan tebal 2 mm. Diameter piringan rotor di desain sebesar 8,2 cm dengan tebal 5 mm. Penempatan magnet neodmium disesuaikan dengan piringan rotor dengan jarak dari diameter luar sebesar 7 mm dan jarak antar magnet membentuk sudut 45°. Untuk desain dari rotor dapat dilihat pada gambar 2-5.



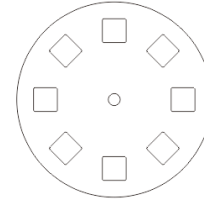
Gbr 1. Desain 3D Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux Secara Keseluruhan



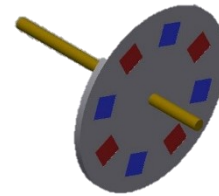
Gbr 2. Desain 2D Rotor Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux



Gbr 3. Desain 3D Rotor Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux Magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm

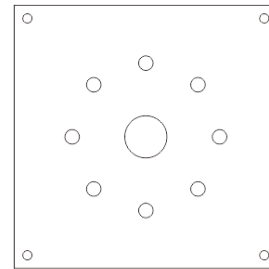


Gbr 4. Desain 2D Rotor Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux Magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm



Gbr 5. Desain 3D Rotor Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux Magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm

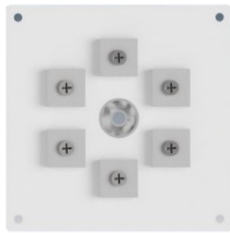
Bagian stator pada motor BLDC ini memiliki 6 kumparan, dimana pada setiap kumparannya terdiri dari 450 lilitan. Kawat email yang digunakan memiliki diameter 0,3 mm. Piringan stator terbuat dari bahan akrilik dengan ketebalan 5 mm dan berukuran 10 cm x 10 cm. Untuk desain stator dapat dilihat pada gambar 6-8.



Gbr 6. Desain 2D Stator Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux



Gbr 7. Desain 3D Stator Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux Tampak Belakang



Gbr 8. Desain 3D Stator Motor BLDC 3φ Axial Flux Tampak Depan

B. Metode Pengumpulan Data

1) Pengukuran

Pengujian motor BLDC 3φ axial Flux dengan perbedaan bentuk magnet ini dilakukan dengan memberikan tegangan sumber sebesar 11 V hingga 24 V. Parameter yang diukur dalam pengujian ini yaitu nilai tegangan sumber, arus sumber, V_{pp} , frekuensi, dan kecepatan motor. Arus dan tegangan motor diukur menggunakan *multimeter digital* sedangkan kecepatan motor diukur menggunakan *tachometer* dimana pada motor telah dipasang encoder sebagai media dalam pembacaan kecepatan putaran motor.

2) Perhitungan

Berdasarkan hasil pengukuran yang telah diperoleh, dapat dilakukan perhitungan nilai tegangan motor, arus motor, daya input, daya output, efisiensi daya, kecepatan hitung, error persen kecepatan, dan torsi motor. Dari data hasil pengukuran nilai frekuensi dan jumlah pole yang digunakan, dapat diperoleh nilai kecepatan putaran motor sesuai dengan persamaan berikut.

$$N_r = \frac{120 f}{p} \tag{1}$$

Nilai torsi diperoleh dari perhitungan daya output dibagi dengan nilai kecepatan sudut seperti persamaan di bawah ini.

$$T = \frac{P_{out}}{\omega} \tag{2}$$

Tegangan motor pada penelitian ini sama dengan tegangan *root mean square* atau V_{rms} . Nilai V_{rms} dapat dirumuskan dengan persamaan di bawah ini :

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \tag{3}$$

Reaktansi induktif dirumuskan pada persamaan berikut.

$$X_L = 2\pi fL \tag{4}$$

Impedansi ini dilambangkan dengan Z. Persamaan dari impedansi sebagai berikut :

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \tag{5}$$

Arus motor pada penelitian ini sama dengan *arus root mean square*. Untuk rumus arus motor dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z} \tag{6}$$

Perhitungan daya yang digunakan pada penelitian ini ada dua yaitu daya input dan daya output. Untuk daya input merupakan hasil perkalian dari tegangan sumber dan arus sumber sesuai dengan persamaan di bawah ini.

$$P_{in} = V_{sumber} I_{sumber} \tag{7}$$

Untuk nilai daya output diperoleh dari perkalian antara nilai tegangan motor, arus motor dan $\sqrt{3}$ seperti pada persamaan berikut.

$$P_{out} = V_{rms} I_{rms} \sqrt{3} \tag{8}$$

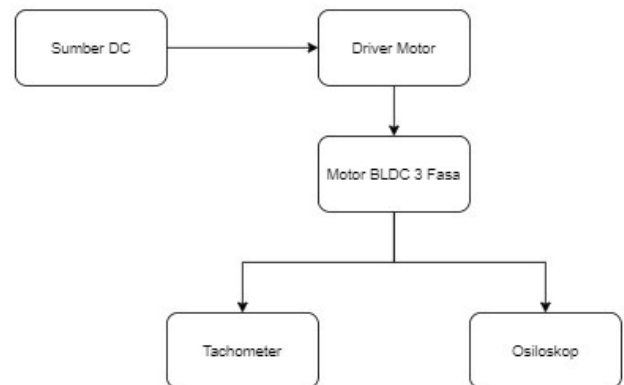
Dari hasil perhitungan nilai daya input dan daya output dapat dihitung nilai efisiensi seperti persamaan berikut.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \tag{9}$$

