

PERANCANGAN PMSG UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK SKALA MIKRO DENGAN NILAI *COGGING TORQUE* RENDAH

PMSG DESIGN FOR MICRO SCALE POWER PLANT WITH LOW COGGING TORQUE VALUE

¹Ujang Cakra Buana*, ²Dian Budhi Santoso

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

¹ujang.cakra18102@student.unsika.ac.id, ²dian.budhi@ft.unsika.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima: 31 Oktober 2021

Direvisi: 31 Desember 2021

Disetujui: 06 Januari 2022

Kata Kunci:

Cogging torque, Finite Element Method, Lebar teeth, PMSG 18s16p

Keywords:

Cogging torque, Finite Element Method, PMSG 18s16p, Teeth width.

ABSTRAK

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk. pemanfaatan energi baru terbarukan sangat penting didorong untuk menopang kebutuhan listrik. Salah satunya dengan pemanfaatan energi angin. Angin dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin yang dikopel dengan generator. *Permanent magnet synchronous generator* (PMSG) merupakan jenis generator yang sering dipakai dalam pemanfaatan energi angin. Komponen utama pada PMSG terdiri oleh tiga komponen yaitu stator, rotor dan magnet permanen. Interaksi antara antar komponen menyebabkan *ripple* atau sering disebut dengan fenomena *cogging*. *Cogging* inilah yang membuat PMSG tidak bekerja dengan sempurna. Penelitian ini membahas pengaruh lebar *teeth* terhadap penurunan nilai *cogging torque* pada PMSG dengan membuat dua desain. Variasi desain yang digunakan adalah lebar *teeth* 7 mm dan 4 mm, jenis inti besi *Carpenter: Silicon steel, Permanent magnet synchronous generator* 18 slot 16 *pole* (PMSG 18s16p). Hasil penurunan nilai *cogging torque* yang didapat adalah sebesar 0.012676 Nm dengan lebar *teeth* 4 mm. Untuk analisa numerik menggunakan metode *finite element method* (FEM).

ABSTRACT

The need for electrical energy continues to increase along with population growth. it is very important to encourage the use of new and renewable energy to support electricity needs. One of them is the use of wind energy. Wind can be used to drive a turbine coupled to a generator. Permanent magnet synchronous generator (PMSG) is a type of generator that is often used in the utilization of wind energy. The main component of PMSG consists of three components, namely the stator, rotor and permanent magnet. The interaction between the components causes a ripple or often referred to as the cogging phenomenon. Cogging is what makes PMSG not work perfectly. This study discusses the effect of teeth width on decreasing the cogging torque value in PMSG by making two designs. The design variations used are teeth width 7 mm and 4 mm, Carpenter type of iron core: Silicon steel, Permanent magnet synchronous generator 18 slot 16 pole (PMSG 18s16p). The result of decreasing the value of cogging torque obtained is 0.012676 Nm with 4 mm teeth width. For numerical analysis using the finite element method (FEM).

*Corresponding author: ujang.cakra18102@student.unsika.ac.id

I. PENDAHULUAN

Perkembangan mesin listrik meningkat begitu cepat terutama pada bidang energi terbarukan salah satunya energi listrik yang memanfaatkan sumber dari tenaga yang memiliki kecepatan skala kecil. Pemanfaatan sumber tenaga yang memiliki kecepatan skala kecil seperti energi angin sangat mungkin untuk dikonversikan menjadi energi listrik. Dalam konversi angin, dibutuhkan generator yang dapat berputar oleh angin dengan skala kecepatan kecil sekalipun. Dalam kasus seperti ini inovasi efisiensi generator sangat dibutuhkan. *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) menjadi mesin listrik yang telah tercipta dengan inovasi terobosan terbaru dalam perkembangan generator. Penerapan PMSG sangat umum dalam konversi energi

terbarukan skala mikro seperti PLTB, PLTA, PLTMH dan lain sebagainya. Penggunaan PMSG dipilih karena memiliki keunggulan dibandingkan mesin lainya seperti penggunaan magnet permanen yang dapat meningkatkan daya efisiensi yang tinggi pada generator [1].

Meskipun potensi angin di Indonesia tidak besar, namun banyak daerah yang memiliki potensi angin yang cukup untuk dikonversi menjadi energi listrik. Kecepatan rata-rata angin di Indonesia sekitar 3 m/s [11]. Akan tetapi, kelemahan PMSG adalah nilai *cogging torque* yang ditimbulkan oleh permanen magnet pada rotor. *Cogging torque* memiliki sifat menarik yang mengakibatkan rotor berat untuk digerakkan ketika mendapat gaya yang kecil. Hal seperti ini mempengaruhi pada *start* awal untuk menggerakkan generator dengan Nilai *cogging torque* pada

PMSG terjadi akibat interaksi fluks magnet rotor dengan variasi permensi (kemampuan material menyalurkan fluks magnet pada area *air gap*). Akibatnya magnet permanen memiliki kecenderungan untuk menarik stator walaupun dalam keadaan tidak bergerak [2].

