

Analisis Pengaruh Teknik Coakan Dua Langkah terhadap Penurunan Torka Cogging terhadap Pergeseran Poros pada Mesin Magnet Permanen

LUCIO A. CORREIA^{1,2}, TAJUDDIN NUR^{2*}, LANNY PANDJAITAN², HERLINA³

¹Departemen Teknik Elektro (Universitas Oriental Timor Lorosa'e), Timor Leste

²Departemen Teknik Elektro (Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya), Indonesia

³ Jurusan Teknik Elektro (Universitas Sriwijaya), Indonesia

*Email: tans@atmajaya.ac.id

Received 1 September 2024 | *Revised* 30 September 2024 | *Accepted* 30 Oktober 2024

ABSTRAK

Torsi cogging adalah torsi yang terjadi akibat interaksi antara gaya tangensial di ujung magnet dengan material alur stator, yang menahan gerakan rotor pada generator magnet permanen. Torsi ini harus diminimalkan dalam aplikasi turbin angin karena dapat menghambat pergerakan awal generator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh metode tertentu dalam mengurangi torsi cogging dan pergeseran poros. Metode yang digunakan melibatkan penerapan coakan dua tingkat pada ujung magnet rotor dengan tiga konstruksi magnet rotor yang berbeda, sementara kondisi inti stator tetap identik. Analisis numerik menggunakan FEMM 4.2 menunjukkan pengurangan torsi cogging yang signifikan sebesar 99,70% dan pengurangan pergeseran poros sebesar 60% secara vertikal dan 51% secara horizontal.

Kata kunci: *coakan dua tingkat, generator magnet permanen, gaya magnet tangensial, torka cogging, pergeseran poros*

ABSTRACT

Cogging torque is the torque resulting from the interaction between tangential forces at the magnet's edge and the stator slot material, which opposes the rotor's motion in a permanent magnet generator. This torque must be minimized in wind turbine applications as it can hinder the generator's initial movement. This study aims to analyze the effect of a specific method on reducing cogging torque and shaft shifting. The method involves applying a two-step notch at the rotor magnet's edge with three different rotor magnet constructions, while keeping the stator core conditions identical. Numerical analysis using FEMM 4.2 achieved a significant cogging torque reduction of 99.70% and reduced shaft displacement by 60% vertically and 51% horizontally.

Keywords: *Two-step notch, permanent magnet generator, tangential magnetic force, shaft shifting.*

1. PENDAHULUAN

Penggunaan mesin magnet permanen, baik sebagai motor maupun generator, telah meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Mesin magnet permanen (MMP) kini dapat ditemukan di berbagai sistem teknik, seperti mobil listrik, robotika, pesawat udara, drone, kapal laut, sistem energi terbarukan, dan lain sebagainya. Peningkatan penggunaan MMP tidak terlepas dari perkembangan teknologi analisis numerik serta manufaktur di bidang mesin listrik. Industri dan peneliti kini memiliki pemahaman yang sama dalam melihat aspek pengembangan MMP dan mesin listrik lainnya secara umum. Dengan demikian, performa sebuah MMP dapat diprediksi secara lebih akurat sebelum diproduksi melalui analisis berbasis numerik. Saat ini, performa dan konstruksi MMP dapat dengan mudah dirancang sesuai dengan sistem yang akan diterapkan.

MMP banyak digunakan dalam sistem keteknikan, seperti pada sistem energi terbarukan dan kendaraan listrik. Hal ini karena MMP memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan mesin listrik konvensional. Beberapa keunggulan MMP antara lain kerapatan daya yang lebih tinggi, tidak memerlukan eksitasi buatan seperti pada mesin konvensional, sehingga bobotnya lebih ringan. Karena tidak memerlukan eksitasi untuk menghasilkan fluks magnet, MMP tidak menggunakan belitan eksitasi. Biaya perawatannya juga jauh lebih rendah, karena tidak menggunakan sikat seperti mesin listrik konvensional, sehingga bebas dari bunga api. Untuk menghasilkan fluks magnet, MMP menggunakan magnet permanen, yang mampu menghasilkan fluks magnet lebih besar dibandingkan dengan sistem eksitasi buatan.

Torsi yang disebut cogging terjadi pada generator sinkron magnet permanen karena interaksi antara magnet permanen pada rotor dan material ferromagnetik pada stator. Ini dapat menghambat rotasi rotor, terutama pada kecepatan rendah, sehingga mengganggu aplikasi seperti Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB), di mana turbin sering beroperasi pada kecepatan angin rendah. Untuk mengatasi masalah ini, skewing—memiringkan slot stator atau rotor untuk mengurangi interaksi magnetik—adalah salah satu solusi **(Ali, dkk, 2019)(Jia, dkk, 2020)(Luu, dkk, 2018)(Ocak & Aydin, 2020)(Won, dkk, 2023)**. Selain itu, telah terbukti bahwa metode alternatif, seperti perubahan desain geometris, seperti mengubah lebar gigi stator **(Ling & Nur, 2016)(Nur & Herlina, 2019)**, dan metode tambahan, seperti mengubah magnet dan menambahkan alur imitasi pada inti stator **(Duan & Zhao, 2024)(Wan, dkk, 2022)(Zhao, dkk, 2017)**, juga berhasil. Menggabungkan teknik-teknik ini telah menghasilkan pengurangan torka cogging hingga 98% dalam beberapa penelitian. Ini merupakan langkah penting dalam meningkatkan kinerja generator sinkron magnet permanen.

Penelitian ini mendesain dan mengoptimalkan GMP agar memiliki kandungan CT serendah mungkin, yaitu minimal sebesar 2% dari kondisi berbeban, sehingga dapat diaplikasikan pada sistem PLTB dengan kondisi angin rendah. Untuk keperluan penelitian ini, kami menggunakan konstruksi GMP dengan 24 alur dan 10 kutub sebagai objek penelitian. Pada tahap awal, kami menganalisis CT pada GMP dengan desain konvensional sebagai pembanding. Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode numerik berbasis FEMM 4.2, kami menemukan nilai puncak CT sebesar 0,2395649 N.m. Nilai CT ini masih relatif besar, sehingga GMP dengan kandungan CT seperti ini tidak dapat digunakan pada sistem PLTB dengan kecepatan angin rendah. Selain CT, masalah lain yang muncul pada MMP adalah pergeseran poros saat rotor berputar. Pergeseran poros secara radial, baik dalam arah vertikal maupun horizontal, disebabkan oleh interaksi antara gaya magnet tangensial (F_t) pada ujung magnet dan gaya magnet normal (F_n) yang tegak lurus pada permukaan magnet **(Hosseinpour, dkk, 2024)**. Perlu dicatat bahwa upaya untuk mengurangi pergeseran poros rotor dan getaran pada mesin

listrik masih jarang dibahas dalam forum ilmiah. Oleh karena itu, masalah CT dan pergeseran poros pada MMP harus diatasi dengan baik agar performa MMP meningkat dan penggunaannya lebih efektif.

