

## **PENGARUH KOMBINASI PEMANGKASAN UJUNG MAGNET PERMANEN DAN AXIAL CHANNEL PADA INTI ROTOR TERHADAP TORKA COGGING PADA GENERATOR TIPE FRACTIONAL SLOT NUMBER**

**Yudha Suherman<sup>1</sup> Tajuddin Nur<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik  
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

Email : <sup>1</sup>yudhadwiputra98@gmail.com, <sup>2</sup>tajuddinnur116@gmail.com\*

### **ABSTRAK**

Paper ini mempelajari pengaruh penggabungan teknik pangkas ujung magnet dengan *axial channel* pada inti rotor terhadap penurunan torca *cogging* dari sebuah generator sinkron magnet permanen. Pelaksanaan disain dilakukan dengan menggunakan optimasi *response surface method (RSM)*. Dalam investigasi ini dilakukan dengan dua bentuk *axial channel*, yakni berbentuk lingkaran dan segi enam. Penurunan torca *cogging* terbaik berhasil dicapai oleh bentuk segi enam dengan luas area sebesar 0.000279683 m<sup>2</sup>. Penentuan sudut pangkas ujung magnet dilakukan dengan sudut sebesar 1° dan sudut permukaan 53°. Metode numerik yang dikenal sebagai *Finite Element Magnetic Method (FEMM)* digunakan dalam menganalisa pengaruh kombinasi dari pemangkasan ujung magnet dan *axial channel*. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh bahwa kombinasi keduanya menghasilkan penurunan torca *cogging* sebesar 98 % bila dibandingkan dengan torca *cogging* desain awal (*initial structure*). Kelebihan lain dari perpaduan kedua teknik penurunan torca *cogging* tersebut adalah tidak mengakibatkan kenaikan kerapatan fluks magnet pada inti mesin secara signifikan. Dapat dikatakan bahwa perpaduan teknik penurunan torca *cogging* dan *axial channel* pada inti rotor mesin dapat menurunkan torca *cogging* secara signifikan.

Kata kunci: pangkas ujung magnet, *axial channel*, generator sinkron magnet permanen, torca *cogging*.

### **ABSTRACT**

*This paper studies the effect of combining a magnetic shaping technique with an axial channel in rotor core to reduce the cogging torque of a permanent magnet synchronous generator. Designing process will be done by using response surface method (RSM). There are 2 axial channel shapes adopted are about to investigate, namely circular and hexagonal. The best alleviation of cogging torque value was achieved by hexagonal shape with 0.000279683 m<sup>2</sup> in its area. Moreover, determination of magnetic edge shaping was carried out with an angle of 1° in both magnet edges and 53° in magnet surface angle. Numerical method known as Finite Element Magnetic Method is utilized in analyzing the effect of combining magnet edge shaping and axial channel. Based on the analysis, it is found that the combination shows a decrease in cogging torque by 98% when compared with the cogging torque in the initial design (initial structure). Another advantage of the combination of the two cogging torque reduction techniques is that there is no significant increase in the magnetic flux density of the engine core. It can be said that the combination of the cogging torque reduction technique and the axial channel at the core of the engine rotor can significantly reduce the cogging torque.*

*Keywords: magnetic tip trim, axial channel, permanent magnet synchronous generator, cogging torque.*

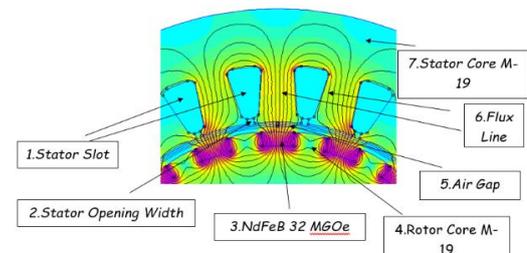
## PENDAHULUAN

Perkembangan mesin listrik meningkat pesat terutama terkait dengan optimasi pada suatu perancangan generator sinkron magnet permanen (GSMP). GSMP sangat lazim digunakan dalam aplikasi energi terbarukan seperti angin, air, ombak, dan lain sebagainya. Penggunaan GSMP dipilih karena dinilai memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan mesin tipe lain seperti penggunaan magnet permanen yang mampu secara signifikan meningkatkan daya keluaran dari generator, perawatan yang relatif mudah dan efisiensi yang tinggi [1]. Namun, kendala utama pada GSMP adalah torka *cogging*. Torka *cogging* memiliki sifat parasit yang mengakibatkan rotor mesin sulit untuk berputar oleh penggerak mula. Pada dasarnya torka *cogging* dalam GSMP terjadi ketika magnet yang berada pada inti rotor mencoba menyelaraskan dirinya dengan bahan ferromagnetik (inti stator) [2]. Torka *cogging* pada GSMP tidak dapat dihilangkan sepenuhnya dengan demikian nilai tersebut harus ditekan semaksimal mungkin. Dalam aplikasi energi terbarukan, konten torka *cogging* yang dapat ditoleransi hanya sebesar 2% dari torka beban nol. Pengurangan nilai torka *cogging* dapat dilakukan melalui berbagai cara antara lain dengan metode pemotongan ujung magnet (*magnet pole shaping*), *skew rotor*, *dummy slot*, *axial channel* dan lain-lain. Teknik kombinasi dimungkinkan untuk memperoleh penurunan nilai torka *cogging* yang maksimal. Dalam makalah ini, teknik gabungan pemotongan ujung magnet (*magnet pole shaping*) dan *axial channel* akan dikaji. Bentuk magnet permanen dalam

desain ini akan mengadopsi bentuk *bread loaf*. GSMP dalam studi ini adalah dengan jumlah 24 alur dan 18 kutub yang dianalisis menggunakan *Finite Element Magnetic Method 4.2*.

