

ANALISIS PENGARUH LEBAR *TEETH* TERHADAP PENURUNAN NILAI *COGGING TORQUE* PADA PMSG 18S16P

Ujang Cakra Buana¹, Dian Budhi Santoso²

Jurusan Teknik Elektro Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang
Jl. HS. Ronggo Waluyo, Kabupaten Karawang, Jawa Barat 41361

¹ujang.cakra18102@student.unsika.ac.id

²dian.budhi@ft.unsika.ac.id

Intisari — Pada penelitian PMSG akan menganalisis mengenai pengaruh lebar *teeth* pada perancangan PMSG 18 slot 16 *pole* terhadap penurunan nilai *cogging torque*. Pengambilan data penelitian dilakukan dengan menggunakan simulasi *software design electromacnetic* yang berbasis *finite element method (FEM)*. Metode penelitian menggunakan dua model desain lebar *teeth*, dimana pada material stator juga divariasikan dengan dua material. Desain pertama menggunakan jenis material *carpenter: silicon steel* lebar *teeth* 7 mm dan 3 mm. Desain kedua menggunakan jenis material *CR10: Cold rolled 1010 steel* dengan lebar *teeth* 7 mm dan 3 mm. Hasil penurunan nilai *cogging torque* yang didapat 0.023110244 Nm dan 0.02488451 Nm untuk stator material *carpenter: silicon steel*. Sedangkan untuk stator *CR10: Cold rolled 1010 steel* didapat 0.025075 Nm dan 0.025932 Nm.

Kata kunci — *Cogging Torque, Finite Element Method (FEM), Lebar Teeth, PMSG.*

Abstract — In this study, PMSG will analyze the effect of teeth width on the design of PMSG 18 slot 16 pole on the decrease in the value of cogging torque. Research data retrieval was carried out using a simulation of electromagnetic design software based on the finite element method (FEM). The research method uses two design models of the width of the teeth, where the stator material is also varied with two materials. The first design uses a type of carpenter material: silicon steel with teeth width of 7 mm and 3 mm. The second design uses CR10 material type: Cold rolled 1010 steel with teeth width of 7 mm and 3 mm. The results of the decrease in the value of the cogging torque obtained were 0.023110244 Nm and 0.02488451 Nm for the carpenter stator material: silicon steel. As for the CR10 stator: Cold rolled 1010 steel obtained 0.025075 Nm and 0.025932 Nm.

Keywords — Cogging Torque, Finite Element Method (FEM), Teeth Width, PMSG.

I. PENDAHULUAN

Pemenuhan energi listrik menjadi kebutuhan yang sangat penting pada perkembangan suatu daerah bahkan suatu negara. Komitmen kementerian Eenergi dan Sumber Daya Mineral RI menyebutkan optimis untuk menuntaskan target rasio elektrifikasi 100% untuk seluruh wilayah Indonesia [1]. Dari komitmen pihak ESDM RI perlu pemanfaatan mengenai sumber energi untuk dikonversi menjadi energi listrik di Indonesia yang secara efisien.

Pembangkit listrik skala mikro menjadi salah satu cara untuk memanfaatkan sumber energi yang dapat

menunjang program elektrifikasi secara merata di Indonesia. Apabila ditinjau dari wilayah Indonesia yang terdiri dari pulau-pulau, pembangkit listrik skala mikro menjadi bahan pertimbangan yang penting untuk dipikirkan kedepan.

Pembangkit listrik skala mikro tidak lepas dari kemajuan dari mesin listrik. Peningkatan mesin listrik sangat penting untuk memanfaatkan sumber dari tenaga yang memiliki kecepatan kecil. Pemanfaatan sumber energi tenaga yang memiliki kecepatan skala seperti energi angin sangat mungkin untuk dikonversikan menjadi energi listrik. Dalam pemanfaatannya, dibutuhkan generator yang dapat berputar oleh angin dengan

kecepatan kecil. Dalam kasus seperti ini inovasi efisiensi generator sangat dibutuhkan. *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* menjadi mesin listrik dengan inovasi terobosan terbaru perkembangan generator. Penerapan PMSG umum diaplikasikan 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 [2].