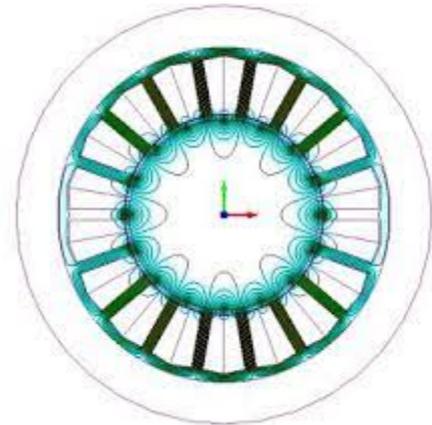
Nilai *cogging torque* pada PMSG tidak dapat diturunkan hingga 100%, namun toleransi penggunaan pada skala mikro sebesar 2% dari *torque* beban nol. Pada penelitian sebelumnya Yudha Suherman dan Tajudin Nur [5], "PENGARUH PEMANGKASAN UJUNG MAGNET PERMANEN DAN *AXIAL CHANEL* PADA INTI ROTOR TERHADAP TORAKA *COGGING* TIPE *FRACTIONAL SLOT NUMBER* sudah dilakukan penelitian mengenai penurunan *cogging torque* dengan cara memangkas ujung magnet permanen. Penurunan nilai *cogging torque* dapat disiasati dengan cara merekayasa lebar *teeth*, pemangkasan permukaan rotor dan lain-lain. Cara merekayasa lebar *teeth* dimungkinkan untuk memperoleh nilai penurunan *cogging torque* yang maksimal. Dalam penelitian ini, pengaruh lebar *teeth* terhadap penurunan nilai *cogging torque* pada PMSG 18s16p akan dikaji. Bentuk desain PMSG 18s16p yang akan dikaji adalah dengan mendesain dua buah PMSG dengan jumlah 18 *slot* dan 16 *pole* yang dianalisis menggunakan *Finite Element Method (FEM)*.

II. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh lebar *teeth* terhadap penurunan *cogging torque* pada PMSG 18s16p. Sebelum membahas lebih dalam alangkah baiknya terlebih dahulu memahami mengenai teori dari PMSG sebagai penunjang penelitian, diantaranya sebagai berikut:

A. Permanent Magnet Synchronous Generator

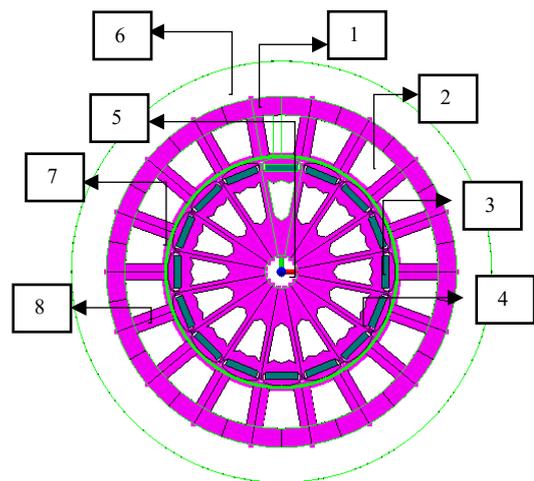
Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) memiliki desain konstruksi hampir mendekati kesamaan dengan generator pada umumnya [3]. Perbedaan antara PMSG dengan generator sinkron konvensional lainnya terletak pada rotornya. Generator magnet permanen *flux* radial dapat beroperasi pada putaran tinggi dan putaran rendah. Keuntungannya terletak pada kemudahan dalam instalasi magnet permanen pada rotor dan biasa dimanfaatkan pada pembangkit listrik di daerah yang memiliki kecepatan putaran yang rendah [4]. Generator sinkron magnet permanen dibangkitkan oleh magnet permanen sebagai penghasil medan magnet pada rotor. *Flux* magnet dihasilkan dari magnet permanen yang mengalir melalui rotor melewati *air gap* menuju ke stator sehingga menghasilkan gaya gerak magnet (GGM) dari kutub magnet secara *axial* dan *radial*. Generator jenis ini banyak sekali dijadikan bahan penelitian oleh para peneliti karena memiliki keunggulan yang sangat signifikan dan biasanya digunakan untuk aplikasi *wind turbine*. Gambar desain PMSG dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Desain PMSG

