

ANALISIS PENGGUNAAN MATERIAL ALUMINIUM SEBAGAI BAHAN KERANGKA PENYUSUN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT 3 PHASE AXIAL FLUX

Rista Nabilla Aqila^{*)}, Widyono Hadi dan Andi Setiawan

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember
Jl. Kalimantan Tegalboto No.37, Kampus Tegal Boto Jember, Jawa Timur 68121, Indonesia

^{*)}E-mail : ristanabillaaqila17@gmail.com

Abstrak

Salah satu bentuk dari perkembangan teknologi motor listrik yang banyak digunakan saat ini adalah motor brushless direct current 3 phase axial flux. Motor ini memiliki nilai efisiensi yang tinggi dan nilai torsi awal yang lebih besar karena menggunakan magnet permanen. Selain itu, motor brushless direct current juga tidak menimbulkan suara bising serta memerlukan proses pendinginan yang lebih mudah. Penelitian ini membandingkan pengaruh dari penggunaan bahan akrilik dengan bahan aluminium sebagai bahan pembuatan rotor. Dari hasil pengujian motor brushless direct current 3 phase axial flux diketahui bahwa penggunaan rotor aluminium memberikan hasil yang lebih baik daripada penggunaan rotor akrilik. Hal ini terjadi karena bahan aluminium dapat mengurangi medan magnet pada sebuah motor. Medan magnet yang berputar pada porosnya dapat meningkatkan efisiensi motor, sehingga hasil yang diperoleh lebih maksimal.

Kata kunci: Motor, BLDC, Axial flux, Akrilik, Aluminium

Abstract

One form of today's electric motor technology developments that is widely used today is a brushless direct current 3 phase axial flux motor. This motor has a high efficiency value and a greater starting torque value because it uses permanent magnets. In addition, the brushless direct current motor also does not cause noise and the cooling process is easier. This study will compare the effect of the use of acrylic material with aluminum as a rotor making material. From the test results of the brushless direct current 3 phase axial flux motor, it is found that when using an aluminum rotor the results obtained are better than when using an acrylic rotor. This happens because the aluminum material can reduce the magnetic field in a motor. The magnetic field that rotates on its axis can increase the efficiency of the motor, so that the results obtained are more maximal.

Keywords: Motor, BLDC, Axial flux, Acrylic, Aluminium

1. Pendahuluan

Salah satu bentuk dari perkembangan teknologi masa kini yaitu motor listrik. Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor listrik kadangkala disebut “kuda kerja” nya industri sebab diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri [1]. Berdasarkan sumber tegangannya, terdapat dua jenis motor listrik yaitu motor listrik AC dan motor listrik DC. Saat ini jenis motor yang banyak digunakan pada peralatan industri maupun kehidupan sehari-hari adalah motor induksi dan motor DC [2]. Hal ini karena pada pengaplikasiannya lebih mudah untuk dikendalikan karena hanya mengatur nilai tegangan dan arus medannya saja untuk mendapatkan tegangan keluaran yang diinginkan.

Jenis motor lain yang juga sering digunakan pada aplikasi kehidupan sehari-hari, industri, maupun medis yaitu motor *brushless direct current* (BLDC). Motor *brushless direct current* masuk pada jenis motor sinkron, karena nilai medan magnet yang dihasilkan rotor dan statornya memiliki nilai frekuensi yang sama [3]. Meskipun termasuk jenis motor listrik sinkron AC 3 fasa, motor ini tetap disebut motor BLDC karena pada implementasinya motor BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC menggunakan inverter 3 fasa[4]. Tujuan menggunakan tegangan AC 3 fasa pada motor BLDC adalah untuk menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor[5].

Motor BLDC ini memiliki nilai efisiensi yang tinggi dan nilai torsi awal yang lebih besar karena menggunakan magnet permanen [6]. Selain itu, motor BLDC juga tidak menimbulkan suara bising serta proses pendinginan yang lebih mudah[7]. Namun pada motor BLDC terdapat beberapa kekurangan yaitu pada proses pembuatannya membutuhkan biaya yang relatif mahal serta pada sistem pengendalian yang cukup rumit[5].

Pada penelitian sebelumnya [8] mengenai uji performa motor *brushless direct current 3 phase flux axial* dengan bahan akrilik sebagai bahan pembuatan motor, menggunakan 6 buah kutub kumparan stator dan pada rotor menggunakan 8 magnet permanen *neodymium* dengan dimensi magnet sebesar 15 mm x 2 mm dan 20 mm x 2 mm. Dimana dari hasil penelitian didapatkan efisiensi terbesar adalah dengan menggunakan magnet *neodymium* dengan ukuran 20 mm x 2 mm. Berbeda dengan penelitian sebelumnya [8], yang menggunakan bahan akrilik, material yang digunakan untuk pembuatan motor BLDC pada penelitian ini adalah menggunakan bahan aluminium dengan ketebalan 2 mm.

Material aluminium dipilih karena merupakan material yang dianggap dapat mengurangi medan magnet pada sebuah motor, medan magnet yang terus berputar tepat pada porosnya dapat meningkatkan nilai efisiensi dari motor itu sendiri [9]. Sehingga, pada penelitian ini digunakan bahan aluminium sebagai bahan pembuatan kerangka motor dengan 6 buah kumparan stator dengan 450 lilitan untuk masing-masing kumparan, dan kawat yang digunakan merupakan kawat tembaga dengan diameter 0,3 mm. Pada rotor, terdapat 8 buah magnet permanen dengan jenis *neodymium* dengan bentuk koin berukuran 20 mm x 2 mm dan pemasangan kutub yang berlawanan. Penelitian ini memiliki fokus meninjau bagaimana pengaruh bahan aluminium dan bahan akrilik sebagai kerangka motor BLDC terhadap torsi dan kecepatan dari motor BLDC dan menemukan efisiensi terbaiknya dari perbandingan dua bahan tersebut.

2. Metode

2.1. Analisis Motor BLDC 3 Phase Axial Flux

Motor *brushless direct current* atau BLDC merupakan jenis motor sinkron yang banyak digunakan pada aplikasi rumah tangga, industri, maupun medis. Motor DC tanpa sikat atau BLDC ini disebut motor sinkron karena nilai medan magnet pada rotor dan stator motor memiliki nilai frekuensi yang sama. Terdapat 2 tipe motor BLDC yaitu *in runner* dan *out runner*, namun yang paling banyak digunakan adalah tipe *out runner*. Berdasarkan arah aliran fluxnya, terdapat 2 jenis motor BLDC yaitu *radial flux* BLDC dan *axial flux* BLDC [10]. Motor ini tetap disebut sebagai motor *brushless direct current* karena pada implementasinya motor *brushless direct current* karena pada implementasinya motor *brushless direct current*

menggunakan sumber tegangan *direct current* (DC) sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC menggunakan *inverter 3 phase*[11].