Di indonesia memiliki kecepatan angin tidak begitu besar, tetapi beberapa daerah memiliki potensi angin yang cukup untuk dikonversi menjadi energi listrik. Kecepatan rata-rata angin di indonesia sekitar 3 m/s [3]. Dari kecepatan angin yang relatif kecil, PMSG memiliki kelemahan dengan nilai *cogging torque* yang ditimbulkan oleh permanen magnet pada rotor. *Cogging torque* memiliki sifat menarik rotor dengan stator yang mengakibatkan rotor sulit untuk digerakan ketika mendapat gaya yang kecil. Hal seperti ini mempengaruhi pada *start* awal untuk generator berputar. Nilai *cogging torque* 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].

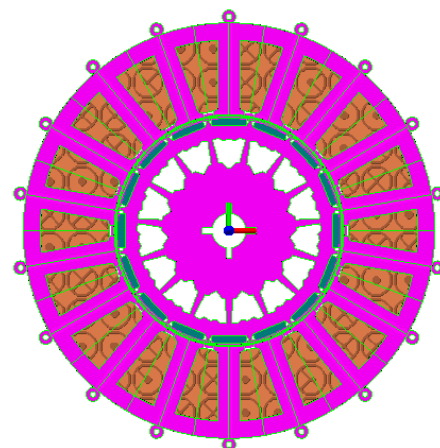
Nilai *cogging torque* pada PMSG tidak dapat diturunkan 100% hilang, namun toleransi penggunaan pada skala mikro sebesar 2% dari *torque* beban nol. Beberapa cara untuk menurunkan nilai *cogging torque* dapat dengan merekayasa lebar *teeth* PMSG, pemangkasan terhadap permukaan rotor PMSG dan lain-lain. Cara merekayasa lebar *teeth* untuk memperoleh nilai *cogging torque* yang maksimal menjadi satu parameter yang dapat dicoba dalam perancangan generator. Dalam penelitian ini, akan dikaji pengaruh lebar *teeth* terhadap penurunan nilai *cogging torque* pada PMSG 18s16p menggunakan *software electromagnetic*. Bentuk desain *teeth* PMSG yang akan dikaji adalah dengan mendesain dua buah PMSG dengan jumlah 18 slot 16 *pole* dengan dua

jenis material yang berbeda pada stator *core* dianalisis menggunakan *Finite Element Method (FEM)*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. *Permanent Magnet Synchronous Generator*

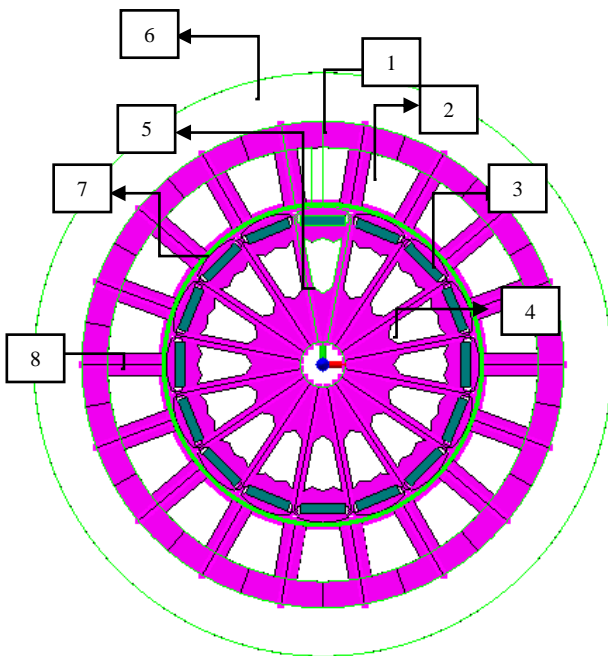
Permananent Magnet Synchronous Generator (PMSG) merupakan salah satu jenis generator sinkron yang umum digunakan pada sistem pembangkitan yang berbasis pada pembangkit kinetik. Diantaranya PLTB, PLTA, PLTMH dan pembangkit yang lainnya. Pemilihan PMSG memiliki desain kontruksi hampir yang simpel, ukuran dimensi yang relatif kecil, serta pemeliharaan yang cukup mudah. PMSG juga tidak memerlukan eksitasi dari luar, melainkan dari permanen magnetnya sendiri. Sistem eksitasi ini membuat efisiensi dari PMSG meningkat [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 menghasilkam 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* [5]. Gambar desain PMSG dapat dilihat pada gambar 1.



