

Desain External Rotor IPM-V Motor Brushless DC Terhadap Torsi Cogging

Muhammad Fauzan Rhabbani^{*1}, Ermanu Azizul Hakim², Nur Kasan³
^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Malang
fauzanrhabbany@gmail.com

Abstract - Internal Permanent Magnet brushless DC motor is one of the various types of electric motors using permanent magnets that are inserted into the rotor's core without having to stick it like a permanent magnet motor mounted on the surface. This motor has better torque characteristics, high efficiency, and sturdy construction. But the consequences in the use of permanent magnets can't be separated from the interaction between the permanent magnetic field mounted by the rotor with stator teeth. So that development is needed to obtain the results of better cogging torque and efficiency, such as variations in the external rotor IPM-V angular range of 80° , 90° and 100° in 18 slots and 16 pole models which are simulated using the Infolytica Magnet application based on Finite Element Method (FEM), the data is processed using Microsoft Excel, so that the output will be a parameter in the Simulink MATLAB 2016a modeling to get the characteristics of the design motor. Variation testing on the motor is done at a speed of 2100 rpm. The results of the test show that the minimum cogging torque value in the angle model of the 90° magnetic range is 1.64 Nm with the highest efficiency of 80.6%. Smaller cogging torque values will reduce vibration or noise when the motor is spinning. The high value of efficiency indicates the losses that cause heating on the motor are smaller, so that the motor operating period becomes longer.

Keywords — Permanent magnet motor, External rotor IPM-V, Magnetic range angle, Cogging torque

Abstrak—Motor brushless DC Internal Permanent Magnet merupakan salah satu dari berbagai jenis motor listrik dengan menggunakan magnet permanen yang dimasukkan ke dalam inti rotor tanpa harus menempelkannya seperti motor magnet permanen yang terpasang di permukaan. Motor ini memiliki karakteristik torsi yang lebih baik, efisiensi tinggi dan konstruksi yang kokoh. Namun konsekuensi dalam penggunaan magnet permanen tidak lepas dari hubungan antara medan magnet permanen yang dipasang pada rotor dengan gigi stator. Sehingga diperlukan pengembangan untuk memperoleh hasil torsi cogging dan efisiensi yang lebih baik, seperti variasi IPM-V rotor luar dengan sudut rentang magnet 80° , 90° dan 100° pada model 18 slot dan 16 pole yang disimulasikan menggunakan aplikasi Magnet Infolytica berbasis Finite Element Method (FEM), selanjutnya data diolah menggunakan Microsoft Excel, sehingga mendapatkan hasil keluaran yang akan menjadi parameter pada permodelan Simulink MATLAB 2016a untuk mendapatkan karakteristik motor hasil desain. Pengujian variasi pada motor dilakukan pada kecepatan 2100 rpm. Hasil pengujian menunjukkan nilai torsi cogging minimum pada model sudut rentang magnet 90° yaitu 1.64 Nm dengan efisiensi tertinggi sebesar 80.6%. Semakin kecil torsi cogging yang didapatkan

maka akan mengurangi getaran ataupun kebisingan saat motor berputar. Tingginya nilai efisiensi menandakan rugi-rugi daya yang menyebabkan pemanasan pada motor lebih kecil, sehingga masa operasi motor menjadi lebih lama.

Kata Kunci—motor magnet permanen, IPM-V rotor luar, sudut rentang magnet, torsi cogging

I. PENDAHULUAN (FONT 10)

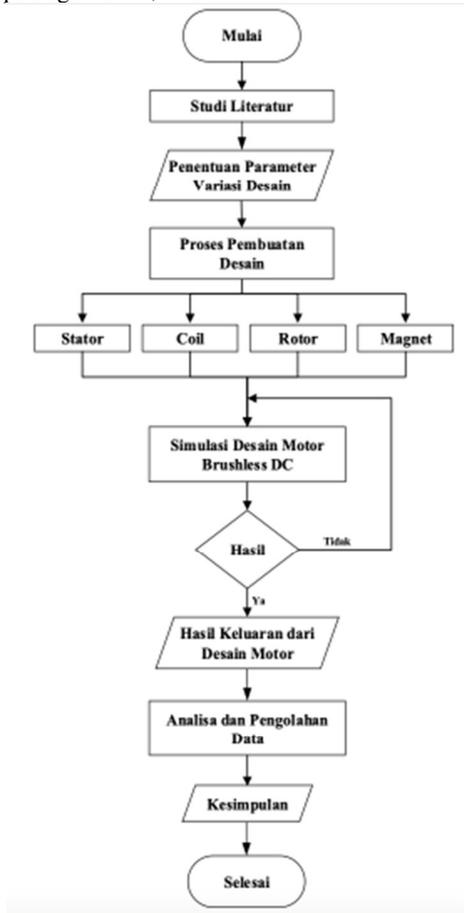
Ketertarikan pada mesin sinkron magnet permanen (PMSM) terus meningkat di seluruh dunia dan sangat populer diberbagai aplikasi industri, terutama dengan meningkatnya penggunaan transportasi elektrik dan energi terbarukan. Penggunaan magnet permanen salah satunya terdapat pada motor brushless DC sebagai pengganti eksitasi elektromagnetik yang menghasilkan banyak keuntungan seperti tidak ada kerugian eksitasi, konstruksi yang disederhanakan, peningkatan efisiensi, dan torsi yang tinggi [1].

