

Desain dan Analisis Variabel *Air Gap* pada Motor *Axial Flux Brushless* DC Berbasis 3D *Finite Element Method* Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik

Achmad Abdul Ghoni, Heri Suryoatmojo, dan Mochamad Ashari
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: suryomgt@ee.its.ac.id ; asharimd@yahoo.com

Abstrak-Seiring berjalannya waktu dibutuhkan pengembangan teknologi pada motor penggerak pada kendaraan yang beredar dipasaran. Karena sumber energi fosil merupakan energi yang tidak dapat diperbarui, maka pengembangan kendaraan dengan listrik sebagai sumber energi adalah solusi untuk penghematan energi dimasa depan. Salah satu jenis motor yang tepat untuk digunakan sebagai penggerak kendaraan akan dibahas pada tugas akhir ini, yaitu motor *axial flux brushless* DC. Motor yang digunakan pada analisis ini dirancang untuk dapat menghasilkan daya *output* 12 kW. Analisis yang dilakukan meliputi parameter kelistrikan pada motor dan rugi-rugi inti. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan metode analisis *finite element*. Hasil desain didapatkan desain motor *axial flux brushless* DC dengan ukuran 220 cm menggunakan 12 slot stator dan 10 kutub rotor. Menghasilkan daya output 11,2 kW, dengan kecepatan 2388 rpm, rugi-rugi inti 381,5 watt, torsi 44,78 Nm dan efisiensi 79,39 persen. Motor ini memiliki rating tegangan 400 V DC dan arus masukan pada motor sebesar 29,6 A. Dari simulasi desain yang sudah dibuat diatas, dilakukan simulasi dengan variabel *air gap*. Variabel *air gap* dilakukan dengan memotong bagian inti stator secara radial. Variabel *air gap* membuat tinggi inti stator di sisi jari-jari luar lebih tinggi dibandingkan tinggi inti stator pada jari-jari dalam. Setiap variabel *air gap* yang dilakukan haruslah diberi kompensasi penambahan ketebalan magnet permanennya. Dari hasil simulasi dengan variabel *air gap* didapatkan hasil daya output 14,5 kW pada kecepatan 2388 rpm, rugi-rugi inti 356,2 W, torsi 38,87 N.m dan efisiensi 78,75 persen.

Kata Kunci — Analisa finite element, Motor axial flux brushless DC, Variabel air gap

I. PENDAHULUAN

Mencuatnya isu *global warming* yang semakin parah di bumi menuntut munculnya teknologi otomotif yang ramah lingkungan. Penggunaan mesin listrik sebagai penggerak utama kendaraan listrik adalah solusi yang sangat tepat untuk menjawab tuntutan teknologi yang ramah lingkungan. Hal ini dikarenakan mesin listrik yang digunakan sebagai penggerak tidak menghasilkan emisi CO maupun CO₂.

Dari berbagai mesin listrik yang sudah ditemukan, salah satu jenis mesin listrik yang paling cocok untuk digunakan pada kendaraan listrik adalah *axial flux brushless* DC motor. Keunggulan dari motor jenis ini adalah tingginya kerapatan daya, efisiensi dan kapasitas perpindahan panasnya. Selain itu keunggulan yang paling menonjol dari motor *axial flux brushless* DC adalah dimensi konstruksinya yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan konstruksi motor jenis lain,

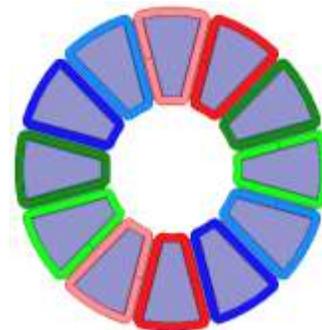
sehingga motor *axial flux brushless* DC tepat untuk digunakan di ruangan yang terbatas. Konstruksi motor *axial flux brushless* DC pada dasarnya terdiri dari sebuah piringan rotor yang dapat berputar dengan beberapa magnet yang menempel di sisi luarnya dan satu lagi bagian stator yang berisi inti dengan konduktor-konduktor yang dibelitkan pada slot-slot stator sebagai pengakomodasi piringan rotor untuk bisa berputar [5].