2.1.1. Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux

Pada motor BLDC 3 phase, kecepatan putar motor dipengaruhi oleh frekuensi tegangan dan jumlah magnet permanen yang digunakan, untuk mengetahui nilai kecepatan putar dari sebuah motor digunakan persamaan sebagai berikut [12]:

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (1)$$

Dimana :

- N_s = Kecepatan Putar Motor (RPM)
- f = Frekuensi tegangan (Hz)
- p = Jumlah kutub

2.1.2. Torsi Motor BLDC 3 Phase Axial Flux

Adanya medan magnet pada kumparan stator saat motor berputar dapat menentukan besar nilai torsi yang dihasilkan motor tersebut. Untuk mengetahui nilai torsi dari sebuah motor dapat diketahui melalui persamaan sebagai berikut [13]:

$$T = \frac{V_{rms} \times I_{rms}}{\frac{2\pi N_s}{60}} \quad (2)$$

Dimana :

- T = Torsi motor (Nm)
- V_{rms} = Tegangan motor (V)
- I_{rms} = Arus motor (A)
- N_s = Kecepatan Putar Motor (RPM)

2.1.3. Daya Input Driver Motor

Besar dari daya *input* motor mempengaruhi performa dan keefektifan dari kinerja motor, untuk menghitung daya *input* dari motor dapat dilakukan melalui persamaan berikut [14].

$$P_{in} = V_{in} \times I_{in} \quad (3)$$

Dimana

- P_{in} = Daya masukan motor listrik (W)
- V_{in} = Tegangan sumber (V)
- I_{in} = Arus sumber (A)

2.1.4. Daya Output Driver Motor

Daya *output driver* motor merupakan daya listrik yang dihasilkan oleh *driver* pada motor. Untuk mengetahui daya

keluaran dari sebuah *driver* motor dapat melalui persamaan berikut.

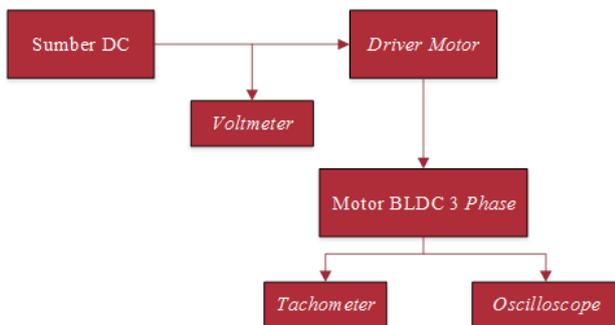
$$P_{out} = \sqrt{3} V_{rms} \times I_{rms} \quad (4)$$

Dimana :

- P_{out} = Daya output motor listrik (W)
- V_{rms} = Tegangan motor (V)
- I_{rms} = Arus motor (A)

2.2. Perancangan Penelitian

Prinsip kerja dari penelitian ini digambarkan dalam Gambar 1. Motor BLDC mendapatkan sumber tegangan dari *driver* motor yang sudah terhubung dengan *power supply*. Tegangan *output driver* sebesar 12 volt, 16 volt, 20 volt, dan 24 volt kemudian nilainya dapat diukur melalui *voltmeter*. Motor BLDC tipe *axial flux* dengan konstruksi satu rotor menggunakan material aluminium sebagai bahan dasar pembuatan motor. Pada rotor terdapat 8 buah magnet permanen *neodymium* tipe koin dan satu stator yang terdapat 6 buah kutub. Saat stator mendapat tegangan sumber dari *driver* motor maka rotor akan berputar. Untuk mengetahui nilai V_{rms} dan I_{rms} yang dihasilkan oleh motor, dilakukan perhitungan dengan nilai tegangan *peak to peak* yang dapat dilihat pada *oscilloscope*, serta melakukan pengukuran terhadap nilai frekuensi yang melewati motor. Sedangkan *tachometer* digunakan untuk mengukur kecepatan putar motor melalui *encoder*.

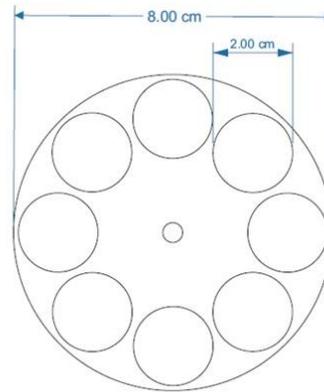


Gambar 1. Blok Diagram Penelitian

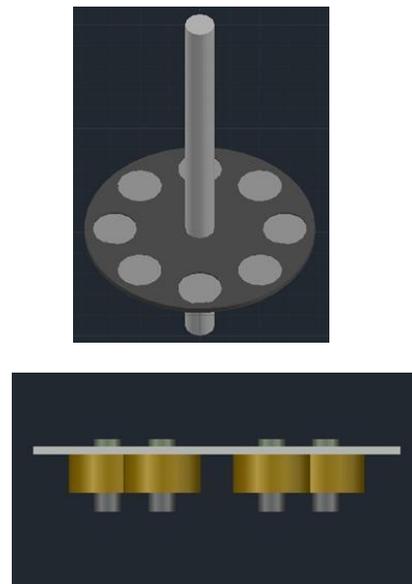
2.2.1. Desain Alat Motor BLDC 3 Phase Axial Flux

Rancangan desain motor *brushless direct current 3 phase axial flux* ini menggunakan rotor dan stator tunggal. Pada rotor terdapat 8 buah magnet permanen *neodymium* dengan diameter sebesar 20 mm x 2 mm seperti dalam Gambar 2. Rotor menggunakan material aluminium sebagai bahan kerangka penyusun motor BLDC seperti dalam Gambar 3. Motor BLDC 3 *phase* ini menggunakan stator tunggal dengan 6 buah kumparan dengan masing-masing kumparan terdapat 450 lilitan. *Spull* yang digunakan untuk

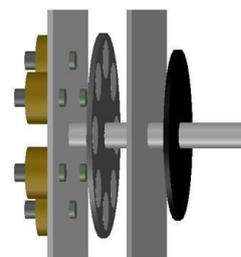
kumparan yaitu berbentuk silinder dengan ukuran 1cm x 1cm, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 3.



