

Perbandingan Torka *Cogging* Generator Integral dan *Fractional* untuk Pembangkit Listrik Tenaga Tenaga Angin

TAJUDDIN NUR^{1*} GUSTIESAR ALBARRY YANASTANTO², MARCHELL MORDEKHAI HALIM³, MELISA MULYADI⁴, DUMA KRISTINA YANTI HUTAPEA⁵, ANTHON DE FRETES⁶

^{1,5} Magister Teknik Elektro, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

^{2,3,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

⁶Program Profesi Insinyur, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya

Email: tans@atmajaya.ac.id

Received 4 Mei 2023 | Revised 29 Mei 2023 | Accepted 5 Juni 2023

ABSTRAK

Penelitian ini membahas penurunan torka cogging pada generator sinkron magnet permanen untuk aplikasi pada pembangkit listrik tenaga angin. Untuk meminimalkan nilai torka cogging, dapat dilakukan berbagai teknik, salah satunya adalah kombinasi teknik pangkasan magnet dan alur tiruan pada inti jangkar. Teknik ini diterapkan terhadap generator sinkron magnet permanen tipe integral slot dengan jumlah gigi alur 30 dan kutub 10 dan tipe fractional slot number dengan jumlah gigi alur 24 dan kutub 10. Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga, didapatkan bahwa tipe fractional slot number memiliki penurunan torka cogging sebesar 98.51 % dari torka berbebannya, sedangkan penurunan torka cogging pada generator tipe integral slot number sebesar 75 % dari torka berbeban.

Kata kunci: *Generator sinkron magnet permanen, torka cogging, fractional slot number, integral slot number, pangkasan magnet, alur tiruan*

ABSTRACT

This research discusses the reduction of cogging torque on a permanent magnet synchronous generator for applications in wind power plants. To minimize the value of the cogging torque, various techniques can be carried out, one of which is a combination of magnet trimming techniques and artificial grooves on the anchor core. This technique is applied to an integral slot type permanent magnet synchronous generator with 30 grooved teeth and 10 poles and a fractional slot number type with 24 grooved teeth and 10 poles. Based on the results of analysis using the finite element method, it was found that the fractional slot number type has a torque reduction. cogging of 98.51% of the loaded torque meanwhile the decrease in cogging torque on the integral slot number type generator is 75% of the loaded torque.

Keywords: *Permanent Magnet Synchronous Generator, cogging torque, fractional slot number, integral slot number, magnet shaping, artificial groove*

1. PENDAHULUAN

Salah satu permasalahan penting di Indonesia dan juga negara lain di dunia dewasa ini adalah energi listrik. Seperti halnya dengan negara lain, kebutuhan energi listrik sudah menjadi kebutuhan primer sama seperti halnya makanan, pakaian listrik maupun perumahan. Kebutuhan akan energi listrik semakin meningkat dari waktu ke waktu seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perluasan daerah-daerah pemukiman. Oleh sebab itu, diperlukan ketersediaan sumber energi listrik yang cukup untuk menunjang keperluan penduduk secara merata dalam jangka panjang.

Usaha pemenuhan kebutuhan energi listrik dilakukan pada sistem pembangkitan tenaga listrik yang mana hingga saat masih mengandalkan energi yang habis terpakai seperti batu bara, minyak dan lain-lain. Meskipun ada kecenderungan penurunan pemanfaatan energi fosil, namun penggunaan energi masih tetap mewarnai pembangkitan tenaga listrik kita hingga saat ini. Di satu sisi, energi yang berasal dari fosil akan mengalami kelangkaan dalam waktu dekat. Untuk itu perlu alternatif untuk mengganti energi fosil menjadi energi terbarukan. Perlu diketahui bahwa Indonesia memiliki banyak sumber energi alternatif atau energi terbarukan yang potensial yang dapat di manfaatkan untuk dikonversi menjadi energi listrik. Energi alternatif tersebut berupa energi angin cukup melimpah di tanah air kita. Energi angin yang memiliki keuntungan seperti bersih, tersedia banyak melimpah di alam. Selain energi angin, juga terdapat energi terbarukan jenis lain seperti tenaga air, ombak, biomassa, gas alam dan lain-lain. Energi mekanik yang dihasilkan oleh energi terbarukan dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan media mesin listrik.

Mesin listrik merupakan peralatan utama yang digunakan untuk mengkonversi energi mekanik angin menjadi energi listrik. Salah satu mesin listrik yang sudah populer digunakan pada sistem PLTB dewasa ini adalah Generator Sinkron Magnet Permanen atau disingkat GSMP. Kelebihan dari GSMP adalah memiliki suatu mekanisme khusus dalam hal pembangkitan fluks magnetnya. Pada GSMP tidak memiliki belitan rotor untuk memberikan arus searah sebagai pemagnetan. Dengan mekanisme tersebut, maka GSMP menjadi lebih ringan bobotnya serta juga memiliki konstruksi yang sangat kokoh. Keunggulan lain GSMP adalah menggunakan magnet permanen sebagai sumber untuk menghasilkan fluks, sehingga fluks magnet GSMP pada sistem mesin tersebut lebih tinggi. Dengan demikian maka dapat menghasilkan daya yang lebih besar dibanding mesin listrik konvensional pada dimensi yang sama.

Meskipun demikian, telah diketahui bahwa GSMP memiliki kekurangan yakni tingginya nilai torka *cogging*. Torka *cogging* dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem dan juga menghambat putaran rotor ketika sedang diputar oleh penggerak mula. Pada sistem pembangkit tenaga angin dimana kecepatan angin sangat fluktuatif, dapat mengakibatkan rotor generator atau GSMP tidak dapat diputar oleh penggerak mula. Oleh sebab itu, maka masalah torka *cogging* harus diatasi agar dapat digunakan secara efektif pada sistem pembangkit listrik tenaga angin.