Perkembangan pada sisi teknologi baterai dan teknologi inverter yang semakin berkembang, akan sangat membantu kinerja motor *axial flux brushless* DC untuk diaplikasikan di dunia industri [1]-[2]. Sumber yang digunakan untuk

Tugas Akhir ini memaparkan desain dan analisis variabel *air gap* pada motor *axial flux brushless* DC *single sided* dengan menggunakan dengan 1 buah stator dan 1 buah rotor. Penelitian ini akan memaparkan analisis parameter-parameter kelistrikan pada motor dengan berbasis metode *finite element* menggunakan *software* yang mampu menganalisis berbasis metode tersebut.

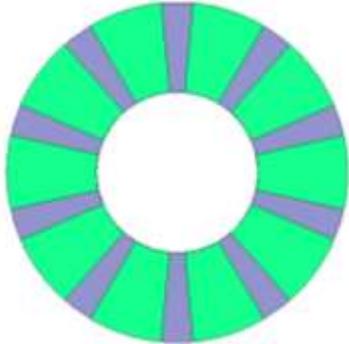
II. PARAMETER MOTOR AXIAL FLUX BLDC

Motor *Brushless* DC (BLDC) merupakan salah satu jenis motor DC yang memiliki magnet permanen di bagian rotor dan kumparan jangkar pada stator. Terdapat dua jenis motor BLDC jika dilihat dari segi arah aliran *flux*-nya, yaitu radial *flux* BLDC dan *Axial flux* BLDC. Motor yang digunakan adalah motor dengan daya output 12 kW, dengan kecepatan putaran 2388 rpm. Karena struktur motor yang simetris, maka cukup untuk mempertimbangkan hanya setengah dari model geometris motor yang digunakan pada analisis motor. Ukuran utama pada motor *Brushless* DC (BLDC) akan ditunjukkan pada Tabel 1.



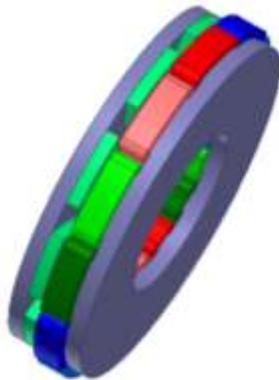
Gambar 1. Konstruksi stator motor *axial flux brushless* DC

Pada Gambar 1 dapat dilihat bentuk fisik dari stator yang digunakan pada motor *axial flux brushless* DC. Stator ini terdiri dari 12 slot stator yang berisi kunyaran tembaga, dengan inti stator setinggi 20 mm.



Gambar 2. Konstruksi rotor motor axial flux brushless DC

Pada Gambar 2 dapat dilihat bentuk fisik dari rotor motor *axial flux brushless* DC dengan 10 buah kutub permanen magnet setinggi 8 mm. Dan gambar 3 adalah bentuk gabungan dari stator dan rotor motor yang sudah digabungkan.



Gambar 3. Konstruksi motor axial flux brushless DC

Tabel 1. Data Stator dan Rotor

Ukuran	Panjang (mm)
Panjang inti Stator	20
Diameter Luar Stator	220
Diameter Dalam Stator	104,5
Diameter Luar Rotor	220
Diameter Dalam Rotor	104,5

III. ANALISIS PARAMETER KELISTRIKAN

A. Perhitungan Kebutuhan Arus dan Torsi

Kebutuhan arus menjadi salah satu parameter penting dalam melakukan desain motor, karena hal ini akan menentukan daya input yang harus disediakan oleh sumber. Kebutuhan Arus dapat dinyatakan sebagai :

$$I = \frac{P_{out}}{3 \times V_{ph} \times \eta \times \cos \alpha} \quad (1)$$

Dalam menentukan rating daya output akan dipengaruhi oleh torsi dan kecepatan dari putaran motor. Semakin besar torsi motor maupun kecepatan putaran motor maka daya output motor juga akan meningkat. Torsi motor dapat dinyatakan sebagai :

$$T = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \pi B_g q_i R_o^3 K_r (1 - K_r^2) \quad (2)$$