Gambar 2. Desain Rotor Aluminium 8 Kutub Motor BLDC 3 Phase Axial Flux



Gambar 3. Desain 3D Rotor Aluminium dan Stator Motor BLDC 3 Phase Axial Flux dengan Rotor dan Stator Tunggal



Gambar 4. Perancangan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux dengan Rotor dan Stator Tunggal

Dari penjelasan di atas spesifikasi dari motor BLDC 3 phase axial flux dengan rotor dan stator tunggal dapat dijabarkan dalam Tabel 1

Tabel 1. Spesifikasi Motor BLDC Axial Flux dengan Rotor dan Stator Tunggal

Keterangan	Simbol	Nilai
Jumlah phase	<i>Nph</i>	3 Phase
Stator		Tunggal
Panjang Stator	<i>p</i>	9,3 cm
Lebar Stator	<i>l</i>	9,3 cm
Jumlah kumparan	<i>s</i>	6 kumparan
Penampang Kumparan	<i>L</i>	1 cm
Lilitan	<i>N</i>	450 lilitan/kumparan
Diameter Rotor 1	<i>d</i>	8 cm
Diameter Rotor 2	<i>d</i>	8 cm
Jumlah Magnet (<i>pole</i>)	<i>p</i>	8 magnet
Diameter Magnet	<i>d</i>	2 cm
Tebal Magnet	<i>t</i>	0,2 cm
Air Gap	<i>X</i>	0,5 cm

2.3. Pengujian Alat

Pada penelitian ini dilakukan proses pengujian dengan membandingkan unjuk kerja motor BLDC 3 phase axial flux dengan material aluminium sebagai kerangka penyusun saat menggunakan rotor berbahan aluminium dan pada saat motor BLDC 3 phase axial flux menggunakan rotor berbahan akrilik. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi tegangan sumber *power supply* sebesar 12 volt, 16 volt, 20 volt, dan 24 volt. Tegangan yang digunakan pada pengujian ini berupa tegangan DC yang diubah menjadi tegangan AC 3 fasa oleh inverter pada *driver* motor. Untuk mengetahui unjuk kerja motor secara spesifik dilakukan 4 poin pengujian pada masing-masing rotor yaitu saat nilai tegangan berubah dan nilai frekuensi sama, saat nilai tegangan tetap (24 volt) dan nilai frekuensi berubah, saat nilai tegangan berubah dan nilai frekuensi tetap, serta saat nilai tegangan dan frekuensi berbeda.

3. Hasil dan Analisis

3.1. Pengujian Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Sama

Hasil dari pengujian saat motor BLDC 3 phase axial flux ketika nilai tegangannya berubah dan nilai frekuensi yang diberikan maksimal saat menggunakan rotor aluminium di tampilkan dalam Tabel 2. Sedangkan ketika menggunakan rotor akrilik ditampilkan dalam Tabel 3.

Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar nilai tegangan sumber yang diberikan maka nilai *Vrms* dan *Irms* yang dihasilkan relatif konstan nilainya. Hal ini terjadi karena nilai tegangan keluaran yang dihasilkan oleh *driver* motor nilainya konstan.

Tabel 2. Hasil Pengujian Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Tegangan Berubah dan Frekuensi Sama pada Rotor Aluminium

Tegangan Sumber (Volt)	Arus Sumber (Ampere)	<i>Vrms</i> (Volt)	<i>Irms</i> (Ampere)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan (RPM)
12	0,26	2,475	0,108	36,6	554,2
16	0,31	2,404	0,102	45,2	694,8
20	0,35	2,475	0,102	54,34	815,2
24	0,39	2,475	0,100	60,24	884,3

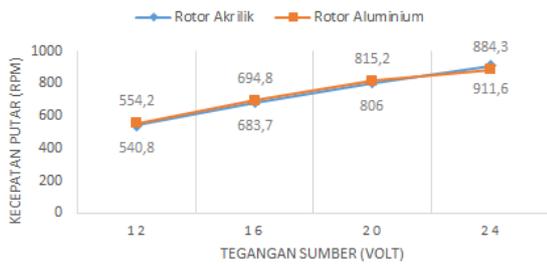
Tabel 3. Hasil Pengujian Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Tegangan Berubah dan Frekuensi Sama pada Rotor Akrilik

Tegangan Sumber (Volt)	Arus Sumber (Ampere)	<i>Vrms</i> (Volt)	<i>Irms</i> (Ampere)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan (RPM)
12	0,27	2,234	0,098	36,07	540,8
16	0,33	2,262	0,098	45,28	683,7
20	0,38	2,404	0,099	53,99	806
24	0,43	2,475	0,099	60,97	911,6

Pada data tersebut dapat dilihat bahwa nilai frekuensi berbanding lurus dengan nilai kecepatan putar motor. Semakin besar nilai frekuensi, maka nilai kecepatan putar motor yang dihasilkan akan semakin besar juga. Seperti pada saat motor dengan bahan aluminium dengan tegangan sumber 12 volt, arus sumber sebesar 0,26 ampere, diperoleh nilai *Vrms* sebesar 2,475 volt dan *Irms* sebesar 0,108 ampere. Dengan nilai frekuensi sebesar 36,6 Hz dan kecepatan putar motor yang dihasilkan sebesar 554,2 RPM. Begitu pula dengan bahan akrilik saat tegangan sumber sebesar 12 volt dengan arus sumber sebesar 0,27 ampere, diperoleh nilai *Vrms* sebesar 2,234 volt dan *Irms* sebesar 0,098 ampere. Dengan frekuensi sebesar 36,07 Hz dan menghasilkan kecepatan putar motor sebesar 540,8 RPM.

Saat diberikan nilai frekuensi yang sama pada masing-masing tegangan sumber, ketika menggunakan rotor aluminium dapat dilihat bahwa nilai frekuensi yang dihasilkan sedikit lebih besar daripada saat menggunakan rotor akrilik. Hal ini berkaitan juga dengan kecepatan putar motor yang dihasilkan, walaupun perbedaan nilainya tidak begitu besar. Dibuktikan dalam Gambar 5. pada parameter kecepatan putar motor.

Kemudian, hasil perhitungan torsi motor BLDC 3 phase axial flux dengan perbedaan jenis rotor dapat dilihat adanya perbedaan nilai torsi yang diperoleh dengan variasi sumber tegangan. Dengan variasi tegangan yang diberikan yaitu 12 volt, 16 volt, 20 volt dan 24 volt diperoleh nilai *Vrms* dan *Irms* yang mengalami kenaikan. Kenaikan nilai *Vrms* dan *Irms* tersebut berpengaruh pada nilai torsi yang dihasilkan. Semakin besar nilai tegangan sumber yang diberikan maka nilai torsi yang dihasilkan akan semakin kecil atau bahkan konstan seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4 dan 5.