Terdapat beberapa penelitian yang membahas mengenai perbandingan Surface Permanent Magnet (SPM) dan Internal Permanent Magnet (IPM) pada inner rotor. Penelitian tersebut mengevaluasi IPM dan SPM dengan concentrated winding dan distributed winding pada model 18 slot dan 20 pole saat kecepatan rendah maupun tinggi. Penelitian tersebut menghasilkan torsi denyut IPM dan SPM masing-masing sebesar 0.19 Nm dan 0.185 Nm ketika kecepatan rendah, Sedangkan ketika model IPM dan SPM disimulasikan pada kecepatan tinggi mendapatkan torsi denyut yang lebih tinggi masing-masing sebesar 29 Nm dan 89 Nm [2]. Penelitian Kedua, melakukan analisa terhadap dua jenis desain motor magnet permanen interior, kemudian dibandingkan dengan motor SPM sebagai motor referensi. Analisis Finite Element dilakukan dan hasilnya motor IPM tipe-V memiliki kualitas torsi yang lebih baik dan wilayah daya konstan yang lebih luas. Disimpulkan bahwa motor IPM tipe-V memiliki lebih banyak manfaat dibandingkan dengan SPM dan motor tipe IPM spoke konvensional pada kecepatan tinggi [3]. Penelitian berikutnya, melakukan pemodelan IPM-V pada external rotor dengan 24 slot 22 pole untuk aplikasi ekor helikopter. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi motor tipe IPM-V saat daya rendah maupun daya tinggi dengan nilai ketika daya rendah sebesar 86.5% sedangkan ketika daya tinggi sebesar 96.2% [4]. Merujuk dari beberapa penelitian diatas terkait

perbandingan Internal Permanent Magnet (IPM) dan Surface Permanent Magnet (SPM). Maka penelitian tugas akhir ini mendesain motor brushless DC tipe external rotor IPM-V pada kecepatan 2100 rpm dengan variasi sudut rentang magnet 80°, 90° dan 100°. Kemudian dari parameter tersebut dilakukan analisa menggunakan metode finite element (FEM). Software yang digunakan adalah MagNet Infolytica, selanjutnya data yang didapat diolah menggunakan Microsoft Excel sehingga diperoleh hasil keluaran torsi cogging yang dibandingkan pada tiap variasi sudut rentang magnet. Kemudian dilakukan permodelan dengan menggunakan Simulink MATLAB 2016a untuk mendapatkan karakteristik motor hasil desain.

II. METODE PENELITIAN

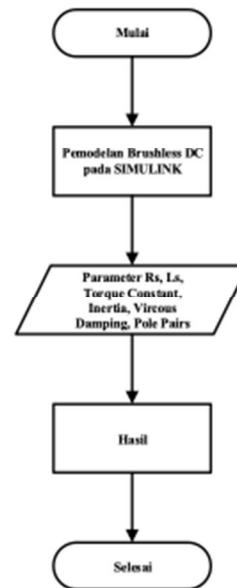
Proses penelitian dibuat dalam bentuk diagram alir mulai dari simulasi, analisa hingga pengolahan data. Hal ini dilakukan agar mempermudah dalam memahami proses penelitian. Berikut merupakan diagram alir penelitian yang disajikan pada gambar 1,



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pengujian putaran motor dilakukan setelah pembuatan model pada Infolytica MagNet. Pengujian dilakukan pada

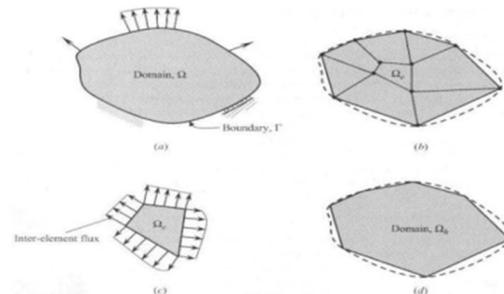
setiap variasi sudut rentang magnet. Hasil keluaran akan digunakan sebagai parameter input pada MATLAB 2016a. Selanjutnya dilakukan pengolahan data agar mengetahui karakteristik motor dan torsi cogging pada motor brushless DC. Diagram alir pengujian karakteristik pada Simulink dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Pengujian Karakteristik Motor pada Simulink MATLAB 2016

A. Metode Finite Element

Metode Finite Element (Elemen Hingga) adalah suatu metode numerik untuk menyelesaikan permasalahan teknik. Metode ini efektif untuk menghitung distribusi pada medan elektromagnetik, dalam FEM suatu domain dilihat sebagai gabungan dari subdomain, hal tersebut dapat dilihat pada gambar 3 dibawah ini [5].