Dimana :

- T = Torsi output motor (Nm)
- B_g = Kerapatan fluks pada airgap (Tesla)
- q_i = Loading Value (Aturn/m)
- R_o = Jari-jari lingkaran luar (mm)
- K_r = perbandingan Jari-jari dalam dan luar

B. Perhitungan Rugi-rugi Inti

Rugi-rugi yang terjadi pada motor merupakan sumber utama panas yang akan timbul pada motor. Rugi-rugi yang terjadi diantaranya adalah rugi-rugi inti, rugi-rugi ohmik, dan rugi-rugi mekanik. Rugi-rugi inti dan rugi-rugi ohmik menyumbang lebih dari 90% dari total rugi-rugi yang terjadi pada motor. Besarnya rugi inti besi yang terjadi sangat bergantung pada pemilihan jenis material yang akan digunakan pada motor. Jenis Material yang digunakan pada tugas akhir ini adalah M800-50A. Rugi inti besi dapat dinyatakan sebagai :

$$P_v = P_c + P_h + P_e \quad (3)$$

$$= K_c (fBm)^2 + K_h f B^2 m + K_e (fBm)^{1.5} \quad (4)$$

$$= K_1 B^2 m + K_2 B^{1.5} m \quad (5)$$

Dimana :

$$K_1 = K_h f + K_c f^2 \quad (6)$$

$$K_2 = K_e f^2 \quad (7)$$

Dengan K_c, K_h, dan K_e berturut-turut merupakan koefisien rugi-rugi arus *eddy*, rugi *hysteresis*, dan *excess loss* atau rugi-rugi tambahan yang terjadi pada motor. Sedangkan P_v, P_h, P_c dan P_e berturut-turut merupakan rugi inti besi, rugi *hysteresis*, rugi arus *eddy*, dan rugi *excessive/elebihan* rugi-rugi Koefisien rugi-rugi arus eddy klasik, K_c dapat dihitung dengan persamaan :

$$K_c = \pi^2 \cdot \sigma \cdot \frac{d^2}{6} \quad (8)$$

Dimana σ adalah konduktivitas dan d adalah ketebalan lembar satu laminasi. Untuk mendapatkan nilai K₁ dan K₂ harus dilakukan minimalisasi terhadap bentuk kuadrat :

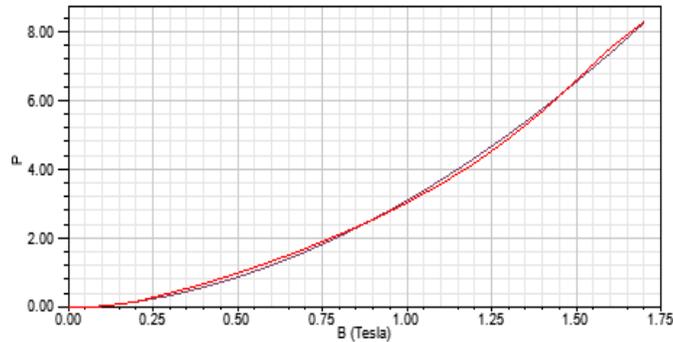
$$f(K_1, K_2) = \sum [P_{vi} - (K_1 B m i^2 + K_2 B m i^{1.5})]^2 = \min \quad (9)$$

Dimana P_{vi}, B_{mi} merupakan titik ke-i dari data yang diukur pada kurva karakteristik rugi-rugi material. Sedangkan kedua koefisien rugi-rugi yang lain, yaitu K_d dan K_h dapat dicari dari persamaan berikut :

$$K_h = \frac{(K_1 - K_c f o^2)}{f o} \quad (10)$$

$$Ke = \frac{K2}{fo^{1.5}} \tag{11}$$

Dimana f_0 merupakan frekuensi uji yang digunakan pada kurva rugi-rugi material. Material yang digunakan adalah besi silikon M800-50 dengan kurva rugi-rugi untuk material jenis ini pada frekuensi 50 Hz akan dijelaskan pada gambar 4 berikut :