Seperti yang telah dijelaskan di awal tulisan ini, MMP banyak digunakan dalam sistem energi terbarukan, seperti pada turbin angin (PLTB). Pada PLTB, energi kinetik dari angin diubah menjadi energi listrik menggunakan GMP. Energi kinetik dari angin memutar baling-baling turbin, dan putaran baling-baling yang terhubung dengan rotor MMP menyebabkan rotor berputar. Saat rotor berputar, fluks magnet menginduksi belitan stator dan menghasilkan tegangan listrik. Meskipun demikian, terdapat kelemahan pada sistem GMP dengan desain konvensional ketika diaplikasikan pada sistem PLTB, yaitu besarnya gaya magnet yang menyebabkan terjadinya torka cogging (CT). CT yang besar merupakan salah satu kendala dalam aplikasi sistem PLTB karena dapat menghambat kecepatan rotor akibat interaksi antara fluks dari ujung magnet dengan alur pada inti stator. Hal ini menyebabkan torka negatif yang melawan perputaran rotor saat MMP mulai beroperasi. Bahkan, ketika tiupan angin melemah, putaran rotor MMP dapat berhenti sama sekali.

Oleh karena itu, masalah CT yang terjadi pada GMP dengan desain konvensional telah menjadi isu yang berkembang dan menjadi fokus kajian selama beberapa tahun terakhir. Berbagai konsep dan pemikiran telah diajukan untuk meminimalkan CT pada desain GMP, dengan penelitian yang telah terdokumentasi dengan baik **(Ali, dkk, 2019)(Anuja, dkk, 2022)(Hongbo, dkk, 2018)(Joe & Nur, 2020)(Nur & Herlina, 2018)(Zhao, dkk, 2017)**. Dengan penurunan CT pada desain GMP, diharapkan sistem PLTB dapat diaplikasikan secara lebih efektif. Umumnya, GMP yang akan diaplikasikan pada sistem PLTB di wilayah dengan kecepatan angin rendah (kurang dari 5 meter/detik) harus memiliki CT yang sangat rendah, yaitu tidak lebih dari 2% dari kondisi mesin berbeban **(Nur & Herlina, 2018)(Nur & Mawar, 2020)(Nur, dkk, 2023)(Suherman & Nur, 2021)**. Pada tahap selanjutnya, kami melakukan optimasi dengan menerapkan coakan satu tingkat pada ujung-ujung magnet rotor. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem coakan satu tingkat berhasil menurunkan nilai CT pada GMP sebesar -0,0123968 N.m. Meskipun demikian, nilai CT GMP masih terlalu besar untuk digunakan pada sistem PLTB.

Oleh karena itu, kami melanjutkan optimasi dengan menerapkan coakan dua tingkat pada ujung-ujung magnet. Tujuan penelitian ini adalah untuk menurunkan CT dan pergeseran poros dengan menerapkan metode coakan dua langkah pada ujung magnet. Keunggulan dari teknik penurunan CT dan pergeseran poros yang diusulkan dalam penelitian ini adalah kemampuannya untuk meminimalkan penyebab CT dan pergeseran poros secara efektif. Untuk meminimalkan bobot GMP, inti rotor telah dilengkapi dengan beberapa lubang udara berbentuk segi enam yang menyerupai keping, sehingga bobot rotor dapat dikurangi. Analisis distribusi atau penjalaran fluks magnet pada inti dan celah udara GMP dilakukan menggunakan software FEMM 4.2 yang dikombinasikan dengan software LUA 4.0. Selain itu, penelitian ini juga memperkenalkan pengaruh lubang udara terhadap bobot inti rotor dan bobot rotor secara keseluruhan. Novelti penelitian ini adalah kemampuannya untuk meningkatkan penurunan CT pada GMP secara signifikan dengan menggunakan metode coakan dua langkah pada ujung magnet.

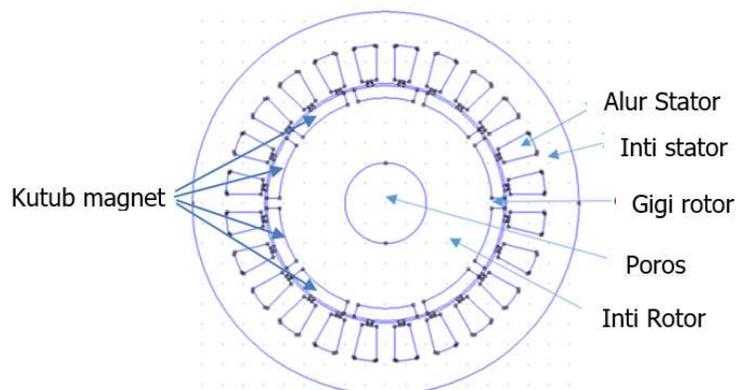
2. METODOLOGI

2.1 Konstruksi Generator Magnet Permanen

Masalah utama yang menyebabkan sistem PLTB tidak dapat beroperasi secara efektif adalah adanya CT yang relatif besar. CT bersifat parasit dan menimbulkan gaya tarik menarik yang berlebihan antara ujung-ujung magnet rotor dan alur pada inti stator. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh **(Ling & Nur, 2016)** **(Nur & Herlina, 2018)** dan **(Kashani, 2019; Suherman & Nur, 2021)**, jika jarak antara ujung magnet rotor dan permukaan inti stator merata dan homogen dari satu ujung magnet ke ujung magnet lainnya, maka CT pada GMP cenderung besar, meskipun luas atau volume magnet relatif kecil. Sebaliknya, jika jarak antara ujung-ujung magnet dan alur stator diperbesar, maka CT menurun secara signifikan. Selain itu, CT pada GMP dipengaruhi oleh dua komponen gaya magnet, yaitu gaya magnet normal (B_n) dan gaya magnet tangensial (B_t). Namun, komponen F_t diketahui sangat dominan dalam menghasilkan CT **(Ling & Nur, 2016)****(Nur & Herlina, 2018)****(Nur & Mawar, 2020)** Komponen F_t dapat diminimalkan melalui berbagai metode, seperti optimasi konstruksi magnet rotor GMP **(Ling & Nur, 2016)**, optimasi inti stator **(Hongbo, dkk, 2018)****(Luu, dkk, 2018)**, atau kombinasi optimasi inti stator dan magnet rotor **(Ali, dkk, 2019)****(Joe & Nur, 2020)****(Nur & Herlina, 2018)****(Suherman & Nur, 2021)**.

Dalam penelitian ini, penulis menerapkan coakan dua langkah pada ujung-ujung magnet dari generator magnet permanen tipe fractional untuk meminimalkan CT pada GMP. Untuk mendapatkan desain GMP yang optimal, penelitian ini menggunakan teknik optimasi *Response Surface Method* (RSM) **(Si, dkk, 2018)****(Suherman & Nur, 2021)**. Untuk meningkatkan penurunan CT pada GMP yang diusulkan, coakan dua langkah diterapkan pada ujung-ujung magnet, sementara inti stator tetap menggunakan desain stator konvensional dengan lebar alur sebesar 2 mm.