Gbr.1 Desain PMSG

B. Kontruksi PMSG

Generator sinkron magnet permanen adalah mesin listrik 3 fasa dengan sistem eksitasi dari magnet permanen. Beberapa jenis generator ini adalah PMSG dengan *inner rotor* dan *outer rotor*. Pembedaannya adalah *inner rotor* menggunakan jenis rotor dalam sedangkan *outer rotor* menggunakan jenis rotor luar. Penggunaan magnet permanen pada rotor untuk menghasilkan *flux* magnet saat rotor diputar. Kontruksi dari PMSG sangat simpel dibandingkan dengan kontruksi generator lain. Pada rotor PMSG magnet yang digunakan adalah magnet yang memiliki kekuatan yang tinggi [6]. Gambar kontruksi dapat dilihat pada gambar 2 berikut.



Gbr. 2 Kontruksi PMSG

Adapun keterangannya:

1. Stator adalah komponen PMSG yang diam.
2. Slot adalah tempat untuk mengaitkan *coil* tembaga dengan jumlah tertentu.
3. Magnet permanen adalah eksitasi fluks pada PMSG.
4. Fluks barrier geometri adalah ruang udara yang digunakan untuk pengeblok fluks magnet pada rotor agar

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

C. Cogging Torque

Dalam beroperasi, generator 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 disebabkan oleh 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 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

D. Finite Element Method

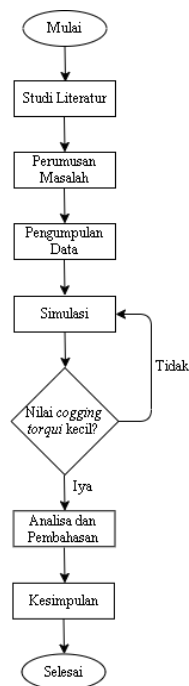
Dalam perancangan *electromagnetic* sifat material harus menyerap gelombang elektromagnetik. Penyerapan ini dilihat dari nilai

permitivitas dan permeabilitas dari bahan tersebut [8].

Metode element hingga dikenal dengan *Finite element method* adalah suatu metode numerik dengan tujuan memperoleh pemecahan pendekatan dari suatu persamaan *differensial* parsial [9]. FEM dipakai di dunia teknik maupun sains untuk menyelesaikan persamaan matematika. Bidang masalah tersebut adalah analisis structural, 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*) [10].

III. METODOLOGI

Adapun alur peneliian di tunjukan dalam gambar berikut ini:

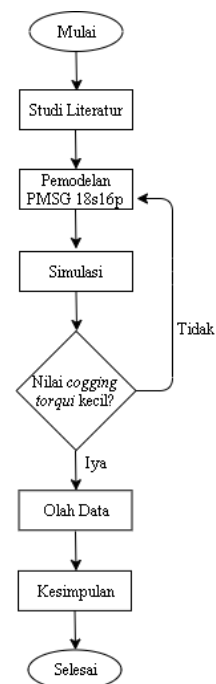


Gbr. 3 *Flow Chart* Penelitian

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 dengan membandingkan nilai *cogging torque* dari kedua desain. *Flow chart* simulasi dapat dilihat pada Gambar 4. Dari data simulasi, data akan diolah dan dianalisis untuk disimpulkan dari kedua desain. Jika nilai *cogging torque* masih didapat nilai yang besar, maka akan dilakukan langkah simulasi lagi.