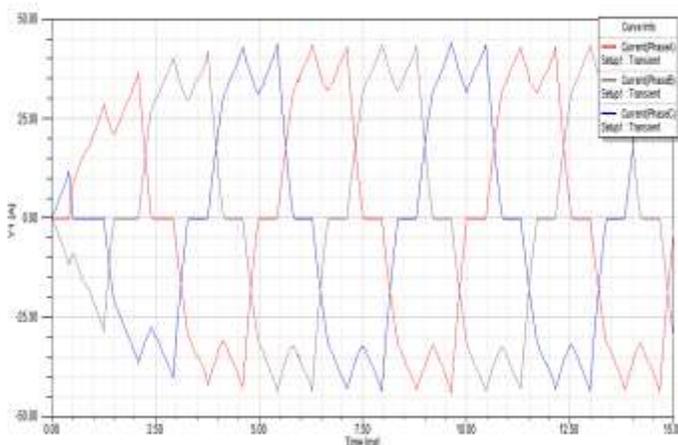


Gambar 4. Kurva B-P material M800-50A.

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DESAIN

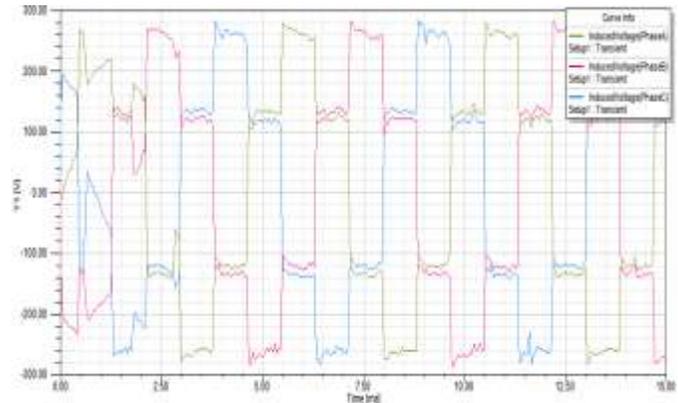
A. Parameter Kelistrikan Moto Axial Flux BLDC

Dengan perangkat lunak berbasis *finite element*, dari desain motor axial flux BLDC diperoleh parameter kelistrikan yang ada pada motor *axial flux* BLDC. Parameter kelistrikan yang dimaksud diantaranya adalah parameter input motor yang terdiri dari nilai arus, nilai tegangan, torsi, dan $\cos \alpha$ pada motor. Nilai arus dan tegangan ini dipengaruhi oleh sumber yang masuk dari rangkaian *controller* dengan sumber 400 volt DC. Arus yang mengalir bergantung dari jumlah belitan yang digunakan. Pada simulasi ini dilakukan pada rentang waktu 1. Pada simulasi ini diperoleh nilai arus sebesar 29,6 A dengan waktu steady-state pada waktu 2,5 ms. Gambar 5 dibawah menjelaskan bentuk gelombang arus pada rentang waktu 15 ms.



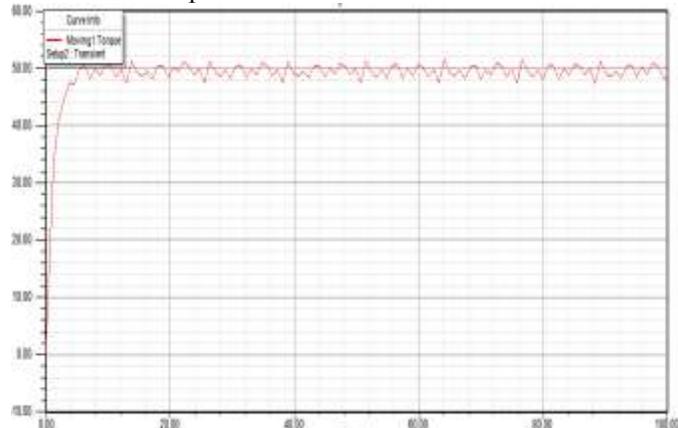
Gambar 5. Bentuk gelombang arus untuk t = 15 ms