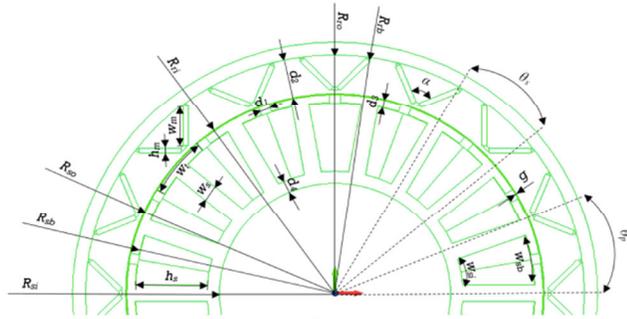


Gambar 3. Gabungan Subdomain dari FEM [5]

B. Desain Motor Brushless DC

Dimensi dari struktur Rotor dan Stator pada motor menggunakan kelipatan genap. Kerangka stator dan rotor terdiri dari beberapa bagian seperti slot, pole, yoke, shoe, back iron depth dan lain sebagainya. Agar lebih jelas bagian

kerangka rotor dan stator ditunjukkan pada gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4. Kerangka Rotor dan Stator

Perhitungan ukuran rotor dan stator saling berkaitan satu sama lain. Setiap bagian dari stator maupun rotor dapat dihitung, seperti yang disajikan pada persamaan berikut ini [6]:

a. Perhitungan derajat slot (θ_s),

$$\theta_s = \frac{2\pi}{N_s} \quad (1)$$

b. Perhitungan derajat pole (θ_p),

$$\theta_p = \frac{2\pi}{N_p} \quad (2)$$

c. Perhitungan tebal rotor (d_2),

$$d_2 = \frac{R_{ro} - R_{ri}}{2} \quad (3)$$

d. Perhitungan diameter yoke rotor (R_{rb}),

$$R_{rb} = R_{ro} - (2 \times 0.00075) \quad (4)$$

e. Perhitungan diameter luar stator (R_{so}),

$$R_{so} = R_{ri} - (2 \times g) \quad (5)$$

f. Perhitungan tebal shoetip (d_3),

$$d_3 = 0.25 \times h_s \quad (6)$$

g. Perhitungan diameter dalam slot (R_{sb}),

$$R_{sb} = R_{so} - (2 \times d_3) \quad (7)$$

h. Perhitungan back iron depth (d_4),

$$d_4 = \frac{R_{sb} - (2 \times h_s) - R_{si}}{2} \quad (8)$$

i. Penghitungan slot pitch (τ_s),

$$\tau_s = \frac{\pi R_{so}}{N_s} \quad (9)$$

j. Perhitungan coil span,

$$coil\ span = int(N_s / N_p) \quad (10)$$

k. Penghitungan coil pitch (τ_c),

$$\tau_c = coil\ span \times \tau_s \quad (11)$$

l. Penghitungan pole pitch (τ_p),

$$\tau_p = \frac{\pi R_{rb}}{N_p} \quad (12)$$

m. Penghitungan panjang inti efektif L_i ,

$$L_i = L \cdot k_{stack} \quad (13)$$

n. Perhitungan lebar slot luar (w_{sb}),

$$w_{sb} = \left(\frac{\pi R_{sb}}{N_s} \right) - w_s \quad (14)$$

o. Perhitungan lebar slot dalam (w_{si}),

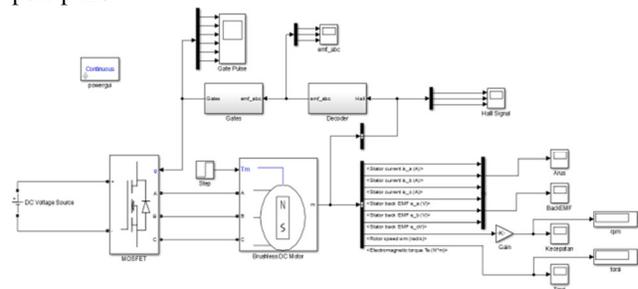
$$w_{si} = \left(\frac{\pi(R_{sb} - (2 \times h_s))}{N_s} \right) - w_s \quad (15)$$

Berdasarkan persamaan yang telah disajikan diatas dari parameter-parameter awal yang telah ditentukan maka diperoleh tabel 1. Parameter tersebut akan digunakan sebagai acuan desain motor 18 slot 16 pole pada aplikasi Magnet Infolytica.

Tabel 1. Parameter Desain Motor

No	Parameter	Nilai
1	Material stator dan rotor	M250-50A
2	Material permanen magnet	NdFeb 48/11
3	Material lilitan	5.77e7 Siemens/m
4	Material air box dan air gap	AIR (udara)
5	Diameter luar rotor (R_{ro})	380 mm
6	Diameter dalam rotor (R_{ri})	319 mm
7	Diameter yoke rotor (R_{rb})	378.5 mm
8	Tebal rotor (d_2)	30.5 mm
9	Diameter dalam stator (R_{si})	176 mm
10	Diameter luar stator (R_{so})	317 mm
11	Diameter dalam slot (R_{sb})	306.5 mm
12	Tebal shoetip (d_3)	5.25 mm
13	Back Iron Depth (d_4)	10.25 mm
14	Panjang Inti (L_i)	76 mm
15	Lebar tooth (w_s)	21 mm
16	Tinggi tooth (h_s)	55 mm
17	Jumlah lilitan per slot (Z)	140 lilitan
18	Sudut rentang magnet (α)	80°, 90° dan 100°
19	Tinggi magnet (h_m)	4 mm
20	Lebar magnet (w_m)	7 mm
21	Celah udara (g)	1 mm
22	Tebal core (L)	80 mm

Pemodelan motor brushless DC pada software Simulink MATLAB 2016a menggunakan pemodelan yang sederhana seperti yang ditunjukkan pada gambar 5 untuk mendapatkan karakteristik motor hasil desain. Parameter motor yang dimasukkan berupa stator phase resistance (R_s), stator phase inductance (L_s), torque constant, inertia, viscous damping, dan pole pairs.