## TEORI GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN

GSMP adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah gaya mekanik menjadi energi listrik pada sistem pembangkitan tenaga listrik. Nama lain dari GSMP adalah alternator, dan umumnya merupakan generator yang menghasilkan energi listrik 3 fasa [3]. GSMP terdiri dari 2 bagian utama yaitu stator merupakan elemen diam yang terdiri dari belitan-belitan jangkar dan rotor (bagian yang bergerak) dan terdiri dari inti rotor and magnet permanen [3]. Adapun bagian umum pada GSMP diperhatikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagian-bagian pada GSMP

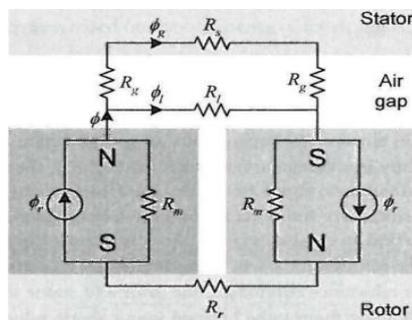
GSMP bekerja berdasarkan hukum Faraday dimana rotor yang terdiri dari magnet permanen yang digerakan oleh penggerak mula memotong kumparan tiga fasa pada alur stator kemudian timbul gaya gerak listrik (GGL) induksi, yang dapat dinyatakan pada Persamaan (1) [3].

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Keterangan;

$e$  = gaya gerak listrik (GGL) induksi (volt),  $N$  = Jumlah lilitan kumparan,  $d\Phi$  = Perubahan fluks magnet terhadap waktu,  $t$  = fungsi waktu

Karena GSMP menghasilkan fluks dari magnet permanen, maka GSMP tidak memerlukan arus DC untuk sistem eksitasinya. Rangkaian ekivalen magnetik GSMP dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian ekivalen magnetic GSMP [4]

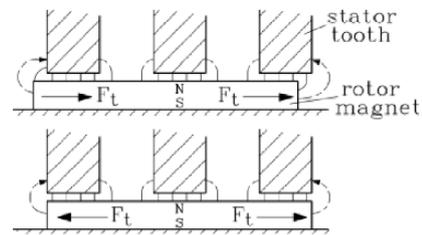
Keterangan:

- $R_l$  = Reluktansi leakage ( $H^{-1}$ ),
- $R_r$  = Reluktansi pada rotor ( $H^{-1}$ ),
- $R_s$  = Reluktansi pada stator ( $H^{-1}$ ),
- $R_m$  = Reluktansi magnet ( $H^{-1}$ ),
- $R_g$  = Reluktansi celah udara ( $H^{-1}$ ),
- $\Phi_r$  = Fluks magnet pada rotor (Wb),
- $\Phi_g$  = Fluks di celah udara (Wb),
- $\Phi_l$  = Leakage flux (Wb).

### A. Torka Cogging

Torka cogging pada GSMP merupakan interaksi fluks magnet yang ada di rotor dan slot opening width [4]. Eksistensi nilai torka cogging yang tinggi sangat berbahaya bagi performansi GSMP karena dapat menurunkan daya output, menimbulkan getaran dan lain-lain. Oleh sebab itu maka torka cogging pada GSMP harus diatasi. Pada mesin magnet permanen, torka cogging

umumnya terletak pada ujung-ujung magnet [5]. Nilai torka cogging dari suatu rancangan GSMP yang baik berkisar antara 1% sampai 2% pada saat kondisi beban nol atau penurunan nilai puncak torka cogging sebesar 98% dari desain awal (initial structure). Terjadinya torka cogging pada GSMP ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Penyebab terjadinya torka cogging [6]

Torka cogging dihitung menggunakan persamaan 2 dan 3 [1], [2], [5], [10]:

$$T_c = -\frac{1}{2} \Phi_g^2 \frac{dR_g}{d\theta} \quad (2)$$

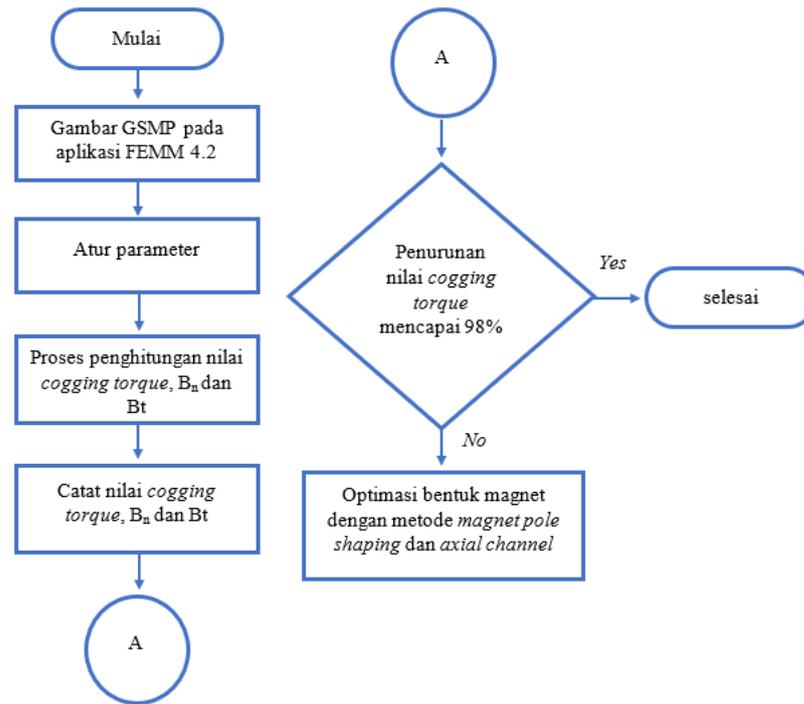
dengan

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \quad (3)$$

Keterangan:

$\Phi_g$  = Fluks celah udara (Wb),  $R_g$  = Reluktansi celah udara ( $H^{-1}$ ),  $\theta$  = Posisi dari rotor ( $^\circ$ ),  $l_g$  = Jarak antar stator dan rotor (m),  $A_g$  = Luas celah udara ( $m^2$ ).