Gambar 5. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Tegangan Berubah dan Frekuensi Sama

Tabel 4. Hasil Perhitungan Torsi Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Tegangan Berubah dan Frekuensi Sama pada Rotor Aluminium

Tegangan Sumber (Volt)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Kecepatan Motor (RPM)	Torsi (Nm)
12	2,475	0,108	554,2	0,005
16	2,404	0,102	694,8	0,003
20	2,475	0,102	815,2	0,003
24	2,475	0,100	884,3	0,003

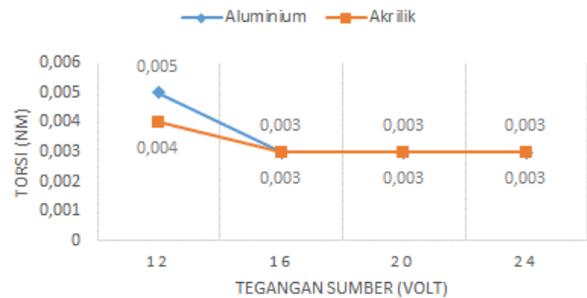
Tabel 5. Hasil Perhitungan Torsi Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Tegangan Berubah dan Frekuensi Sama pada Rotor Akrilik

Tegangan Sumber (Volt)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Kecepatan Motor (RPM)	Torsi (Nm)
12	2,234	0,098	540,8	0,004
16	2,262	0,098	683,7	0,003
20	2,404	0,099	806	0,003
24	2,475	0,099	911,6	0,003

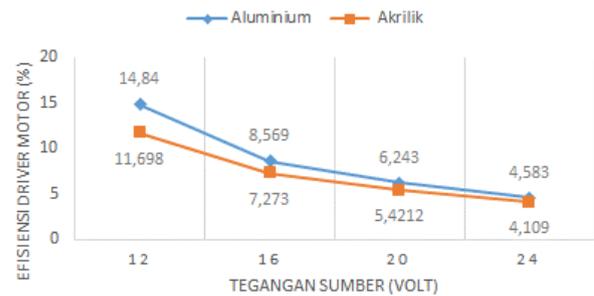
Dari data yang ditampilkan dalam Tabel 4. dan Tabel 5. dapat dilihat bahwa semakin besar nilai tegangan sumber yang diberikan maka nilai torsi yang diperoleh semakin kecil atau konstan. Perbandingan ini dilakukan dengan peninjauan pada variabel yang sama yaitu tegangan sumber sebesar 12 volt pada kedua jenis rotor yaitu aluminium dan akrilik. Pada rotor aluminium saat diberi tegangan sumber sebesar 12 volt diperoleh nilai torsi sebesar 0,005 Nm. Sedangkan pada rotor akrilik saat diberi tegangan sumber sebesar 12 volt diperoleh nilai torsi sebesar 0,004 Nm. Maka dari itu nilai torsi dihasilkan pada rotor aluminium nilainya lebih besar daripada menggunakan rotor akrilik. Nilai torsi yang dihasilkan relatif konstan karena nilai Irms yang diperoleh relatif konstan juga, karena nilai torsi berbanding lurus dengan Irms, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 6.

Selanjutnya adalah analisis efisiensi dari Motor BLDC yang memperhatikan perbedaan nilai keluaran daya *input* dan *output* pada *driver* motor terhadap 2 jenis rotor berbahan aluminium dan akrilik. Pada rotor aluminium nilai Vrms dan Irms yang diperoleh nilainya lebih tinggi dari pada rotor akrilik. Begitu juga pada nilai kecepatan putar motor dan torsinya. Sehingga mempengaruhi hasil dari keluaran perhitungan nilai daya *input* dan *output*. Karena pada motor BLDC 3 phase axial flux yang

digunakan tidak menggunakan beban sehingga hasil nilai keluaran efisiensi *driver* motor yang diperoleh relatif kecil. Berikut merupakan grafik hubungan tegangan sumber terhadap efisiensi *driver* motor BLDC 3 phase axial flux pada Gambar 7.



Gambar 6. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Torsi Motor Brushless Direct Current 3 Phase Axial Flux Saat Tegangan Berubah dan Frekuensi Sama



Gambar 7. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Efisiensi Driver Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Tegangan Berubah dan Frekuensi Sama

3.2. Pengujian Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Tetap dan Frekuensi Berubah

Pengujian motor BLDC 3 phase axial flux dengan nilai tegangan tetap yaitu sebesar 24 volt dan nilai frekuensi yang berubah bertujuan untuk mengetahui pengaruh frekuensi terhadap kinerja motor. Nilai frekuensi yang digunakan disesuaikan dengan tegangan masukannya. Pada tegangan 24 volt diberikan nilai frekuensi terendah saat motor dapat mulai berputar.

Pada pengujian motor BLDC 3 phase axial flux dengan nilai tegangan tetap yaitu sebesar 24 volt dan nilai frekuensi yang berubah menggunakan rotor aluminium memiliki nilai kecepatan putar motor yang lebih besar dibandingkan saat pengujian menggunakan rotor akrilik. Hal ini terjadi karena pada rotor aluminium membutuhkan nilai frekuensi awal yang lebih besar untuk dapat memicu rotor agar dapat berputar. Hal ini sesuai hasil pengujian yang ditunjukkan dalam Tabel 7 dan Tabel 8.

Kemudian, jika meninjau Tabel 9 dan Tabel 10 bahwa pada rotor akrilik diperoleh nilai torsi yang lebih besar yaitu 0,017 Nm pada frekuensi 8,53 Hz daripada rotor aluminium yang memiliki nilai torsi sebesar 0,015 Nm pada frekuensi 10,51. Hal ini menunjukkan bahwa pada rotor akrilik saat nilai tegangan tetap dan frekuensi berubah, torsi yang dihasilkan nilainya lebih tinggi daripada rotor aluminium walaupun frekuensi yang diberikan lebih rendah nilainya.