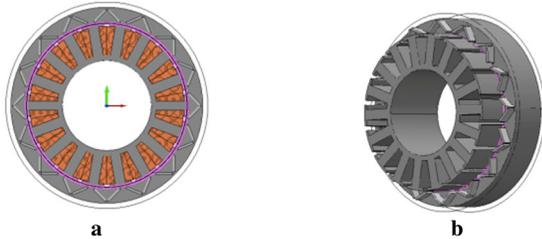


Gambar 5. Pemodelan Motor Brushless DC pada Simulink MATLAB 2016a

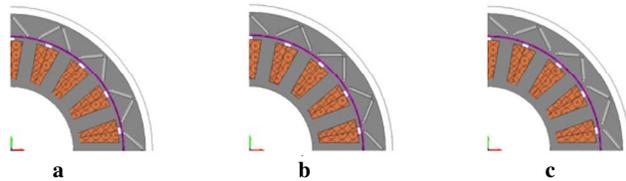
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Desain Geometri Motor

Desain kerangka motor dibuat menggunakan software MagNet Infolytica, hasil desain motor menggunakan 18 slot 16 pole yang disajikan pada tampilan 2D maupun 3D seperti gambar 6. Desain motor disimulasikan dengan 3 variasi rentang sudut magnet yaitu 80°, 90° dan 100° seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 6. Hasil desain geometri motor brushless DC tipe exterior rotor IPM-V 18 slot 16 pole. a) Tampilan 2D dan b) Tampilan 3D



Gambar 7. Hasil desain sudut rentang magnet IPM-V a) 80°, b) 90°, dan c) 100°

B. Hasil Simulasi Motor

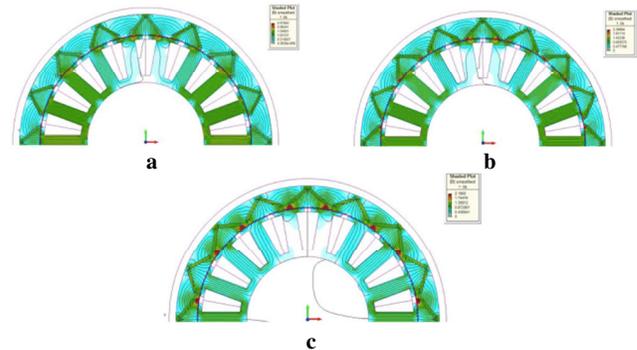
Simulasi dilakukan dengan menggunakan software MagNet Infolytica berbasis FEM yang mampu merealisasikan bentuk desain motor brushless DC pada kecepatan 2100 Rpm saat beban 200 ohm. Desain motor menggunakan 18 slot 16 pole dengan 3 variasi sudut rentang magnet IPM-V. Hasil yang dianalisa meliputi flux linkage, torsi cogging dan efisiensi.

C. Pengaruh Terhadap Flux Linkage

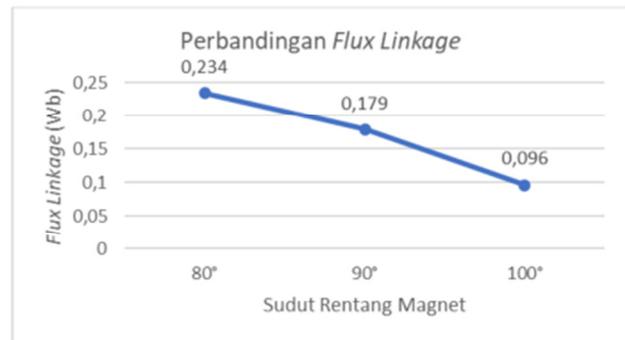
Perbedaan sudut rentang magnet berpengaruh pada tingkat daya magnetiknya, tingkatan tersebut dapat diketahui dari warna yang dihasilkan. Warna merah menunjukkan bahwa daya magnet semakin kuat, dan sebaliknya apabila warna semakin putih maka daya semakin lemah, seperti yang ditunjukkan pada gambar 8 aliran fluks magnetik berdasarkan sudut rentang magnetnya.

Dari gambar 8 terlihat bahwa nilai kerapatan fluks magnet yang paling tinggi berwarna merah merupakan daerah yang berdekatan dengan magnet permanen karena merupakan penghasil fluks magnet. Sudut rentang magnet mempengaruhi besar fluks yang mengalir melewati stator. Semakin kecil sudut rentang magnet maka semakin rapat fluks yang melewati stator begitu juga sebaliknya. Daerah gigi stator

paling besar kerapatan fluks magnetnya yaitu gigi stator yang berada tepat di tengah rentang magnet dibandingkan daerah yang lain, karena bentuk IPM-V memfokuskan fluks ke bagian gigi stator. Diperoleh nilai flux linkage dengan variasi sudut rentang magnet 80°, 90° dan 100° masing-masing sebesar 0.234 Wb, 0.179 Wb dan 0.096 Wb yang ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 8. Aliran fluks magnetik pada sudut rentang magnet a) 80°, b) 90°, dan c) 100°.