Dalam kurun waktu kurang 10 tahun terakhir, terdapat banyak penelitian tentang cara mengatasi torka *cogging* pada mesin magnet permanen serta GSMP (Ling, dkk, 2016) (Nur, dkk, 2020) (Nur, dkk, 2020) (Joe, dkk, 2020) (Leithner, dkk, 2019) (Zhou, dkk, 2019) (Caruso, dkk, 2022) (Wu, dkk, 2021) (Liu, dkk, 2016) (Jiang, dkk, 2016) (Wanjiku, dkk, 2015). Sedangkan pada referensi (Di, dkk, 2018) (Jose, dkk., 2018) (Chuan, dkk, 2018) membahas masalah pergeseran poros mesin listrik ketika sedang berputar. Pergeseran poros mesin ketika sedang berputar dikenal dengan istilah *unbalanced magnetic pull* (UMP). Sesuai perbandingan jumlah gigi jangkar dan kutub magnet pada rotor, GSMP dibedakan atas *integral slot number* (ISN) dan *fractional slot number* (FSN). ISN adalah

jenis GSMP dimana nilai perbandingan antara jumlah gigi jangkar terhadap jumlah kutub merupakan suatu bilangan genap. Sebaliknya apabila nilai perbandingan antara jumlah gigi jangkar dan jumlah kutub magnet pada rotor bilangan pecahan, maka disebut GSMP tersebut termasuk tipe FSN.

Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari dan menganalisis perbandingan kinerja GSMP tipe ISN dan FSN dalam sebagai mesin yang digunakan untuk konversi energi angin menjadi energi listrik. Untuk tujuan penelitian, penulis menggunakan GSMP alur 24 / kutub 10 sebagai tipe FSN (Nur, dkk, 2020) dan alur 30 / kutub 10 sebagai tipe ISN (Ling, dkk, 2016). Konstruksi dengan perbandingan jumlah alur jangkar dan jumlah kutub pada GSMP yang lainnya diperlihatkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 dalam penelitian ini. Hasil pengukuran dalam penelitian ini menunjukkan bahwa GSMP tipe FSN memiliki nilai penurunan torka *cogging* yang drastis dibandingkan dengan tipe ISN dengan menggunakan teknik penurunan torka *cogging* yang sama. Penurunan torka *cogging* pada GSMP tipe FSN sebesar 98.51 % dari torka berbeban. Penurunan torka *cogging* sebesar 98.51 % pada GSMP tipe FSN tersebut sangat signifikan, sehingga dapat direkomendasikan untuk diterapkan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin (PLTB).

2. METODE

2.1. Generator Sinkron Magnet Permanen (GSMP)

Generator sinkron magnet permanen (GSMP) adalah salah satu mesin listrik yang digunakan untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Terdapat beberapa jenis GSMP yang telah dipabrikasi dewasa ini. Berdasarkan perbandingan jumlah alur jangkar terhadap jumlah kutub pada inti rotor, GSMP dapat dibedakan atas tipe *integral slot number* (ISN) (Ling, dkk, 2016) dan *fractional slot number* (FSN) (Nur, dkk, 2020). Adapun yang dimaksud dengan ISN adalah sebuah konstruksi GSMP yang memiliki perbandingan jumlah alur jangkar (A) terhadap jumlah kutub magnet (P) yang merupakan bilangan bulat. Alur jangkar adalah inti GSMP yang merupakan tempat pemasangan belitan konduktor. Apabila perbandingan jumlah alur jangkar terhadap jumlah kutub rotor adalah bilangan pecahan, maka GSMP tersebut dinamakan FSN.

Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan beberapa contoh perbandingan jumlah alur dan kutub yang berlaku pada GSMP tipe ISN maupun FSN pada umumnya. Terlihat pada Tabel 1 bahwa nilai perbandingan jumlah alur jangkar dan jumlah kutub rotor merupakan bilangan bulat.

Tabel.1 Perbandingan Jumlah Alur (A) dan Jumlah Kutub (P) Tipe ISN

<i>Integral slot number (ISN)</i>		
Jumlah alur jangkar 1	Jumlah kutub magnet 2	Nilai perbandingan A/P 3
48	16	3,0 (bilangan bulat)
48	8	6,0 (bilangan bulat)
48	6	8,0 (bilangan bulat)
36	12	3,0 (bilangan bulat)
36	6	6,0 (bilangan bulat)
30	10	3,0 (bilangan bulat)
24	8	3,0 (bilangan bulat)
24	6	4,0 (bilangan bulat)

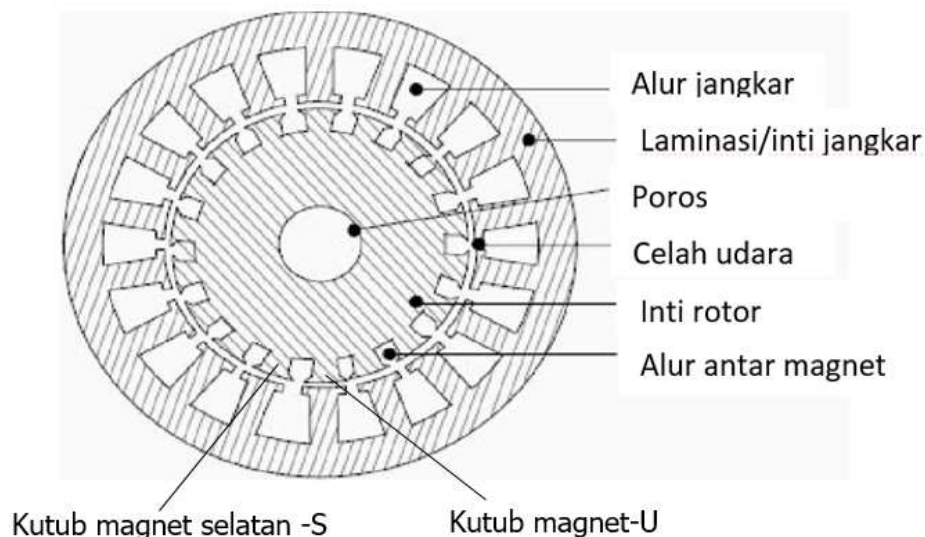
Sedangkan pada Tabel 2, contoh nilai perbandingan jumlah alur jangkar dan jumlah kutub

adalah bilangan pecahan. Selain itu GSMP juga dapat dibedakan atas tata letak magnetnya. Apabila peletakkan magnet berada pada bagian luar dari GSMP tersebut maka disebut rotor luar (*outer rotor*), sedangkan bilamana magnet rotor berada pada bagian dalam dari GSMP tersebut maka disebut rotor kutub dalam (*inner rotor*).