Error persen kecepatan yang dihasilkan dirumuskan dengan persamaan di bawah ini.

$$E\% = \left| \frac{H_p - H_T}{H_T} \right| \times 100\% \tag{10}$$

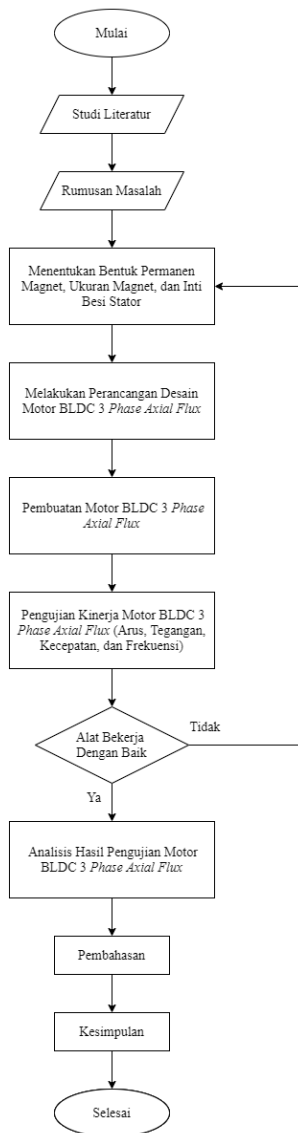
C. Blok Diagram



Gbr 9. Blok Diagram Sistem

Blok diagram (Gambar 9) menggambarkan prinsip kerja dari motor *brushless direct current* 3 phase axial Flux menggunakan magnet dengan bentuk penampang persegi. Sumber tegangan yang digunakan yaitu sumber tegangan DC yang berasal dari power supply atau catu daya. Power supply ini dihubungkan dengan driver motor dan driver motor sendiri.

D. Tahapan Penelitian



Gbr 10. Flowchart Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pada penelitian ini dilakukan sebanyak empat kali. Pengujian yang pertama yaitu ketika nilai tegangan sumber berbeda dan nilai frekuensi sama. Pengujian kedua yaitu ketika nilai frekuensi berbeda dan nilai tegangan sumber sama. Pengujian yang ketiga yaitu ketika nilai tegangan sumber dan frekuensi berbeda. Serta pengujian yang keempat yaitu ketika nilai tegangan sumber dan frekuensi sama. Pengujian pada penelitian ini juga dilakukan dengan memberikan variasi tegangan sumber sebesar 11 V hingga 24 V. Metode pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan dua acara yaitu dengan pengukuran dan perhitungan.

A. Pengujian Motor BLDC 3 ϕ Tipe Axial Flux Ketika Nilai Tegangan Sumber Berbeda dan Frekuensi Sama

TABEL I
HASIL PENGUKURAN MOTOR BLDC 3 Φ AXIAL FLUX MAGNET 15 MM X 15 MM X 5 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER BERBEDA DAN FREKUENSI SAMA

Vs (V)	Is (A)	Vpp (V)	f (Hz)	Nr (rpm)
11	0,2	6,48	20,24	313,2
12	0,18	6,32	20,61	307,2
13	0,17	6,32	20,4	306,9
14	0,16	6,48	20,57	304,8
15	0,16	6,64	20,4	304,3
16	0,15	6,4	20,24	306,8
17	0,15	6,4	20,97	303,6
18	0,14	6,56	20,93	302,4
19	0,13	6,56	20,66	303,4
20	0,12	6,64	20,64	302
21	0,12	6,48	20,16	301,5
22	0,11	6,48	20,64	300,6
23	0,11	6,64	20,79	300,4
24	0,11	6,48	20,21	298

TABEL II
HASIL PENGUKURAN MOTOR BLDC 3 Φ AXIAL FLUX MAGNET 10 MM X 10 MM X 2 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER BERBEDA DAN FREKUENSI SAMA

Vs (V)	Is (A)	Vpp (V)	f (Hz)	Nr (rpm)
11	0,11	6,56	120,1	1829
12	0,1	6,8	120,6	1811
13	0,1	6,72	120,6	1793
14	0,1	6,72	120,4	1791
15	0,1	6,64	120,3	1786
16	0,09	6,64	120,9	1785
17	0,09	6,8	120,7	1782
18	0,08	6,8	120,1	1777
19	0,08	6,8	120,7	1783
20	0,08	7,04	120,7	1786
21	0,08	6,88	120,6	1790
22	0,08	6,88	120,7	1795
23	0,08	6,8	120,9	1798
24	0,07	6,88	120,3	1803

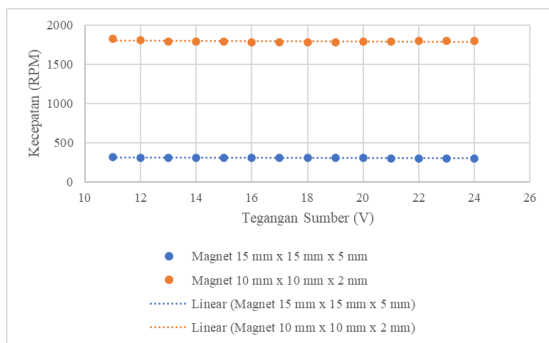
TABEL III
HASIL PERHITUNGAN MOTOR BLDC 3 Φ AXIAL FLUX MAGNET 15 MM X 15 MM X 5 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER BERBEDA DAN FREKUENSI SAMA

