

Pengaruh Air Gap Terhadap Unjuk Kerja Motor *Brushless Direct Current* 3 Fasa Fluks Aksial Stator Ganda

Bella Octavia Nurul Hidayah¹, Widyono Hadi², Widya Cahyadi³

[Submission: 09-09-2020, Accepted: 10-12-2020]

Abstract— Between the stator and rotor there is a gap called the air gap. In BLDC motors, air gaps can affect motor speed and motor torque. The purpose of this study is to determine the effect of the air gap on the speed and torque produced by the BLDC 3 phase double stator axial flux motor. Tests are carried out at 4 mm and 5 mm air gap, when the motor is not overloaded and when the motor is loaded, at a source voltage of 12V - 15V. The results of testing on the motor are not burdened, ie when the source voltage is increased, the voltage, current, frequency, speed, motor power and torque increase. At a 5 mm water gap, the results of the voltage, frequency and speed have a greater value than the 4 mm water gap. While the results of the motor current, motor power and torque have a smaller value than the 4 mm air gap. The results of the motorized test are when the load and source voltage are increased, the motor voltage, frequency and speed increase. While the current, power and torque of the motor decreases. At the 4 mm water gap, the results of the voltage, frequency and speed of the motor have a greater value than the 5 mm water gap. While the current, power and torque of the motor have a smaller value than the 5 mm air gap.

Intisari— Diantara stator dan rotor terdapat celah yang disebut celah udara (*air gap*). Pada motor BLDC celah udara dapat mempengaruhi kecepatan motor dan torsi motor. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh *air gap* terhadap kecepatan dan torsi yang dihasilkan oleh motor BLDC 3 fasa fluks aksial stator ganda. Pengujian dilakukan pada *air gap* 4 mm dan 5 mm, ketika motor tidak berbeban dan ketika motor diberi beban, pada tegangan sumber sebesar 12V – 15V. Hasil pengujian pada motor tidak berbeban yaitu ketika tegangan sumber dinaikkan, maka tegangan, arus, frekuensi, kecepatan, daya motor dan torsi meningkat. Pada *air gap* 5 mm, hasil dari tegangan, frekuensi dan kecepatan memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan pada *air gap* 4 mm. Sedangkan hasil dari arus motor, daya dan torsi motor memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan pada *air gap* 4 mm. Hasil pengujian motor berbeban yaitu ketika beban dan tegangan sumber dinaikkan, maka tegangan, frekuensi dan kecepatan motor meningkat. Sedangkan arus, daya dan torsi motor menurun. Pada *air gap* 4 mm, hasil dari tegangan, frekuensi dan kecepatan motor memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan pada *air gap* 5 mm. Sedangkan arus, daya dan torsi motor memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan pada *air gap* 5 mm.

Kata Kunci— *air gap*, motor bldc, fluks aksial, stator ganda.

I. PENDAHULUAN

Motor listrik termasuk salah satu perangkat listrik yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Sifat umum motor listrik yaitu semua motor listrik bekerja dengan menggunakan hukum elektromagnetik [1]. Motor BLDC merupakan motor listrik sinkron AC 3 fasa. Disebut dengan motor BLDC karena pada implementasinya menggunakan tegangan DC sebagai sumber utamanya. Konstruksi pada motor BLDC yaitu armature terdapat pada stator dan magnet permanen terdapat pada rotor. Pengoperasian motor ini mirip dengan motor DC yaitu menggunakan sumber utama berupa tegangan DC [2].

Motor *brushless direct current* dengan jenis aksial fluks merupakan jenis motor yang paling cocok digunakan pada kendaraan listrik. Keunggulan dari motor *brushless direct current* aksial fluks adalah dimensi dari konstruksinya relatif lebih kecil dibandingkan dengan konstruksi motor jenis lainnya, sehingga motor *brushless direct current* aksial fluks sangat tepat digunakan di ruangan yang terbatas. Konstruksi motor *brushless direct current* aksial fluks pada dasarnya terdiri dari sebuah piringan rotor yang dapat berputar dengan beberapa magnet yang menempel di dalam piringin rotor dan bagian stator yang berisi kumparan dengan inti konduktor pada slot-slot stator. Diantara stator dan rotor terdapat celah yang biasa disebut dengan *air gap*. Celah udara ini dapat mempengaruhi nilai kecepatan dan torsi yang dihasilkan oleh motor *brushless direct current*.