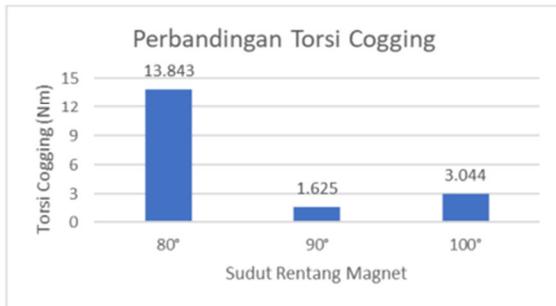
Gambar 9. Perbandingan nilai flux linkage dari variasi sudut rentang magnet

D. Pengaruh Rentang Sudut Magnet Terhadap Torsi Cogging

Motor akan disimulasikan dengan memutar rotor sejumlah derajat yang diperlukan saja. Jumlah derajat ini ditentukan dengan menghitung derajat mekanik untuk tiap periode torsi cogging menggunakan persamaan (22). Nilai torsi cogging hasil simulasi didapatkan dengan cara (nilai maksimum cogging – nilai minimum cogging), sehingga diperoleh nilai torsi cogging masing-masing variasi sudut rentang magnet sebesar 13.843 Nm, 1.625 Nm dan 3.044 Nm yang ditunjukkan pada gambar 10.



a

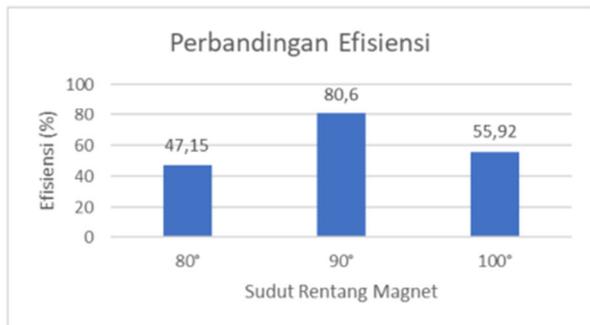


b

Gambar 10. a) Perbandingan Gelombang Torsi Cogging, dan b) Perbandingan Nilai Torsi Cogging

E. Perbandingan Daya dan Efisiensi Motor

Pengujian efisiensi ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar efisien hasil rancangan motor brushless DC yang telah dirancang. Efisiensi didapat dari perbandingan daya output dan daya input. Dari ketiga model desain motor efisiensi terkecil didapatkan pada sudut rentang magnet 80° sebesar 47.15 %, sedangkan efisiensi terbesar didapatkan pada sudut rentang magnet 90° sebesar 80.6%. Agar lebih jelas maka diberikan perbandingan pada gambar 11 sebagai berikut.



Gambar 11. Perbandingan nilai efisiensi dari variasi sudut rentang magnet

F. Hasil Simulasi Pemodelan Motor pada Simulink MATLAB 2016a

Pada simulasi ini menggunakan model permanent magnet synchronous machine dengan menggunakan back EMF waveform trapezoidal, dengan waktu simulasi selama 60 detik.

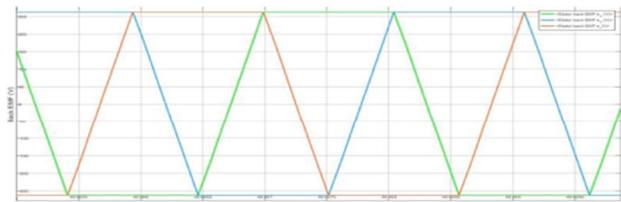
Torsi beban diberikan pada simulasi ini sebesar 5 Nm pada detik ke 35. Adapun parameter yang dimasukkan pada model diperoleh dari hasil simulasi pada MagNet Infolytica, kemudian dilakukan pengolahan data dengan Microsoft Excel yang ditampilkan pada tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Parameter Motor BLDC

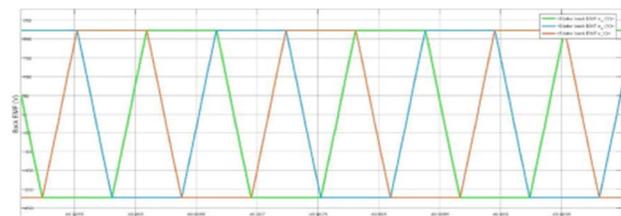
Input	Nilai		
	80°	90°	100°
Torque Constant (Nm/Arms)	5.972794	2.749347	2.133848
Voltage Constant (Vrms/rad/s)	2.764681	2.160595	1.120433
Vircous Damping (Nms)	0.082564	0.029701	0.011954
Voltage (V)	300, 400, 500, 600		
Phase Resistance (Ohm)	2.875	2.875	2.875
Phase Inductance (H)	0.0085	0.0085	0.0085
Inertia (Kg.m2)	0.619	0.619	0.619
Pole Pairs	16	16	16

G. Back EMF

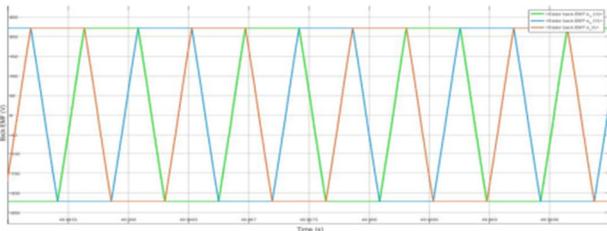
Salah satu keluaran yang dapat dianalisa dari motor BLDC ialah back EMF. Gelombang back EMF berbentuk trapezoidal yang terdiri dari tiga fasa yang berbeda 120 derajat, Hasil back EMF yang telah diperbesar pada waktu 49.9955 – 50 detik dari pengujian tiap model. seperti ditunjukkan pada gambar 12 berikut ini.