Tabel 2. Perbandingan Jumlah Alur (A) dan Jumlah Kutub (P) Tipe FSN

<i>Fractional slot number (FSN)</i>		
Jumlah alur jangkar	Jumlah kutub magnet	Nilai perbandingan A/P
48	20	2,4 (pecahan)
48	18	2,67 (pecahan)
48	14	3,428 (pecahan)
36	14	2,571(pecahan)
36	10	3,6 (pecahan)
24	16	1,5 (pecahan)
24	14	1,714 (pecahan)
24	10	2,4 (pecahan)

Pada penelitian ini, penulis menggunakan GSMP sistem rotor kutub dalam. Pada saat sekarang ini, aplikasi GSMP rotor kutub dalam pada sistem pembangkit listrik tenaga angin menjadi meningkat. Pada GSMP kutub dalam, kutub-kutub magnet dipasang pada inti rotor dibagian dalam mesin dan dikelilingi oleh inti jangkar yang berada pada bagian luar. Sebaliknya, pada GSMP jenis rotor luar, posisi rotor berada pada inti yang dipasang mengelilingi inti jangkar dan berada pada bagian dalam mesin. Sesuai namanya, maka fluks untuk pemagnetan pada GSMP diperoleh dari kutub-kutub magnet yang dipasang pada inti rotor. Fluks magnet yang berasal dari kutub utara (U) menyebar atau terdistribusi kedalam celah udara kemudian menuju inti jangkar kemudian kembali ke kutub selatan (S) pada magnet pasangannya dan seterusnya menuju inti rotor. Pada keadaan tertentu misalnya konstruksi magnet yang berpasangan berbeda volumenya, maka fluks magnet dapat memasuki poros secara signifikan. Hal ini dapat mengakibatkan terjadi arus pada bearing mesin dalam jumlah besar dan mengakibatkan dampak yang berbahaya bagi mesin. Dalam paper ini diasumsikan magnet berbentuk sama serta ideal dan tidak terjadi pangaliran fluks magnet yang berlebihan pada poros mesin. Ilustrasi dari sebuah konstruksi GSMP dapat ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Jangkar dan Rotor pada GSMP Rotor Kutub Dalam

Pada Gambar 1 memperlihatkan ilustrasi 2 dimensi (2-D) dari sebuah GSMP. Perlu diketahui bahwa tipikal GSMP sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1 tersebut adalah tipikal GSMP rotor kutub dalam. Selanjutnya, distribusi fluks magnet pada GSMP yang ditinjau dalam penelitian adalah fluks magnet radial saja. Pada GSMP jenis magnet radial, fluks yang menembus permukaan magnet tersebar merata diseluruh permukaan magnet. Fluks magnet tersebut akan terdistribusi pada seluruh inti mesin melalui reluktansi material, baik reluktansi inti jangkar, reluktansi inti rotor maupun reluktansi udara. Meski demikian, reluktansi yang sangat mempengaruhi kinerja GSMP adalah reluktansi celah udara.

Besarnya reluktansi celah udara (R_g) pada sebuah GSMP dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \quad (1)$$

R_g adalah reluktansi celah udara, (Ampere tern/Weber). l_g adalah panjang celah udara (mm). μ_0 adalah $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry.meter). A_g adalah luas celah udara (m^2).

Reluktansi pada celah udara GSMP beserta fluks magnet yang masuk kedalam celah udara berpengaruh langsung nilai puncak torka *cogging*. Setiap terjadi perputaran pada rotor, maka dengan sendirinya akan terjadi torka *cogging*. Nilai torka *cogging* akan tinggi bila bilamana reluktansi pada celah udara tinggi. Selanjutnya dapat ditegaskan, bahwa nilai reluktansi celah udara merupakan suatu parameter mempengaruhi torka *cogging* pada GSMP tipe manapun juga. Oleh sebab itu dalam disain mesin magnet permanen ataupun GSMP harus dilakukan sedemikian rupa sehingga pengaruh reluktansi celah udah tidak signifikan.

Hubungan antara reluktansi celah udara dengan torka *cogging* (T_c) dalam sebuah GSMP dapat dirumuskan sebagai berikut **(Nur, dkk, 2020) (Di, dkk, 2018)**:

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

T_c adalah torka *cogging* (N.m). ϕ_g adalah fluks magnet pada celah udara (Weber). R_g adalah reluktansi celah udara (Mho). θ adalah derajat mekanik perputaran atau posisi rotor.

Penelitian dan investigasi terdahulu **(Nur, dkk,2020) (Suherman, dkk, 2020) (Di, dkk, 2018)** telah mengemukakan bahwa secara spesifik torka *cogging* juga dipengaruhi oleh kerapatan fluks magnet celah udara, baik kerapatan fluks normal (B_n) maupun tangensial (B_t) yang dihasilkan oleh suatu magnet permanen. Kerapatan fluks normal (B_n) menghasilkan gaya normal yang mana posisinya tegak lurus terhadap permukaan gigi jangkar, sedangkan kerapatan fluks tangensial (B_t) menghasilkan suatu gaya tangensial yang parallel terhadap inti jangkar dan tegak lurus terhadap pintu alur jangkar. Perlu pula dijelaskan bahwa, walaupun kedua fluks magnet memperuhi torka *cogging*, namun yang paling dominan berpengaruh langsung adalah B_t .