B. Kontruksi PMSG

Generator sinkron magnet permanen adalah mesin listrik 3 fasa sama seperti generator magnet induksi pada umumnya. Perbedaannya adalah penggunaan magnet permanen pada rotor untuk menghasilkan *flux* magnet saat rotor diputar. Kontruksi dari PMSG tidak serumit yang dibayangkan seperti halnya generator magnet induksi. Pada rotor PMSG magnet yang digunakan adalah magnet yang memiliki kekuatan yang tinggi [5]. Gambar konstruksi dapat dilihat pada Gambar 2 berikut:



Gambar 2 Kontruksi PMSG

Adapun keterangan dari Gambar 2 yaitu:

1. Stator adalah komponen PMSG yang tidak bergerak.
2. *Slot* adalah tempat untuk menempatkan lilitan tembaga.
3. Permanen magnet berfungsi sebagai eksitasi fluks pada PMSG.
4. Fluks *barrier* berfungsi sebagai pengeblok fluks magnet pada rotor.

5. Rotor adalah komponen yang bergerak pada PMSG.
6. *Air box* adalah ruang udara dalam ruang PMSG.
7. *Air gap* adalah celah udara antara rotor dengan stator.
8. *Teeth* adalah dinding batas antar *slot*.

B. Cogging Torque

Generator beroperasi tidak selalu bekerja menghasilkan atau menyerap torsi secara maksimal. Hal ini diakibatkan oleh adanya gejala *ripple* saat generator bekerja. Salah satu penyebab dari gejala *ripple* adalah fenomena *cogging* [6]. Fenomena *cogging* adalah gejala yang diakibatkan interaksi *flux* magnet rotor dengan variasi permeansi (kemampuan material menyalurkan *flux* magnet pada area *air gap*). Fenomena ini menjadi faktor timbulnya nilai *cogging torque*. Adanya *cogging torque* pada rotor pada mesin listrik dengan permanen magnet memiliki kecenderungan untuk menarik stator walaupun dalam kondisi tidak bergerak [7]. Untuk persamaan yang digunakan adalah Persamaan (1) sebagai berikut:

$$\tau_{cog}(Nm) = \frac{1}{2} \phi_r \frac{dF}{d\theta} = \frac{1}{2} B_r \frac{l m}{\mu_0 \mu_r} \frac{d\phi}{d\theta} \quad (1)$$

Dimana:

τ_{cog}	:Cogging torque
ϕ_r	:Flux remanen tegak lurus arah magnetisasi di dalam magnet
F	:Gaya magnet (N)
θ	:Posisi rotor dalam derajat mekanik
B _r	:Titik potong pada sumbu B dari kurva B-H
l m	:Panjang magnet sesuai arah magnetisasi
μ_0	:Permeabilitas ruang bebas
μ_r	:Permeabilitas relatif dari material magnet
ϕ	:Flux yang dihitung

C. Finite Element Method

Finite Element Method (FEM) adalah suatu metode numerik yang dipakai di dunia teknik maupun sains untuk menyelesaikan persamaan matematika. Bidang masalah tersebut adalah analisis struktural, aliran fluida, serta potensi elektromagnetik. FEM dapat memecahkan masalah dengan membagi sistem besar menjadi bagian-bagian yang lebih kecil, lebih sederhana yang dikenal sebagai elemen hingga (*finite element*) [8].

D. Menentukan Jumlah Pole Rotor

Rotor memiliki jumlah *magnet* yang tersusun dengan beda kutub. Kegunaannya adalah ketika lilitan pada stator diberikan sumber listrik maka akan terjadi gaya gerak *magnet* (GGM) pada susunan *magnet*. Gaya gerak *magnet* ini terjadi akibat induksi elektromagnetik pada stator *core* [9]. Untuk menentukan berapa jumlah *pole* pada rotor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2) berikut:

$$f = \frac{p}{2} \times \frac{n}{60} \quad (2)$$

Dimana:

f : Frekuensi (Hz)

p : *pole*

n : Kecepatan putar rotor (rpm)

E. Menentukan Jenis Magnet

Magnet permanen yang dipakai pada penelitian ini adalah jenis NdFeb (*Neodymium Iron Boron*). Magnet jenis ini memiliki produksi energi (Bh_{max}) cukup tinggi sekitar 440 KJ/m³ [10]. Namun tidak menutup kemungkinan menggunakan jenis magnet yang lain sesuai dengan kebutuhan pada PMSG.