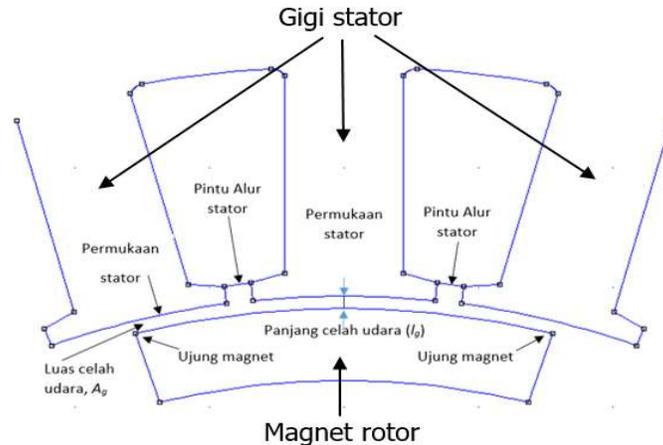
Seperti yang tercermin dari namanya, GMP memanfaatkan fluks magnet permanen yang dipasang pada inti rotor, sehingga fluks magnet pada GMP jauh lebih besar dibandingkan dengan generator konvensional. Secara konstruksi, GMP terdiri dari dua bagian utama: inti stator, yang merupakan bagian yang tidak bergerak, dan magnet rotor, yang menghasilkan fluks serta merupakan bagian yang bergerak. Konstruksi dasar dari GMP ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Awal GMP Konvensional

Gambar 1 menunjukkan konstruksi GMP konvensional di mana magnet rotor dan gigi stator belum dioptimasi. Perlu dicatat bahwa bagian yang bergerak pada GMP adalah rotor, yang

meliputi inti dan pasangan kutub magnet. Dalam penelitian ini, penulis menggunakan GMP dengan konstruksi 24 alur dan 10 kutub magnet. Berdasarkan perbandingan jumlah alur terhadap jumlah kutub, GMP ini dikategorikan sebagai tipe fractional. Bentuk alur stator dan kutub magnet pada rotor ditunjukkan secara spesifik pada Gambar 2.



Gambar 2. Inti Stator dan Magnet Rotor GMP Konvensional

Gambar 2 menunjukkan gigi stator dan magnet rotor yang terletak berdampingan, dipisahkan oleh panjang celah udara (l_g). Pada GMP konvensional (tanpa coakan pada ujung-ujung magnet rotor) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, jarak antara kedua ujung magnet dan seluruh permukaan magnet terhadap pintu alur stator/gigi stator adalah sama. Dengan kata lain, jika jarak permukaan magnet pada bagian tengah adalah 1 mm, maka jarak pada kedua ujung magnet juga sebesar 1 mm dari permukaan stator.

Pada GMP yang menerapkan coakan atau pangkasan pada ujung-ujung magnet rotor, jarak antara ujung-ujung magnet dan alur stator menjadi lebih besar dibandingkan dengan jarak di bagian tengah magnet rotor. Hal ini menyebabkan jalur distribusi fluks pada ujung-ujung magnet berkurang, sehingga fluks magnet yang mencapai alur stator menurun.

2.2 Torka Cogging pada Generator Magnet Permanen

Untuk memahami terjadinya CT pada GMP, fluks total yang memasuki celah udara harus dibatasi. Jika kuantitas fluks total (Φ_g) yang memasuki celah tidak dibatasi, fluks tersebut akan berinteraksi dengan reluktansi celah udara (R_g) dan menghasilkan CT yang besar. Hubungan antara CT, R_g , dan Φ_g dapat dinyatakan dalam Persamaan (1) (Nur & Herlina, 2018)(Suherman & Nur, 2021).

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

Reluktansi celah udara (R_g), sebagaimana diperlihatkan dalam Persamaan (1), dipengaruhi oleh jarak antara magnet rotor dan alur pada inti stator, yang dapat dinyatakan dalam Persamaan (2).

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \quad (2)$$

Keterangan:

\emptyset = fluks celah udara (Wb), R_g = reluktansi celah udara (H^{-1}), θ = posisi dari rotor ($^\circ$), l_g = jarak antar stator dan rotor (m), A_g = luas celah udara (m^2).

Pada GMP konvensional, di mana jarak antara permukaan magnet dan bukaan alur stator adalah sama atau homogen dari satu ujung magnet ke ujung magnet lainnya, kerapatan fluks magnet tangensial (B_t) pada kedua ujung magnet menjadi maksimum. Hal ini mengakibatkan gaya tarik-menarik yang besar antara ujung-ujung magnet dan alur stator pada inti rotor. Besarnya gaya magnet tangensial yang dihasilkan oleh kedua ujung magnet dinyatakan dalam Persamaan (3) **(Suherman & Nur, 2021)**.

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} (B_n B_t) \quad (3)$$

Keterangan:

F_t = gaya magnet tangensial (Newton), μ_0 = permeabilitas ruang hampa ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m), B_n = kerapatan fluks magnet normal (Tesla), B_t = kerapatan fluks magnet tangensial (Tesla).

Selain F_t , magnet juga menghasilkan gaya magnet normal (F_n), yang tegak lurus terhadap permukaan magnet. Gaya magnet normal F_n terletak pada bagian tengah magnet dan arahnya menuju ke gigi stator. Besar gaya magnet normal dinyatakan dalam Persamaan (4) **(Suherman & Nur, 2021)**.

$$F_n = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \quad (4)$$

Telah diketahui bahwa penyebab utama meningkatnya CT adalah akibat gaya magnet tangensial (F_t) pada ujung magnet. Oleh karena itu, untuk menurunkan CT pada GMP, prinsip dasarnya adalah mengurangi nilai puncak amplitudo F_t pada ujung-ujung magnet. Secara matematis, hubungan antara F_t dan CT pada GMP dinyatakan dalam Persamaan (4) **(Nur & Mawar, 2020)(Suherman & Nur, 2021)**.

$$CT = L_{stk} \int_0^{2\pi} F_t r^2 d\theta \quad (5)$$

Selanjutnya, dengan substitusi Persamaan (4) ke dalam Persamaan (5) dapat dituliskan secara lengkap nilai yang mempengaruhi CT sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (6).

$$CT = \frac{L_{stk}}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_n B_t d\theta \quad (6)$$