Pada penelitian sebelumnya tahun 2017 oleh Maulana, yang berjudul “Efek *Air gap* pada Rancang Bangun dan Uji Performa Generator Listrik Aksial berbasis Magnet Permanen NdFeB” menggunakan desain generator listrik fluks aksial yang terdiri dari dua bagian yaitu satu stator dan dua rotor. Pada penelitian tersebut menganalisis mengenai efek *air gap* terhadap performa generator listrik fluks aksial dengan menggunakan magnet NdFeB. Analisis dilakukan dengan mengukur tegangan keluaran dari generator listrik terhadap ukuran *air gap* dan kecepatan putar rotor. [3]

Dengan topik yang sama yaitu efek *air gap*, penelitian ini akan menganalisis mengenai pengaruh dari *air gap* yang digunakan terhadap keluaran motor *brushless direct current* 3 fasa fluks aksial stator ganda. Motor *brushless direct current* yang digunakan yaitu motor *brushless direct current* 3 fasa fluks aksial stator ganda yang mengacu pada laporan penelitian tahun 2019 oleh Hadi, yang berjudul “Rancang Bangun dan Analisis Driver Motor BLDC Konstruksi *Axial* 3 Fasa”. [4]

II. METODE

A. Alat dan Bahan

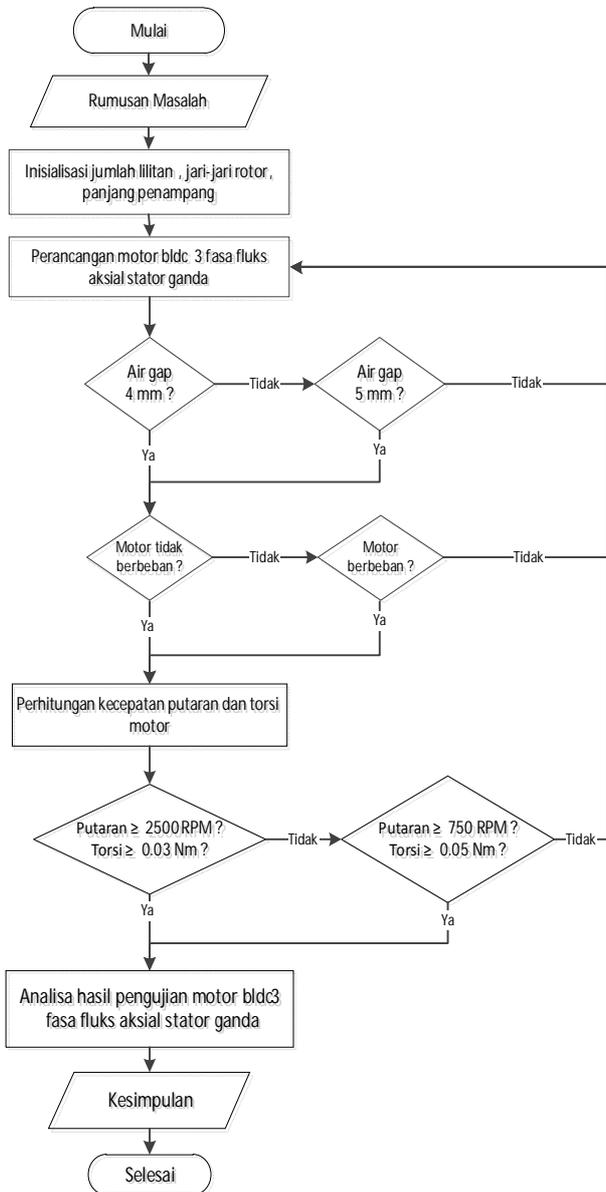
¹Mahasiswa, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember, Tukum, Tekung Lumajang, 67381 (Hp: 082228007388; e-mail: bellaoctavia23nurulhidayah@gmail.com)

^{2, 3} Staf Pengajar, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember, Kampus Tegalboto, Jl. Kalimantan No.37, Krajan Timur, Sumbersari, Kec. Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68121 (e-mail: widyono.hadi1961@gmail.com, e-mail: cahyadi@unej.ac.id)



Pada penelitian ini, bahan dari rotor yang digunakan yaitu akrilik dan magnet neodymium 15x2 mm. Sedangkan bahan dari stator yaitu akrilik, spul logam, baut, bearing 625-RS dan kawat email 0.5 mm. Alat yang digunakan untuk melakukan pengujian terdiri dari *Multimeter Digital* Krisbow Tipe Bench, *Multimeter Digital* Sanwa CD800a, *Oscilloscope* Hantek DSO5102P (2 Channels), *Tachometer Counter* Extech 461920 dan *Power Supply* CODY 3005DT (30V-5A).