Kemudian untuk alur simulasi dapat dilihat pada gambar berikut:



Gbr. 4 *Flow Chart* Simulasi

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.

IV. PEMBAHASAN

A. Penentuan Dimensi

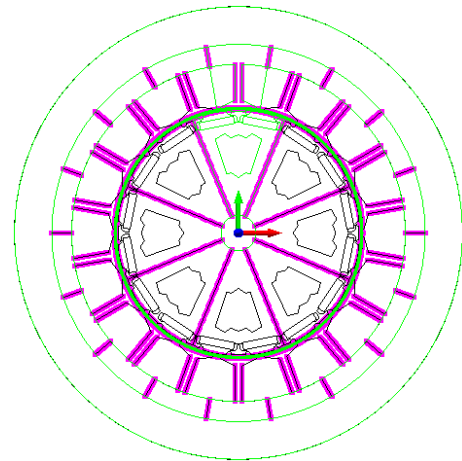
Penentuan dimensi sangat penting dalam perancangan PMSG. Karena sangat mempengaruhi pada hasil simulasi PMSG adalah dimensi stator, rotor, serta dimensi magnet permanen yang digunakan. Dimensi dari stator, rotor dan magnet permanen akan mempengaruhi nilai besar kecilnya *cogging torque*. Dimensi yang didapat adalah hasil referensi dan modifikasi penelitian yang terdahulu.

Tabel 1. Parameter PMSG

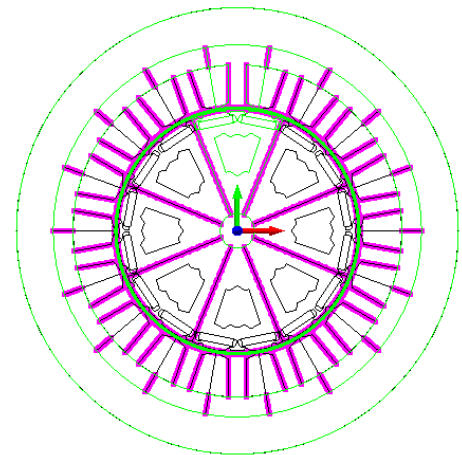
Data Dimensi PMSG		
No	Keterangan	Ukuran
1	Tebal Stator	50 mm
2	Tebal Teeht	50 mm
3	Lebar Teeht	7 & 3 mm
4	Tinggi Teeht	14 mm
5	Diameter Rotor	98 mm
6	Panjang Magnet	14 mm
7	Tebal Magnet	50mm
8	Tinggi Magnet	3 mm
9	Air Gap	1 mm
10	Air Box	180 mm
11	Tebal PMSG	50 mm
12	Jumlah Slot	18 slot
13	Sudut Slot	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 membuat desain geometri stator, lebar *teeht*, rotor, magnet, slot, *air gap*, serta *air box* serta untuk memberikan material pada PMSG. Desain PMSG 18s16p dibuat menggunakan *software design electromagnetic*. Dalam gambar desain akan dibuat dua desain lebar *teeth* dan juga dua material yang berbeda pada stator *core* PMSG 18s16p pada gambar berikut:



Gbr. 5 Desain lebar *teeht* 3 mm



Gbr. 6 Desain lebar *teeht* 7 mm

Desain sudut slot sebesar 20 deg/mech dan sudut *pole* sebesar 22.5 deg/ mech. Cara menentukan sudut slot dapat dicari menggunakan persamaan (2) sedangkan menentukan sudut *pole* menggunakan persamaan (3) adalah sebagai berikut:

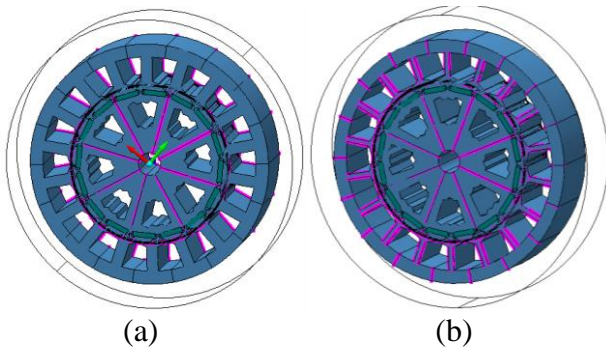
$$\theta_{\text{slot}} = \frac{360^\circ}{N_{\text{slot}}} \quad (2)$$

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

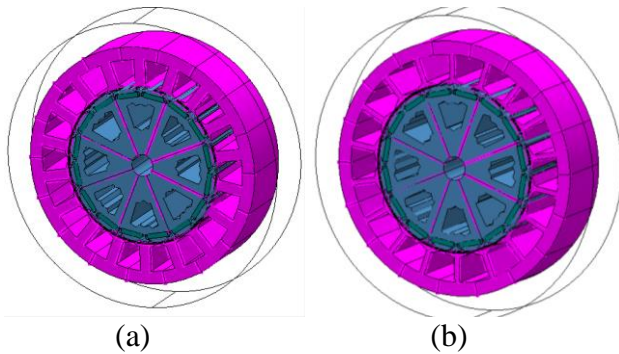
C. Inisialisasi desain geometri

Inisialisasi desain adalah tahap pemberian material pada *software design electromagnetic* pada bagian desain komponen. Material yang digunakan pada komponen rotor adalah CR10: Cold rolled

1010 steel. Sedangkan material stator menggunakan dua jenis yaitu CR10: Cold rolled 1010 steel dan Carpenter: Silicon Steel. Ketebalan PMSG juga di tentukan pada tahap ini. Apabila terdapat desain yang tidak terinisialisasi, maka desain tidak bisa disimulasikan. Dapat dilihat pada gambar berikut:



Gbr. 7 Hasil inisialilasi desain lebar *teeht* (a) 7 dan (b) 3 mm dengan material CR10: Cold rolled 1010 steel



Gbr. 8 Hasil inisialisasi desain lebar *teeht* (a)7 dan (b)3 mm dengan material Carpenter: Silicon steel

D. 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:

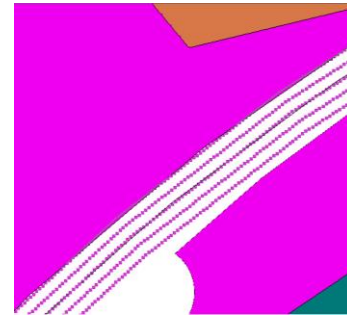
$$\Theta_{\text{mech}} = \frac{360^\circ}{N_{\text{cogging}}} \quad (4)$$

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

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:

$$\Theta_{\text{mech}} = \frac{3.2^\circ}{32 \text{ step}} = 0.1^\circ$$



Gbr. 9 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:

$$t = \frac{\text{sudut step cogging torque}^\circ}{n \left[\frac{\text{deg}}{\text{sec}} \right]} \quad (6)$$

$$t = \frac{0.1^\circ}{1000} = 0.0001 \text{ (s) atau } 0.1 \text{ (ms)} \quad (7)$$

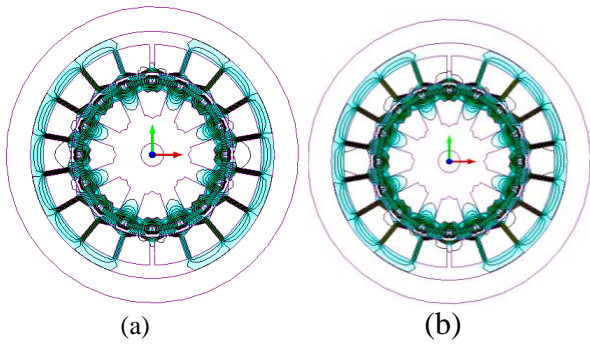
Dari perhitungan tersebut, waktu untuk satu step mekanikal membutuhkan waktu 0.1 (ms). Maka untuk satu gelombang *cogging torque* penuh dengan 32 step putaran membutuhkan waktu:

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

Untuk simulasi *cogging torque* menggunakan *software design electromagnetic*. Dalam simulasi kuparan tidak mempengaruhi nilai hasil *cogging torque*.