Sedangkan dari simulasi nilai tegangan pada stator diperoleh sebesar 174,5 V. Nilai tegangan pada stator merupakan nilai tegangan output dari inverter. Gambar 5 di bawah akan menampilkan bentuk gelombang tegangan pada waktu 15 ms dan kondisi *steady-state* diperoleh pada 2,5 ms.



Gambar 6. Bentuk gelombang tegangan pada t = 15 ms

Pada simulasi ini, dengan kecepatan referensi yang digunakan sebesar 2388 rpm diperoleh nilai torsi keluaran rata-rata sebesar 44,78. Gambar 7 dan dibawah menampilkan bentuk torsi keluaran tiap waktu.



Gambar 7. Torsi keluaran motor *axial flux brushless* DC

Parameter kelistrikan berikutnya adalah nilai $\cos \alpha$. Nilai $\cos \alpha$ ini merupakan perbedaan sudut fasa antara gelombang tegangan dan gelombang arus pada motor. Nilai $\cos \alpha$ dapat dicari dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{t_{(I=0)} - t_{(V=0)}}{T} \times 360^\circ$$

Dari persamaan tersebut diatas perlu diketahui perbedaan waktu antara arus dan tegangan pada saat bernilai nol dan nilai periode gelombang untuk dapat menghitung besarnya nilai α . Dari hasil simulasi didapatkan waktu saat periode satu gelombang sebesar $t = 5.0251$ ms. Sehingga besarnya α dapat dicari dengan :

$$\alpha = \frac{0,294}{5.0251} \times 360^\circ = 21^\circ$$

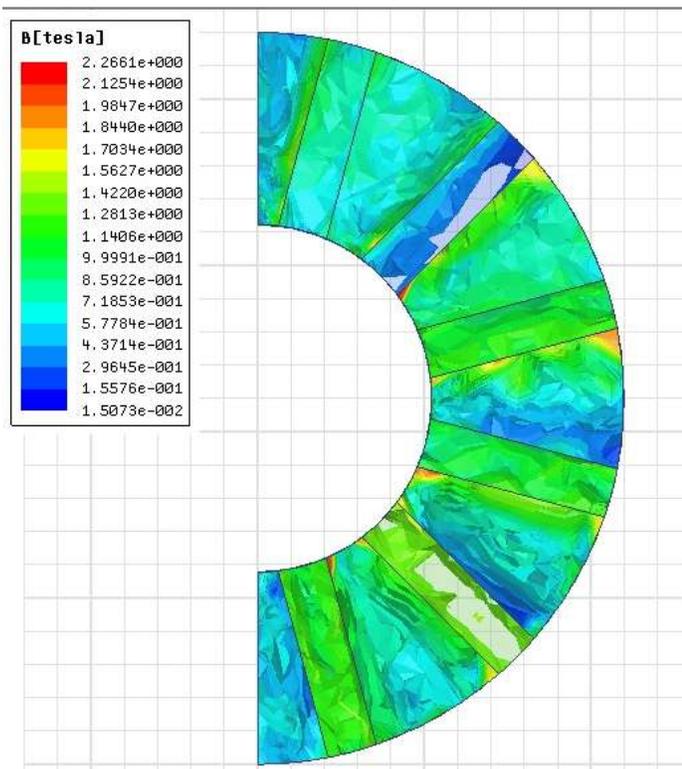
Sehingga besarnya $\cos \alpha$ menjadi $\cos 21^\circ = 0.91$

Didapatkan pada desain awal efisiensi motor *axial flux brushless* DC sebesar 79,3 persen.