B. Diagram Alir

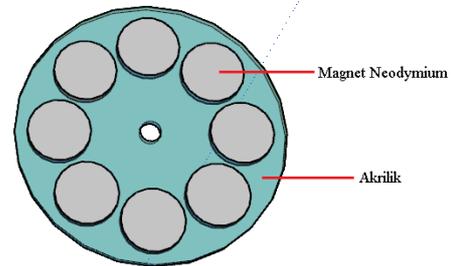


Gambar 1: Flowchart Penelitian

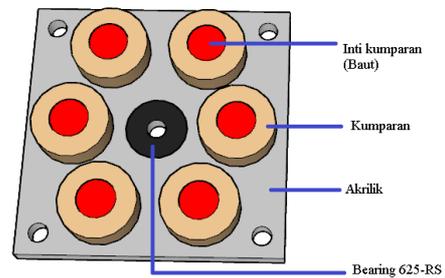
C. Desain Alat

Desain rotor pada motor ini terbuat dari akrilik berbentuk piringan dengan jari-jari rotor sebesar 3.2 cm dan ketebalan 2 mm. Jumlah magnet neodymium yang digunakan pada rotor sebanyak 8 buah dengan ukuran magnet sebesar 15x2 mm. Desain rotor tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.

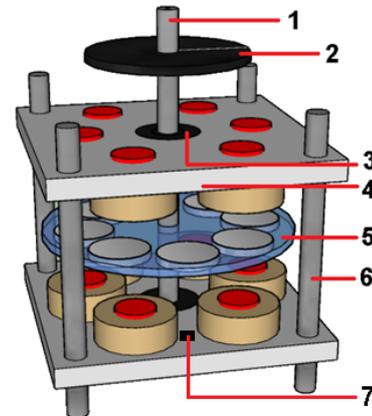
Desain stator pada motor ini berbentuk kotak yang terbuat dari akrilik dengan ukuran 8x8 cm dan ketebalan 5 mm. Motor ini menggunakan dua stator dengan kumparan sebanyak 6 kutub tiap stator. Masing-masing kumparan terdiri dari 150 lilitan dengan diameter kawat email 0.5 mm. Desain stator pada motor ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2: Desain 3D rotor motor BLDC 3 fasa fluks aksial stator ganda



Gambar 3: Desain 3D stator motor BLDC 3 fasa fluks aksial stator ganda



Gambar 4: Desain 3D keseluruhan motor BLDC 3 fasa fluks aksial stator ganda

Dari Gambar 4. dapat dijelaskan mengenai bagian-bagian dari motor BLDC 3 fasa fluks aksial stator ganda sebagai berikut.

1. Inti Besi
2. Encoder
3. *Bearing* 625-RS
4. Stator
5. Rotor
6. Baut
7. *Sensor Hall Effect*

D. Metode Pengumpulan Data

Pada penelitian ini, pengujian motor BLDC fluks aksial stator ganda dilakukan ketika motor tidak diberi beban dan ketika motor diberi beban. Metode yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua cara yaitu menggunakan pengukuran dan perhitungan.

1) Pengukuran

Pada tahap ini, pengujian motor BLDC fluks aksial stator ganda dilakukan dengan memvariasikan *air gap* sebesar 4 mm dan 5 mm, dengan tegangan sumber 12V, 13V, 14V dan 15V yang berasal dari *power supply*. Alat ukur yang digunakan dalam melakukan pengujian terdiri dari *Multimeter Digital*, *Ossilloscope*, *Tachometer* dan *Teslameter*. Data yang diambil pada saat pengukuran terdiri dari medan magnet, tegangan masukkan motor, arus masukkan motor, frekuensi dan kecepatan putaran motor.

2) Perhitungan

Pada tahap ini, perhitungan dilakukan dengan menggunakan hasil data dari pengukuran. Parameter yang dihasilkan dari perhitungan terdiri dari kecepatan putaran motor, daya masukkan motor, torsi motor dan gaya tolak menolak.