Vs (V)	Nr (rpm)	Vm (V)	Im (A)	T (m-Nm)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
11	303,6	2,291	0,104	12,598	2,2	0,413	18,790
12	309,15	2,234	0,102	12,210	2,16	0,393	18,193
13	306	2,234	0,102	12,227	2,21	0,393	17,788
14	308,55	2,291	0,104	12,938	2,24	0,413	18,444
15	306	2,347	0,107	13,611	2,4	0,434	18,080
16	303,6	2,262	0,103	12,546	2,4	0,403	16,801
17	314,55	2,262	0,103	12,662	2,55	0,403	15,793
18	313,95	2,319	0,105	13,356	2,52	0,423	16,791
19	309,9	2,319	0,105	13,319	2,47	0,423	17,139
20	309,6	2,347	0,107	13,709	2,4	0,434	18,072
21	302,4	2,291	0,104	13,089	2,52	0,413	16,406
22	309,6	2,291	0,104	13,117	2,42	0,413	17,070

Vs (V)	Nr (rpm)	Vm (V)	Im (A)	T (m-Nm)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
23	311,85	2,347	0,107	13,779	2,53	0,434	17,139
24	303,15	2,291	0,104	13,242	2,64	0,413	15,659

TABEL IV
HASIL PERHITUNGAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 10 MM X 10 MM X 2 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER BERBEDA DAN FREKUENSI SAMA

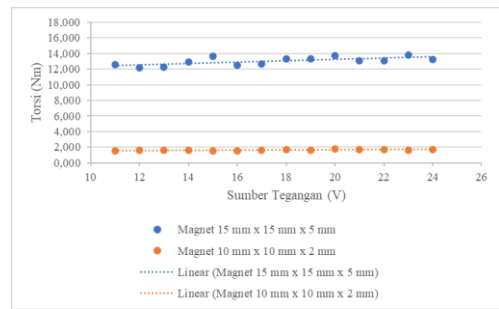
Vs (V)	Nr (rpm)	Vm (V)	Im (A)	T (m-Nm)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
11	1801,5	2,319	0,071	1,494	1,21	0,286	23,655
12	1809	2,404	0,074	1,617	1,2	0,307	25,570
13	1809	2,376	0,073	1,595	1,3	0,300	23,051
14	1806	2,376	0,073	1,599	1,4	0,300	21,425
15	1804,5	2,347	0,072	1,566	1,5	0,293	19,532
16	1813,5	2,347	0,072	1,562	1,44	0,292	20,289
17	1810,5	2,404	0,074	1,643	1,53	0,307	20,046
18	1801,5	2,404	0,074	1,652	1,44	0,308	21,358
19	1810,5	2,404	0,074	1,642	1,52	0,307	20,178
20	1810,5	2,489	0,076	1,757	1,6	0,329	20,546
21	1809	2,432	0,075	1,675	1,68	0,314	18,697
22	1810,5	2,432	0,075	1,670	1,76	0,314	17,839
23	1813,5	2,404	0,074	1,627	1,84	0,306	16,653
24	1804,5	2,432	0,075	1,665	1,68	0,315	18,723



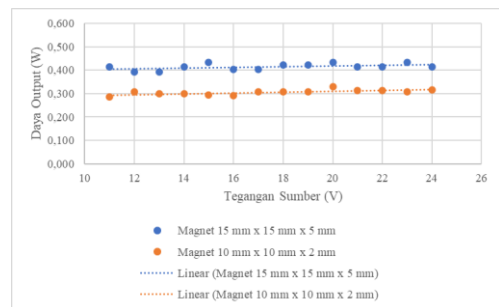
Gbr 11. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Kecepatan Motor BLDC 3φ Axial Flux

Ketika nilai tegangan sumber semakin besar dan frekuensi tetap, dapat diketahui bahwa nilai kecepatan motor yang didapatkan konstan dikarenakan nilai frekuensi diatur tetap. Dapat dilihat pada Gambar 11 terlihat bahwa pada motor dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm nilai kecepatan konstan pada range 300 rpm dan pada motor dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm nilai kecepatan konstan pada range 1800 rpm. Jika dilihat dari garis *trendline* maka hubungan antara sumber tegangan dan kecepatan saat tegangan sumber dan frekuensi sama tidak berpengaruh.

Pada Gambar 12 jika dilihat dari garis *trendline* dapat diketahui bahwa hubungan antara sumber tegangan dan torsi saat tegangan sumber berbeda dan frekuensi sama pada motor dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm dan dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm tidak berpengaruh. Artinya, semakin besar nilai tegangan sumber maka nilai torsi yang dihasilkan tetap atau konstan.



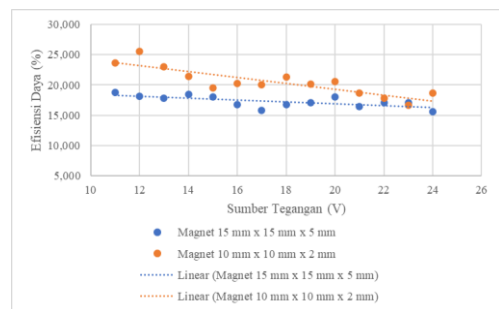
Gbr 12. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Torsi Motor BLDC 3φ Axial Flux



Gbr 13. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Daya Output Motor BLDC 3φ Axial Flux

Pada Gambar 13 jika dilihat dari garis *trendline* dapat diketahui hubungan antara tegangan sumber dan daya *output* pada motor BLDC 3φ *axial Flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm dan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm berbanding lurus. Di mana semakin besar nilai tegangan sumber maka daya *output* yang dihasilkan semakin besar pula.