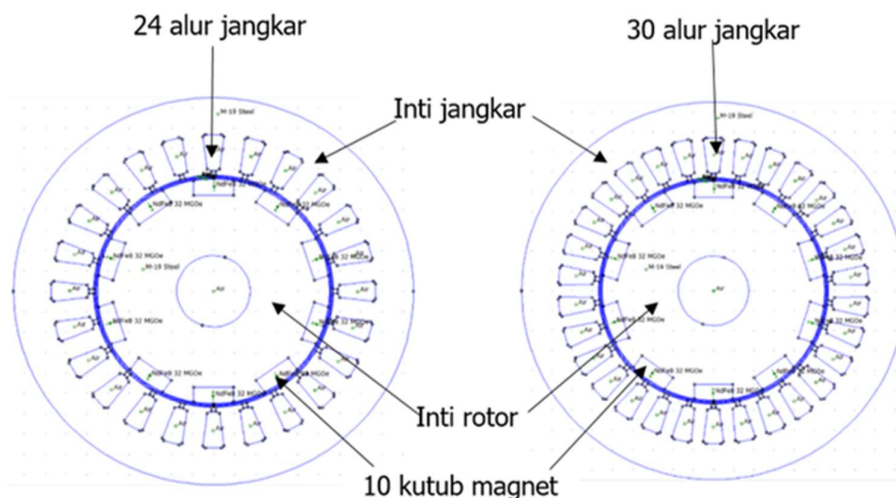
Pada GSMP tipe ISN, kerapatan fluks tangensial jauh lebih tinggi dari tipe FSN **(Ling, dkk, 2016) (Nur, dkk, 2020)**. Hal ini disebabkan karena akumulasi fluks magnet yang masuk celah udara lebih besar pada GSMP tipe ISN. Pada saat yang sama, nilai reluktansi celah udara secara alamiah menjadi sangat fluktuatif pada saat rotor bergerak. Hal ini terjadi karena pada saat fluks magnet memasuki atau terdistribusi ke dalam celah udara lalu masuk gigi jangkar, terjadi secara bersamaan tanpa pengalihan ke area lainnya. Berbeda halnya dengan GSMP tipe ISN, pada tipe FSN nilai fluks magnet yang terdistribusi pada celah udara dan memasuki inti jangkar menjadi tidak sama besar pada setiap grup belitan atau grup fasa. Hal ini dapat dilihat dari kerapatan fluks magnet pada inti **(Nur, dkk, 2020)**.

Kelebihan dari sebuah GSMP tipe FSN adalah bahwa fluks magnet yang terdistribusi dapat melingkupi atau menjangkau kumparan pada inti jangkar menjadi lebih panjang. Lintasan fluks magnet tidak hanya mencakup pada konduktor yang berada pada alur jangkar saja, tetapi juga dapat mencapai kumparan yang berada pada sisi kiri dan kanan inti jangkar menjadi lebih panjang. Dengan demikian, maka panjang efektif konduktor yang mendapatkan fluks magnet menjadi lebih besar bila dibandingkan dengan GSMP tipe ISN. Demikian juga, torka *cogging* dari suatu GSMP tipe FSN pada umumnya lebih rendah atau jauh lebih rendah dibanding dengan torka *cogging* pada GSM tipe ISN.

Meski demikian, akibat distribusi fluks magnet yang tidak seimbang kedalam inti jangkar dapat memperburuk performansi GSMP dan dapat mengakibatkan terjadinya pergeseran pada poros ketika sebuah GSMP sedang beroperasi. Fenomena ini dikenal dengan istilah ketidakseimbangan tarikan gaya (*Unbalance Magnetic Pull*). Hal ini juga terjadi pada mesin induksi yang merupakan salah satu jenis mesin listrik. Seperti telah disinggung sebelumnya *Unbalance Magnetic Pull* (UMP) merupakan suatu fenomena yang harus diminimalkan pada sebuah konstruksi GSMP, motor listrik magnet permanen atau bahkan pada mesin induksi. Riset tentang UMP pada mesin-mesin listrik magnet permanen (**Jose, dkk, 2018**) dan mesin induksi pada referensi (**Di, dkk, 2018**) (**Chiu, dkk, 2018**). Masalah UMP tidak dibahas detail dalam penelitian ini, namun demikian, dapat dinyatakan bahwa nilai torka *cogging* dari sebuah GSMP atau mesin magnet permanen dapat mempengaruhi UMP.

2.2. Teknik untuk menurunkan torka *cogging* dan konstruksi GSMP

Torka *cogging* yang terjadi GSMP atau mesin magnet permanen (MMP) diakibatkan oleh gaya negatif yang terjadi pada celah udara mesin. Torka *cogging* terjadi pada sebuah GSMP meskipun tidak ada arus listrik yang mengalir pada konduktor jangkarnya. Hal itu terjadi sebagai akibat dari interaksi fluks pada permukaan magnet rotor, khususnya pada ujung kiri dan kanan magnet dengan inti jangkar atau alur jangkar. Untuk mengetahui lebih lanjut terjadinya torka *cogging* pada GSMP, dapat dilihat pada struktur magnet dan inti jangkar dari sebuah GSMP seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Integral Slot Number (kiri) dan *Fractional*/Slot Number (kanan)

Pada Gambar 2 diperlihatkan struktur magnet dan inti jangkar dalam dia dimensi (2-D). Permanen magnet menghasilkan dua macam kerapatan fluks, yaitu normal B_n dan kerapatan fluks tangensial B_t . Kedua kerapatan fluks magnet tersebut terjadi pada magnet, tetapi memiliki posisi atau tempat serta arah distribusi yang berbeda. Kerapatan fluks normal B_n berada pada pusat atau tengah magnet dan distribusinya langsung menuju ke arah gigi jangkar. Kerapatan fluks normal menghasilkan gaya normal pada celah udara. Meski demikian, kerapatan fluks normal tidak mempengaruhi atau tidak mengakibatkan gaya tarik menarik antara rotor dan inti jangkar pada ketika rotor mesin mulai berputar.