Untuk menghitung nilai dari kecepatan putaran motor dapat menggunakan persamaan (1) sebagai berikut.

$$n_r = \frac{120 f}{p} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

- n_r = Kecepatan putaran motor (RPM)
- f = Frekuensi (Hz)
- p = Jumlah *pole*

Dari hasil pengukuran berupa tegangan masukkan motor dan arus masukkan motor, maka dapat dihitung daya masukkan motor dengan menggunakan persamaan (2) sebagai berikut.

$$P = \sqrt{3} . V . I \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

- V = Tegangan masukkan motor (volt)
- I = Arus masukkan motor (ampere)
- P = Daya (watt)

Dengan menggunakan nilai pengukuran arus masukkan motor, jumlah lilitan, medan magnet pada magnet neodmium, *air gap* dan panjang penampang maka dapat dihitung gaya tolak menolak yang terjadi pada motor dengan menggunakan persamaan (4) sebagai berikut.

$$F = \frac{4\pi i N B_{magnet} x^2}{L} \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

- F = Gaya tolak menolak (N)
- B = Medan magnet (T)
- i = Kuat arus listrik (A)
- l = Panjang penampang (m)
- N = Jumlah lilitan
- x = *Air gap* (m)

Dari dimensi rotor dan perhitungan gaya tolak menolak, maka dapat dihitung nilai torsi dengan menggunakan persamaan (5) sebagai berikut.

$$T = F . r \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

- T = Torsi (Nm)
- F = Gaya (N)
- r = Jari-jari pada rotor (m)

Dari hasil perhitungan dan pengukuran kecepatan putaran motor, maka dapat dihitung *error* persen menggunakan persamaan (6) berikut.

$$E\% = \left| \frac{H_{hitung} - H_{ukur}}{H_{hitung}} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

Dimana:

- H_{hitung} = Hasil perhitungan kecepatan
- H_{ukur} = Hasil pengukuran kecepatan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pada motor BLDC dilakukan dengan cara mengukur keluaran dari motor. Pengujian dilakukan dengan menggunakan *air gap* 4 mm dan 5 mm, ketika motor tidak berbeban dan ketika motor berbeban. *Air gap* yang digunakan pada motor ini sebesar 4 mm dan 5 mm. Hal itu dikarenakan jika *air gap* yang digunakan kurang dari sama dengan 4 mm, terdapat gesekan antara rotor dan stator saat rotor berputar karena posisi rotor dan stator yang terlalu dekat. Dan ketika *air gap* yang digunakan lebih dari 5 mm, arus yang muncul pada *power supply* mendekati nilai 4 ampere, sedangkan arus maksimal dari *power supply* yang digunakan sebesar 5 ampere. Dari hasil pengukuran tersebut akan dilakukan perbandingan mengenai hasil keluaran dari motor BLDC. Parameter yang akan dibandingkan terdiri dari tegangan motor, arus motor, frekuensi dan kecepatan putaran motor. Pada pembahasan ini dilakukan perbandingan hasil pengukuran ketika motor tidak berbeban dan ketika motor diberi beban resistor 50 ohm.

TABEL I
 PERBANDINGAN HASIL PENGUKURAN KETIKA MOTOR TIDAK DAN MOTOR BERBEBAN RESISTOR 50 OHM

Keadaan Motor	<i>Air gap</i> (mm)	Tegangan sumber (volt)	Tegangan masukkan motor (volt)	Arus masukkan motor (ampere)	f (Hz)	Putaran motor ukur (RPM)
Motor Tidak Berbeban	4	12	8.460	1.240	260	3852
		13	9.157	1.280	284	4261
		14	9.927	1.290	312	4711
		15	10.683	1.290	333	4976
	5	12	8.607	0.96	373	5551
		13	9.380	0.97	400	6023
		14	10.047	0.99	423	6427
		15	10.813	1.01	454	6887
Motor Berbeban (Resistor 50 ohm)	4	12	7.467	3.150	70	1057
		13	7.957	3.170	72	1070
		14	8.673	3.230	82	1247
		15	9.490	3.330	88	1334
	5	12	6.980	3.24	60	899
		13	7.800	3.43	65	989
		14	8.607	3.56	78	1173
		15	9.440	3.68	84	1271

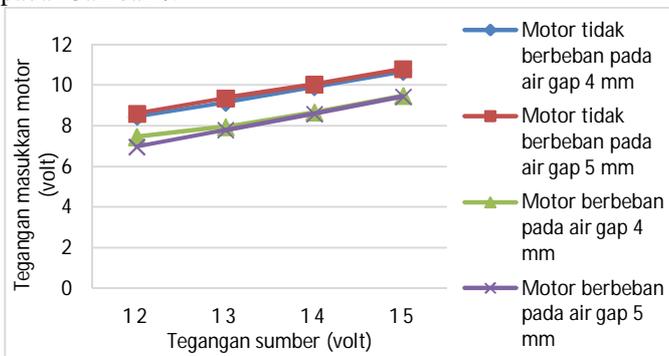
Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa tegangan masukkan motor, frekuensi dan kecepatan putaran motor yang dihasilkan