Tabel 7. Hasil Pengujian Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Tetap dan Frekuensi Berubah pada Rotor Aluminium

Tegangan Sumber (Volt)	Vrms (Volt)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan Motor (RPM)	Kecepatan Motor Hitung (RPM)	Error Persen (%)
24	2,262	10,51	153,3	157,65	2,759
24	2,333	15,28	222,1	229,2	3,097
24	2,262	20,21	294,1	303,15	2,985
24	2,333	25,72	377,8	385,8	2,073
24	2,333	30,30	457,4	454,5	0,638
24	2,404	35,97	530,4	539,55	1,695
24	2,404	40,84	599,9	612,6	2,073
24	2,333	45,45	665,2	681,75	2,427
24	2,404	50,81	746,2	762,15	2,092
24	2,404	55,55	807,9	833,25	3,042
24	2,404	60,24	884,3	903,6	2,135
24	2,475	62,64	910,3	939,75	3,133

Tabel 8. Hasil Pengujian Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Tetap dan Frekuensi Berubah pada Rotor Akrilik

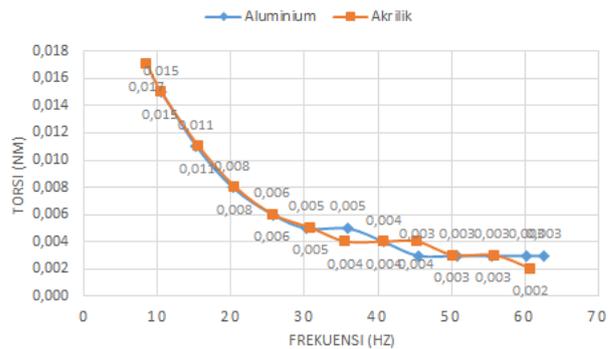
Tegangan Sumber (Volt)	Vrms (Volt)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan Motor (RPM)	Kecepatan Motor Hitung (RPM)	Error Persen (%)
24	2,262	8,53	128,5	127,95	0,335
24	2,333	10,42	161	156,3	3
24	2,404	15,55	233,6	233,25	0,150
24	2,333	20,55	308	308,25	0,081
24	2,333	25,66	384,5	384,9	0,103
24	2,404	30,82	464,7	462,3	0,519
24	2,262	35,56	533,8	533,8	0,074
24	2,404	40,84	613,1	612,6	0,081
24	2,475	45,28	677,5	679,2	0,250
24	2,333	50,20	754,1	753	0,146
24	2,475	55,80	836,9	837	0,011
24	2,333	60,82	912	912,3	0,032

Tabel 9. Hasil Perhitungan Torsi Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Tetap dan Frekuensi Berubah pada Rotor Aluminium

Tegangan Sumber (Volt)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Kecepatan Motor (RPM)	Frekuensi (Hz)	Torsi (Nm)
24	2,262	0,104	153,3	10,51	0,015
24	2,333	0,107	222,1	15,28	0,011
24	2,262	0,103	294,1	20,21	0,008
24	2,333	0,105	377,8	25,72	0,006
24	2,333	0,104	457,4	30,30	0,005
24	2,404	0,105	530,4	35,97	0,005
24	2,404	0,104	599,9	40,84	0,004
24	2,333	0,099	665,2	45,45	0,003
24	2,404	0,100	746,2	50,81	0,003
24	2,404	0,099	807,9	55,55	0,003

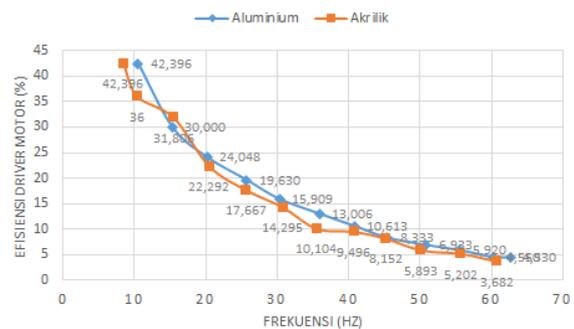
Tabel 10. Hasil Perhitungan Torsi Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Tetap dan Frekuensi Berubah pada Rotor Akrilik

Tegangan Sumber (Volt)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Kecepatan (RPM)	Frekuensi (Hz)	Torsi (Nm)
24	2,262	0,104	128,5	8,53	0,017
24	2,333	0,107	161	10,42	0,015
24	2,404	0,110	233,6	15,55	0,011
24	2,333	0,106	308	20,55	0,008
24	2,333	0,105	384,5	25,66	0,006
24	2,404	0,107	464,7	30,82	0,005
24	2,262	0,099	533,8	35,56	0,004
24	2,404	0,104	613,1	40,84	0,004
24	2,475	0,105	677,5	45,28	0,004
24	2,475	0,102	836,9	55,80	0,003



Gambar 8. Grafik Hubungan Torsi Terhadap Frekuensi Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Tetap dan Frekuensi Berubah

Sedangkan, untuk efisiensi *driver* motor pada saat pengujian nilai tegangan tetap dan frekuensi berubah pada motor BLDC 3 phase axial flux yang didapatkan melalui perhitungan perbandingan antara daya *input* dan daya *output* dalam satuan (%) dapat diketahui melalui Gambar 9. Gambar 9 menunjukkan bahwa semakin bertambah nilai dari frekuensi akan mengurangi efisiensi dari motor BLDC 3 Phase Axial Flux baik berbahan aluminium maupun berbahan akrilik. Namun ada selisih kecil menunjukkan bahwa nilai efisiensi *driver motor* saat menggunakan bahan aluminium lebih besar dibandingkan dengan bahan akrilik.



Gambar 9. Grafik Hubungan Frekuensi Terhadap Efisiensi Driver Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Tetap dan Frekuensi Berubah

3.3. Pengujian Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Tetap

Pada pengujian ini nilai frekuensi yang diambil berdasarkan nilai frekuensi maksimal saat diberikan tegangan terendah yaitu 12 volt. Ketika tegangan 12 volt menggunakan rotor aluminium nilai frekuensi maksimal yang bekerja pada motor tersebut bernilai 35,36 Hz dan saat menggunakan rotor akrilik bernilai 35,26 Hz. Sehingga dilakukan pengujian dengan variasi tegangan sumber dengan nilai 12 volt, 16 volt, 20 volt, dan 24 volt.