Nilai torka cogging dalam suatu mesin listrik juga dapat dipengaruhi karena nilai kerapatan fluks magnet normal ( $B_n$ ) dan fluks magnet tangensial ( $B_t$ ).  $B_n$  merupakan kerapatan fluks dengan arah distribusi



Gambar 4. Langkah desain GSMP

fluks magnet vertikal menuju gigi stator hal mana terdapat belitan. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa besarnya energi magnet yang dikonversi menjadi energi listrik tergantung jumlah  $B_n$ . Kerapatan fluks tangensial ( $B_t$ ) didefinisikan sebagai kerapatan fluks dengan arah distribusi fluks magnet horizontal dan arahnya menuju alur stator.  $B_t$  merupakan penyebab utama terjadinya torka *cogging* pada GSMP. Hubungan antara  $B_n$  dan  $B_t$  terhadap nilai torka *cogging* pada sebuah GSMP dirumuskan pada Persamaan (4) [1], [2], [5], [8], [9], [10], [11]:

$$T_c = \frac{L_{stk}}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_n B_t d\theta \quad (4)$$

Keterangan:

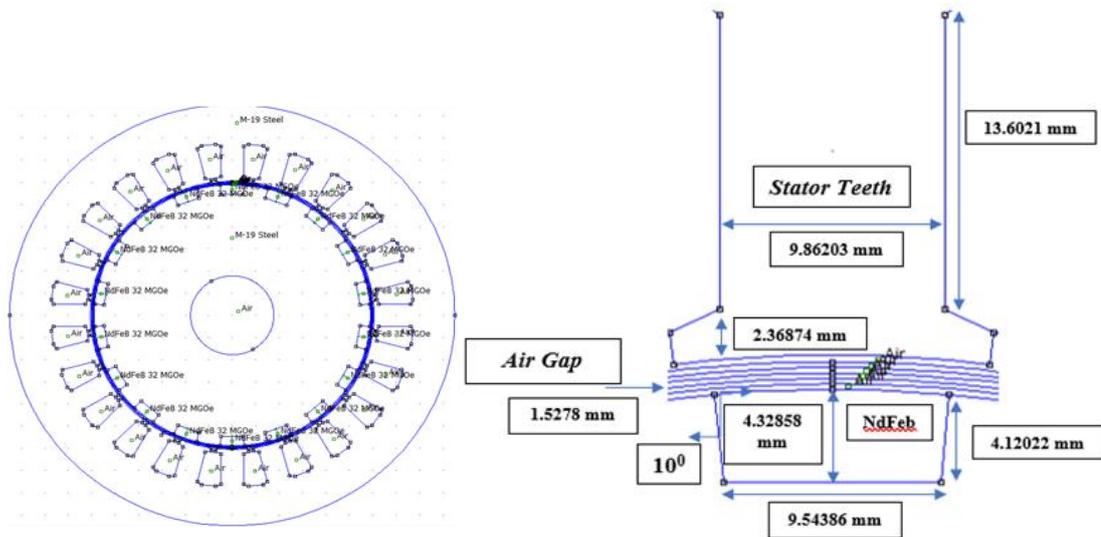
$L_{stk}$  = Panjang mesin (m),  $B_n$  = Kerapatan fluks normal (T),  $B_t$  = Kerapatan fluks tangensial (T),  $\theta$  = Derajat rotor ( $^\circ$ ),  $r$  = Jari-jari tiruan di

celah udara tempat nilai *cogging torque* diukur (mm).

## B. Finite Element Methods Magnetic (FEMM)

*Finite element methods magnetic* (metode elemen hingga untuk magnetik) atau disingkat FEMM adalah salah satu metode numerik yang paling umum dipakai di dunia teknik maupun sains untuk menyelesaikan persamaan-persamaan matematika [7]. Bidang masalah tersebut adalah analisis struktural atau konstruksi, perpindahan panas, aliran fluida, serta potensi elektromagnetik. FEMM dapat memecahkan masalah dengan membagi sistem besar menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, lebih sederhana yang dikenal sebagai elemen hingga (*finite element*) [7]

## C. Perancangan Generator Sinkron Magnet Permanen (GSMP)



Gambar 5. Desain *intial structure* (struktur awal) GSMP

Proses pembuatan desain GSMP dilampirkan dalam bentuk diagram alir dalam Gambar 4. Proses perancangan GSMP dalam paper ini menerapkan metode optimasi Response surface Method (RSM). Untuk keperluan studi, maka hanya menampilkan disain GSMP yang terbaik saja.

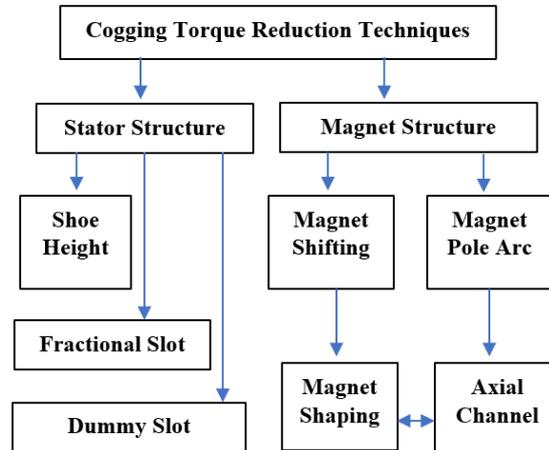
#### D. Struktur Awal GSMP

Rancangan GSMP dalam paper ini adalah konstruksi 24 alur dan 18 kutub yang merupakan tipe fractional slot number. Struktur awal GSMP dalam studi ini menggunakan bentuk magnet konvensional yang mana tanpa modifikasi baik pada stator maupun rotornya. Rotor GSMP menggunakan rotor tipe *non salient pole (Inset)* seperti diperhatikan seperti pada Gambar 5. Untuk meminimalkan torka *cogging*, GSMP dioptimasi dan dianalisis menggunakan metode elemen hingga. Sedangkan untuk mendapatkan konstruksi yang optimal dilakukan dengan bantuan *Response Surface Method (RSM)* Seperti yang

ditunjukkan pada struktur awal GSMP, jarak permukaan magnet dan tepi magnet terhadap gigi stator masih belum mengalami perubahan. Hal ini yang menyebabkan masih tingginya interaksi diantara permukaan magnet dengan alur stator yang pada gilirannya menyebabkan tingginya torka *cogging* pada GSMP konvensional.