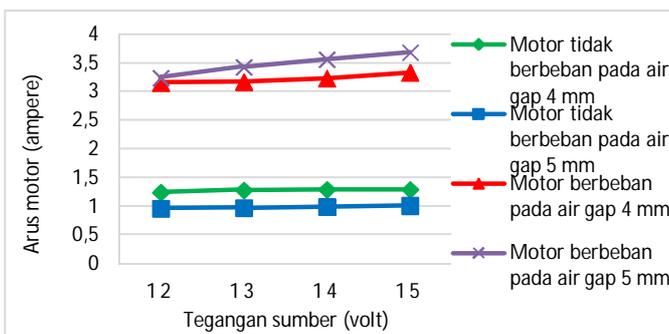
ketika motor tidak berbeban memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan ketika motor berbeban. Sedangkan arus motor pada saat motor berbeban memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan pada saat motor tidak berbeban. Pada motor tidak berbeban, semakin besar *air gap* yang digunakan, maka tegangan motor, frekuensi dan kecepatan putaran motor juga semakin meningkat sedangkan arus motor semakin menurun. Pada motor berbeban, semakin besar *air gap* yang digunakan, maka tegangan motor, frekuensi dan kecepatan putaran motor semakin menurun, sedangkan arus motor semakin meningkat.

Pada motor BLDC, tegangan masukkan motor pada saat motor tidak berbeban memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada saat motor berbeban. Nilai tertinggi dari tegangan masukkan motor terletak pada saat motor tidak berbeban dengan *air gap* 5 mm. Pada pengujian motor tanpa beban, nilai tegangan masukkan motor ketika *air gap* 5 mm memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan *air gap* 4 mm. Namun ketika pengujian motor dengan menggunakan beban, nilai tegangan masukkan motor ketika *air gap* 4 mm memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan *air gap* 5 mm. Grafik hubungan tegangan sumber terhadap tegangan masukkan motor dapat dilihat pada Gambar 5.

Pada motor BLDC, arus masukkan motor pada saat motor berbeban memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada saat motor tidak berbeban. Nilai tertinggi dari arus masukkan motor terletak pada saat motor berbeban dengan *air gap* 5 mm. Pada pengujian motor tanpa beban, nilai arus masukkan motor ketika *air gap* 4 mm memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan *air gap* 5 mm. Namun ketika pengujian motor dengan menggunakan beban, nilai arus masukkan motor ketika *air gap* 5 mm memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan *air gap* 4 mm. Grafik hubungan tegangan sumber terhadap arus masukkan motor dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 5: Grafik hubungan tegangan sumber terhadap tegangan motor ketikamotor tidak berbeban dan ketika motor berbeban



Gambar 6: Grafik hubungan tegangan sumber terhadap arus motor ketika motor tidak berbeban dan ketika motor berbeban

TABEL II
PERHITUNGAN KELUARAN MOTOR KETIKA MOTOR TIDAK BERBEBAN DAN KETIKA MOTOR DIBERI BEBAN RESISTOR 50 OHM

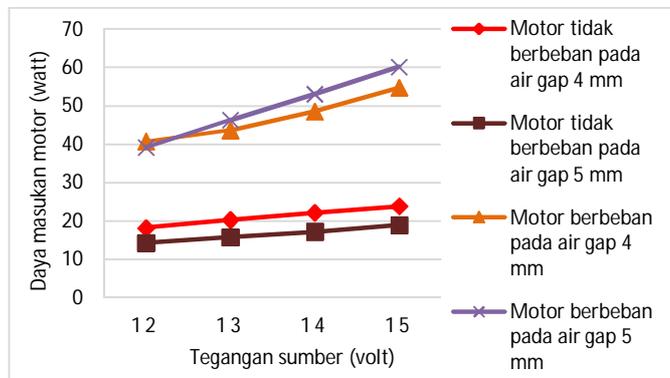
Keadaan Motor	Air gap (mm)	Tegangan sumber (volt)	Daya masukkan motor (watt)	Gaya tolak menolak (N)	Torsi motor (Nm)	Putaran motor hitung (RPM)
Motor Tidak Berbeban	4	12	18.170	1.876	0.060	3900
		13	20.301	1.921	0.061	4260
		14	22.180	1.951	0.062	4680
		15	23.870	1.951	0.062	4995
	5	12	14.311	1.689	0.054	5595
		13	15.759	1.706	0.055	6000
		14	17.227	1.741	0.056	6345
		15	18.917	1.776	0.057	6810
Motor Berbeban (Resistor 50 ohm)	4	12	40.738	4.765	0.152	1050
		13	43.687	4.795	0.153	1080
		14	48.523	4.886	0.156	1230
		15	54.736	5.037	0.161	1320
	5	12	39.171	5.699	0.182	900
		13	46.339	6.033	0.193	975
		14	53.070	6.262	0.200	1170
		15	60.170	6.473	0.207	1260