Tabel 11. Hasil Pengujian Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Tetap pada Rotor Aluminium

Tegangan Sumber (Volt)	Arus Sumber (Ampere)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan (RPM)
12	0,24	2,192	0,096	35,36	531,3
16	0,21	2,475	0,109	35,01	531,9
20	0,16	2,475	0,109	35,71	536,3
24	0,14	2,475	0,109	35,81	536,7

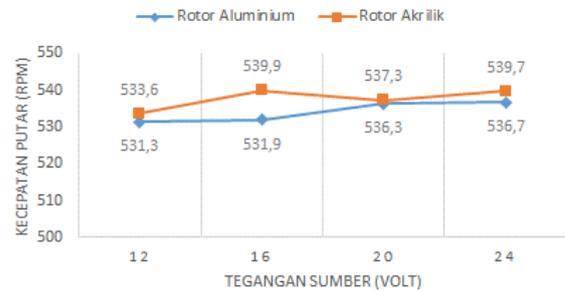
Tabel 12. Hasil Pengujian Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Tetap pada Rotor Akrilik

Tegangan Sumber (Volt)	Arus Sumber (Ampere)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan (RPM)
12	0,28	2,475	0,109	35,26	533,6
16	0,22	2,333	0,102	35,71	539,9
20	0,18	2,333	0,102	35,86	537,3
24	0,16	2,333	0,102	35,86	539,7

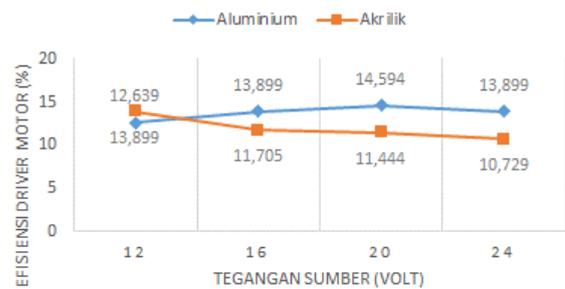
Hasil pengujian untuk pengaruh kecepatan motor pada bahan aluminium dengan akrilik di tunjukkan dalam Tabel 11. dan Tabel 12. Berdasarkan tabel tersebut dapat ditinjau bahwa nilai frekuensi yang tetap berbanding lurus dengan kecepatan putar motor yang dihasilkan. Pada frekuensi 35 Hz diperoleh keluaran kecepatan putar motor relatif konstan pada nilai 530 RPM. Jika diperhatikan secara detail untuk kecepatan putar motor berbahan akrilik lebih besar nilainya apabila dibandingkan dengan berbahan akrilik seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 10. Selain itu, nilai arus sumber yang diperoleh berbanding terbalik dengan tegangan sumber yang masuk ke *driver* motor. Saat tegangan sumber berubah dengan frekuensi yang tetap, nilai arus sumber yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal tersebut terjadi pada kedua pengujian baik menggunakan rotor aluminium maupun rotor akrilik.

Kemudian, dalam Gambar 11. dapat ditinjau kembali bahwa pada rotor aluminium terjadi kenaikan nilai torsi pada tegangan 12 volt, kemudian pada variabel tegangan selanjutnya nilai yang diperoleh tetap yaitu 0,005 Nm. Namun berkebalikan hasilnya saat menggunakan rotor akrilik. Saat menggunakan rotor akrilik, terjadi penurunan nilai torsi pada tegangan 12 volt, kemudian pada variabel tegangan selanjutnya nilai yang diperoleh lebih kecil.

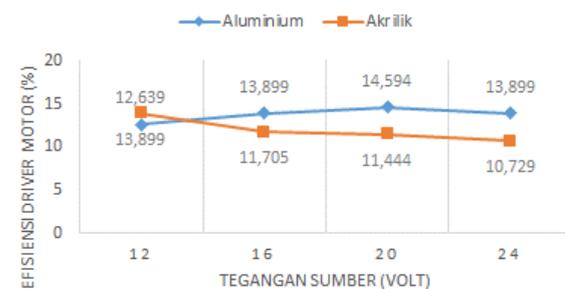
Sehingga di ketahui bahwa, nilai torsi yang dihasilkan pada rotor aluminium nilainya lebih besar daripada menggunakan rotor akrilik.



Gambar 10. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Tetap



Gambar 11. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Torsi Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Tetap



Gambar 12. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Efisiensi Driver Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Tetap

Sedangkan, untuk efisiensi dari *driver* motor memiliki nilai yang dipengaruhi oleh nilai Vrms dan Irms yang dihasilkan. Pada rotor aluminium nilai Vrms dan Irms yang dihasilkan lebih besar nilainya daripada saat menggunakan rotor akrilik, oleh sebab itu nilai daya input dan efisiensi yang dihasilkan akan lebih besar juga. Pada percobaan ini, semakin besar nilai tegangan sumber yang dihasilkan maka efisiensi motor yang diperoleh akan semakin kecil. Hal ini

terjadi karena pada motor BLDC 3 phase axial flux tidak menggunakan beban, sehingga nilai efisiensinya rendah. Berikut merupakan grafik hubungan tegangan sumber terhadap efisiensi driver motor BLDC 3 phase axial flux pada rotor aluminium dan akrilik pada Gambar 12.

3.4. Pengujian Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan dan Frekuensi Berbeda

Pengujian ini dilakukan dengan 4 variasi tegangan yaitu 12 volt, 16 volt, 20 volt, dan 24 volt dan 4 variasi frekuensi yaitu 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, dan 40 Hz. Penggunaan variasi frekuensi yang digunakan ditentukan oleh nilai minimum dan maksimum frekuensi yang diperoleh saat menggunakan tegangan terendah yaitu 12 volt. Ketika tegangan 12 volt, nilai frekuensi terendah yang diperoleh agar motor dapat berputar adalah sebesar 10 Hz dan nilai frekuensi maksimal yang diperoleh adalah sebesar 35 Hz. Oleh karena ini digunakan variasi frekuensi dengan rentang 10 Hz sampai 40 Hz.

Hasil pengujian untuk pengaruh kecepatan motor pada bahan aluminium dengan akrilik di tunjukkan dalam Tabel 13 dan Tabel 14. Nilai kecepatan putar motor yang diperoleh saat menggunakan rotor aluminium dan rotor akrilik saat tegangan dan frekuensi berbeda, nilai yang dihasilkan tidak jauh berbeda. Pada sumber tegangan yang sama, semakin besar nilai frekuensi yang diberikan semakin besar pula nilai kecepatan putar motor yang dihasilkan. Hal ini berlaku untuk semua variasi tegangan sumber. Nilai frekuensi untuk dapat menghasilkan kecepatan putar motor tertinggi pada pengujian ini adalah sebesar 40 Hz. Perbandingan secara keseluruhan hasil pengujian kecepatan putar motor BLDC 3 phase axial flux saat menggunakan rotor aluminium dengan rotor akrilik dapat ditinjau dalam Gambar 13.