a



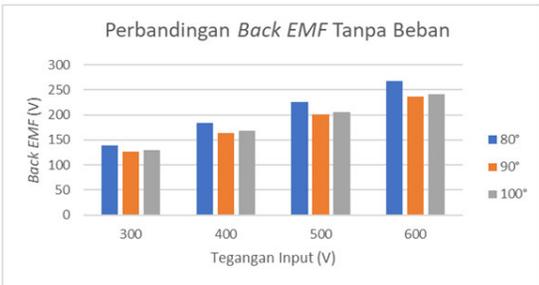
b



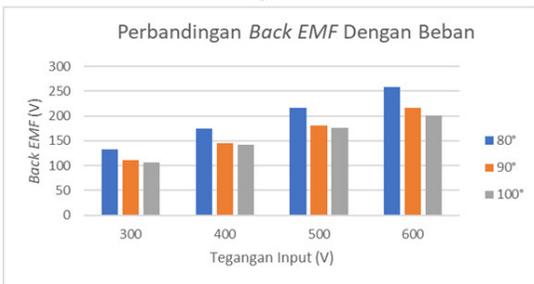
c

Gambar 12. Hasil gelombang back EMF pada sudut rentang magnet a) 80°, b) 90° dan c) 100° yang diperbesar dalam waktu 49.9955 – 50 detik

Gelombang warna hijau menunjukkan bembf fasa a, warna biru menunjukkan bembf fasa b, sedangkan warna merah menunjukkan fasa c. Terlihat bahwa gelombang back EMF mengalami zero crossing yang diakibatkan oleh perbedaan fasa sebesar 120°, sehingga efek yang terjadi adalah pergantian input secara periodik. Nilai back EMF dari model desain terhadap variasi tegangan ditunjukkan pada gambar 13 dibawah ini.



a

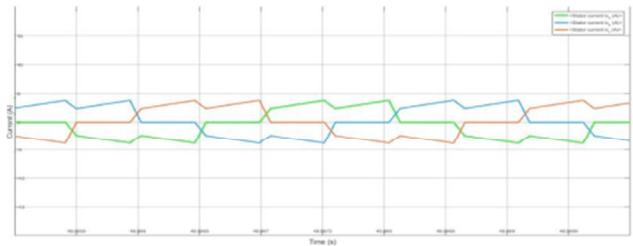


b

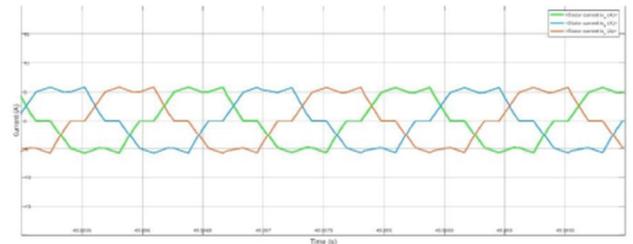
Gambar 13. Perbandingan nilai back EMF a) tanpa beban b) dengan beban pada variasi sudut rentang magnet

H. Stator Current

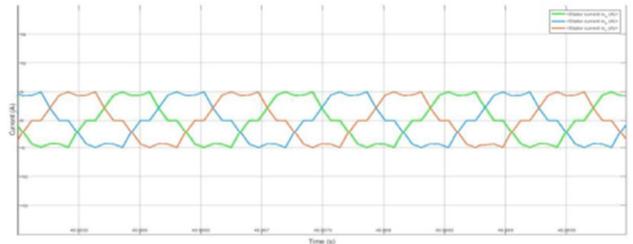
Sama halnya dengan back EMF, gelombang stator current juga terdiri dari tiga fasa yang berbeda 120 derajat, warna hijau menunjukkan bembf fasa a, warna biru menunjukkan bembf fasa b, sedangkan warna merah menunjukkan fasa c. Hasil stator current yang telah diperbesar pada rentang waktu 49.9955 – 50 detik dari pengujian tiap model ditunjukkan pada gambar 14 berikut ini.



a



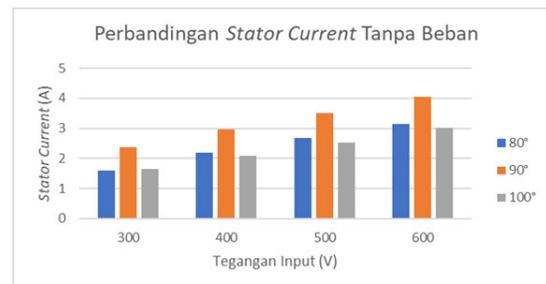
b



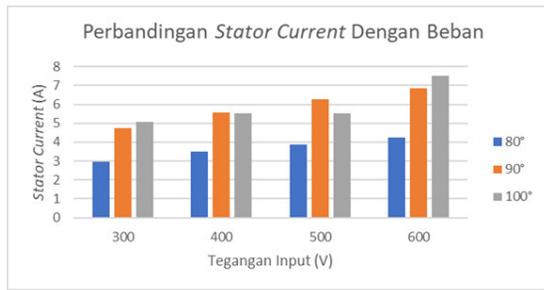
c

Gambar 14. Hasil gelombang stator current pada sudut rentang magnet a) 80°, b) 90°, dan c) 100° yang diperbesar dalam waktu 49.9955 – 50 detik