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa nilai dari daya motor, torsi motor dan gaya tolak menolak yang dihasilkan pada saat motor diberi beban memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan pada saat motor tidak berbeban. Pada motor tidak berbeban, semakin besar *air gap* yang digunakan maka nilai daya motor, torsi motor dan gaya tolak menolak motor semakin turun. Namun pada saat motor diberi beban, nilai daya motor dan torsi motor semakin naik, sedangkan nilai gaya tolak menolak motor semakin turun.

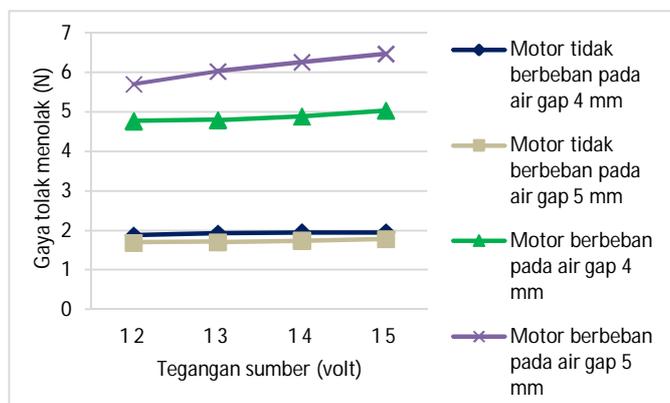
Dari hasil perhitungan, nilai dari daya masukkan motor pada saat motor berbeban memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada saat motor tidak berbeban. Nilai tertinggi dari daya masukkan motor terletak pada saat motor berbeban dengan *air gap* 5 mm. Pada pengujian motor tanpa beban, nilai daya masukkan motor ketika *air gap* 4 mm memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan *air gap* 5 mm. Namun ketika pengujian motor dengan menggunakan beban, nilai daya masukkan motor ketika *air gap* 5 mm memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan *air gap* 4 mm. Grafik hubungan tegangan sumber terhadap daya masukkan motor dapat dilihat pada Gambar 7.

Dari hasil perhitungan, nilai gaya tolak menolak pada saat motor berbeban memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada saat motor tidak berbeban. Nilai tertinggi dari gaya tolak menolak motor terletak pada saat motor berbeban dengan *air gap* 4 mm. Pada pengujian motor tanpa beban, nilai gaya tolak menolak motor ketika *air gap* 4 mm memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan *air gap* 5 mm. Namun ketika pengujian motor dengan menggunakan beban, nilai gaya tolak menolak motor ketika *air gap* 4 mm memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan *air gap* 5 mm. Perbedaan nilai

gaya tolak menolak motor ketika motor tidak berbeban dengan motor berbeban resistor 50 ohm terjadi cukup jauh. Hal itu dikarenakan terjadi lonjakan arus yang signifikan pada motor berbeban dan perbedaan nilai medan magnet. Grafik hubungan tegangan sumber terhadap gaya tolak menolak dapat dilihat pada Gambar 8.