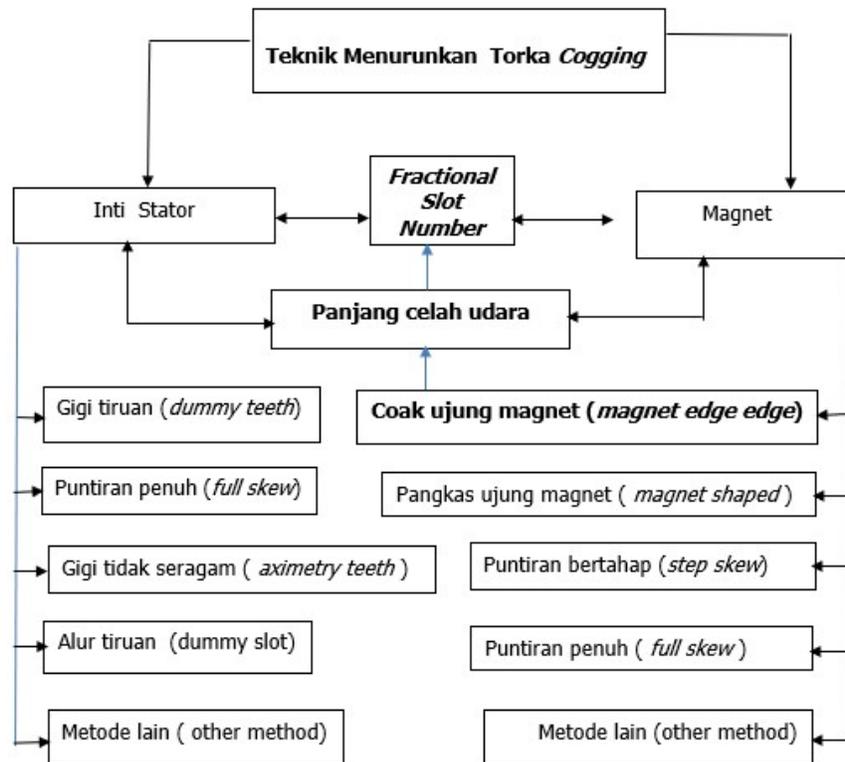
Keterangan:

L_{stk} = panjang aksial mesin (m), B_n = kerapatan fluks magnet normal (T), B_t = kerapatan fluks magnet tangensial (T), θ = derajat mekanik perpindahan rotor ($^\circ$), r = jari-jari rotor (m)

Berdasarkan Persamaan (6), terlihat bahwa CT sangat dipengaruhi oleh F_t pada ujung-ujung magnet, sedangkan F_n tidak mempengaruhi CT secara langsung. Meskipun demikian, F_n juga tidak boleh berlebihan, karena interaksi antara F_t dan F_n dapat menyebabkan pergeseran poros mesin (*Unbalanced Magnetic Pull*), yang dapat mengakibatkan kerusakan pada bearing.

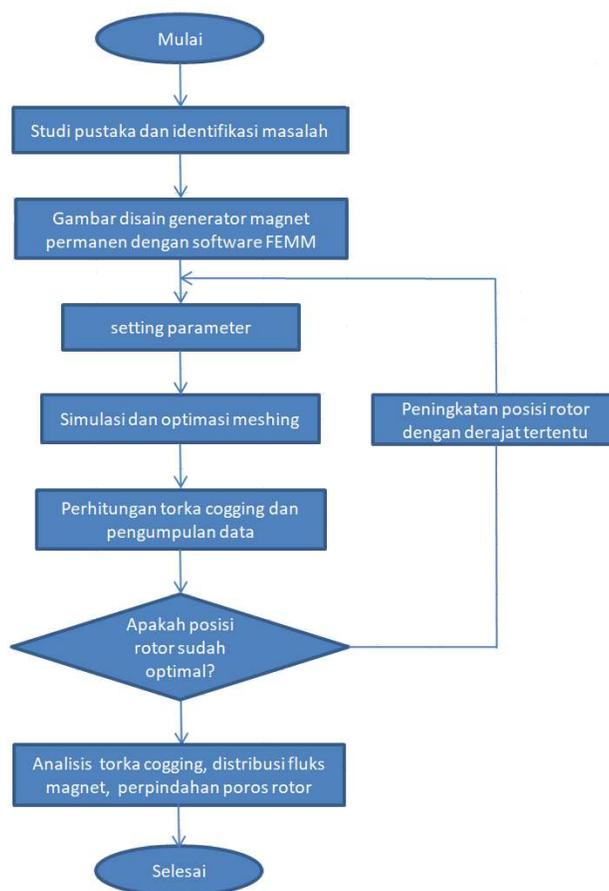
2.3 Teknik Menurunkan Torka Cogging

Untuk meminimalkan CT pada GMP, prinsip dasarnya adalah mengurangi pengaruh F_t pada ujung-ujung magnet rotor. Hal ini dapat dilakukan dengan menurunkan ketinggian ujung magnet rotor. Dengan menurunkan ketinggian ujung magnet, jarak antara ujung-ujung magnet dan alur stator menjadi lebih besar. Pada saat yang sama, luas celah udara di daerah ujung magnet juga bertambah. Dengan demikian, kerapatan fluks magnet tangensial B_t dapat menurun, serta amplitudo F_t dapat dikurangi secara langsung (Ling & Nur, 2016). F_t yang terdistribusi ke dalam alur pada inti stator menjadi rendah secara signifikan, sehingga gaya tarik antara ujung-ujung magnet dan alur di inti stator juga menurun. Beberapa teknik yang digunakan untuk meminimalkan CT pada GMP dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Teknik Menurunkan CT pada GMP

Dalam proses desain dan optimasi generator magnet permanen yang menggunakan perangkat lunak FEMM (Finite Element Method Magnetics), flowchart berikut menjelaskan langkah-langkah sistematis yang digunakan. Proses ini dilakukan untuk memastikan generator bekerja sebaik mungkin, terutama dengan mengurangi torque cogging, yang dapat berdampak pada efisiensi dan stabilitas operasional generator.



Gambar 4. Diagram Alir Penurunan Torka Cogging

Diagram alir pada gambar 4 menguraikan pendekatan sistematis untuk mendesain dan mengoptimalkan generator magnet permanen. Ini mencakup proses desain awal, tinjauan literatur, identifikasi masalah, desain awal menggunakan perangkat lunak FEMM, pengaturan parameter, simulasi dan pengoptimalan mesh, torsi cogging dan pengumpulan data, pengoptimalan posisi rotor, analisis torsi cogging, distribusi magnet, dan analisis putaran rotor rotor, dan akhir. Proses ini memastikan peningkatan berulang dan analisis menyeluruh pada setiap langkah, memastikan generator memenuhi persyaratan kinerja.