Terlihat bahwa dari gambar 14 gelombang mengalami penurunan hingga bernilai minus, hal tersebut dikarenakan efek dari back EMF. Seperti yang kita ketahui motor BLDC merupakan motor jenis induksi sehingga arus dari keluaran motor juga digunakan untuk menambah daya dari baterai ke motor yang diolah melalui unit converter, yang awalnya adalah arus DC menjadi arus AC. Nilai stator current dari model desain terhadap variasi tegangan disajikan pada gambar 15 berikut ini.



a

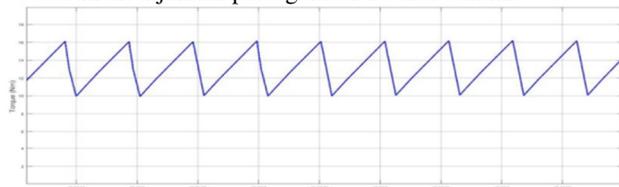


b

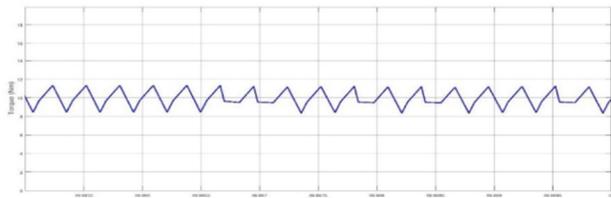
Gambar 15. Perbandingan nilai stator current a) tanpa beban b) dengan beban pada variasi sudut rentang magnet

I. Torsi

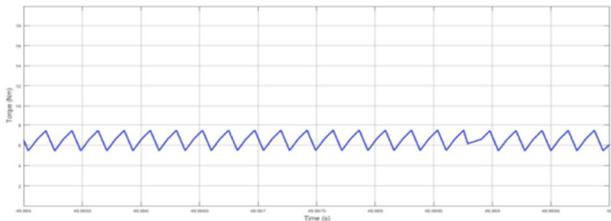
Besaran yang timbul akibat gaya yang dihasilkan terhadap sumbu putar yang mampu memberikan pengaruh pada sebuah benda untuk dapat berputar disebut torsi. Hasil torsi pada simulasi pemodelan yang telah diperbesar pada waktu 49.9955 – 50 detik ditunjukkan pada gambar 16 dibawah ini.



a



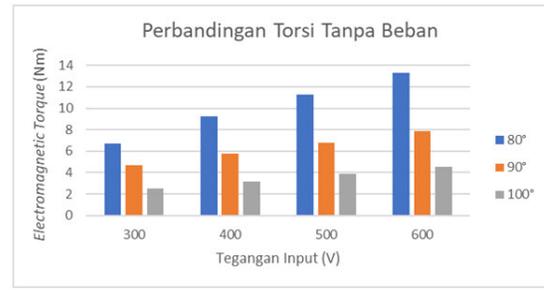
b



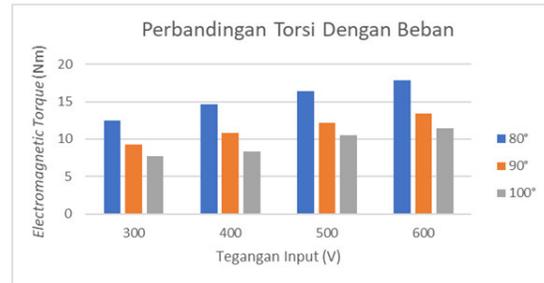
c

Gambar 16. Hasil gelombang torsi pada sudut rentang magnet a) 80°, b) 90°, dan c) 100° yang diperbesar dalam waktu 49.9955 – 50 detik

Berdasarkan gambar 16 diperoleh hasil torsi tertinggi yaitu pada desain sudut rentang magnet 80°, sedangkan torsi terendah pada desain sudut rentang magnet 100°. Hal tersebut dipengaruhi oleh nilai back EMF. Semakin besar nilai back EMF maka semakin besar juga torsi yang di dapatkan. Nilai torsi pada masing-masing model dengan variasi tegangan ditunjukkan pada gambar 17 seperti berikut.



a

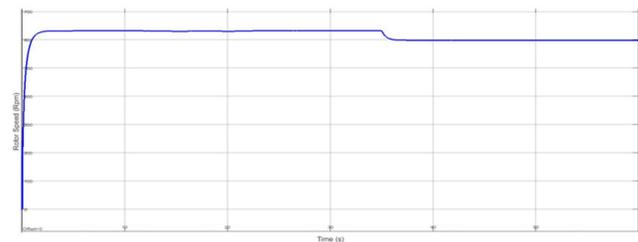


b

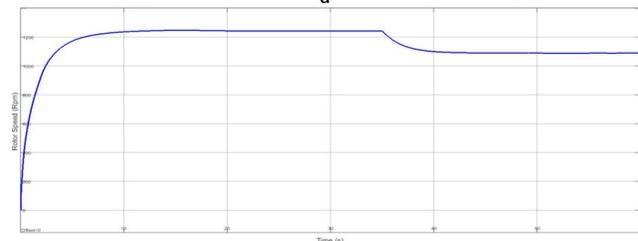
Gambar 17. Perbandingan nilai torsi a) tanpa beban b) dengan beban pada variasi sudut rentang magnet