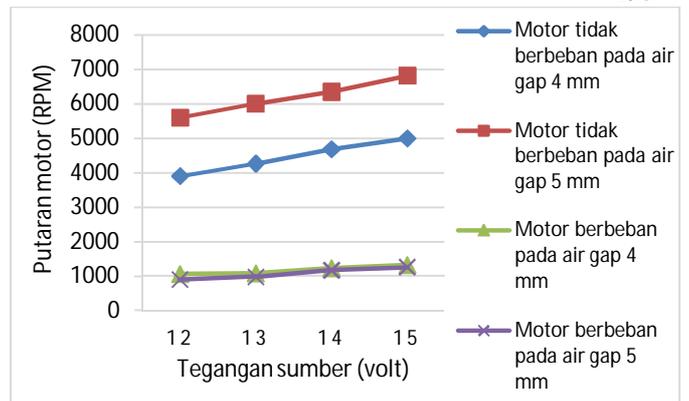


Gambar 7: Grafik hubungan tegangan sumber terhadap daya masukan motor ketika motor tidak berbeban dan ketika motor berbeban

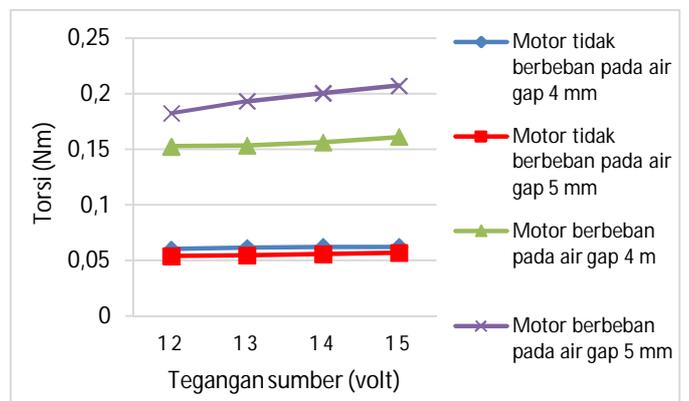


Gambar 8: Grafik hubungan tegangan sumber terhadap daya masukan motor ketika motor tidak berbeban dan ketika motor berbeban

Dari hasil perhitungan, nilai dari kecepatan putaran motor pada saat motor tidak berbeban memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada saat motor berbeban. Nilai tertinggi dari kecepatan putaran motor terletak pada saat motor tidak berbeban dengan *air gap* 5 mm. Pada pengujian motor tanpa beban, nilai kecepatan putaran motor ketika *air gap* 4 mm memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan *air gap* 5 mm. Namun ketika pengujian motor dengan menggunakan beban, nilai kecepatan putaran motor ketika *air gap* 5 mm dan *air gap* 4 mm memiliki selisih yang kecil. Perbedaan nilai kecepatan putaran motor ketika motor tidak berbeban dengan motor berbeban resistor 50 ohm terjadi cukup besar. Hal itu dikarenakan ketika motor diberi beban maka untuk mencapai 1 putaran membutuhkan waktu yang lebih lama sehingga frekuensinya lebih kecil dibandingkan pada saat motor tidak diberi beban. Grafik hubungan tegangan sumber terhadap kecepatan putaran motor dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik hubungan tegangan sumber terhadap kecepatan putaran motor ketika motor tidak berbeban dan ketika motor berbeban



Gambar 10: Grafik hubungan tegangan sumber terhadap torsi motor ketika motor tidak berbeban dan ketika motor berbeban

Dari Gambar 10 dapat dilihat bahwa nilai dari torsi motor pada saat motor berbeban memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada saat motor tidak berbeban. Nilai tertinggi dari torsi motor terletak pada saat motor berbeban dengan *air gap* 5 mm. Pada pengujian motor tanpa beban, nilai torsi motor ketika *air gap* 4 mm memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan *air gap* 5 mm. Namun ketika pengujian motor dengan menggunakan beban, nilai torsi motor ketika *air gap* 5 mm memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan *air gap* 4 mm. Perbedaan nilai torsi motor ketika motor tidak berbeban dengan motor berbeban resistor 50 ohm terjadi cukup besar. Hal itu dikarenakan terjadi lonjakan arus masukan motor yang signifikan pada saat motor berbeban.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Dalam pengujian kecepatan putaran motor *brushless direct current* tanpa menggunakan beban, ketika *air gap* yang digunakan semakin besar maka kecepatan putaran yang dihasilkan juga semakin besar. Misalnya pada tegangan sumber 12 volt ketika *air gap* yang digunakan 4 mm, kecepatan motor yang dihasilkan sebesar 3852 RPM. Namun ketika *air gap* yang digunakan menjadi 5 mm,