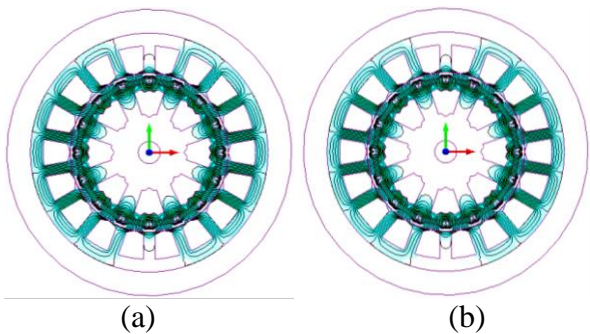
E. Variasi desain lebar *teeht*

a. PMSG 18s16p dengan lebar *teeht* 3 mm



Gbr. 10 *Contour* dengan material (a) Carpenter: Silicon steel, (b) CR10: Cold rolled 1010 steel

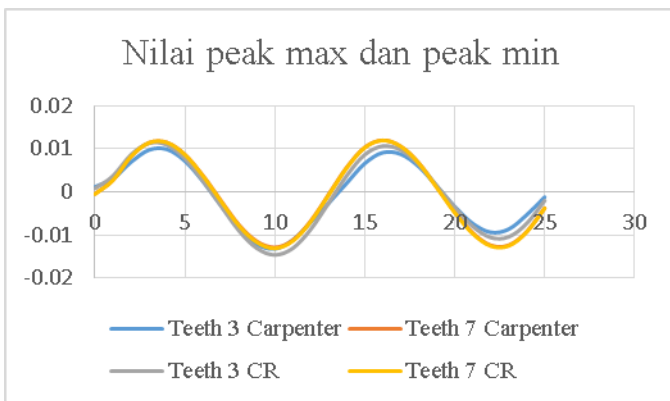
b. PMSG 18s16p dengan lebar *teeht* 7 mm



Gbr. 11 *Contour* dengan material (a) Carpenter: Silicon steel, (b) CR10: Cold rolled 1010 steel

F. Hasil

Hasil simulasi dari kedua desain lebar *teeht* PMSG diperoleh nilai *peak positive* dan *peak negative* masing-masing:



Gbr. 12 Grafik Nilai *Peak Max* dan *Peak Min*

Tabel 2. Hasil Simulasi

Hasil <i>Cogging Torque</i>				
No	Lebar <i>teeht</i> (mm)	<i>Cog max</i> (Nm)	<i>Cog min</i> (Nm)	<i>Cog torque</i> (Nm)
1	3 (Carpenter)	0.009872	-0.01324	0.02311
2	7 (Carpenter)	0.011974	-0.01291	0.024884
3	3 (CR)	0.011945	-0.01313	0.025075
4	7 (CR)	0.01128	-0.01465	0.025932

Pada Gambar dapat dilihat hasil simulasi dari *cogging torque* yang paling besar adalah desain PMSG 18s16p dengan lebar *teeht* 7 mm dengan material CR10: Cold rolled 1010 steel nilai *cog torque* 0.025932 Nm. Sedangkan desain PMSG 18s16p dengan nilai *cogging torque* kecil adalah lebar *teeht* 3 mm dengan material Carpenter: Silicon steel nilai *cogging torque* 0.02311 Nm. Perubahan lebar *teeth* dan jenis material sangat mempengaruhi nilai *cogging torque* pada PMSG 18s16p. Begitu juga akan mengakibatkan kerja turbin pada generator dikecepatan angin yang rendah tetap berputar.