Dalam penelitian ini, dilakukan optimasi pada magnet rotor dengan menerapkan teknik coakan dua langkah pada kedua ujung magnet (**Ling & Nur, 2016**)(**Nur & Mawar, 2020**). mengeksplorasi efektivitas coakan pada rotor saja atau bersama rotor dan stator. Pendekatan ini dapat dibuktikan dengan persamaan matematis yang menggambarkan distribusi medan magnet dan variasi reluctance di celah udara. Persamaan dasar cogging torque, yang diperoleh dari energi magnetik di celah udara, dapat digunakan untuk membuktikan bahwa menambahkan coakan pada rotor mengurangi cogging torque (CT) (**Hao, dkk, 2023**):

$$T_c = -\frac{\partial W_m}{\partial \theta} \quad (7)$$

Dengan W_m merupakan energy mekanik di celah udara, dan Θ adalah posisi sudut rotor. Untuk perhitungan energi mekanik di celah udara dapat dihitung dengan mengintegrasikan densitas energi mekanik, atau dapat dilihat dengan persamaan berikut ini.

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} \int_v B^2 dV \quad (8)$$

Dengan demikian, pemberian coakan pada rotor memiliki dasar matematis yang kuat dalam pengurangan cogging torque.

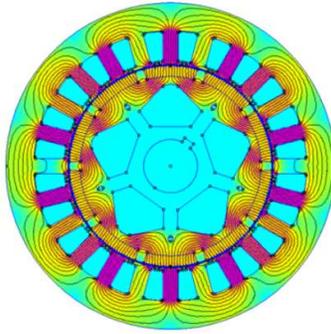
2.4 Analisis GMP menggunakan FEMM 4.2

FEMM 4.2 adalah salah satu metode numerik yang banyak digunakan untuk menganalisis konstruksi mekanik dan magnetik yang kompleks, seperti pada generator, motor, dan transformator. Metode ini dapat melakukan analisis menyeluruh pada objek yang dianalisis, sehingga hasilnya memiliki kesamaan dengan keadaan mesin yang sesungguhnya. Dalam menganalisis GMP, FEMM 4.2 mampu menyelesaikan persamaan diferensial homogen maupun tidak homogen secara bersamaan, sehingga hasil analisisnya lebih akurat dibandingkan metode analisis biasa (**Ling & Nur, 2016**). Seiring perkembangannya, FEMM 4.2 kemudian dikombinasikan dengan Bahasa Pemrograman LUA 4.0, memungkinkan proses analisis dilakukan secara simultan dan akurat (**Joe & Nur, 2020**)(**Suherman & Nur, 2021**). Untuk mengoptimalkan konstruksi GMP dalam penelitian ini, digunakan teknik optimasi Response Surface Method (RSM) (**Kushwaha & Fernandes, 2021**)(**Si, dkk, 2018**)(**Suherman & Nur, 2021**). Dalam studi ini, hanya hasil desain GMP terbaik yang ditampilkan.

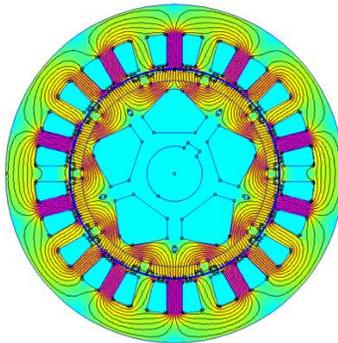
2.5 Analisis dan Simulasi Distribusi Fluks Magnet GMP

Pada bagian ini, dijelaskan analisis ketiga desain GMP menggunakan FEMM 4.2. Prosedur penggunaan FEMM 4.2 untuk analisis GMP dan mesin-mesin listrik merujuk pada referensi (**Meeker, 2013**) serta pengembangan yang dilakukan oleh peneliti lain (**Joe & Nur, 2020**)(**Ling & Nur, 2016**)(**Nur & Herlina, 2018**)(**Nur & Mawar, 2020**)(**Said, dkk, 2024**)(**Song, dkk, 2022**)(**Suherman & Nur, 2021**). Dalam pengujian desain untuk mendapatkan data, terdapat dua faktor utama yang sangat mempengaruhi peningkatan atau penurunan CT pada GMP. Kedua faktor tersebut adalah kerapatan fluks magnet normal (B_n) dan kerapatan fluks magnet tangensial (B_t) (**Nur & Mawar, 2020**). Kerapatan fluks magnet pada inti stator (B_s) serta kerapatan fluks magnet pada inti rotor (B_r) dapat dikatakan memiliki pengaruh yang kecil atau tidak signifikan terhadap peningkatan nilai CT pada GMP. B_s dan B_r ditampilkan langsung pada tampilan distribusi fluks pada Gambar 5. Berbeda dengan kerapatan fluks magnet inti, kerapatan fluks magnet normal (B_n) dan tangensial (B_t) diperoleh dari celah udara GMP dengan menggunakan garis bantu celah udara (*air gap dummy line*).

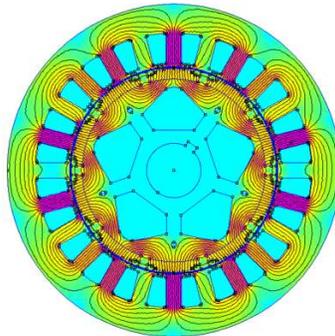
Konstruksi GMP yang dipilih dalam penelitian ini adalah konstruksi dengan 24 alur dan 10 kutub. Gambar 5, 6 dan 7 memperlihatkan GMP dengan sistem coakan pada kedua ujung magnet untuk meminimalkan nilai CT.



Gambar 5. Distribusi Fluks Magnet pada GMP Desain Awal



Gambar 6. Distribusi Fluks Magnet pada GMP dengan satu coakan



Gambar 7. Distribusi Fluks Magnet pada GMP dengan coakan dua tingkat

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Penurunan Torka *Cogging* pada Mesin Magnet Permanen

Untuk mengetahui penurunan Cogging Torque (CT) pada mesin magnet permanen, dilakukan perbandingan antara nilai puncak CT terbesar pada generator magnet permanen (GMP) yang telah dioptimasi dengan nilai CT terbesar pada GMP desain awal. Persentase penurunan CT dinyatakan dalam Persamaan (7) (Ling & Nur, 2016)(Nur & Mawar, 2020)(Suherman & Nur, 2021).

$$CT (\%) = \left(100 \% - \frac{CT_2}{CT_1} \times 100\% \right) \quad (7)$$

Keterangan:

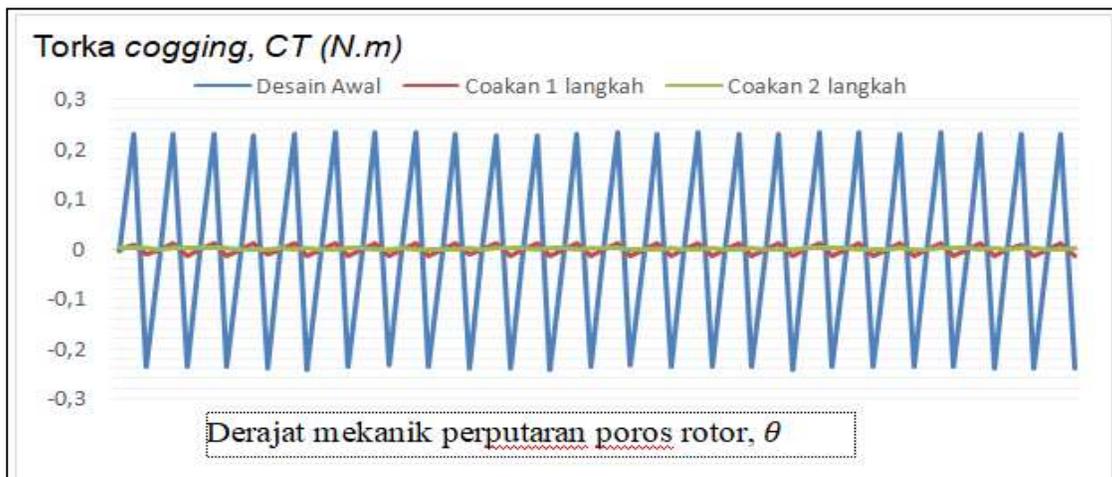
Analisis pengaruh teknik coakan dua langkah terhadap penurunan torka cogging terhadap pergeseran poros pada mesin magnet permanen

CT_1 = Nilai puncak CT desain GMP awal, CT_2 = Nilai puncak CT_2 desain GMP yang dioptimasi.

Berdasarkan hasil analisis Cogging Torque (CT) untuk setiap Generator Magnet Permanen (GMP) yang telah diteliti, nilai CT terbesar pada GMP dengan coakan dua tingkat pada ujung magnet adalah sebesar -0,0006801 N.m. Sementara itu, GMP dengan coakan satu tingkat pada ujung magnet menghasilkan nilai puncak CT sekitar -0,0123968 N.m. GMP desain awal memiliki nilai puncak CT terbesar, yaitu sekitar 0,2395649 N.m. Berdasarkan hasil pengolahan data pengujian CT untuk GMP desain awal, GMP dengan coakan satu tingkat, dan GMP dengan coakan dua tingkat, diperoleh hasil bahwa nilai CT terbesar adalah -0,2395649 N.m untuk GMP desain awal, 0,0123968 N.m untuk GMP dengan satu tingkat coakan, dan 0,0006801 N.m untuk GMP dengan dua tingkat coakan pada ujung magnet. Persentase penurunan CT dari GMP dengan coakan dua tingkat terhadap GMP desain awal dihitung berdasarkan Persamaan (7).

$$CT_{\%} = 10 \% - \left(\frac{0.0006801}{0.2395649} \right) \% = 100 \% - 0.30 \% = 99.70 \%$$

Perbandingan nilai Cogging Torque (CT) dari ketiga konstruksi Generator Magnet Permanen (GMP) yang diteliti diperlihatkan pada Gambar 6. Pada gambar tersebut, terlihat bahwa nilai puncak CT pada desain GMP tanpa coakan sangat besar. Dengan penerapan coakan satu langkah pada kedua ujung magnet rotor, nilai CT menurun secara signifikan. Penurunan nilai puncak CT terbaik diperoleh pada GMP dengan magnet rotor yang memiliki coakan dua langkah. Dengan coakan dua langkah pada ujung-ujung magnet rotor, penurunan nilai CT dapat mencapai 99,70% dibandingkan dengan nilai CT pada GMP konvensional. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini jauh lebih baik dari penelitian sebelumnya untuk struktur fractional slot number 24/10 slot/kutub dengan metode one step slotting sebesar 98,4% (Said, dkk, 2024).



Gambar 8. Torka Cogging ketiga disain GMP

Gambar 8 memperlihatkan perbandingan Torka Cogging (CT) antara tiga desain generator magnet permanen: desain awal, coakan satu langkah, dan coakan dua langkah. Desain awal (biru) menunjukkan fluktuasi torka yang sangat tinggi dan teratur, dengan nilai puncak mendekati $\pm 0,3$ N.m, yang mengindikasikan torka cogging yang besar dan berulang sepanjang rotasi rotor. Torka cogging yang tinggi ini dapat menyebabkan getaran dan ketidakstabilan yang signifikan pada sistem, terutama selama proses *startup*. Dengan penerapan coakan satu

langkah (merah), fluktuasi torka cogging berkurang drastis, dengan amplitudo yang jauh lebih rendah dibandingkan desain awal. Namun, hasil yang paling optimal terlihat pada desain dengan coakan dua langkah (hijau), di mana fluktuasi torka hampir sepenuhnya dihilangkan, dengan amplitudo yang sangat rendah dan hampir mendekati nol. Ini menunjukkan bahwa coakan dua langkah pada magnet rotor adalah metode yang sangat efektif untuk mengurangi torka cogging secara signifikan, meningkatkan stabilitas sistem, dan meminimalkan gangguan mekanis selama operasi generator, yang pada akhirnya akan meningkatkan efisiensi dan umur panjang sistem.

3.2 Pergeseran Poros pada Sumbu -X dan Y pada Mesin Magnet Permanen

Pergeseran poros (Unbalance Magnetic Pull/UMP) pada mesin magnet permanen diakibatkan oleh interaksi antara gaya tangensial (F_t) dan gaya normal (F_n). Setiap kali rotor mesin magnet permanen (MMP) berputar, pada saat yang sama rotor akan bergerak secara horizontal (sumbu-X) dan secara vertikal (sumbu-Y). Pergeseran poros ini dikenal sebagai *Unbalance Magnetic Pull* (UMP). Formulasi yang berkaitan dengan UMP pada sebuah MMP dapat dirumuskan pada Persamaan 8 dan 9 berikut:

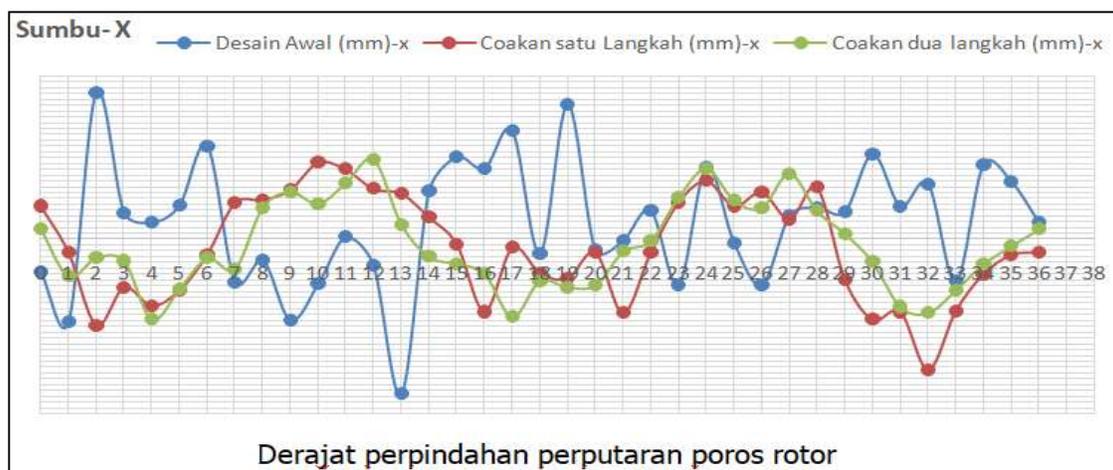
$$F_x = f_r \cos \theta - f_t \sin \theta \quad (8)$$

$$F_y = f_r \sin \theta + f_t \cos \theta \quad (9)$$

Dengan:

- F_x = pergeseran poros ke arah horizontal (newton)
- F_y = pergeseran poros ke arah vertikal (newton)
- f_r = gaya magnet radial (newton)
- f_t = gaya magnet tangensial (newton)
- θ = derajat mekanik perputaran rotor

Pada penelitian ini, pergeseran *Unbalance Magnetic Pull* (UMP) baik terhadap sumbu-X maupun sumbu-Y ditampilkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.