Pada Gambar 14 jika dilihat dari garis *trendline* dapat diketahui bahwa hubungan antara tegangan sumber dan efisiensi daya pada motor dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm dan pada motor dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm berbanding terbalik. Dimana semakin besar nilai sumber tegangan maka daya *output* yang dihasilkan semakin kecil. Nilai efisiensi daya pada motor BLDC 3φ *axial Flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm lebih besar dibanding dengan motor BLDC 3φ *axial Flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm.



Gbr 14. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Efisiensi Daya Motor BLDC 3φ Axial Flux

B. Pengujian Motor BLDC 3φ Tipe Axial Flux Ketika Nilai Frekuensi Berbeda dan Tegangan Sumber Sama

TABEL V
HASIL PENGUJIAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 15 MM X 15 MM X 5 MM KETIKA FREKUENSI BERBEDA DAN TEGANGAN SUMBER SAMA

Vs (V)	Is (A)	Vpp (V)	f (Hz)	Nr (rpm)
24	0,06	6,48	9,891	148,1
24	0,08	6,48	15,31	231,8
24	0,1	6,48	19,64	299,7
24	0,13	6,48	24,5	371,9
24	0,16	6,56	30,03	455,2
24	0,2	6,8	35,06	528
24	0,23	6,88	40	605,6
24	0,27	6,64	45,2	681,2

TABEL VI
HASIL PENGUJIAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 10 MM X 10 MM X 2 MM KETIKA FREKUENSI BERBEDA DAN TEGANGAN SUMBER SAMA

Vs (V)	Is (A)	Vpp (V)	f (Hz)	Nr (rpm)
24	0,03	6,56	9,93	149,2
24	0,03	6,96	15,36	231,2
24	0,03	6,8	20,24	307,2
24	0,04	6,64	25,74	387,5
24	0,04	7,04	30,52	447,1
24	0,04	6,64	35,61	531,4
24	0,04	6,72	40,19	590,7
24	0,04	6,72	45,57	680,6

TABEL VII
HASIL PERHITUNGAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 15 MM X 15 MM X 5 MM KETIKA FREKUENSI BERBEDA DAN TEGANGAN SUMBER SAMA

Vs (V)	Nr (rpm)	Vm (V)	Im (A)	T (m-Nm)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
24	148,36	2,291	0,106	27,003	1,44	0,419	29,095
24	229,65	2,291	0,105	17,151	1,92	0,416	21,692
24	294,6	2,291	0,104	13,179	2,4	0,414	17,241
24	367,5	2,291	0,103	10,525	3,12	0,410	13,143
24	450,45	2,319	0,103	8,704	3,84	0,415	10,809
24	525,9	2,404	0,106	7,957	4,8	0,440	9,170
24	600	2,432	0,105	6,999	5,52	0,444	8,045
24	678	2,347	0,100	5,699	6,48	0,407	6,277

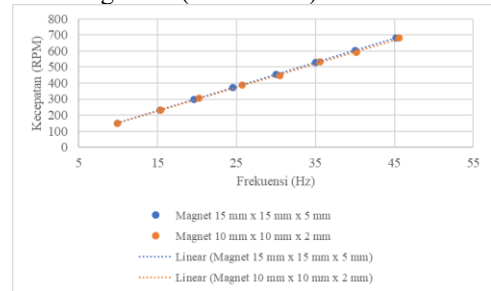
TABEL VIII
HASIL PERHITUNGAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 10 MM X 10 MM X 2 MM KETIKA FREKUENSI BERBEDA DAN TEGANGAN SUMBER SAMA

Vs (V)	Nr (rpm)	Vm (V)	Im (A)	T (m-Nm)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
24	148,95	2,319	0,107	27,469	0,72	0,429	59,633
24	230,4	2,460	0,113	19,836	0,72	0,480	66,728
24	303,6	2,404	0,109	14,144	0,72	0,455	63,224
24	386,1	2,347	0,106	10,579	0,96	0,429	44,734
24	457,8	2,489	0,111	10,193	0,96	0,477	49,733
24	534,15	2,347	0,103	7,527	0,96	0,419	43,649
24	602,85	2,376	0,103	6,842	0,96	0,423	44,105
24	683,55	2,376	0,101	5,835	0,96	0,416	43,341

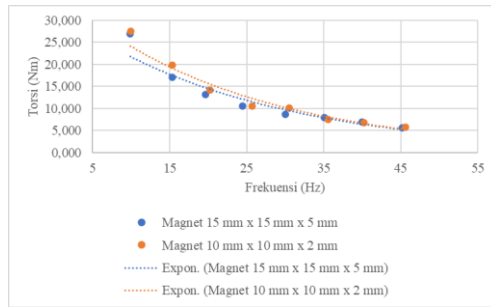
Pada Gambar 15 dapat dianalisis bahwa ketika nilai frekuensi semakin besar pada tegangan sumber yang sama, didapat nilai kecepatan yang semakin besar pula. Jika ditinjau dari ukuran magnet, nilai kecepatan yang dihasilkan relatif sama pada kedua motor dengan magnet berbeda karena variasi frekuensi yang digunakan saat tegangan sumber tetap, nilainya sama.

Pada Gambar 16 jika dilihat dari garis *trendline*, nilai frekuensi dan torsi berbanding terbalik. Semakin besar nilai frekuensi maka semakin kecil nilai torsi motor yang diperoleh. Nilai torsi pada motor dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm tidak jauh berbeda bila dibanding dengan nilai torsi pada motor dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm.