F. Tipe Penelitian

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian yang sudah ada, sekaligus untuk memecahkan masalah mengenai krisis energi. Penelitian juga menggunakan simulasi untuk menganalisis desain PMSG yang dibuat dengan analisis numerik menggunakan metode FEM. Peneliti menggunakan dua desain yang mengadopsi desain yang sudah ada. Pada penelitian sebelumnya Yudha Suherman dan Tajudin Nur [5], "PENGARUH PEMANGKASAN UJUNG MAGNET PERMANEN DAN AXIAL CHANEL PADA INTI ROTOR TERHADAP TORKA COGGING TIPE FRACTIONAL SLOT NUMBER menggunakan desain *slot* sebanyak 24 dan *pole* sebanyak 18 dengan fokus penelitian pada pemangkasan ujung magnet permanen, kemudian peneliti membuat desain PMSG dengan jumlah *slot* sebanyak 18 dan *pole* sebanyak 16 dengan fokus penelitian pada pengaruh lebar *teeth*.

G. Jenis Data

Dalam penelitian ini, data diambil dengan beberapa metode yaitu:

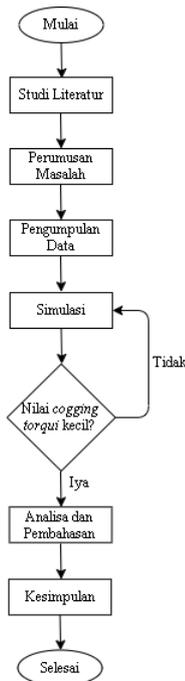
1. Observasi, yaitu pengamatan dan percobaan pada objek yang akan diteliti dengan cara menganalisis desain PMSG mengenai nilai *cogging torque* kemudian menjadi dasar dalam mendesain PMSG.
2. Studi kepustakaan, menggunakan literatur yang berkaitan dengan perancangan PMSG.

H. Waktu dan Lokasi Penelitian

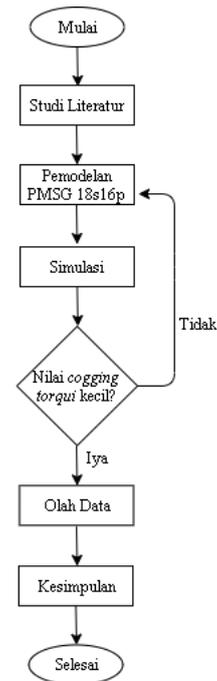
Penelitian dilakukan di PT. Lentera Bumi Nusantara selama 1,5 bulan. Penelitian berfokus pada perancangan PMSG yang berkaitan dengan nilai *cogging torque*.

I. Flow Chart Penelitian

Adapun *flow chart* dalam penelitian menggunakan terbagi menjadi dua yaitu, *flow chart* penelitian dan simulasi dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3 Flow chart penelitian



Gambar 4 Flow chart simulasi

Pafda Gambar 3, tampak bahwa penelitian dimulai dengan studi literatur dengan tujuan menemukan informasi dari referensi utama dan pendukung yang sesuai dengan masalah yang telah dirumuskan. Selanjutnya dilakukan perumusan masalah mengenai nilai *cogging torque* pada PMSG 18s16p yang menjadi permasalahan dalam perancangan generator. Dalam penentuan masalah juga dikumpulkan data-data mengenai nilai *cogging torque* pada desain PMSG pada umumnya. Langkah selanjutnya mensimulasikan desain yang dibuat engan membandingkan nilai *cogging torque* dari kedua desain. Flow chart simulasi dapat dilihat pada Gambar 4. Dari data simulasi, data akan diolah dan dinalisis untuk disimpulkan dari kedua desain. Jika nilai *cogging torque* masih didapat nilai yang besar, maka akan dilakukan langkah simulasi lagi.

Tahap simulasi dimulai dengan studi literatur, dengan tujuan mengumpulkan data mengenai perancangan PMSG 18s16p mengenai penelitian yang berhubungan dengan *cogging torque*. Dalam tahap pemodelan PMSG 18s16p menggunakan *software design electromagnetic* berbasis *finite element method (FEM)*. Hasil data simulasi akan diolah, apabila nilai *cogging torque* kecil maka akan diambil kesimpulan dan selesai. Apabila nilai yang didapat masih besar maka akan diulangi pemodelan lagi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil nilai *cogging torque* yang didapat dari kedua desain lebar *teeth* PMSG 18s16p adalah desain pertama mendapatkan nilai *cogging torque* sebesar 0.026034 Nm. Sedangkan desain kedua mendapatkan nilai *cogging torque* sebesar 0.012676 Nm.