Sebaliknya, kerapatan fluks tangensial menghasilkan gaya magnet tangensial pada celah yang menyebabkan terjadinya gaya tarik antara permukaan magnet dengan inti jangkar menjadi sangat dominan. Akibatnya terjadi gaya tarik menarik yang sangat kuat antara magnet dengan inti jangkar dan berpengaruh langsung kepada nilai torka *cogging*. Pengaruh kerapatan fluks tangensial terhadap inti jangkar hanya dapat dihilangkan atau dibuat sekecil mungkin pada GSMP yang dikonstruksi dengan sistem tanpa inti jangkar (*coreless*). Demikian pula GSMP yang tidak memiliki pintu alur jangkar (*slotless*). Hal ini karena fluks magnet tidak dapat menembus langsung ke dalam alur jangkar. Kerapatan fluks tangensial yang terjadi pada mesin magnet permanen atau GSMP pada prinsipnya dihasilkan oleh fluks magnet yang berbalik arah atau peralihan fluks magnet dari kutub utara (U) menuju magnet kutub selatan (S). Sebagaimana kita ketahui, jalur perpindahan fluks magnet selalu memiliki karakter trajektori *orthogonal*. Pada mesin magnet permanen yang tidak dioptimasi sama sekali baik pada inti jangkar maupun magnet rotornya, maka jalur fluks magnet yang menghasilkan kerapatan fluks tangensial menjadi sangat panjang pada celah udara.

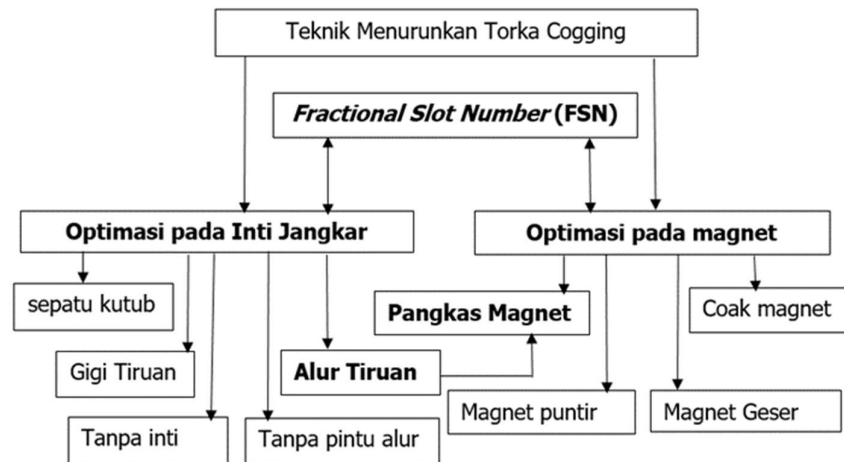
Pada GSMP dengan teknik pangkas magnet, kerapatan fluks tangensial yang dapat mencapai alur jangkar menjadi menurun, sehingga kekuatan Tarik menarik antara permukaan magnet rotor dengan alur jangkar menjadi menurun. Selain itu, beberapa teknik yang dilakukan yang dapat dilakukan untuk menurunkan torka *cogging* yang lain. Teknik penurunan torka *cogging* dapat dilakukan optimasi baik pada inti jangkar maupun pada magnet.

Untuk perbandingan jumlah alur dan kutub tertentu misalnya alur 24 dan kutub 8 dan alur 24 dan kutub 20, optimasi dapat dilakukan dengan teknik coakan bertingkat pada ujung magnet **(Ling, dkk, 2016) (Nur, dkk, 2020)** sedangkan pada GSMP tipe FSN penurunan torka *cogging* juga dapat dilakukan sistem kombinasi optimasi pada alur tiruan pada jangkar dan coakan magnet rotor [3]. Penurunan torka *cogging* **(Ling, dkk, 2016) (Nur, dkk, 2020)** pada dasarnya dilakukan dengan meminimalkan fluks pada permukaan atau ujung-ujung magnet rotor yang berinteraksi dengan inti jangkar.

Selanjutnya pada penurunan torka *cogging* dapat dilakukan dengan langkah-langkah antara lain : (1) Memperkecil tinggi ujung magnet **(Ling, dkk, 2016)** (2). Memperbesar jarak antara permukaan magnet dengan inti jangkar **(Nur, dkk, 2020)**. (3) Membuat alur tiruan pada inti jangkar **(Nur, dkk, 2020)**. (4) Memperkecil pintu pembukaan pada alur jangkar, (5). Memperbesar ketinggian kutub sepatu jangkar. (6) Menggunakan gigi tiruan pada jangkar. Demikian pula teknik penurunan torka *cogging* dapat dikembangkan dengan cara kombinasi dari teknik yang sudah ada.

Penurunan torka *cogging* dari sebuah GSMP atau mesin magnet permanen dapat dianggap baik dan dapat diimplementasikan pada aplikasi khusus seperti sistem pembangkit listrik tenaga angin, apabila menghasilkan suatu penurunan minimal 98 % dari torka berbeban. Dengan kata lain, sebuah GSMP dapat dikatakan berkualitas baik apabila kandungan torka *cogging* yang dimiliki oleh mesin tersebut maksimal 2% dari torka berbeban.

Dalam penelitian ini, penurunan torka *cogging* dilakukan dengan kombinasi optimasi gigi jangkar dan magnet rotor. Optimasi jangkar dilakukan dengan menerapkan teknik alur tiruan, sedangkan pada magnet rotor adalah dengan teknik pangkasan magnet. Berdasarkan hasil riset sebelumnya telah banyak diusulkan teknik untuk menurunkan torka *cogging* pada mesin magnet permanen serta GSMP. Secara umum, teknik penurunan torka *cogging* dapat dijabarkan secara sederhana pada Gambar 3.