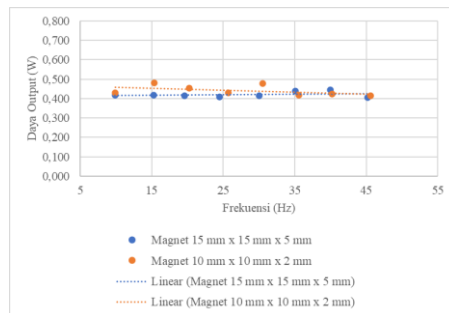
Dari grafik hasil pengujian daya *output* ketika frekuensi berbeda dan tegangan sumber sama dapat di analisis bahwa, jika dilihat dari garis *trendline* antara frekuensi dan daya *output* berbanding lurus (Gambar 17).



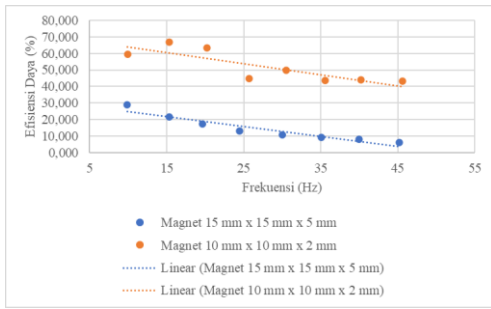
Gbr 15. Grafik Hubungan Frekuensi Terhadap Kecepatan Motor BLDC 3φ Axial Flux



Gbr 16. Grafik Hubungan Frekuensi Terhadap Torsi Motor BLDC 3φ Axial Flux



Gbr 17. Grafik Hubungan Frekuensi Terhadap Daya Output Motor BLDC 3φ Axial Flux



Gbr 18. Grafik Hubungan Frekuensi Terhadap Efisiensi Daya Motor BLDC 3φ Axial Flux

Pada Gambar 18 ketika dilihat dari garis *trendline* antara frekuensi dan efisiensi daya berhubungan terbalik di mana semakin besar nilai frekuensi maka nilai efisiensi daya semakin kecil. Nilai efisiensi daya pada motor BLDC 3φ *axial Flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm lebih besar dibanding dengan nilai efisiensi daya yang didapat pada motor BLDC 3φ *axial Flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm.

C. Pengujian Motor BLDC 3φ Tipe Axial Flux Ketika Nilai Tegangan Sumber dan Frekuensi Berbeda

TABEL IX
HASIL PENGUJIAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 15 MM X 15 MM X 5 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER DAN FREKUENSI BERBEDA

Vs (V)	Is (A)	Vpp (V)	f (Hz)	Nr (rpm)
12	0,1	6,32	10,13	153,7
	0,13	6,56	14,08	206,6
	0,17	6,56	18,05	270,3
	0,21	6,56	22,07	328,8
16	0,1	6,64	13,07	195,9
	0,14	6,48	19,19	284
	0,19	6,72	25	377
	0,25	6,8	31,15	464
20	0,1	6,56	15,12	225,9
	0,15	6,72	23,09	345,1
	0,21	6,8	31,05	464,1
	0,28	7,12	39	583,2
24	0,11	6,8	18,01	270,3
	0,17	6,88	28,08	421,2
	0,23	6,72	38,16	572,9
	0,3	6,96	48,26	721,8

TABEL X
HASIL PENGUJIAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 10 MM X 10 MM X 2 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER DAN FREKUENSI BERBEDA

Vs (V)	Is (A)	Vpp (V)	f (Hz)	Nr (rpm)
12	0,07	6,8	45,66	681
	0,09	6,64	65,01	972,3
	0,1	6,72	85,03	1272
	0,12	6,88	105,5	1588
16	0,08	7,04	75,87	1138
	0,1	7,04	95,05	1425
	0,12	6,88	125,6	1887
	0,13	6,88	145,6	2183
20	0,06	6,64	50,1	755,1
	0,08	6,96	90	1349
	0,1	6,96	130,3	1953

Vs (V)	Is (A)	Vpp (V)	f (Hz)	Nr (rpm)
24	0,13	7,2	170,2	2556
	0,07	7,04	80,71	1208
	0,09	7,2	120,8	1814
	0,11	6,96	160,6	2402
	0,14	7,04	200,3	3003

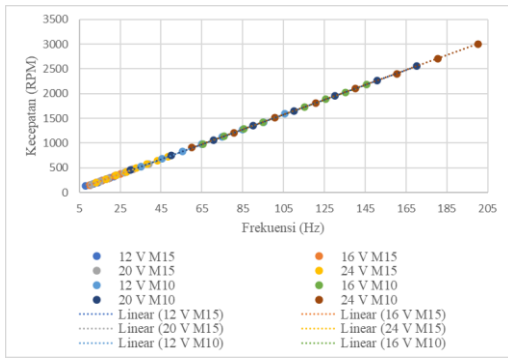
TABEL XI
HASIL PERHITUNGAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 15 MM X 15 MM X 5 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER DAN FREKUENSI BERBEDA