B. Karakteristik Medan dan Rugi-rugi Inti pada Stator

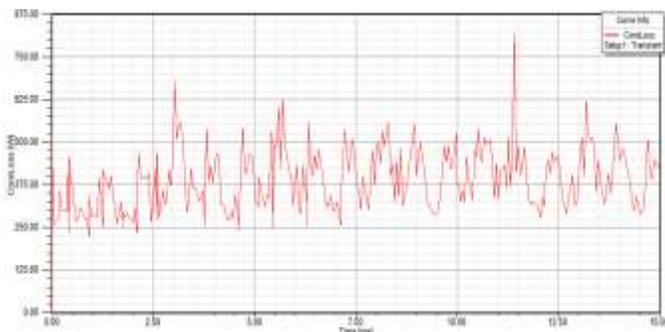
Dari simulasi dengan pengambilan data selama 0,1 detik diperoleh peta persebaran fluks pada stator. Nilai fluks yang relatif tinggi terdapat pada slot dan *tooth* dimana terdapat

belitan tempat terbangkitnya medan. Gambar 8 di bawah menunjukkan karakteristik medan yang terjadi pada stator



Gambar 8. Bentuk gelombang tegangan pada $t = 15$ ms

Rugi-rugi inti dipengaruhi oleh dua hal, yaitu rugi *hysteresis* dan rugi arus *eddy* yang timbul pada inti stator. Dimana rugi-rugi inti ini bergantung terhadap nilai fluks, terutama fluks maksimum yang timbul pada inti stator. Pada tabel 4 menampilkan karakteristik medan stator tiap waktu dan diperoleh nilai fluks maksimum yang timbul pada stator adalah sebesar 2.26 Tesla. Gambar 9 di bawah menampilkan besarnya rugi-rugi inti (*core loss*) yang terjadi pada motor *axial flux brushless DC*.