Gambar 3. Klasifikasi Teknik Penurunan Torka *Cogging* pada GSMP

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perhitungan Torka *Cogging* pada GSMP yang Ditinjau

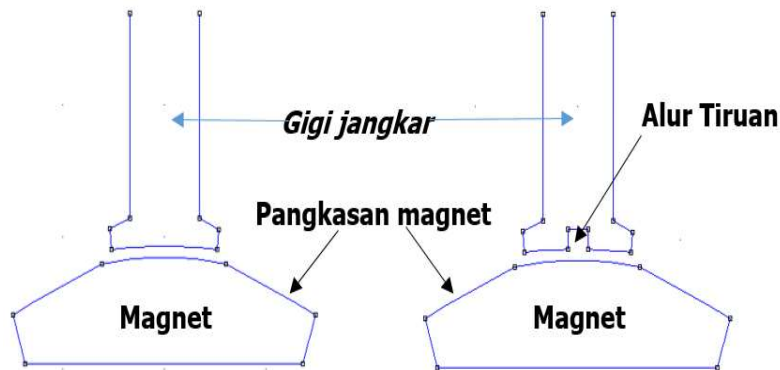
Torka *cogging* (T_c) dalam penelitian ini dihitung berdasarkan Persamaan 3 dan dilakukan menggunakan Metode Stress Tensor (MST) (Ling, dkk, 2016) (Nur, dkk, 2020) dengan menggunakan Persamaan (3) (Nur, dkk, 2020):

$$T_c = \frac{L_{stk}}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_n B_t d\theta \quad (3)$$

T_c adalah torka *cogging* (N.m). L_{stk} adalah panjang mesin (m). μ_0 sebesar $4\pi \times 10^{-7}$ H/m, r adalah jari-jari pada celah udara tempat T_c diukur (m). B_n adalah kerapatan fluks normal (Tesla). B_t adalah kerapatan fluks tangensial (Tesla). θ adalah derajat mekanik posisi rotor GSMP.

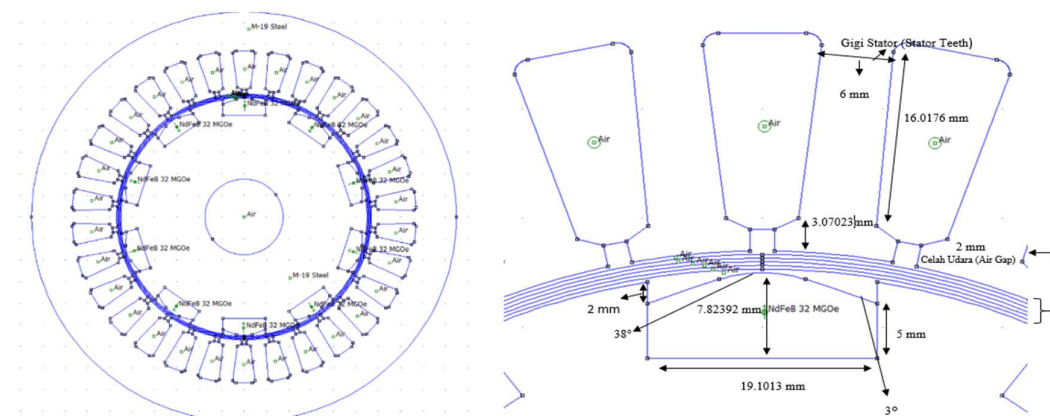
Penurunan torka *cogging* dilakukan dengan melakukan 3 kombinasi teknik untuk menurunkan torka *cogging* yaitu: (1) *fractional slot number*, (2) alur tiruan pada gigi jangkar, (3) pangkasan magnet rotor.

Perbandingan Nilai Torka *Cogging* Antara Tipe Generator *Integral Slot Number* dan *Fractional Slot Number* untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin



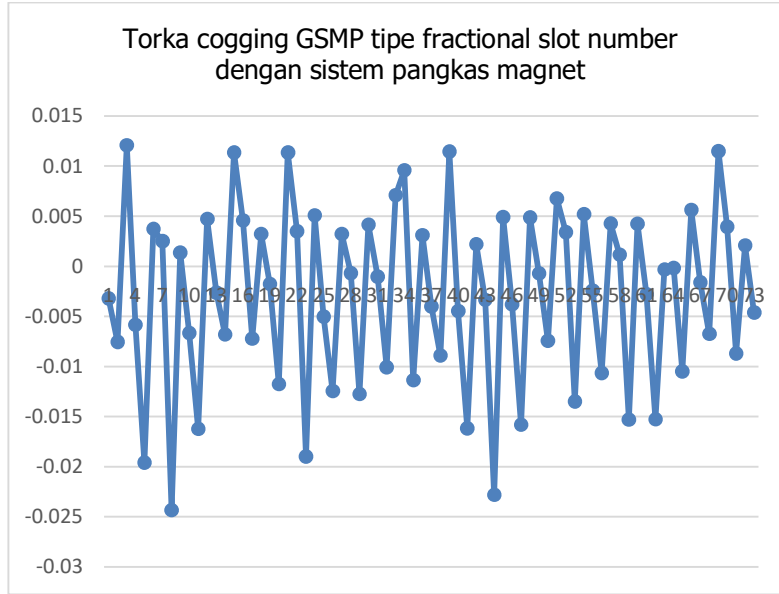
Gambar 4. Optimasi gigi jangkar dan magnet rotor

Pada tahap selanjutnya dari penelitian ini, penulis melakukan penurunan torka *cogging* dengan teknik pangkasan magnet rotor, sedangkan inti jangkar tidak mengalami perubahan. Pada GSMP dengan tipe *integral slot number* (ISN) penurunan torka *cogging* dilakukan sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5.



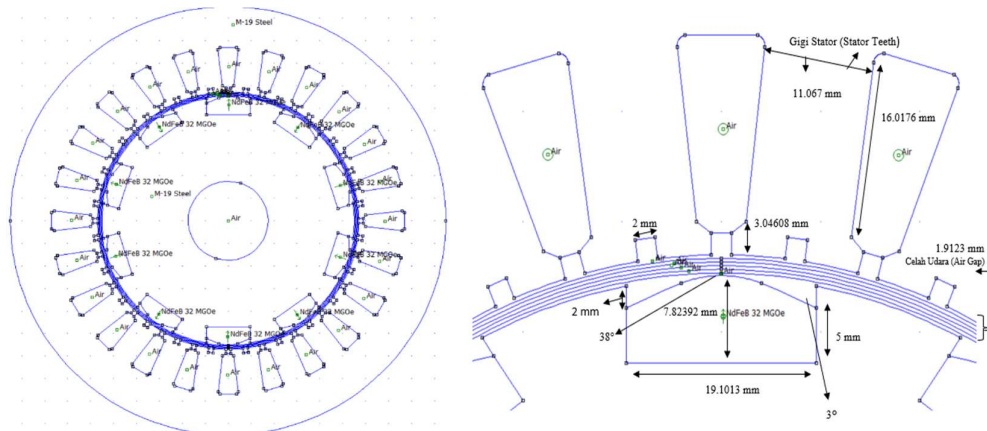
Gambar 5. Penurunan Torka *Cogging* dengan Teknik Pangkasan Magnet

Penerapan teknik pangkasan magnet rotor menghasilkan suatu penurunan torka *cogging* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6. Pada Gambar 6, dengan penggunaan teknik pangkasan magnet dapat menurunkan torka *cogging* kurang lebih 0.0125 N.m. Persentase penurunan torka *cogging* sebesar 75 % dari torka beban nol.