A. Penentuan Dimensi

Dalam penelitian ini, penentuan dimensi sangat penting untuk ditentukan dalam perancangan PMSG. Karena sangat mempengaruhi pada hasil simulasi PMSG adalah dimensi stator, rotor, serta dimensi magnet permanen yang digunakan. Dimensi dari stator, rotor dan magnet permanen akan mempengaruhi nilai besar kecilnya *cogging torque*. Penentuan dimensi PMSG 18S16P dapat dilihat pada tabel 1 berikut:

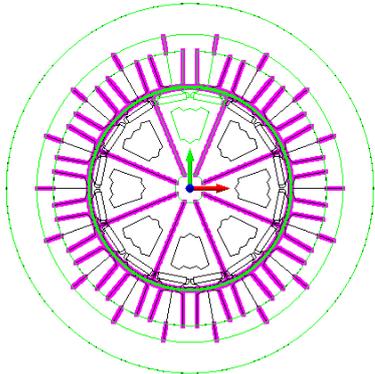
TABEL I
PARAMETER PMSG 18S16P

No	Keterangan	Ukuran
1	Tebal Stator	40 mm
2	Tebal <i>Teeth</i>	40 mm
3	Lebar <i>Teeth</i>	7 & 4 mm
4	Tinggi <i>Teeth</i>	14 mm
5	Diameter Rotor	98 mm
6	Panjang Magnet	14 mm
7	Tebal Magnet	40mm
8	Tinggi Magnet	3 mm
9	Air Gap	1 mm
10	Air Box	180 mm
11	Tebal PMSG	40 mm
12	Jumlah Slot	18 slot
13	Sudut Slot	20 deg
14	Jumlah Pole	16 pole
15	Sudut Pole	22.5 deg
16	Diameter Stator	150

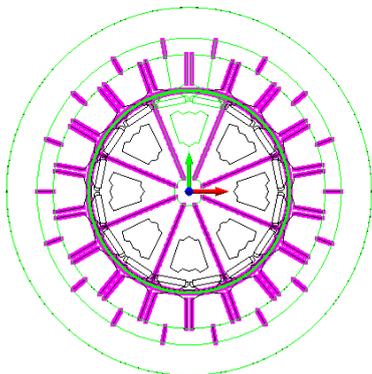
B. Gambar Desain

Gambar desain merupakan tahapan untuk bentuk geometri stator, lebar *teeth*, rotor, magnet, slot, *air gap*, serta *air box*. Desain PMSG 18s16p dibuat menggunakan *software design electromagnetic*. Dalam gambar desain akan dibuat dua desain lebar *teeth* PMSG 18s16p pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Gambar 5 dan 6 di bawah ini merupakan desain *sketch* dari PMSG yang akan diteliti. Dalam membuat desain digunakan material *carpenter: silicon steel* untuk stator *core* dan rotor *core*, *Air* untuk fluks *barrier*, *air gap* dan *air box*, *copper: 5.77e7 siemens/meter*.



Gambar 5 Desain lebar *teeth* 7 mm



Gambar 6 Desain lebar *teeth* 4 mm

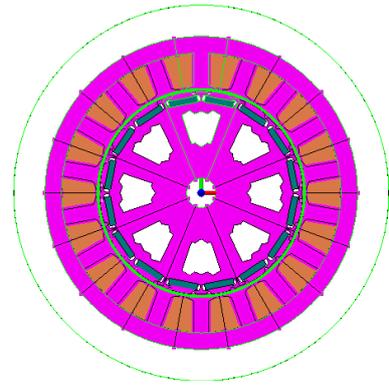
Desain didapat sudut slot sebesar 20 deg/mech dan sudut *pole* sebesar 22.5 deg/ mech. Cara menentukan sudut slot dapat dicari menggunakan persamaan (3) sedangkan menentukan sudut *pole* menggunakan persamaan (4) adalah sebagai berikut:

$$\theta_{slot} = \frac{360^\circ}{N_{slot}} \quad (3)$$

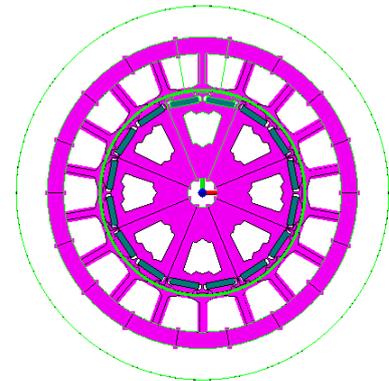
$$\theta_{pole} = \frac{360^\circ}{N_{pole}} \quad (4)$$

C. Inisialisasi dan desain geometri

Inisialisasi dan desain geometri adalah tahap untuk menentukan material yang digunakan pada bagian desain komponen. Pada tahap ini juga ketebalan dari setiap komponen di *setting*. Apabila terdapat desain yang tidak terinisialisasi, maka desain tidak bisa disimulasikan. Dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8 berikut:



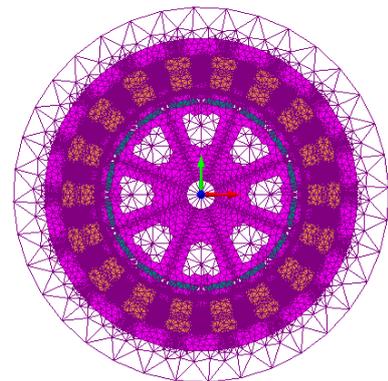
Gambar 7 Hasil inisialisasi desain lebar *teeth* 7 mm