Vs (V)	Nr (rpm)	Vm (V)	Im (A)	T (m-Nm)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
12	151,9	2,234	0,1030	24,745	1,2	0,398	33,204
	211,2	2,319	0,1064	19,752	1,56	0,428	27,404
	270,75	2,319	0,1059	15,014	2,04	0,425	20,841
	331,05	2,319	0,1051	12,259	2,52	0,422	16,756
16	196,05	2,347	0,1079	21,367	1,6	0,439	27,407
	287,85	2,291	0,1044	13,918	2,24	0,414	18,487
	375	2,376	0,1071	11,155	3,04	0,441	14,492
	467,25	2,404	0,1068	9,149	4	0,445	11,119
20	226,8	2,319	0,1063	18,040	2	0,427	21,347
	346,35	2,376	0,1075	12,233	3	0,442	14,742
	465,75	2,404	0,1068	9,150	4,2	0,445	10,592
	585	2,517	0,1094	7,808	5,6	0,477	8,519
24	270,15	2,404	0,1097	16,134	2,64	0,457	17,306
	421,2	2,432	0,1089	10,394	4,08	0,459	11,242
	572,4	2,376	0,1035	7,098	5,52	0,426	7,718
	723,9	2,460	0,1038	5,848	7,2	0,442	6,142

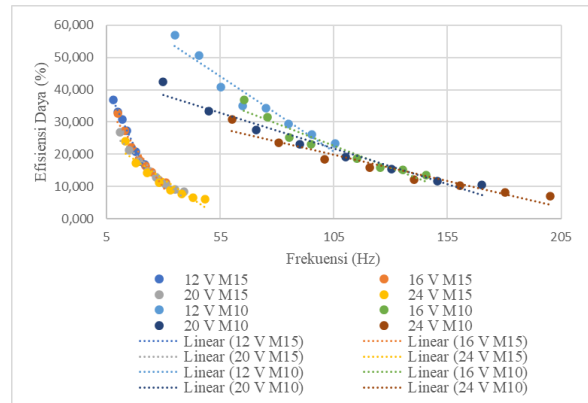
TABEL XII
HASIL PERHITUNGAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 10 MM X 10 MM X 2 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER DAN FREKUENSI BERBEDA

Vs (V)	Nr (rpm)	Vm (V)	Im (A)	T (m-Nm)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
12	684,9	2,404	0,1023	5,970	1,2	0,398	33,204
	975,15	2,347	0,0928	3,703	1,56	0,428	27,404
	1275,4	2,376	0,0860	2,655	2,04	0,425	20,841
	1582,5	2,432	0,0800	2,026	2,52	0,422	16,756
16	1138,0	2,489	0,0939	3,394	1,6	0,439	27,407
	1425,7	2,489	0,0860	2,483	2,24	0,414	18,487
	1884	2,432	0,0729	1,552	3,04	0,441	14,492
	2184	2,432	0,0665	1,225	4	0,445	11,119
20	751,5	2,347	0,0983	5,054	2	0,427	21,347
	1350	2,460	0,0870	2,624	3	0,442	14,742
	1954,5	2,460	0,0721	1,502	4,2	0,445	10,592
	2553	2,545	0,0625	1,030	5,6	0,477	8,519
24	1210,6	2,489	0,0919	3,129	2,64	0,457	17,306
	1812	2,545	0,0780	1,808	4,08	0,459	11,242
	2409	2,460	0,0630	1,067	5,52	0,426	7,718
	3004,5	2,489	0,0541	0,742	7,2	0,442	6,142

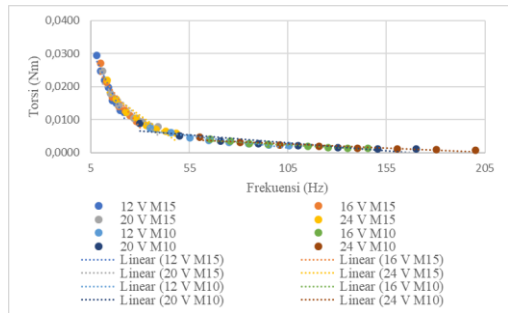
Pada Gambar 19, simbol M10 merupakan motor BLDC 3φ *axial Flux* magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm dan simbol M15 merupakan motor BLDC 3φ *axial Flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa hasil kecepatan yang didapat pada motor dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm lebih besar dibanding pada motor dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm karena frekuensi maksimum yang dapat diatur pada masing-masing variasi tegangan juga lebih besar.



Gbr 19. Grafik Hubungan Frekuensi Terhadap Kecepatan Motor BLDC 3φ Axial Flux



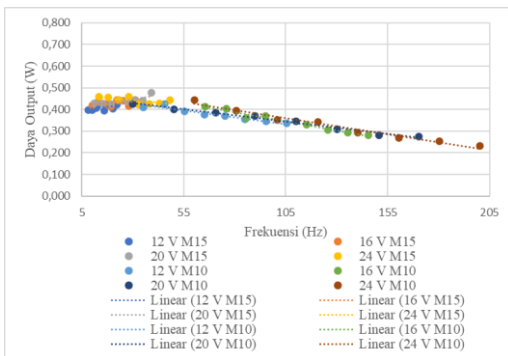
Gbr 22. Grafik Hubungan Frekuensi Terhadap Efisiensi Daya Motor BLDC 3φ Axial Flux



Gbr 20. Grafik Hubungan Frekuensi Terhadap Torsi Motor BLDC 3φ Axial Flux

Pada Gambar 20 dapat diketahui bahwa hasil torsi yang didapat pada motor BLDC 3φ *axial flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm lebih kecil dibanding pada motor BLDC 3φ *axial flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm. Hal ini dikarenakan torsi berbanding terbalik dengan kecepatan, kecepatan motor yang didapat pada motor BLDC 3φ *axial Flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm di pengujian sebelumnya bernilai lebih besar sehingga pada pengujian torsi nilai yang dihasilkan lebih kecil.

Pada Gambar 21 dapat diketahui bahwa hasil daya *output* yang didapat pada motor BLDC 3φ *axial flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm lebih rendah dibanding pada motor BLDC 3φ *axial flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm.