Tabel 13. Hasil Pengujian Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Tetap pada Rotor Aluminium

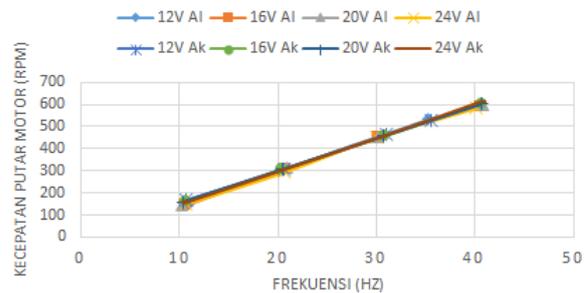
Tegangan Sumber (Volt)	Arus Sumber (Ampere)	Vrms (volt)	Irms (Ampere)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan (rpm)
12	0,07	2,050	0,094	10,23	151
	0,12	1,979	0,090	20,17	299,2
	0,2	2,050	0,091	30,08	453,5
	0,26	2,050	0,090	35,21	533,9
16	0,06	2,050	0,094	10,5	141,8
	0,1	2,050	0,093	20,74	308,9
	0,16	2,050	0,091	30,12	453,5
	0,25	2,050	0,089	40,51	593
20	0,05	1,979	0,091	10,23	143,5
	0,09	2,050	0,093	20,92	311,3
	0,14	2,050	0,091	30,12	454,5
	0,21	2,050	0,089	40,84	599,3
24	0,05	1,979	0,091	10,64	149,5
	0,08	2,050	0,093	20,66	293,9
	0,12	2,050	0,091	30,01	450,2
	0,17	2,050	0,089	40,12	582,3

Kemudian, dalam Gambar 14. hasil perhitungan torsi motor BLDC 3 phase axial flux dengan perbedaan jenis rotor dapat dilihat bahwa hasil perhitungan saat menggunakan rotor aluminium tidak jauh nilainya dengan

saat menggunakan rotor akrilik. Hal tersebut terjadi karena nilai Vrms dan Irms yang dihasilkan oleh kedua jenis rotor tidak jauh berbeda, nilai Vrms antar variasi tegangan sumber relatif sama karena pada driver motor yang digunakan menghasilkan tegangan keluaran bernilai konstan. Nilai torsi yang dihasilkan oleh kedua jenis rotor dipengaruhi oleh pengaturan frekuensi yang diberikan, pada tegangan sumber yang berbeda dan variabel frekuensi yang sama diperoleh nilai torsi yang sama besarnya. Saat tegangan sumber 12 volt pada rotor aluminium dengan frekuensi sebesar 10,23 Hz diperoleh nilai torsi sebesar 0,012 Nm. Sedangkan pada rotor akrilik dengan tegangan sumber yang sama dan pengaturan frekuensi sebesar 10,59 Hz diperoleh nilai torsi sebesar 0,011 N.

Tabel 14. Hasil Pengujian Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Tetap pada Rotor Akrilik

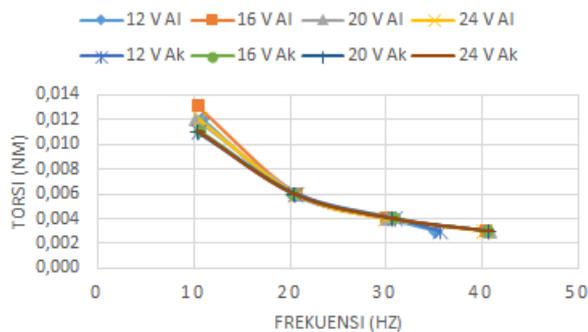
Tegangan Sumber (Volt)	Arus Sumber (Ampere)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Frekuensi (Hz)	Kecepatan (RPM)
12	0,07	2,050	0,094	10,59	167,6
	0,12	2,050	0,093	20,55	307,5
	0,22	2,050	0,091	30,97	462,5
	0,27	2,050	0,090	35,56	529
16	0,06	2,050	0,094	10,62	160,9
	0,1	2,050	0,093	20,34	306,3
	0,17	1,979	0,088	30,90	457,6
	0,28	1,979	0,086	40,58	606,5
20	0,05	1,979	0,091	10,30	157,6
	0,09	1,979	0,090	20,47	307
	0,15	1,979	0,088	30,63	457,4
	0,22	1,979	0,086	40,58	603,3
24	0,05	1,979	0,091	10,39	154,2
	0,08	1,979	0,090	20,30	301,9
	0,13	2,050	0,091	30,56	455,1
	0,20	1,979	0,086	40,58	612,1



Gambar 13. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Kecepatan Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan dan Frekuensi Berbeda

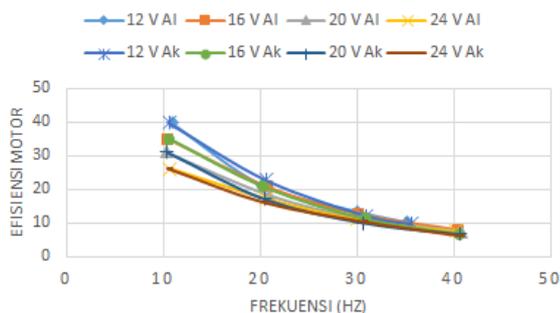
Sedangkan, untuk efisiensi dari driver motor hasil perhitungan daya dan efisiensi motor brushless direct current 3 phase axial flux dengan perbedaan jenis rotor dapat dilihat dalam Gambar 15. bahwa dengan tegangan sumber yang sama semakin tinggi nilai frekuensi yang

diberikan maka nilai daya *input* yang diperoleh semakin besar. Hal ini berbeda dengan daya *output* motor yang dihasilkan, perbedaan variasi tegangan sumber dan frekuensi tidak berpengaruh terhadap daya *output* yang diperoleh. Hal ini terjadi karena nilai V_{rms} pada pengujian ini relatif sama, sehingga nilai I_{rms} dan daya *output* yang dihasilkan nilainya tidak jauh berbeda dengan variasi tegangan sumber dan frekuensi yang lainnya.



Gambar 14. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Torsi Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan dan Frekuensi Berubah

Sehingga, pada pengujian ini pada tegangan sumber yang sama, semakin besar nilai frekuensi yang diberikan maka efisiensi motornya akan semakin kecil. Hal tersebut berlaku untuk semua variasi tegangan sumber. Ini terjadi karena pada pengujian motor BLDC 3 phase axial flux ini tidak menggunakan beban pada keluarannya, sehingga nilai efisiensi *driver* motor yang dihasilkan kecil, seperti diperoleh pada [15]. Pada rotor aluminium dan rotor akrilik efisiensi motor tertinggi yang diperoleh adalah sebesar 39,762% pada tegangan sumber 12 volt dan frekuensi 10 Hz.