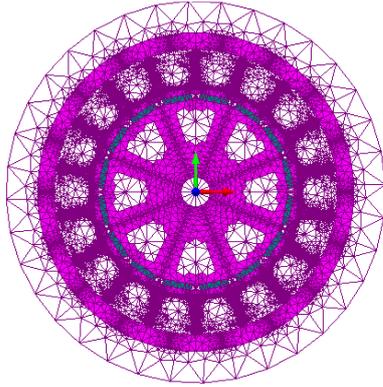
Gambar 8 Hasil inisialisasi desain lebar *teeth* 4 mm

D. Pengaturan *Meshing*

Pengaturan *meshing* bertujuan untuk mendapatkan hasil simulasi yang nilai yang akurat. Setiap bagian desain komponen PMSG memiliki nilai *mesh* yang sama yaitu 3 mm. Hasil pengaturan *mesh* dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10 berikut:

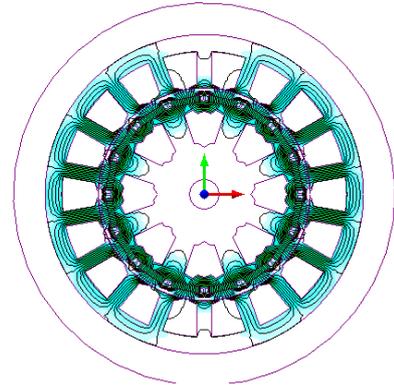


Gambar 9 *Meshing* desain lebar *teeth* 7 mm



Gambar 10 Meshing desain lebar *teeth* 4 mm

$$T_{cog} = 32 \times 0.1 \text{ (ms)} = 3.2 \text{ (ms)} \quad (8)$$



Gambar 12 Contour dan shade plot desain lebar *teeth* 7 mm

E. Simulasi *cogging torque*

Desain PMSG pada penelitian ini menggunakan 18 slot dan 16 *pole*, sehingga menghasilkan *cogging torque* sebanyak 114 kali. Jumlah *cogging torque* ini didapat dari KPK 18 slot dan 16 *pole*. Maka besar sudut satu gelombang penuh simulasi *cogging torque* adalah:

$$\Theta_{mech} = \frac{360^\circ}{N \text{ Cogging}} \quad (4)$$

$$\Theta_{mech} = \frac{360^\circ}{114} = 3.15^\circ \quad (5)$$

Nilai 3.15° dapat dibulatkan menjadi 3.2° , maka dengan memutar rotor sejauh 3.2° akan didapat satu gelombang penuh simulasi *cogging torque*. Sedangkan untuk mendapatkan nilai sudut satu step putaran mekanikal didapat dengan cara:

$$\Theta_{mech} = \frac{3.2^\circ}{32 \text{ step}} = 0.1^\circ \quad (6)$$

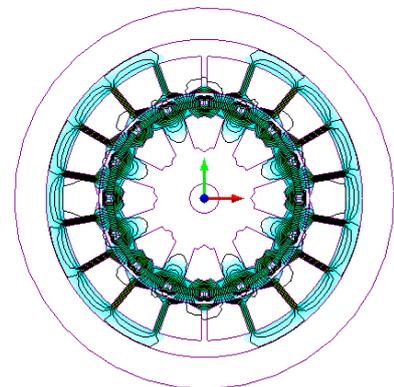
Gambar 11 Pembagian titik celah udara

Pembagian titik difungsikan agar nilai perhitungan akurat dan saat rotor diputar akan bertemu titik *mesh*. Waktu yang dibutuhkan dalam satu gelombang *cogging torque* dicari dengan cara:

$$t = \frac{\text{sudut step cogging torque}^\circ}{n \left[\frac{deg}{sec} \right]} \quad (7)$$

$$t = \frac{0.1^\circ}{1000} = 0.0001 \text{ (s) atau } 0.1 \text{ (ms)}$$

Dari perhitungan tersebut, waktu untuk satu step mekanikal membutuhkan waktu 0.1 (ms). Maka untuk satu gelombang *cogging torque* penuh dengan 32 step putaran membutuhkan waktu:



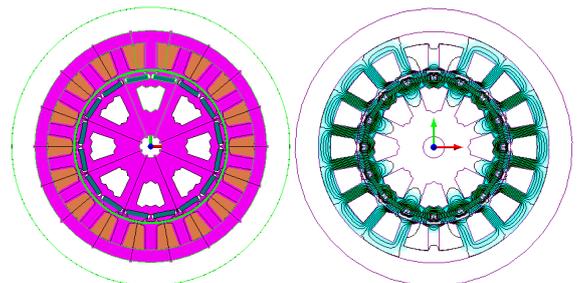
Gambar 13 Contour dan shade plot desain lebar *teeth* 4 mm

Untuk simulasi *cogging torque* menggunakan *software design electromagnetic*. Dalam simulasi kuperan tidak mempengaruhi nilai hasil *cogging torque*, hasil dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13.