Gbr 21 Grafik Hubungan Frekuensi Terhadap Daya Output Motor BLDC 3φ Axial Flux

Pada Gambar 22 dapat diketahui bahwa hasil efisiensi daya yang didapat pada motor BLDC 3φ *axial flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm pada tiap variasi tegangannya lebih besar dibanding pada motor BLDC 3φ *axial flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm.

D. Pengujian Motor BLDC 3φ Tipe Axial Flux Ketika Nilai Tegangan Sumber dan Frekuensi Sama

TABEL XIII
HASIL PENGUJIAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 15 MM X 15 MM X 5 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER DAN FREKUENSI SAMA

Vs (V)	Is (A)	Vpp (V)	f (Hz)	Nr (rpm)
12	0,2	6,48	22,28	332,2
16	0,24	6,64	31,03	463,7
20	0,28	6,8	39,61	590,3
24	0,31	6,96	48,07	720,1

TABEL XIV
HASIL PENGUJIAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 10 MM X 10 MM X 2 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER DAN FREKUENSI SAMA

Vs (V)	Is (A)	Vpp (V)	f (Hz)	Nr (rpm)
12	0,06	6,64	22,3	337,9
16	0,06	6,8	31,4	472,6
20	0,06	6,88	39,71	597,2
24	0,06	6,88	48,2	722,9

TABEL XV
HASIL PERHITUNGAN MOTOR BLDC 3φ AXIAL FLUX MAGNET 15 MM X 15 MM X 5 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER DAN FREKUENSI SAMA

Vs (V)	Nr (rpm)	Vm (V)	Im (A)	T (m-Nm)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
12	334,2	2,291	0,104	11,834	2,4	0,412	17,161
16	465,45	2,347	0,104	8,732	3,84	0,424	11,047
20	594,15	2,404	0,104	7,023	5,6	0,434	7,756
24	721,05	2,460	0,104	5,865	7,44	0,442	5,947



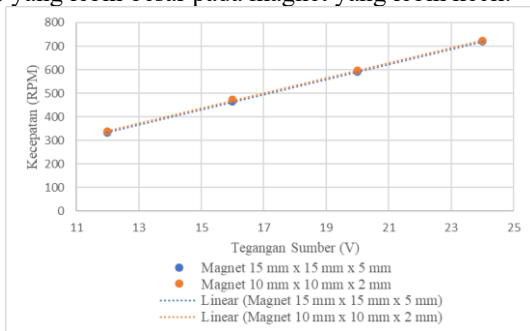
TABEL XVI
HASIL PERHITUNGAN MOTOR BLDC 3 ϕ AXIAL FLUX MAGNET
10 MM X 10 MM X 2 MM KETIKA TEGANGAN SUMBER DAN
FREKUENSI SAMA

Vs (V)	Nr (rpm)	Vm (V)	Im (A)	T (m-Nm)	Pin (W)	Pout (W)	η (%)
12	334,5	2,347	0,106	12,216	0,72	0,432	60,060
16	471	2,404	0,107	8,977	0,96	0,444	46,298
20	595,65	2,432	0,106	7,104	1,2	0,444	37,039
24	723	2,432	0,103	5,707	1,44	0,432	30,012

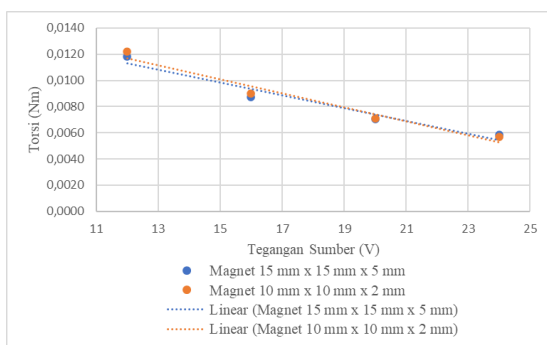
Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 23 dapat dilihat bahwa perbedaan ukuran magnet ketika pengujian saat nilai tegangan sumber dan frekuensi sama tidak berpengaruh terhadap nilai kecepatan motor. Nilai kecepatan motor yang didapat pada motor dengan ukuran magnet yang berbeda hasilnya sama.

Pada Gambar 24 saat tegangan sumber dan frekuensi sama menghasilkan nilai torsi yang tidak jauh berbeda. Artinya perbedaan ukuran magnet tidak berpengaruh pada nilai torsi yang didapat. Dapat diketahui bahwa nilai tegangan sumber dan torsi berbanding terbalik artinya semakin besar nilai tegangan sumber maka nilai torsi semakin rendah dapat dilihat pada grafik hasil pengujian torsi.

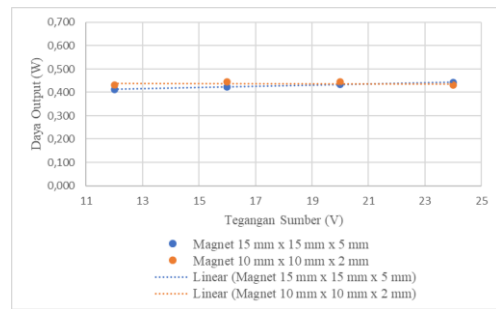
Pada Gambar 25 jika dilihat dari *trendline* antara tegangan sumber dan daya *output* nilainya berbanding lurus. Perbedaan ukuran magnet pada pengujian ini menghasilkan nilai daya *output* yang lebih besar pada magnet yang lebih kecil.