#### E. Metode Penurunan Torka Cogging pada GSMP

Sebagaimana kita ketahui bahwa torka *cogging* diakibatkan oleh interaksi antara fluks magnet dari rotor dengan alur stator. Oleh sebab itu, maka untuk meminimalkan torka *cogging* dapat dilakukan dengan melakukan optimasi parameter pada permukaan magnet dan alur stator. Terdapat beberapa teknik untuk menurunkan torka *cogging* pada GSMP [2],[5],[8],[9]. Setiap metode penurunan torka *cogging* memiliki keandalan dan kekurangannya masing-masing. Oleh sebab itu maka setiap metode penurunan torka *cogging* dapat dipadukan dengan metode lainnya untuk mendapat penurunan



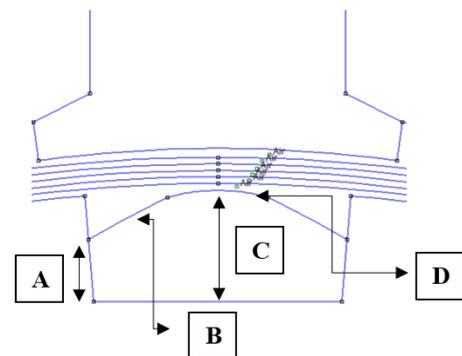
Gambar 6. Metode penurunan nilai torka *cogging*

torka *cogging* yang lebih baik. Dalam studi ini penurunan nilai torka *cogging* dilakukan dengan mengkombinasikan beberapa metode penurunan torka *cogging*. Metode penurunan torka *cogging* ditunjukkan pada Gambar 6. Dalam paper ini, kami menggabungkan dua metode yaitu *fractional slot number* (FSN) dan pangkasan pada ujung magnet dalam proses perancangannya.

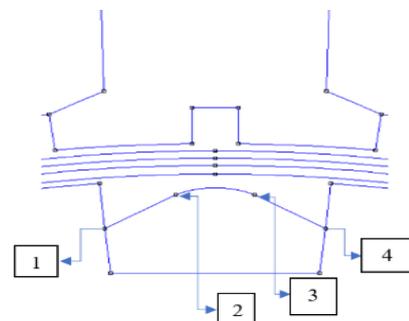
Dalam, penurunan torka *cogging* dilakukan dengan metoda pangkas ujung magnet yang dipadukan dengan coakan pada gigi stator, seperti ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8.

Perubahan desain magnet dilakukan pada titik koordinat yang sama dalam kedua desain perbaikan pada proyek makalah ini, hal tersebut ditampilkan oleh Gambar 8. Perbedaan kedua desain perbaikan terletak pada bentuk *axial channel* yang diajukan. Kehadiran *dummy slot* pada gigi stator dibahas dalam makalah yang lain [2], [10].

Pemangkasan dengan membentuk magnet menjadi bentuk *bread loaf* akan



Gambar 7. Bagian-bagian magnet yang akan dimodifikasi (A) Tinggi ujung magnet, (B) Sudut ujung magnet, (C) Tinggi magnet, (D) Sudut permukaan magnet



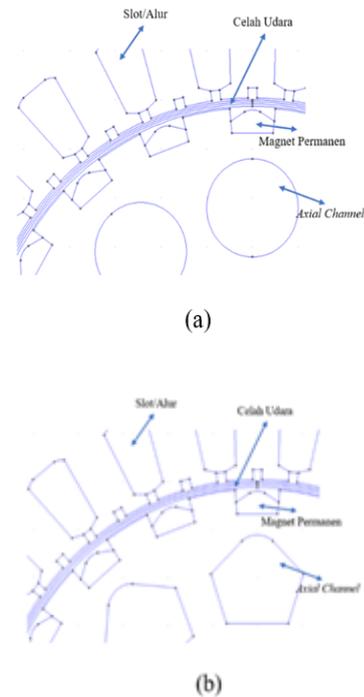
Gambar 8. Kedua desain yang diajukan dengan bentuk magnet *bread loaf*

Tabel 1. Koordinat titik-titik pemotongan desain yang diajukan

No	Nama	Titik ke-	Koordinat	
			X(mm)	Y(mm)
1	Desain 1	1	-4.75018	55.6977
		2	-1.70223	57.57
		3	1.70223	57.57
		4	4.75018	55.6977
2	Desain 2	1	-4.75018	55.6977
		2	-1.70223	57.57
		3	1.70223	57.57
		4	4.75018	55.6977

berdampak pada perubahan volume, arah distribusi fluks magnet terhadap poros dan interaksi fluks magnet dengan gigi stator. Pemangkas pada titik koordinat yang tepat akan menyebabkan penurunan nilai *cogging torque* yang signifikan pada desain generator. Koordinat titik-titik pemotongan dari desain yang diajukan ditampilkan dalam bentuk tabel dan dapat diperhatikan pada Tabel 1.