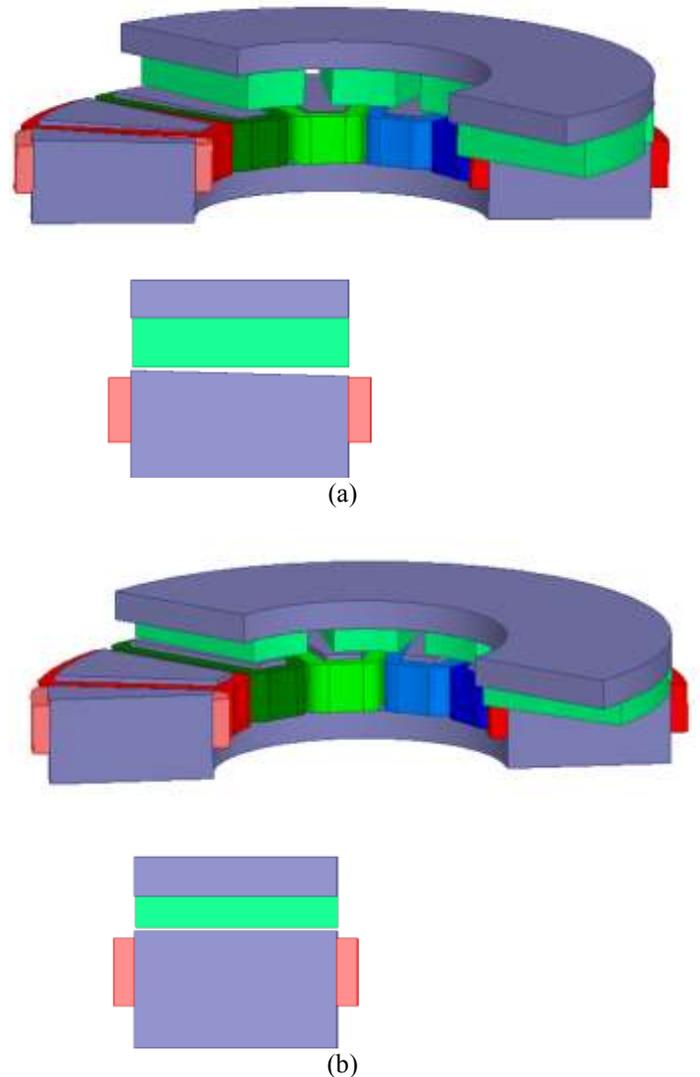


Gambar 9. Besarnya rugi-rugi inti pada stator

Pada simulasi dengan perangkat lunak Ansys Maxwell seperti yang ditunjukkan pada gambar 8 di atas menunjukkan nilai rugi-rugi inti pada tiap perubahan waktu. Dan dari gambar di atas pula dapat diketahui nilai rata-rata rugi inti yang dihasilkan pada motor adalah sebesar 381,5 watt.

V. ANALISIS VARIABEL AIR GAP

Variasi variabel *air gap* pada desain utama, berarti hanya melakukan variasi pada nilai variabel *air gap* saja, sedangkan untuk semua parameter penyusun motor dijaga tetap stabil. Tujuan dari variasi nilai variabel *air gap* ini adalah untuk mengetahui pengaruh apa yang muncul pada sebuah desain motor apabila diberikan perubahan pada nilai *air gap radial*nya. Pertambahan variabel *air gap* akan membuat torsi bernilai lebih tinggi dan nilai *core loss* naik dari pada desain awal. Kenaikan torsi ini dibarengi dengan naiknya arus masukan dari controller, sehingga mengakibatkan efisiensi dari motor memburuk. Oleh karena itu, ketika variabel *air gap* diimplementasikan pada motor haruslah diberi kompensasi berupa penambahan ketebalan magnet permanen.



Gambar 9. (a) Desain dengan variable *air gap* berkompensasi, (b) Desain orisinal motor tanpa variasi

Pada desain normal kerapatan *flux* pada stator memiliki kejenuhan yang lebih tinggi di bagian tengah dan jari-jari dalam inti stator. Dari kejenuhan kerapatan *flux* menyebabkan torsi yang dihasilkan tidak efisien. Dengan variabel *air gap* kejenuhan kerapatan *flux* pada bagian tengah dan jari-jari inti

stator diuraikan sehingga kerapatan *flux* yang dihasilkan oleh stator menjadi lebih rata pada seluruh permukaannya. Dengan kerapatan flux yang lebih merata membuat torsi yang dihasilkan motor menjadi lebih efisien dan bernilai lebih besar bila dibandingkan dengan torsi dari desain orisinil tanpa ada modifikasi variabel *air gap*.

Dari hasil simulasi dilakukan beberapa kombinasi variabel *air gap* dan kompensasi penambahan tebal magnet permanen untuk mendapatkan kombinasi dengan hasil terbaik. Hasil kombinasi terbaik didapat pada variabel *air gap* 1,5 mm dan kompensasi penambahan tebal magnet permanen 5 mm dari desain orisinil awal. Perbedaan bentuk desain ditunjukkan pada Gambar 9:

Didapatkan nilai arus variabel *air gap* pada motor *axial flux brushless* DC sebesar 38,87 A, torsi motor sebesar 57,89 N.m pada kecepatan yang dijaga stabil 2388 rpm, dengan nilai *core loss* yang menurun menjadi 356,2 W. Daya output motor dengan variabel *air gap* meningkat menjadi 14,5 kW dengan efisiensi yang tidak terlalu banyak berubah, yaitu 78,8 persen.