Gbr 23. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Kecepatan Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux

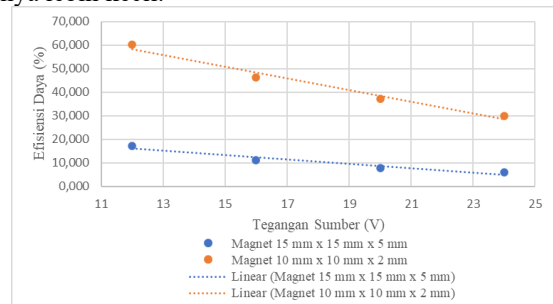


Gbr 24. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Torsi Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux



Gbr 25. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Daya Output Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux

Pada grafik yang ditunjukkan Gambar 26 menunjukkan hasil pengujian efisiensi daya motor BLDC 3 ϕ *axial flux* saat tegangan sumber dan frekuensi sama. Jika dilihat dari *trendline* diketahui bahwa hubungan antara tegangan motor dan efisiensi daya berbanding terbalik. Perbedaan ukuran magnet berpengaruh terhadap nilai efisiensi daya. Semakin kecil nilai ukuran magnet yang digunakan maka nilai efisiensi daya semakin besar. Hal ini dikarenakan nilai daya input pada motor BLDC 3 ϕ *axial flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm lebih besar dibanding pada motor BLDC 3 ϕ *axial flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm sehingga pembagiannya lebih besar dan menyebabkan nilai efisiensi dayanya lebih kecil.



Gbr 26. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Efisiensi Daya Motor BLDC 3 ϕ Axial Flux

IV. KESIMPULAN (PENUTUP)

Dari penelitian yang berjudul “Unjuk Kerja Motor *Brushless Direct 3 Phase Tipe Axial Flux* Dengan Perbedaan Bentuk Magnet *Neodymium*” dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada pengujian motor BLDC 3 ϕ *axial flux* saat tegangan sumber berbeda dan frekuensi sama, semakin besar nilai tegangan sumber maka nilai kecepatan, torsi, dan daya *output* yang didapat pada motor BLDC 3 ϕ *axial flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm dan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm bernilai konstan. Hal ini dikarenakan nilai frekuensi yang digunakan nilainya tetap, kecepatan yang didapat dipengaruhi oleh nilai frekuensi. Selain itu, semakin besar nilai tegangan sumber maka nilai efisiensi daya yang dihasilkan semakin kecil. Untuk nilai kecepatan dan efisiensi daya pada motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm lebih besar

- nilainya dibanding pada motor BLDC 3 ϕ *axial flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm. Namun hal ini berkebalikan untuk nilai torsi dan daya *output* yang didapat.
2. Pada pengujian motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* saat frekuensi berbeda dan tegangan sumber sama, semakin besar nilai frekuensi maka nilai kecepatan yang didapat pada motor BLDC 3 ϕ *axial flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm dan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm semakin besar pula. Namun untuk nilai torsi dan efisiensi daya nilainya semakin kecil. Untuk nilai daya *output* dan efisiensi daya pada motor BLDC 3 ϕ *axial flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm lebih besar nilainya dibanding pada motor BLDC 3 ϕ *axial flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm. Tetapi, untuk nilai kecepatan dan torsi nilainya sama karena frekuensi yang digunakan nilainya tetap.
 3. Pada pengujian motor BLDC 3 ϕ *axial flux* saat tegangan sumber dan frekuensi berbeda berpengaruh pada nilai kecepatan, torsi, daya *output* dan efisiensi daya. Semakin besar variasi tegangan sumber dengan nilai frekuensi yang semakin besar pula, maka nilai torsi dan efisiensi daya pada kedua motor semakin kecil. Namun untuk nilai kecepatan semakin besar. Sedangkan untuk nilai daya *output* pada motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm semakin naik dan pada motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm semakin kecil. Untuk nilai torsi dan daya *output* pada motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm lebih besar dibanding pada motor BLDC 3 ϕ

axial Flux dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm. Tetapi hal ini berkebalikan untuk nilai kecepatan dan efisiensi daya.

4. Pada pengujian motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* saat tegangan sumber dan frekuensi sama, nilai kecepatan dan torsi yang didapat pada kedua motor bernilai sama. Tetapi, untuk nilai daya *output* dan efisiensi daya yang didapat pada motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* dengan magnet 10 mm x 10 mm x 2 mm lebih besar dibanding pada motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* dengan magnet 15 mm x 15 mm x 5 mm.
5. Pengujian dengan hasil performa motor terbaik terdapat pada pengujian motor BLDC 3 ϕ *axial Flux* ketika nilai tegangan sumber dan frekuensi berbeda.

REFERENSI

- [1] Yunus Chandra Wibowo; Slamet Riyadi, "Analisa Pembebanan pada Motor *Brushless direct current* (BLDC)," Analisa Pembebanan pada Motor *Brushless direct current* (BLDC), p. 1, 2018.
- [2] K. ESDM, "Penggunaan Motor Listrik Dukung Konservasi Energi," 24 10 2017. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/direktorat-jenderal-ebtke/penggunaan-motor-listrik-dukung-konservasi-energi>.
- [3] Wikipedia, "Motor Listrik," 15 May 2021. [Online]. Available: https://id.wikipedia.org/wiki/Motor_listrik.
- [4] V. Andrean, Rancang Bangun Sistem Pengereman Regeneratif Brushless DC Motor Menggunakan Bidirectional Voltage Source Inverter (VSI), Malang: Universitas Brawijaya, 2016.