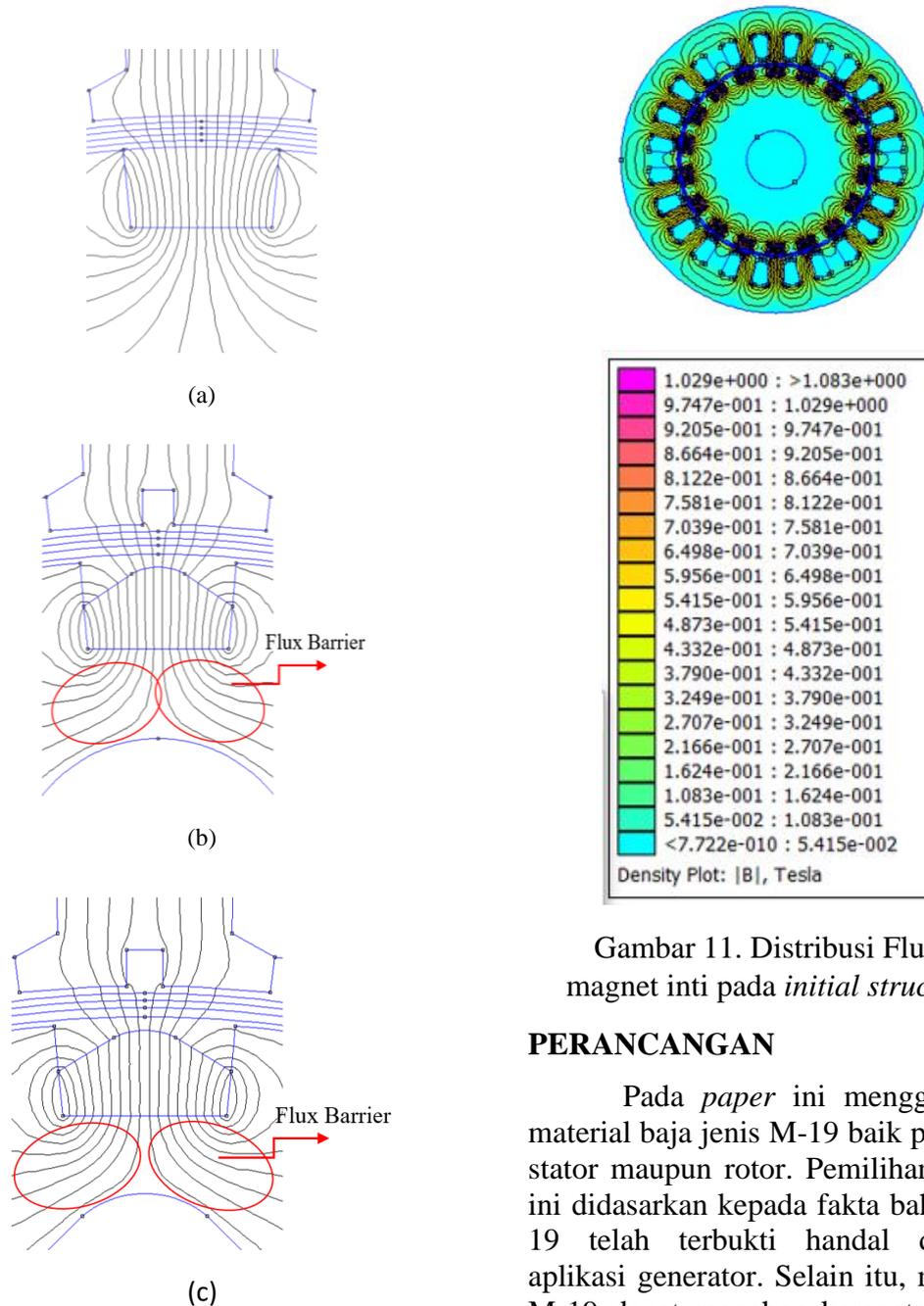
Lebih jauh lagi, proses penurunan torka *cogging* dilakukan dengan melibatkan *axial channel* pada inti rotor. Pada dasarnya, *axial channel* hanya merupakan lubang udara pada inti rotor yang berperan dalam mengurangi bobot rotor dengan demikian rotor dapat dengan mudah digerakan. Struktur magnet pemanen pada desain yang diusulkan tidak mengalami perubahan pada saat penambahan *axial channel* pada inti rotor. Terdapat dua bentuk *axial channel* yang diajukan dan dianalisa dalam paper ini, yaitu pola lingkaran dan segienam sebagaimana



Gambar 9 (a). Desain *axial channel* dengan bentuk lingkaran, (b). Desain *axial channel* dengan bentuk segi enam

ditunjukkan pada Gambar 9(a) dan 9(b).

Keberadaan *axial channel* pada inti rotor menyebabkan fluks magnet yang berasal dari magnet permanen berbelok kembali menuju inti stator dibandingkan masuk ke poros. Hal ini disebabkan karena jalur fluks magnet (*flux barrier*) cenderung memilih bahan ferromagnetik dengan nilai permeabilitas yang lebih tinggi daripada udara. Sebagai hasil, maka kebocoran fluks yang terdapat pada poros menjadi jauh berkurang sehingga dapat menurunkan rugi-rugi pada inti GSMP. Gambar *flux barrier* dari ketiga rancangan ditunjukkan oleh Gambar 10(a), (b), dan (c).

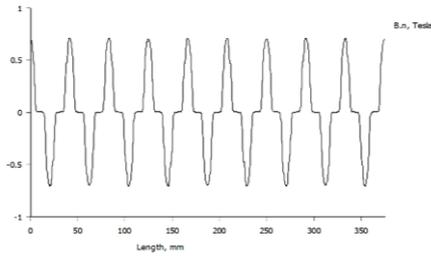


Gambar 11. Distribusi Fluks magnet inti pada *initial structure*

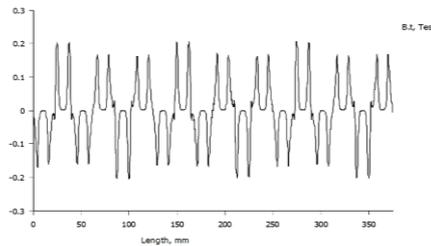
## PERANCANGAN

Pada *paper* ini menggunakan material baja jenis M-19 baik pada inti stator maupun rotor. Pemilihan bahan ini didasarkan kepada fakta bahwa M-19 telah terbukti handal didalam aplikasi generator. Selain itu, material M-19 dapat menahan kerapatan fluks magnet hingga 1.5 Tesla. Pada rotor magnet, *Neodymium-Iron-Boron* (NdFeb) dipilih sebagai magnet rotor. Material magnet NdFeB ini memiliki nilai kerapatan fluks remanensi yang relative besar bila dibandingkan dengan jenis magnet yang lain, seperti *Samarium-Cobalt* (Sm-co), *Alnico* (AlNiCo), dan lain sebagainya. Baik