F. Variasi desain lebar *teeth*

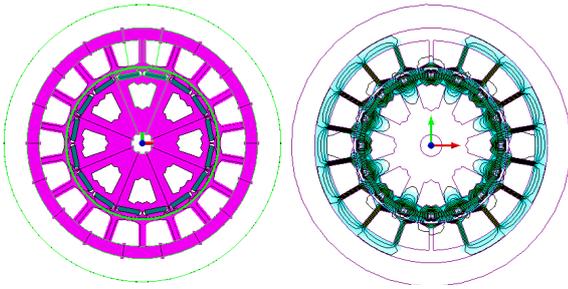
Untuk variasi desain lebar *teeth* secara *solid* dapat dilihat pada Gambar 14 dan Gambar 15 berikut:

- a. PMSG 18s16p dengan lebar *teeth* 7 mm



Gambar 14 Desain PMSG dan contour lebar *teeth* 7 mm

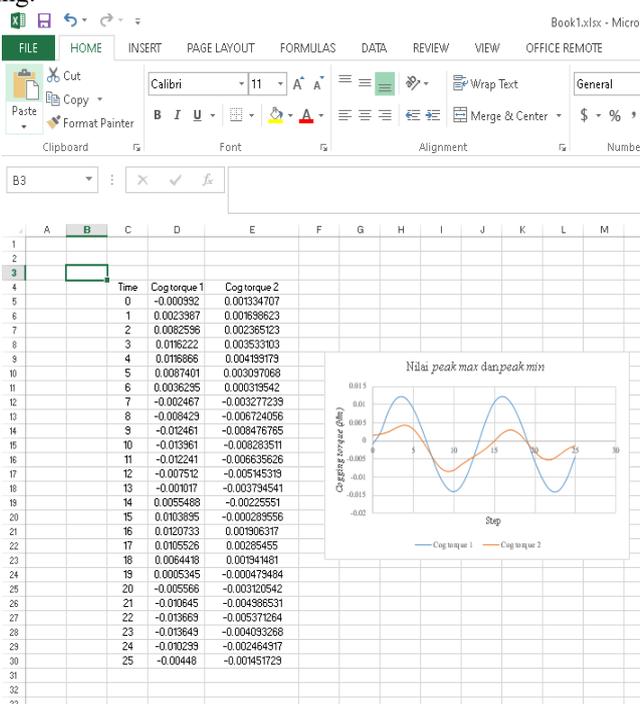
- b. PMSG 18s16p dengan lebar *teeth* 4 mm



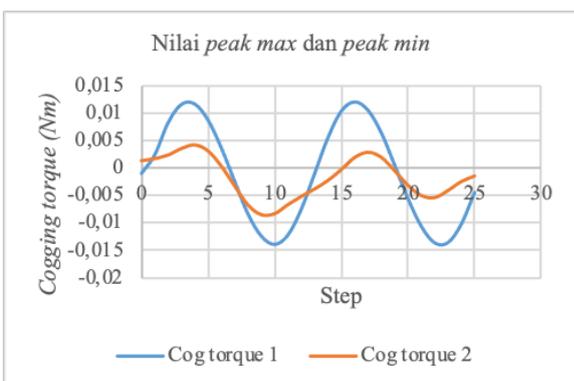
Gambar 15 Desain PMSG dan *contour* lebar *teeth* 4 mm

G. Hasil

Hasil simulasi dihitung menggunakan aplikasi *Ms. Excel* guna mendapatkan perhitungan yang akurat dapat dilihat pada Gambar 16. Dari kedua desain lebar *teeth* PMSG diperoleh nilai *peak positive* dan *peak negative* masing-masing:



Gambar 16 Perhitungan nilai *peak max* dan *peak min* pada aplikasi *Ms.Exel*



Gambar 17 Grafik nilai *peak max* dan *peak min*

TABEL II
HASIL NILAI *COGGING TORQUE*

No	Lebar <i>teeth</i> (mm)	<i>Cog max</i> (Nm)	<i>Cog min</i> (Nm)	<i>Cog torque</i> (Nm)
1	7	0.012073	-0.01073	0.026034
2	4	0.004199	-0.00848	0.012676

Pada Tabel II dan Gambar 17 dapat dilihat hasil simulasi dari *cogging torque* yang paling besar adalah desain PMSG 18s16p dengan lebar *teeth* 7 mm (*cog torque* 1) dengan nilai *cogging torque* 0.026034 Nm. sedangkan desain PMSG 18s16p dengan lebar *teeth* 4 mm (*cog torque* 2) dengan nilai *cogging torque* 0.012676 Nm. Pengaruh lebar *teeth* terhadap penurunan nilai *cogging torque* pada PMSG 18s16p akan mengakibatkan kerja turbin pada generator dikecepatan angin yang rendah tetap berputar.