Pada tabel 2 diperlihatkan perbandingan hasil perbandingan antara desain orisinil dengan desain yang sudah dimodifikasi dengan variabel *air gap* berkompensasi.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Desain

Hasil Analisa Variabel Air Gap dan Penambahan Tebal Magnet				
Variabel Desain Motor	Variabel Air Gap 0mm	Magnet Permanen 8mm	Variabel Air Gap 1,5mm	Magnet Permanen 13mm
Tegangan (V)	174,5		173,2	
Arus (A)	29,6		38,87	
Torsi (N.m)	44,78		57,89	
Daya Input (W)	14.101		18.379,14	
Daya Output (W)	11.195		14.474,25	
core loss (W)	381.5		356,2	
Effisiensi (%)	79.39156		78,74568	

VI. KESIMPULAN

Permodelan dari desain motor *axial flux brushless* DC ini memiliki diameter luar 220 mm dan berdiameter dalam 104,5 mm. Motor ini memiliki 12 slot stator dan 10 kutub permanen magnet rotor. Dari hasil pemodelan desain utama motor *axial flux brushless* DC dengan rating daya 12 kW diperoleh :

1. Tegangan AC keluaran controller per fasa yang dibutuhkan dari simulasi yang sudah dilakukan 174,5 V dengan arus masukan 29,6 A. Torsi output 44,78 N.m pada kecepatan yang dijaga stabil 2388 rpm menghasilkan rating daya output motor 11,2 kW.
2. Desain motor dengan variasi *air gap* saja mengakibatkan kenaikan nilai kebutuhan tegangan AC input dan arus AC input. Torsi output meningkat sedangkan nilai *core loss* turun dengan efek samping nilai efisiensi yang semakin rendah.
3. Penambahan ketebalan magnet permanen saja, dapat menaikkan efisiensi secara drastis dan memberikan efek

samping nilai torsi yang turun tidak signifikan seiring dengan semakin tingginya nilai efisiensi

4. Dari hasil simulasi dengan variabel *air gap* 1,5 mm berkompensasi penambahan ketebalan magnet permanen 5 mm pada motor *axial flux brushless* DC didapatkan arus masukan 38,87 A, torsi output 57,89 N.m pada kecepatan yang dijaga stabil 2388 rpm menghasilkan rating daya output motor 14,5 kW.
5. Variabel *air gap* pada motor *axial flux brushless* DC dapat meningkatkan efektivitas daya output motor tanpa mengubah dimensi motor secara signifikan, sehingga sangat tepat untuk diaplikasikan pada kendaraan listrik dengan dimensi ruang yang terbatas.

VII. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sujatmoko. B, Ashari. M, Hery. Mauridhi, "Universal Algorithm Control for Asymmetric Cascaded Multilevel Inverter" *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887) Volume 10– No.6, November 2010.
- [2] Sujatmoko. B, Ashari. M, Hery. Mauridhi, "Improved Voltage Of Cascaded Inverters Using Sine Quantization Progression", 2010.
- [3] Hendrik Vansompel, P. Sergeant, Luc Dupré, A. Van den Bossche, "Axial-Flux PM Machines With Variable Air Gap," in *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 61, NO. 2, Feb 2014.
- [4] Ahmed Hemeida, Peter Sergeant, "Comparison of Methods for Permanent Magnet Eddy Current Loss Computations With and Without Reaction Field Considerations in Axial Flux PMSM," *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015
- [5] Sreeju S. Nair, S. Nalakath, "Design and Analysis of Axial Flux Permanent Magnet BLDC Motor for Automotive Applications," in *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2011.
- [6] T. D. Nguyen, "Loss Study of a Novel Axial Flux Permanent Magnet," in *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 2011.
- [7] Yilmaz, Kurtuluş, "Comparison Of Axial Flux And Radial Flux Brushless Dc Motor Topologies For Control Moment Gyroscope Wheel Applications," *Middle East Technical University*, 2009
- [8] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Second Edition. Springer. 2008
- [9] Hendrik Vansompel, "Design of an Energy Efficient Axial Flux Permanent Magnet Machine". *Universiteit Gent*, 2013.
- [10] Seyyed Mehdi Mirimani, "Study the Influence of Air-gap Variation on Axial Forces in Axial Flux Permanent Magnet Motor Using 3D-FEM". *University of Cassino and Southern Latium*, 2012.
- [11] Gd. Bayu A. Janardana, "Desain Dan Analisis Motor Axial Flux Brushless DC Berbasis 3D Finite Element Method Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik," *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2015