- kecepatan motor yang dihasilkan sebesar 5551 RPM. Sehingga ketika *air gap* dinaikkan dari 4 mm ke 5 mm terjadi kenaikan nilai kecepatan putaran motor sebesar 1699 RPM.
2. Dalam pengujian torsi motor *brushless direct current* tanpa menggunakan beban, ketika *air gap* yang digunakan semakin besar maka torsi yang dihasilkan semakin kecil. Misalnya saat tegangan sumber 12 volt ketika *air gap* yang digunakan 4 mm, torsi motor yang dihasilkan sebesar 0.045 Nm. Namun ketika *air gap* yang digunakan menjadi 5 mm, torsi yang dihasilkan sebesar 0.025 Nm. Sehingga ketika *air gap* dinaikkan dari 4 mm ke 5 mm terjadi penurunan nilai torsi motor sebesar 0.02 Nm.
 3. Pada pengujian kecepatan putaran motor *brushless direct current* dengan menggunakan beban resistor 50 ohm, ketika *air gap* yang digunakan semakin besar maka kecepatan putaran motor yang dihasilkan semakin kecil. Misalnya saat tegangan sumber 12 volt, ketika *air gap* yang digunakan 4 mm, kecepatan motor yang dihasilkan sebesar 1057 RPM. Namun ketika *air gap* yang digunakan menjadi 5 mm, kecepatan motor yang dihasilkan sebesar 900 RPM. Sehingga ketika *air gap* dinaikkan dari 4 mm ke 5 mm terjadi penurunan nilai kecepatan putaran motor sebesar 157 RPM.
 4. Pada pengujian torsi motor *brushless direct current* dengan menggunakan beban resistor 50 ohm, ketika *air gap* yang digunakan semakin besar maka torsi yang dihasilkan juga semakin besar. Misalnya saat tegangan sumber 12 volt, ketika *air gap* yang digunakan 4 mm, torsi motor yang dihasilkan sebesar 0.368 Nm. Namun ketika *air gap* yang digunakan menjadi 5 mm, torsi motor yang dihasilkan sebesar 0.416 Nm. Sehingga ketika *air gap* dinaikkan dari 4 mm ke 5 mm terjadi kenaikan nilai torsi motor sebesar 0.048 Nm.

REFERENSI

- [1] APRESCO, R. A. D. 2017. Perbandingan unjuk kerja notor brushless direct current dan brushed dc pada nogogeni urban konsep. 0:1–71.
- [2] Budijanto, A. 2018. Pengaturan kecepatan motor dc pada robot line follower menggunakan pulse width modulation (pwm). Senasif. 2–2.
- [3] Fallis, A. 2013. Bab ii landasan teori. Journal of Chemical Information and Modeling. 53(9):1689–1699.
- [4] Giancoli, D. C. 2001. FISIKA. Edisi ke-5. Jakarta: Erlangga.
- [5] Giulietti dan Assumpção. 2019. 濟無 No Title No Title. 9. Journal of Chemical Information and Modeling.
- [6] Hadi, Widyono., G. Aditya Rahardi, D. Ayu Larasati, M. Gozali, dan S. Bachri Masmachofari. 2019. Rancang Bangun dan Analisis Driver Motor BLDC Konstruksi Axial 3 Fasa. Laporan Penelitian
- [7] Hughes, A. dan B. Drury. 2013. Electric Motors and Drives. Electric Motors and Drives.
- [8] Jearl Walker. 2014. Fundamentals of Physics Halliday & Resnick 10ed. Wiley.
- [9] JST UK. 2018. Wire size and current rating. 3:1.
- [10] Maulana, A. 2017. Efek air gap pada rancang bangun dan uji performa generator listrik fluks aksial berbasis magnet permanen ndfeb. PISTON: Journal of Technical Engineering. 1(1):6–12.
- [11] Parviainen, A. 2005. Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low-Speed Machines and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial-Flux Machines. Thesis.
- [12] Pratama, F. dan E. 2018. Rancang bangun pengendalian kecepatan brushless dc motor tipe a2212/10t 1400 kv menggunakan kontroler pid berbasis labview. Jurnal Teknik Elektro. 7(03):157–166.
- [13] Putra, R. A. W., E. Firmansyah, dan F. Danang Wijaya. 2014. Metode six step comutation pada perancangan rangkian kendali sensored motor brushless direct current. Jurnal Penelitian Teknik Elektro Dan Teknik Informasi. 1(1):46–50.
- [14] Shewane, P. G., M. Gite, A. Singh, dan A. Narkhede. 2014. An overview of neodymium magnets over normal magnets for the generation of energy. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2(12):4056–4059.
- [15] Siswoyo. 2008. Teknik Listrik Industri. PhD Proposal.