Gambar 10 (a). *Flux barrier* pada desain awal, (b). *Flux barrier* pada desain 1 dengan bentuk *axial channel* lingkaran, (c). *Flux barrier* pada desain 1 dengan bentuk *axial channel* segienam

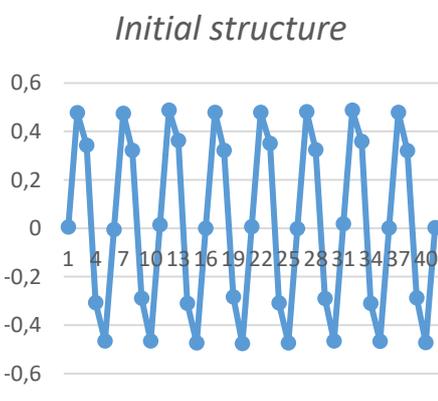


(a)



(b)

Gambar 12. (a) Grafik kerapatan fluks ( $B_n$ ) *initial structure*, (b) Grafik kerapatan fluks ( $B_t$ ) *initial structure*

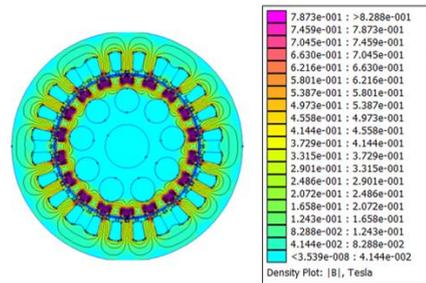


Gambar 13. Grafik torka *cogging* pada *initial structure*

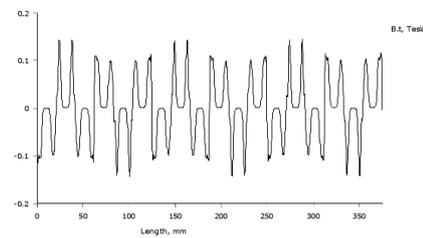
material M-19 dan magnet permanen NdFeB telah banyak dipakai dalam aplikasi mesin-mesin listrik.

### HASIL DAN DISKUSI

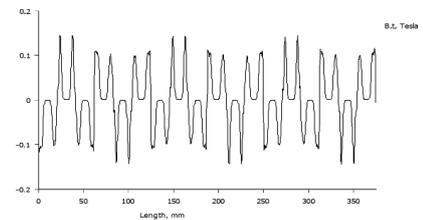
Pada bagian ini, dijelaskan menganalisa serta hasil dari setiap desain GSMP sebelum dan setelah



Gambar 14. Kerapatan fluks inti desain 1



(a)

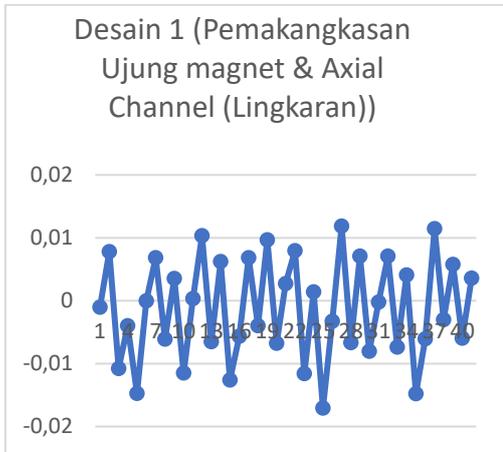


(b)

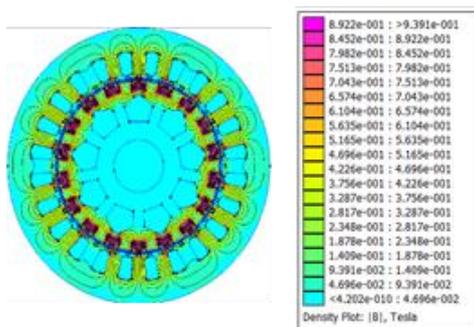
Gambar 15. (a) Grafik kerapatan fluks ( $B_n$ ) desain 1, (b) Grafik kerapatan fluks ( $B_t$ ) desain 2

dilakukan modifikasi. Dalam proses pengujian desain terdapat beberapa faktor yang diamati karena berperan dalam penurunan nilai torka *cogging* yaitu nilai kerapatan fluks inti, kerapatan fluks normal ( $B_n$ ), kerapatan fluks tangensial ( $B_t$ ). Grafik-grafik kerapatan fluks inti,  $B_n$  dan  $B_t$  pada *initial structure* berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 11, 12 (a) dan 12 (b). Data nilai *cogging torque* disajikan dalam bentuk grafik dapat diperhatikan pada Gambar 13.

Hasil pengujian berupa nilai kerapatan fluks inti, kerapatan fluks



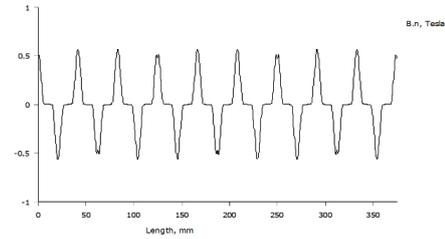
Gambar 16. Grafik torka *cogging* pada desain 1



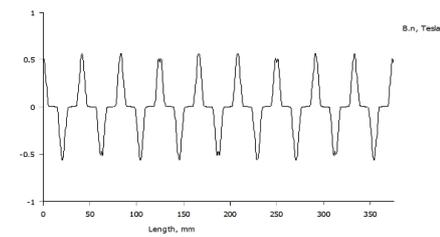
Gambar 17. Kerapatan fluks inti desain 2

normal ( $B_n$ ) dan kerapatan fluks tangensial ( $B_t$ ) pada desain 1 ditampilkan dalam bentuk grafik. Grafik-grafik kerapatan fluks inti,  $B_n$  dan  $B_t$  berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 14, 15(a) dan 15 (b). Data nilai torka *cogging* disajikan dalam bentuk grafik dapat diperhatikan pada Gambar 16.