Gambar 6. Grafik Torka Cogging Menggunakan Pangkasan Magnet

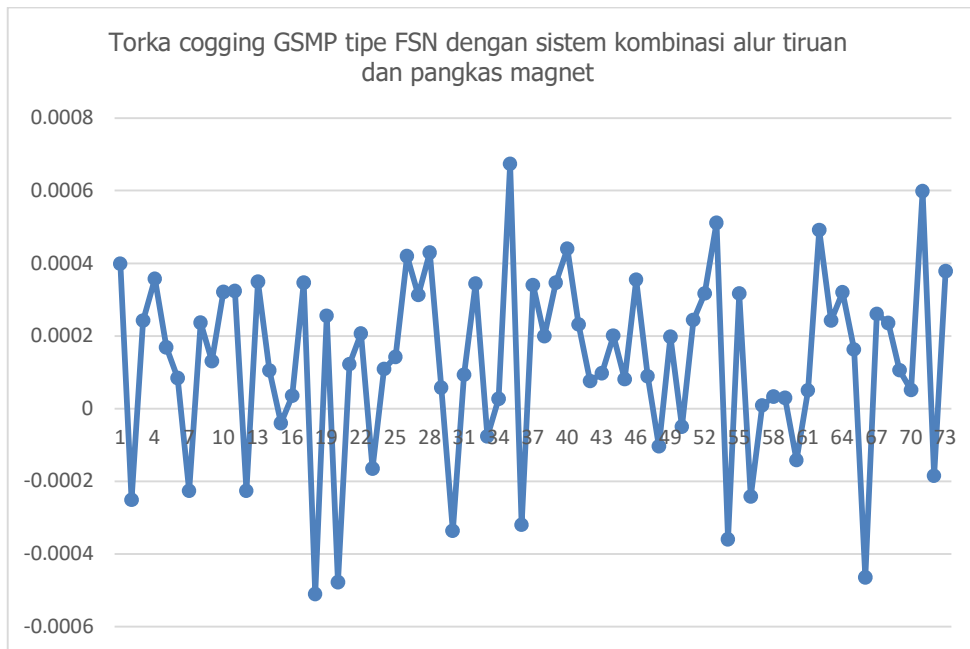
Setelah itu dilanjutkan kombinasi teknik pangkasan magnet rotor dan alur tiruan pada GSMP tipe ISN seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



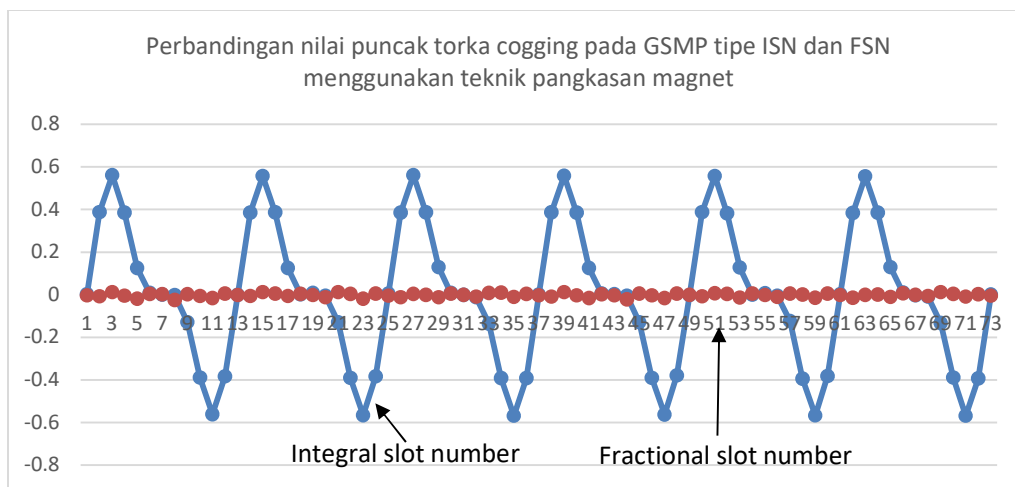
Gambar 7. Kombinasi Pangkasan Magnet Rotor dan Alur Tiruan pada Inti Jangkar

Dengan kombinasi pangkasan magnet dan alur tiruan pada inti jangkar, penurunan torka cogging menjadi 0.0007 N.m. sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 8. Terlihat bahwa dengan Teknik kombinasi pangkasan magnet rotor dan alur tiruan pada jangkar dapat menghasilkan penurunan nilai puncak torka cogging yang sangat signifikan dibandingkan dengan GSMP sebelumnya yakni sebesar 98.51%.