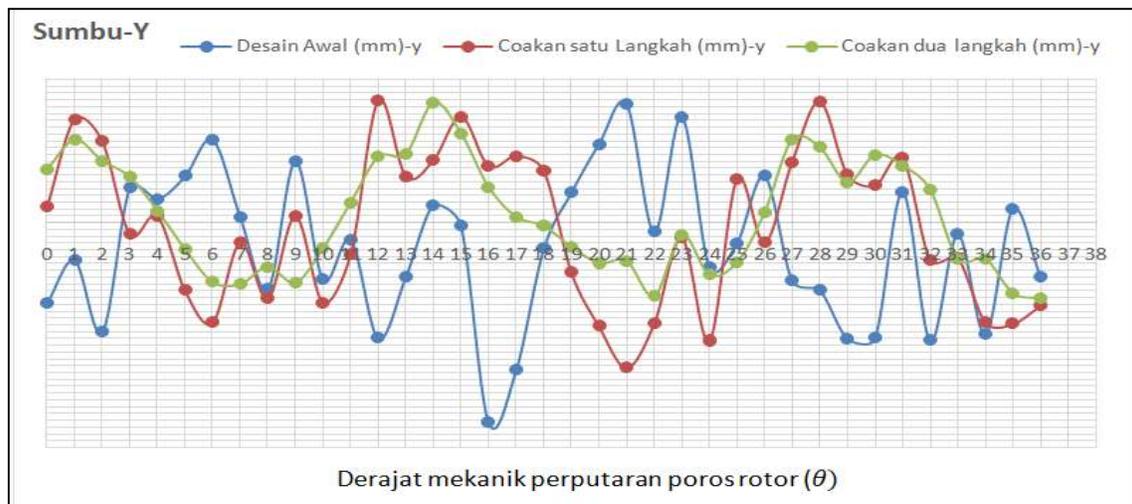


Gambar 9. Perbandingan UMP pada sumbu-X pada ketiga GMP yang ditinjau

Grafik pada gambar 9 ini menunjukkan perbandingan pergeseran poros rotor pada sumbu-X untuk tiga desain generator magnet permanen: desain awal, coakan satu langkah, dan coakan

Analisis pengaruh teknik coakan dua langkah terhadap penurunan torka cogging terhadap pergeseran poros pada mesin magnet permanen

dua langkah. Desain awal (biru) mengalami fluktuasi pergeseran poros yang paling besar, menunjukkan ketidakstabilan yang signifikan selama rotasi. Dengan penerapan coakan satu langkah (merah), terdapat penurunan yang cukup signifikan dalam fluktuasi, yang menandakan peningkatan stabilitas. Namun, coakan dua langkah (hijau) menghasilkan pergeseran poros yang paling stabil, dengan fluktuasi yang paling kecil di antara ketiganya. Ini mengindikasikan bahwa coakan dua langkah secara efektif mengurangi gaya tarik magnet yang tidak seimbang (*Unbalance Magnetic Pull*/UMP), sehingga meminimalkan pergeseran poros dan memberikan stabilitas rotasi yang lebih baik. Hasil ini menunjukkan bahwa coakan dua langkah adalah metode yang paling efektif untuk mengoptimalkan kinerja generator magnet permanen, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan konsistensi rotasi yang tinggi.



Gambar 10. Perbandingan UMP pada sumbu-Y pada ketiga GMP yang ditinjau

Grafik pada gambar 10 ini menunjukkan perbandingan pergeseran poros rotor pada sumbu-Y untuk tiga desain generator magnet permanen: desain awal, coakan satu langkah, dan coakan dua langkah. Desain awal (biru) menunjukkan fluktuasi yang sangat besar dan tidak teratur, menunjukkan ketidakstabilan yang signifikan dalam arah vertikal. Coakan satu langkah (merah) berhasil mengurangi sebagian besar fluktuasi ini, meskipun masih ada beberapa variasi yang cukup tajam. Namun, coakan dua langkah (hijau) menunjukkan hasil yang lebih stabil, dengan fluktuasi yang lebih halus dan konsisten dibandingkan dengan kedua desain lainnya. Ini menandakan bahwa coakan dua langkah lebih efektif dalam mengurangi gaya tarik magnet yang tidak seimbang (*Unbalance Magnetic Pull*/UMP) pada sumbu-Y, yang berpotensi meningkatkan stabilitas keseluruhan dari sistem. Dengan stabilitas yang lebih baik dalam arah vertikal, sistem dengan coakan dua langkah kemungkinan akan mengalami lebih sedikit getaran dan keausan, yang pada akhirnya akan meningkatkan umur dan kinerja generator secara keseluruhan.

4. KESIMPULAN

Pengujian desain PMG dengan teknik coakan dua tingkat pada ujung-ujung magnet dan pengaruhnya terhadap penurunan Torka Cogging (CT) dan *Unbalance Magnetic Pull* (UMP) pada generator magnet permanen (GMP) telah dilakukan dalam penelitian ini. Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode numerik berbasis FEMM 4.2 terhadap tiga desain GMP yang berbeda, diketahui bahwa teknik coakan dua langkah pada ujung-ujung magnet mampu

menurunkan nilai puncak CT secara sangat signifikan, yaitu sebesar 99,70%. Sementara itu, UMP pada GMP dengan sistem coakan dua langkah juga mengalami penurunan sebesar 60% pada sumbu vertikal (sumbu-Y) dan 51% pada sumbu horizontal (sumbu-X) dibandingkan dengan GMP desain awal yang tidak memiliki coakan. Penurunan UMP pada sumbu vertikal dan horizontal ini pada dasarnya dapat diterima, karena GMP dengan sistem fractional slot number memang cenderung memiliki UMP yang besar. Berdasarkan nilai CT pada GMP yang diusulkan, hasil tersebut memenuhi kriteria untuk diaplikasikan pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Dengan performa yang dimiliki oleh GMP dengan coakan dua langkah, desain ini dapat direkomendasikan untuk diaplikasikan pada sistem PLTB.