Gambar 15. Grafik Hubungan Tegangan Sumber Terhadap Efisiensi Driver Motor BLDC 3 Phase Axial Flux Saat Nilai Tegangan Berubah dan Frekuensi Tetap

4. Kesimpulan

Setelah dilakukan percobaan dan pengujian ada beberapa teori yang dibuktikan secara praktik. Pada pengujian kecepatan putar motor *brushless direct current 3 phase*

axial flux, nilai frekuensi berbanding lurus dengan nilai kecepatan putar motor. Semakin besar nilai frekuensi yang diberikan, maka nilai kecepatan putar motor yang dihasilkan akan semakin besar juga.

Kemudian, pada pengujian motor *brushless direct current 3 phase axial flux* saat kondisi tegangan berubah dan frekuensi sama, ketika menggunakan rotor aluminium nilai kecepatan putar motor yang dihasilkan lebih besar daripada saat menggunakan rotor akrilik. Pada pengujian ini diperoleh arus sumber yang cukup besar yaitu mencapai 0,4 ampere, yang mana hal tersebut akan mempengaruhi nilai daya *input* yang dihasilkan, serta akan mempengaruhi nilai efisiensi motor yang dihasilkan. Rotor aluminium menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi.

Selanjutnya, pada pengujian motor *brushless direct current 3 phase axial flux* saat kondisi nilai tegangan tetap dan frekuensi berubah, walaupun nilai tegangan sumber yang diberikan tetap yaitu 24 volt, nilai arus sumber yang diperoleh tetap berubah berbanding lurus dengan frekuensi yang diberikan. Pada pengujian ini saat menggunakan rotor aluminium memiliki nilai kecepatan putar motor yang lebih besar dibandingkan saat pengujian menggunakan rotor akrilik.

Pada pengujian motor *brushless direct current 3 phase axial flux* saat kondisi nilai tegangan berubah dan frekuensi tetap, dengan frekuensi yang tetap maka nilai kecepatan putar motor yang dihasilkan akan tetap juga.

Pada pengujian motor *brushless direct current 3 phase axial flux* saat kondisi nilai tegangan dan frekuensi berbeda, secara keseluruhan tidak begitu banyak perbedaan nilai kecepatan putar motor yang dihasilkan. Saat menggunakan rotor aluminium, nilai *error persen* tertinggi yaitu sebesar 9,968%. Sedangkan, saat menggunakan rotor akrilik nilai *error persen* tertinggi yang diperoleh yaitu sebesar 5,508%.

Nilai efisiensi motor *brushless direct current 3 phase axial flux* yang diperoleh relatif kecil nilainya karena pada percobaan ini tidak menggunakan beban, sehingga tidak ada perubahan nilai daya yang signifikan.

Sehingga, secara keseluruhan saat menggunakan rotor aluminium hasil yang diperoleh lebih baik daripada saat menggunakan rotor akrilik. Hal ini terjadi karena bahan aluminium dapat mengurungkan medan magnet pada sebuah motor. Medan magnet yang berputar pada porosnya dapat meningkatkan efisiensi motor, sehingga hasil yang diperoleh lebih maksimal.

Referensi

- [1]. S. Madichetty, S. Mishra, and M. Basu, "New trends in electric motors and selection for electric vehicle propulsion systems," *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 11, no. 3, pp. 186–199, 2021.

- [2]. S. Sultan, A. B. Muljono, and I. M. A. Nrartha, "Visualisasi Pengasutan Motor Induksi Tiga Fase Berbasis Programmable Logic Control," *DIELEKTRIKA*, vol. 4, no. 1, pp. 58–69, 2017.
- [3]. P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) motor fundamentals," *Microchip Technol. Inc.*, vol. 20, no. 1, pp. 3–15, 2003.
- [4]. G. Dilovar and S. Gandzha, "Research of Inter-turn Short-circuit of a Synchronous Generator with Permanent Magnet," in *2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*, 2020, pp. 128–132.
- [5]. A. Nurmalia, W. Hadi, and W. Cahyadi, "Performance Test of Three-Phase Brushless Direct Current Motor Axial Flux with Differences Diameter of Neodymium Type Permanent Magnet," *ELKHA*, vol. 13, no. 1, pp. 55–62, 2021.
- [6]. Q. Khikmah, W. Hadi, and W. Cahyadi, "Analisis Pengaruh Air Gap (Celah Udara) Terhadap Unjuk Kerja Generator Axial Flux Double Side Rotor 1 Fasa Dengan Kutub Berlawanan (N-S)," *Transmisi*, vol. 23, no. 3, pp. 87–96, Jul. 2021.
- [7]. K. Tarsisius, Marsono, and S. Sayuti, "Liquid Cooling Model Of Axial Bldc Motor," vol. 6, no. 11, pp. 3569–3573, 2020, [Online]. Available: <http://jmess.org/>.
- [8]. A. W. Nurmalia, "Uji Performa Motor Brushless Direct Current 3 Phase Axial Flux dengan Perbedaan Diameter Magnet Permanen Jenis Neodymium," Tugas Akhir Teknik Elektro, Universitas Jember, 2020.
- [9]. M. Valtonen, A. Parviainen, and J. Pyrhonen, "The effects of the number of rotor slots on the performance characteristics of axial-flux aluminium-cage solid-rotor core induction motor," in *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2007, vol. 1, pp. 668–672.
- [10]. E. B. Kashani and A. H. Niasar, "Reduction of torque ripple in an electrolytic capacitor-less BLDC motor drive by simultaneous speed and torque control method," *Ain Shams Eng. J.*, 2021.
- [11]. S. Gandzha, D. Aminov, and B. Kosimov, "Design of brushless electric machine with axial magnetic flux based on the use of nomograms," in *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, 2018, pp. 282–287.
- [12]. P. Awari, P. Sawarkar, R. Agarwal, A. Khergade, and S. Bodkhe, "Speed control and electrical braking of axial flux BLDC motor," in *2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)*, 2017, pp. 297–302.
- [13]. R. Setiabudy, H. Wahab, and Y. S. Putra, "Reduction of cogging torque on brushless direct current motor with segmentation of magnet permanent," in *2017 4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 2017, pp. 81–86.
- [14]. M. F. Azizi, W. Hadi, and G. D. Kalandro, "Rancang Bangun Motor BLDC Axial Flux Menggunakan Dua Kawat Email Pada Lilitan Kumputan Stator," *J. Arus Elektro Indones.*, vol. 6, no. 2, pp. 52–57, 2020.
- [15]. M. K. Sari, W. Hadi, and W. Cahyadi, "Analisis Motor Brushless Direct Current Aksial Fluks 3 Fasa Menggunakan Magenet Permanen Neodymium Sebagai Prime Mover Generator," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 2, p. 195, 2020, doi: 10.24843/mite.2020.v19i02.p11.