J. Rotor Speed

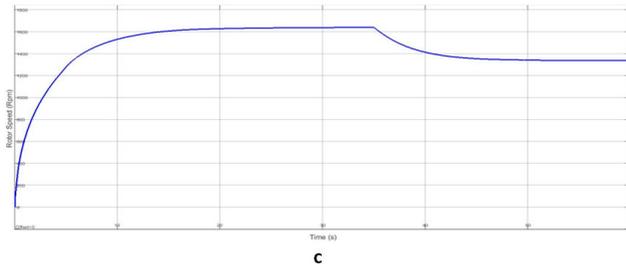
Salah satu karakteristik motor yang perlu diketahui yaitu kecepatan putaran motor. Simulasi kecepatan putaran motor dilakukan selama 60 detik. Hasil menunjukkan perbedaan dari tiap variasi sudut rentang magnet seperti yang ditunjukkan pada gambar 18 berikut ini.



a

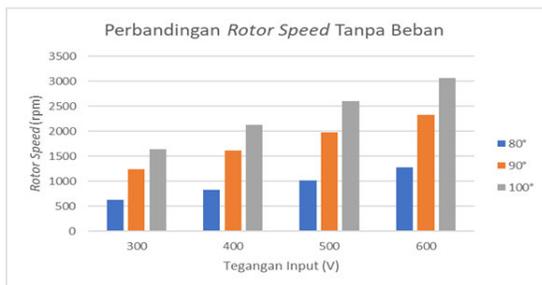


b

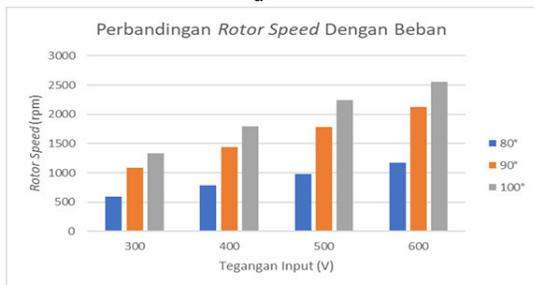


Gambar 18. Hasil gelombang rotor speed pada sudut rentang magnet a) 80°, b) 90° dan c) 100°

Dari gambar 18 diatas, dapat dilihat bahwa hasil rotor speed tertinggi yaitu pada desain sudut rentang magnet 100°, namun untuk mencapai titik kestabilannya desain ini cenderung lebih lambat dibandingkan desain yang lainnya. Kemudian rotor speed terendah yaitu pada desain sudut rentang magnet 80° dan merupakan desain yang paling cepat dalam mencapai titik kestabilannya. Kecepatan putaran motor mengalami penurunan ketika diberikan beban. Hal ini di karenakan beban menghambat putaran motor. Selain itu pemodelan motor dilakukan tanpa menggunakan kontroller untuk mempertahankan putaran motor ketika terjadi penambahan beban. Nilai rotor speed pada masing-masing desain dengan variasi tegangan dapat dilihat pada gambar 19 dibawah ini.



a



b

Gambar 19. Perbandingan nilai rotor speed a) tanpa beban b) dengan beban pada variasi sudut rentang magnet

IV. KESIMPULAN

Simulasi pemodelan motor brushless DC tipe external rotor IPM-V 18 slot dan 16 pole telah dilakukan dengan menggabungkan perangkat lunak berbasis FEM dan Simulink

MATLAB 2016a untuk menganalisis flux linkage, torsi cogging, efisiensi dan karakteristik motor dari variasi sudut rentang magnet sebesar 80°, 90° dan 100° pada kecepatan 2100 rpm. Hasil pengujian menunjukkan dari ketiga sudut rentang magnet yang optimal sebesar 90°. Hal tersebut ditinjau dari kecilnya torsi cogging yang dihasilkan dengan efisiensi yang tinggi.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. He and T. Wu, "Permanent magnet brushless dc motor and mechanical structure design for the electric impact wrench system," *Energies*, vol. 11, no. 6, 2018.
- [2] A. R. Muñoz, F. Liang, and M. W. Degner, "Evaluation of Interior PM and Surface PM Synchronous machines with distributed and concentrated windings," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 1189–1193, 2008.
- [3] O. Ocak, M. Onsal, and M. Aydin, "Development of a 7.5kW High Speed Interior Permanent Magnet Synchronous Spindle Motor for CNC Milling Machine," *Proc. - 2018 23rd Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2018*, pp. 704–709, 2018.
- [4] M. Villani, F. Parasiliti, M. Tursini, G. Fabri, and L. Castellini, "PM brushless motors comparison for a Fenestron®type helicopter tail rotor," *2016 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, SPEEDAM 2016*, no. September 2017, pp. 22–27, 2016.
- [5] R. M. Agusta, E. A. Hakim, and M. Irfan, "Analisa Pengaruh Desain Shoe Pada Tooth Depth Stator Motor Brushless DC Dengan Kecepatan 1000 RPM," *AITEL*, vol. 1, 2019.
- [6] I. T. D. Strous, "Design of a permanent magnet radial flux concentrated coil generator for a range extender application," *Electr. Energy Conversion, Delft Univ. Technol.*, no. August, p. 106, 2010.