V. PENUTUP

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

Terimakasih penulis ucapkan kepada keluarga yang telah mensupport dengan sepenuh hati dalam penelitian ini. Kepada dosen Dian Budhi Santoso selaku pembimbing penelitian. Pada warga kosan mak nur yang senantiasa memberikan dukungan material. Tim Tugas Akhir periode sidang awal. Tak lupa segenap keluarga besar warga Cihuy yang menjadi penasehat penelitian saat di PT. Lentera Bumi Nusantara.

REFERENSI

- [1] -, "Kementrian ESDM Akan Tuntaskan 100% Rasio Elektrifikasi di 2022," KEMENTERIAN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA, 28 Mei 2021. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/kementerian-esdm-akan-tuntaskan-100-rasio-elektrifikasi-di-2022->. [Diakses 13 Oktober 2021].
- [2] T. Nur dan M. S, "Study the Influence of Edge Point of Magnet Surface and Stator Core on the Cogging Torque Reductio in Permanent Magnet Machine," dalam *in International Conference on Electrical Engineering, Science and Technology (ICEST)*, Bandar Lampung, Indonesia, 2019.
- [3] L. Bimantara, "UJI POTENSI KECEPATAN ANGIN SEBAGAI SUMBER ENERGI ALTERNATIF DI KAMPUS TERPADU UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA," JURUSAN TEKNIK ELEKTRO, FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI, UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA, YOGYAKARTA, INDONESIA, 2020.
- [4] A. P. Alam, "RANCANG BANGUN CONSTANT CURRENT CHARGER DARI PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR (PMSG) DENGAN KENDALI LOGIKA FUZZY," JURUSAN TEKNIK ELEKTRO, FAKULTAS TEKNIK, UNIVERSITAS JEMBER, JEMBER, INDONESIA, 2020.
- [5] F. a. N. K. F. Pramono, "Desain Dan Uji Kinerja Generator AC Flux Radial Menggunakan 12 Magnet Perman Tipe Neodymium (NdFeB) Sebagai Pembangkit Listrik," *JUTEKS*, vol. IV, no. 1, pp. 34-40, 2017.
- [6] Y. S. a. Tjuddin, "Pengaruh Pemangkasan Ujung Magnet Permanent dan Axial Channel Pada Inti Rotor Terhadap Torka Cogging Pada Generator Tipe Fractional Slot," *JURNAL ELEKTRO*, vol. XIII, no. 2, p. 6, 2020.
- [7] J. F. Gieras, , *Analytical Approach to Cogging torque Calculation of PM Brushless Motors*, Hartfard: IEEE, 2004.
- [8] M. M. Nugroho, "Optimalisasi Nilai Cogging torque pada Internal Permanent Magnet Synchronous Generator Outer Rotor 15 Slot 10 Pole dengan Variasi Keberadaan Umbrella pada Stator dan Lebar Teeth," *PAPER CIHUY/GENERATOR ELEKTRIK*, vol. II, no. 1, pp. 1-2, 2021.
- [9] Y. Taryana, A. Manaf, N. Sudrajat dan Y. Wahyu, "Electromagnetic Wave Absorbing Materials on Radar Frequency Range," *Jurnal KERAMIK DAN GELAS INDONESIA*, vol. XXVIII, no. 1, pp. 1-28, 2019.
- [10] Y. A. Santoso, N. Sulandari dan Y. A. Pranata, "STUDI PENDAHULUAN SIMULASI NUMERIKAL METODE ELEMEN HINGGA SAMBUNGAN BALOK-KOLOM BAJA TIPE CLIP-ANGLE," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. VIII, no. 2, pp. 76-141, 2012.
- [11] R. Bargallo, *Finite Element for Electrical Engineering*, Barcelona: Electrical Engineering Department. University Politecnica De Catalunya, 2006.