Hasil pengujian berupa nilai kerapatan fluks inti, kerapatan fluks normal ( $B_n$ ) dan kerapatan fluks tangensial ( $B_t$ ) pada desain yang diajukan ditampilkan dalam bentuk grafik. Grafik-grafik kerapatan fluks inti,  $B_n$  dan  $B_t$  berturut-turut ditunjukkan



(a)

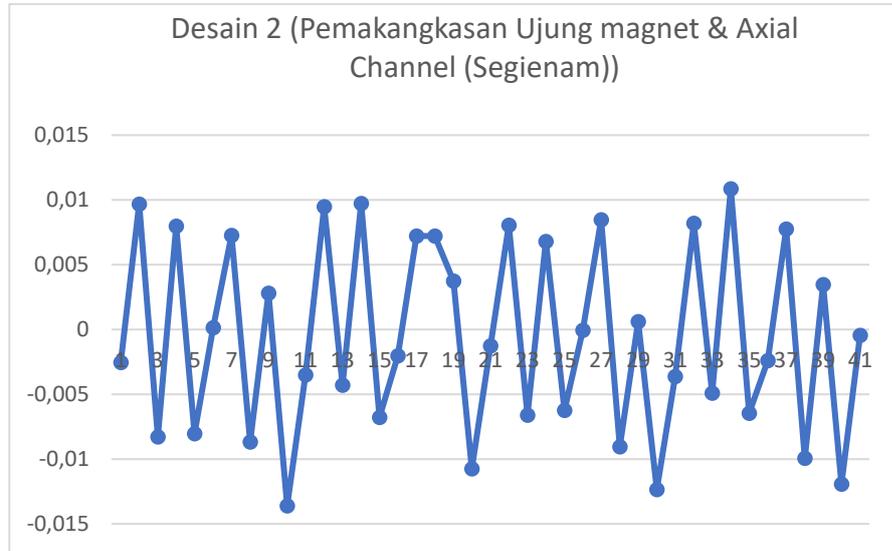


(b)

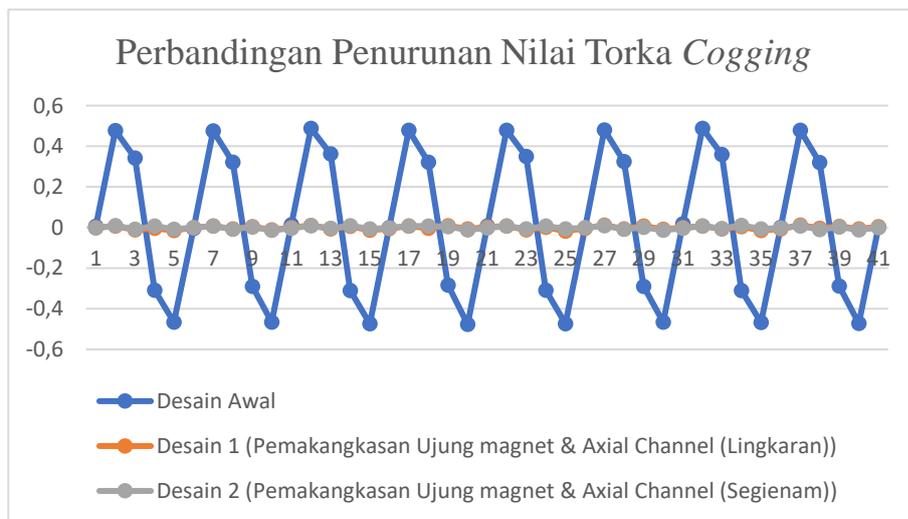
Gambar 18. (a) Grafik kerapatan fluks ( $B_n$ ) desain 2, (b) Grafik kerapatan fluks ( $B_t$ ) desain

pada Gambar 17, 18(a) dan 18 (b). Data nilai torka *cogging* disajikan dalam bentuk grafik dapat diperhatikan pada Gambar 19.

Penelitian ini bertujuan untuk mengamati serta menganalisis pengaruh pemangkasan ujung magnet dan penggunaan *axial channel* terhadap penurunan torka *cogging* pada desain generator sinkron magnet permanen tipe *fractional slot number*. Desain mesin ini tergolong tipe *fractional slot number* dimana nilai *cogging torque* relatif rendah dibandingkan dengan mesin tipe *integral slot number*. Pada dasarnya torka *cogging* merupakan bagian dari rugi-rugi yang terdapat dalam suatu mesin listrik. Nilai torka *cogging* dalam mesin listrik dapat mengurangi energi mekanik sehingga berdampak pada penurunan puncak torka efektif. Oleh karena itu, metode



Gambar 19. Grafik torka cogging pada desain 2



Gambar 20. Perbandingan penurunan nilai torka cogging

kombinasi pemangkasan ujung magnet dan *axial channel* diajukan dalam makalah ini. Metode pemangkasan ujung magnet dipilih karena dapat meminimal nilai kerapatan fluks yang tidak berguna yang berasal dari kerapatan fluks tangensial ( $B_t$ ) serta mampu menurunkan reluktansi celah udara secara bersamaan. Pernyataan tersebut didukung oleh persamaan (2), (3), dan (4). Pada persamaan (2) dan (3)

dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya luas celah udara (*air gap*) melalui proses pemangkasan nilai reluktansi di celah udara (*air gap*) akan turun dengan sendirinya. Apabila ditinjau dari persamaan (4) nilai torka cogging akan ikut berkurang seiring dengan berkurangnya kerapatan fluks tangensial ( $B_t$ ) pada tepi magnet. Akan tetapi metode ini tidak sepenuhnya baik sebab dengan adanya pemangkasan,

kerapatan fluks normal ( $B_n$ ) ikut terdampak dan volume magnet mejadi berkurang. Oleh karena itu, untuk memperoleh penurunan torka *cogging* yang maksimal teknik kombinasi dengan *axial channel* digunakan. Perbedaan bentuk serta luas *axial channel* menyebabkan perbedaan kerapatan fluks pada inti mesin. Hal tersebut dapat diperhatikan pada Gambar 13 dan Gambar 16. Dalam proyek makalah ini, proses perhitungan penurunan torka *cogging* dilakukan menggunakan aplikasi FEMM 4.2. Grafik penurunan torka *cogging* dapat diperhatikan pada Gambar 19.