Perbandingan Nilai Torka *Cogging* Antara Tipe Generator *Integral Slot Number* dan *Fractional Slot Number* untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin



Gambar 8. Grafik Torka *Cogging* dengan Kombinasi Pangkasan Magnet dan Alur Tiruan



Gambar 9. Perbandingan Torka *Cogging* pada GSMP Tipe ISN dan FSN Menggunakan Teknik Pangkasan Magnet

Gambar 9 adalah perbandingan nilai torka *cogging* antara GSMP tipe ISN dan FSN. Berdasarkan Gambar 9 tersebut dapat dilihat bahwa penurunan torka *cogging* pada GSMP tipe *fractional* Slot number (*FSN*) sangat signifikan dan jauh lebih besar dibanding penurunan torka *cogging* pada GSMP tipe integral slot number (ISN). Hal ini karena reluktansi celah udara pada tipe *FSN* lebih rendah dibandingkan dengan tipe ISN. Hal ini disebabkan karena dengan penerapan teknik pangkas dan alur tiruan pada inti jangkar atau inti stator dari GSMP tipe FSN mengakibatkan peningkatan interaksi antara ujung magnet dengan inti jangkar semakin sering terjadi. Akibat peningkatan interaksi yang semakin tinggi mengakibatkan frekuensi torka *cogging* semakin tinggi, tetapi sebaliknya nilai puncak torka *cogging* menjadi semakin kecil. Sebaliknya, pada GSMP tipe ISN, interaksi antara ujung magnet dengan alur jangkar lebih jarang terjadi. Hal itulah yang mengakibatkan frekuensi torka *cogging* menjadi rendah dan nilai puncak torka *cogging* jauh lebih tinggi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan, pengujian menggunakan metode numerik, serta pengolahan terhadap data yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan. Di antaranya, tinggi amplitudo torka *cogging* untuk GSMP tipe *ISN* pada umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan GSMP tipe *FSN* untuk jumlah kutub yang sama. Berdasarkan penelitian yang telah kami lakukan, penerapan teknik pangkasan magnet rotor dapat mengurangi nilai torka *cogging* baik pada GSMP tipe *ISN* maupun tipe *FSN*. Meski demikian, nilai penurunan torka *cogging* tersebut tidak signifikan untuk aplikasi pada pembangkit listrik tenaga angin karena belum mencapai 98.0 % dari nilai torka beban nol generator. Dengan menggunakan kombinasi teknik pangkasan magnet dan alur tiruan pada jangkar, maka penurunan torka *cogging* mencapai 98,51 % dari torka berbeban. Penurunan torka *cogging* sebesar 98.51 % tersebut diperoleh dari GSMP tipe *FSN* yang diteliti dalam riset ini. Pada GSMP tipe *ISN*, penggunaan kombinasi teknik pangkasan magnet dan alur tiruan pada inti jangkar dapat menurunkan torka *cogging* sebesar 75 % dari torka beban nol. Berdasarkan hasil penurunan torka *cogging* dari GSMP tipe *FSN* menggunakan kombinasi teknik pangkasan magnet dan alur tiruan, maka dapat direkomendasikan untuk menindaklanjuti dengan manufaktur GSMP untuk diaplikasikan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin

DAFTAR RUJUKAN

- Di, C., Petrov, I., Pyrhonen, J. J. & Bao, S. (2018). Unbalance magnetic pull compensation with active magnetic bearings in a 2 MW high speed induction machine. *IEEE Transaction on Magnetics*, 54 (8), 1-13.
- Chuan, H., & Shek, J. K. H. (2018). Calculation of unbalanced magnetic pull in induction machines through empirical method. *IET Electric Power Applications*, 12 (9), 1233-1239.
- Ling, J. M. & Nur, T. (2016). Influence of edge slotting of magnet pole with fixed slot opening width on the cogging torque in Inset Permanent Magnet Synchronous Machine. *Advance Mechanical Engineering*, 8 (8).
- Perez-Loya, J. J., Abrahamsson, C. J. D. & Lundin, U. (2018). Electromagnetic losses in synchronous machine during active compensation of unbalanced magnetic pull. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 66 (1), 124-131.
- Joe, L. E. & Nur, T. (2020). Study the Effect of Slot in Stator and Rotor on the Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012025.
- Zhou, M., Zhang, X., Zhao, W., Ji, J., & Hu, J. (2019). Influence of Magnet Shape on the Cogging Torque of Surface Mounted Permanent Magnet Motor. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 5 (4), 40-50.
- Leitner, S., Gruebler, H., & Muetze, A. (2019). Cogging Torque Minimization and Performance of the sub-Fractional HP BLDC Claw Pole Motor. *IEEE Transaction on Industry Application*, 55 (5), 4653-4664.

- Nur, T. & Ling, J. M. (2020). Development of Magnet Structure Optimization on Achieving the Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machine. *23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, (pp. 504-508)
- Nur, T., Joe, L. E. & Siregar, M. (2020). Novel of Cogging Torque Reduction Technique for Permanent Magnet Generator by Compounding of Magnet Edge Shaping and Dummy Slot in Stator Core. *International Journal on Advance Science Engineering Information Technology (IJASEIT)*, *10* (3), 1191-1199.
- Suherman, Y. & Nur, T. (2020). Pengaruh Kombinasi Pemangkasan Ujung Magnet Permanen dan Axial Channel pada Inti Rotor terhadap Torka Cogging tipe Fractional Slot Number. *Jurnal Elektro*, *13* (2), 67-80.
- Caruso, M., Di Tommaso, A. O., Miceli, R. & Viola, F. (2022). A Cogging Torque Minimization Procedure for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Based on a Progressive Modification of the Rotor Lamination Geometry. *Energies* *15* (14), 4956.
- Wu, L., Ming, G., Zhang, L. & Fang, Y. (2021). Improved Stator/Rotor-Pole Number Combinations for Torque Ripple Reduction in Doubly Salient PM Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *68* (11), 10601-10611.
- Liu, C., Zhu, J., Wang, Y., Lei, G. & Guo, Y. (2016). Cogging torque minimization of smc pm transverse flux machines using shifted and unequal-width stator teeth. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, *26* (4), 1-4.
- Jiang, J. W., Bilgin, B., Yang, Y., Sathyan, A., Dadkhah, H. & Emadi, A. (2016). Rotor skew pattern design and optimisation for cogging torque reduction. *IET Electrical Systems in Transportation*, *6* (2), 126 – 135.
- Wanjiku, J., Khan, M. A., Barendse, P. & Pillay, P. (2015). Influence of slot openings and tooth profile on cogging torque in axial-flux pm machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *62* (12), 7578-7589.