DAFTAR RUJUKAN

- Ali, Ahmed, Ahmed, Ahmad, & Saied, Basil. (2019). *Cogging torque Mitigation for PMSM using stator slots design and Magnets skewing*.
- Anuja, T. A., Doss, M. Arun Noyal, Senthilkumar, R., Rajesh, K. S., & Brindha, R. (2022). Modification of Pole Pitch and Pole Arc in Rotor Magnets for Cogging Torque Reduction in BLDC Motor. *IEEE Access*, *10*, 116709-116722. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3217233
- Duan, Y., & Zhao, J. (2024, 14-16 June 2024). *Influence of stator auxiliary slot on cogging torque of surface-mounted permanent magnet synchronous motor*. Paper presented at the 2024 5th International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA).
- Hao, Wenjuan, Zhang, Gong, Liu, Wenbo, Liu, Hui, & Wang, Yu. (2023). Methods for Reducing Cogging Force in Permanent Magnet Machines: A Review. *Energies*, *16*(1), 422.
- Hongbo, Qiu, Hu, Kaiqiang, Yu, Wenfei, & Yang, Cunxiang. (2018). Influence of the magnetic pole shape on the cogging torque of permanent magnet synchronous motor. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, *14*, 1-7. doi: 10.1080/1448837X.2018.1463607
- Hosseinpour, Alireza, Rahideh, Akbar, Iqbal, Atif, El-Bayeh, Claude, Flah, Aymen, Ali, Enas, & Ghaly, Ramy. (2024). Calculating torque, back-EMF, inductance, and unbalanced magnetic force for a hybrid electrical vehicle by in-wheel drive application. *Scientific Reports*, *14*. doi: 10.1038/s41598-024-63702-8
- Jia, L., Lin, M., Le, W., Li, N., & Kong, Y. (2020). Dual-Skew Magnet for Cogging Torque Minimization of Axial Flux PMSM With Segmented Stator. *IEEE Transactions on Magnetics*, *56*(2), 1-6. doi: 10.1109/TMAG.2019.2951704
- Joe, Liza, & Nur, Tajuddin. (2020). Study the Effect of Dummy Slot in Stator and Rotor on the Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *807*, 012025. doi: 10.1088/1757-899X/807/1/012025

- Kashani, S. A. Afsari. (2019). Rotor Pole Design of Radial Flux Magnetic Gear for Reduction of Flux Density Harmonics and Cogging Torque. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(8), 1-8. doi: 10.1109/TASC.2019.2951090
- Kushwaha, Amarkumar, & Fernandes, B. (2021). Response Surface Assisted Trust-Region Method for Optimization of Electromagnetic Devices. *IEEE Transactions on Magnetics, PP*, 1-1. doi: 10.1109/TMAG.2021.3063124
- Ling, Jeeng, & Nur, Tajuddin. (2016). Influence of edge slotting of magnet pole with fixed slot opening width on the cogging torque in inset permanent magnet synchronous machine. *Advances in Mechanical Engineering*, 8. doi: 10.1177/1687814016659598
- Luu, Phuong, Lee, Ji-Young, Hwang, Wook, & Woo, Byung-Chul. (2018). *Cogging Torque Reduction Technique by Considering Step-Skew Rotor in Permanent Magnet Synchronous Motor*.
- Meeker, David. (2013). Finite Element Method Magnetics : Manual (Version 4.2). Retrieved from <https://www.femm.info/wiki/Manual>
- Nur, T., & Herlina. (2018, 2-4 Oct. 2018). *Enhancement of Cogging Torque Reduction on Inset Permanent Magnet Generator by Using Magnet Edge Shaping Method*. Paper presented at the 2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS).
- Nur, T., & Herlina. (2019, 2-3 Oct. 2019). *Investigation of the Implement the Shoe Height and Slot Opening Width on Decreasing the Peak of Cogging Torque in PMSG*. Paper presented at the 2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS).
- Nur, Tajuddin, & Mawar, Sri. (2020). Improvement of Cogging Torque Reduction by Combining the Magnet Edge Shaping and Dummy Slot in Stator Core of Fractional Slot Number in Permanent Magnet Machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 807(1), 012023. doi: 10.1088/1757-899X/807/1/012023
- Nur, Tajuddin, Yanstanto, Gustiesar Albarry , Halim, Marchell Morekhai , Mulyadi, Melisa, Hutapea, Duma Kristina Yanti, & De Fretes, Anthon. (2023). Perbandingan Torka Cogging Generator Integral dan Fractional untuk Pembangkit Listrik Tenaga Tenaga Angin. *Elkomika*, 11(3), 581-593. doi: <https://doi.org/10.26760/elkomika.v11i3.581>
- Ocak, O., & Aydin, M. (2020). An Innovative Semi-FEA Based, Variable Magnet-Step-Skew to Minimize Cogging Torque and Torque Pulsations in Permanent Magnet Synchronous Motors. *IEEE Access*, 8, 210775-210783. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038340

- Said, Sri M., Nur, Tajuddin, & Herlina, Herlina. (2024). The Application of Magnet Structures to Reduce the Cogging Torque Associated with Fractional Slot Number in Permanent Magnet Generators. *Energies*, *17*(11). doi:10.3390/en17112505
- Si, Ji, Zhao, Suzhen, Feng, Haichao, Cao, Ruiwu, & Hu, Yihua. (2018). Multi-objective optimization of surface-mounted and interior permanent magnet synchronous motor based on Taguchi method and response surface method. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, *4*, 67-73. doi: 10.23919/cjee.2018.8327373
- Song, Si-Woo, Hong, Min-Ki, Lee, Ju, & Kim, Won-ho. (2022). A Study on Reduction of Cogging Torque and Magnet Usage through Intersect Magnet Consequent Pole Structure. *Energies*, *15*, 9255. doi: 10.3390/en15239255
- Suherman, Yudha, & Nur, Tajuddin. (2021). *Pengaruh Kombinasi Pemangkasan Ujung Magnet Permanen dan Axial Channel pada inti rotor terhadap Torka Cogging pada Generator Tipe Fractional Slot Number*.
- Wan, X., Yang, S., Li, Y., Shi, Y., & Lou, J. (2022). Minimization of Cogging Torque for V-Type IPMSM by the Asymmetric Auxiliary Slots on the Rotor. *IEEE Access*, *10*, 89428-89436. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3201246
- Won, Y. J., Kim, J. H., Park, S. H., Lee, J. H., An, S. M., Kim, D. Y., & Lim, M. S. (2023). Transfer Learning-Based Design Method for Cogging Torque Reduction in PMSM With Step-Skew Considering 3-D Leakage Flux. *IEEE Transactions on Magnetics*, *59*(11), 1-5. doi: 10.1109/TMAG.2023.3294601
- Zhao, Guishu, Hua, Wei, Zhu, Xiaofeng, & Zhang, Gan. (2017). The Influence of Dummy Slots on Stator Surface-Mounted Permanent Magnet Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, *PP*, 1-1. doi: 10.1109/TMAG.2017.2658938