Pada desain awal (*Initial Structure*) mesin dapat dilihat bahwa nilai  $B_t$  mencapai puncak tertinggi. Nilai  $B_t$  desain awal ditunjukkan oleh Gambar 11(b). Hal tersebut diverifikasi dalam proses perhitungan nilai torka *cogging* dimana nilai puncak torka *cogging* desain awal sebesar 0.488158911 Tesla serta dapat diperhatikan pada Gambar 15 (garis biru). Setelah dilakukan pemangkasan ujung magnet dan penambahan *axial channel* pada desain yang diajukan, nilai  $B_t$  dan nilai puncak torka *cogging* turun cukup drastis. Penurunan nilai puncak torka *cogging* terbaik berhasil dicapai oleh desain 2 dengan nilai puncak torka *cogging* sebesar 0.0096751203544941 Tesla (garis abu-abu). Desain 2 menunjukkan bentuk segienam yang digunakan sebagai *axial channel* lebih baik dibandingkan dengan bentuk lingkaran karena jalur fluks (*flux barrier*) yang lebih baik. Oleh sebab itu torka *cogging* dapat turun dengan maksimal. Proses perhitungan dilakukan menggunakan data nilai puncak torka *cogging* dari desain awal (*Initial structure*) dan desain 2. Penurunan nilai puncak torka

*cogging* diproses menggunakan persamaan (5).

$$Tc(\%) = (100\% - \frac{Tc_2}{Tc_1} \times 100\%) \quad (5)$$

Keterangan:

$Tc_1$  = Nilai puncak torka *cogging* desain awal,  $Tc_2$  = Nilai puncak torka *cogging* desain yang diajukan

Proses perhitungan dilakukan menggunakan data nilai puncak torka *cogging* dari desain awal (*Initial Structure*) dan desain 2.

$$Tc(\%) = (100\% - \frac{Tc_2}{Tc_1} \times 100\%)$$

$$= 100\% - \frac{0.0096751203544941}{0.488158911} \times 100\%$$

$$= 100\% - 1.98\% = 98.02 \approx 98\%$$

Penurunan torka *cogging* yang diperoleh sebesar 98% dari desain awal (*Initial structure*).

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian serta pengolahan data yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode kombinasi *axial channel* bentuk segienam dan pemangkasan ujung magnet (*magnet shaping*) dengan modifikasi bentuk magnet *bread loaf* yang dilakukan pada bagian-bagian atau aspek-aspek seperti tinggi ujung magnet, sudut ujung magnet, tinggi magnet, sudut permukaan magnet terbukti mampu menurunkan nilai puncak torka *cogging* secara signifikan.
2. Desain 2 merupakan rancangan mesin dengan penurunan nilai puncak torka *cogging* terbaik yakni sebesar 98% dari desain awal (*initial structure*). Spesifikasi magnet pada desain yang diajukan ditampilkan sebagai berikut: (1)

Tinggi ujung magnet 2.50009 mm. (2) Sudut ujung magnet  $1^\circ$  (3) Tinggi tengah magnet : 4.75279 mm, (4) Sudut permukaan magnet  $52^\circ$ . (5) Bentuk *axial channel* adalah segi enam. (6). Luas *axial channel* 0.000279683 m<sup>2</sup>.

3. Tujuan perbaikan desain sudah tercapai dan mampu memenuhi kriteria penurunan nilai puncak torka *cogging* yang optimal.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nur.Tajuddin, dan Liza Evelyn Joe. 2019. *Study the Effect of Height and Length of Slotting in Magnet Edge on The Cogging Torque Reduction of Fractional Slot Number in Magnet Permanent Machine*, In : *International Conference on Electrical Engineering, Science and Technology (ICEST)*, Bandar Lampung.
- [2] Nur.Tajuddin, dan Sri Mawar. 2019. *Study the Influence of Edge Points of Magnet Surface and Stator Core on the Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machine*, In : *International Conference on Electrical Engineering, Science and Technology (ICEST)*, Bandar Lampung.
- [3] Marappung, Muslimin. 1979. *Teknik Tenaga Listrik*. Bandung: Armico.
- [4] D.Hanselmann. 2006. *Brushless Permanent Magnet Motor Design: Magna Physics Publishing Motorsoft Division of Fisher Electric Technology*, Magna Physics Publishing.
- [5] Nur.Tajuddin, dan Herlina. 2018. *Enhancement of Cogging Torque Reduction on Inset Permanent Magnet Generator by Using Magnet Edge Shaping Method*, *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science*.
- [6] Candel, Miquel Tost. 2016. “*Cogging Torque Reduction for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors*”. *Department of Electrical Engineering and Information Technology*. Technical University of Darmstadt. Darmstadt.
- [7] Bargallo, Ramón. 2006. *Finite Elements for Electrical Engineering*. *Electrical Engineering Department*. Universitas Politécnica De Catalunya. Barcelona.
- [8] Jeeng-Min Ling dan Tajuddin Nur. 2012. *Study of Magnetics Performance of Inset Permanent Magnet Synchronous Machine (Inset - PMSM) using Finite Element Method*. Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology. Taiwan. *Applied Mechanics and Materials Vols 260-261* (2013) pp 554-558.
- [9] Jeeng-Min Ling dan Tajuddin Nur. 2016. *Influence of edge slotting of magnet pole with fixed slot opening width on the cogging torque in inset permanent magnet synchronous machine*. Department of Electrical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology. *Advances in Mechanical Engineering* 2016, Vol. 8(8) 1–9.
- [10] Nur.Tajuddin, dan Sri Mawar. 2019. *Study the Influence of Edge Points of Magnet Surface and Stator Core on the Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet*

*Machine, In : International Conference on Electrical Engineering, Science and Technology (ICEST).*

- [11] Hsio. Chun Yu, dkk. 2011. *A Novel Cogging Torque Simulation Method for Permanent-Magnet Synchronous Machines.*