IV. KESIMPULAN

Salah satu cara meminimalisir nilai *cogging torque* yaitu dengan merencanakan lebar *teeth* PMSG 18s16p. Cara mengetahuinya dengan membuat dua variasi desain lebar *teeth*. Pengaruh penurunan nilai *cogging torque* pada PMSG 18s16p mengakibatkan kerja turbin pada generator dikecepatan angin yang rendah tetap berputar pada *start* awal. Hasil desain penurunan nilai *cogging torque* pada PMSG 18s16p memiliki nilai sebesar 0.012676 Nm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada bang Rifqi selaku pembimbing Kuliah Praktik di PT. Lentera Bumi Nusantara yang tidak bosan dalam diskusi terkait penelitian ini. Kepada dosen Dian Budhi Santoso yang tidak henti-hentinya memberikan arahan terkait teori dasar penelitian ini. Tidak lupa sosok ibu dan bapak yang tidak pernah putus doa-doa baiknya untuk kelancaran penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] T. Nur and L. E. Joe, "STUDY OF THE EFFECT OF HEIGHT AND LENGTH OF SLOTTING IN MAGNET EDGE ON THE COGGING TORQUE REDUCTION OF FRACTIONAL SLOT NUMBER IN," in *International Conference on Engineering Science and Technology (ICEST)*, Lampung, Indonesia, 2019.
- [2] S. Mawar dan T. Nur, "Study the Influence of Edge Points of Magnet Surface and Stator Core on the Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machine," dalam *International Conference on Electrical Engineering, Science and Technology (ICEST)*, Lampung, Indonesia, 2019.
- [3] E. M. A. Harahap, I. H. Rosma and A. Hamzah, "Analisis Pengaruh Posisi Peletakan Magnet Permanen di Rotor Terhadap Kinerja Generator Sinkron Magnet Permanen," *Jom FTEKNIK*, vol. 7, no. 2, pp. 1-2, 2020.
- [4] G. E. Pramono, F. Muliawati and N. F. Kurniawan, "DESAIN DAN UJI KINERJA GENERATOR AC FLUKS RADIAL MENGGUNAKAN 12 BUAH MAGNET PERMANEN TIPE NEODYMIUM (NdFeB) SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK,"

- Jurnal Teknik Elektro & Sains (JuTEkS)*, vol. 4, no. 1, p. 34, 2017.
- [5] Y. Suherman and T. Nur, "Pengaruh Kombinasi Pemangkasan Ujung Magnet Permanen dan Axial Channel pada inti rotor terhadap Torka Cogging pada Generator Tipe Fractional Slot Number," *JURNAL ELEKTRO*, vol. 13, no. 2, p. 2, 2020.
- [6] J. F. Gieras and F. , "Analytical Approach to Cogging Torque Calculation of PM Brushless Motors," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 40, no. 5, p. 1, 2004.
- [7] M. M. Nugroho, "Optimalisasi Nilai Cogging torquepada Internal Permanent Magnet SynchronousGenerator Outer Rotor 15 Slot 10 Pole dengan VariasiKeberadaan Umbrella pada Stator dan Lebar Teeth," *PAPER CIHUY / GENERATOR ELEKTRIK*, Vol. %1 dari %2-, no. -, p. 1, 2021.
- [8] R. Bargallo, *Finite Element for ElectricalEngineering*, Barcelona: Electrical Engineering Department.University Politecnica De Catalunya, 2006.
- [9] H. Pujowidodo, J. Helian, G. . E. Pramono, and A. Ridwan, "Pengembangan Generator Mini Dengan Menggunakan Magnet Permanen," Departemen Teknik Mesin, Program Pasca Sarjana, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Indonesia, 2008.
- [10] P. Irasari, "Metode perancangan generator magnet permanen berbasis pada dimensi stator yang sudah ada," *Ketenagalistrikan dan Energi Baru Terbarukan*, vol. 7, no. 1, pp. 15-27, 2008.
- [11] I. Raharjo and M. , "The Conversation," 8 August 2018. [Online]. Available: <https://theconversation.com/potensi-energi-angin-di-indonesia-begitu-besar-mengapa-kincirnya-harus-kecil-104498>. [Accessed 3 October 2021].