

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi uraian mengenai teori-teori dasar, konsep, dan penelitian terdahulu yang menjadi landasan dalam penyusunan tugas akhir ini. Tinjauan pustaka bertujuan untuk memberikan pemahaman yang mendalam tentang prinsip kerja generator sinkron magnet permanen (GMP), karakteristik torka *cogging*, serta metode-metode reduksi *torka cogging* yang telah dikembangkan oleh peneliti sebelumnya.

2.1 Penelitian yang Relevan

Penelitian relevan berperan penting dalam memberikan dasar teoritis dan memperkuat arah penelitian yang sedang dilakukan. Kajian terhadap penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa upaya pengurangan torka *cogging* pada Generator Magnet Permanen (GMP) telah banyak dikembangkan melalui berbagai pendekatan geometris dan metode optimasi. Diantaranya adalah :

1. Analisis Pengaruh Teknik Coakan Dua Langkah Terhadap Penurunan Torka *Cogging* Terhadap Pergeseran Poros Pada Mesin Magnet Permanen. Penelitian ini dilakukan oleh Lucio A. Correia dari Program Studi Teknik Elektro Universitas Oriental Timor Lorosa'e pada tahun 2024. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa torka *cogging* muncul akibat interaksi antara gaya magnet tangensial pada ujung magnet rotor dan alur stator, yang menyebabkan getaran serta penurunan efisiensi kerja mesin. Generator yang digunakan memiliki konfigurasi 10 kutub magnet dan 24 slot stator. Metode yang diterapkan untuk menurunkan torka *cogging* adalah penerapan teknik coakan dua langkah pada ujung magnet rotor dengan tiga variasi konstruksi magnet rotor, sementara kondisi inti stator dijaga tetap sama. Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2, teknik coakan dua langkah terbukti mampu menurunkan torka *cogging* secara signifikan hingga 99,70% serta mengurangi pergeseran poros sebesar 60% pada arah vertikal dan 51% pada arah horizontal[10].

2. *Enhancement of Cogging torque Reduction on Inset Permanent Magnet Generator by Using Magnet Edge Shaping Method*. Penelitian oleh Tajuddin Nur dan Herlina (2020) mengkaji metode reduksi torka *cogging* pada Inset Permanent Magnet Generator (Inset-PMG) 24 Slot dan 18 Kutub, melalui pendekatan pengubahan geometri, yaitu pengurangan slot opening width serta pembentukan tepi magnet (magnet edge shaping). Analisis dilakukan menggunakan FEMM 4.2 dengan variasi shoe height dan kedalaman shaping pada magnet. Hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi kedua metode tersebut mampu menurunkan nilai torka *cogging* hingga 98%, dari 0.0039818 Nm menjadi 0.0000869 Nm. Penurunan signifikan ini dipicu oleh berkurangnya densitas fluks tangensial pada area airgap akibat perubahan bentuk magnet yang memperlebar kutub magnet (*pole*) arc dan mengurangi interaksi antara magnet dan slot stator. Temuan ini menegaskan bahwa modifikasi geometri rotor–stator merupakan pendekatan yang sangat efektif dalam menekan torka *cogging* pada generator kecepatan rendah[11].
3. Analisis Studi Literatur – Dummy Slot untuk Reduksi Torka *Cogging*, Penelitian yang dilakukan oleh Joe dan Tajuddin Nur (2020) menunjukkan bahwa penggunaan dummy slot pada stator dan rotor memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan torka *cogging* pada permanent magnet machine. Studi ini menganalisis empat tipe struktur rotor–stator menggunakan simulasi FEMM 2D dengan pendekatan Maxwell Stress Tensor. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kombinasi dummy slot pada stator dan metode magnet edge slotting pada rotor (tipe 24 slot/14 A) mampu menurunkan nilai puncak torka *cogging* dari 0.0003716 Nm menjadi 0.0000253 Nm atau sekitar 93.19% dibandingkan struktur awal, dan mencapai 97.17% dibanding tipe bread-loaf magnet. Penurunan ini terjadi akibat berkurangnya tangential flux density (Bt) yang merupakan faktor dominan dalam pembentukan torka *cogging*. Temuan ini memperkuat bahwa modifikasi geometri rotor–stator, termasuk dummy slot, merupakan pendekatan efektif dalam optimasi GMP kecepatan rendah[4].
4. Penelitian yang dilakukan oleh Abduh, Karunanithi, dan Tajuddin Nur (2025) menyoroti upaya penurunan torka *cogging* pada generator magnet permanen (GMP) untuk aplikasi kecepatan angin sangat rendah. Dengan konfigurasi 24 slot stator dan

20 kutub magnet, studi ini mengkaji bagaimana variasi struktur magnet rotor memengaruhi karakteristik torka *cogging* pada GMP tipe *fractional slot number*. Tiga model dibandingkan menggunakan metode elemen hingga melalui FEMM 4.2, yaitu: (1) desain awal tanpa slot, (2) desain *one-step slotting* (OSS) yang dipadukan dengan kutub magnet (*pole*) *arc optimization* (PAO), serta (3) desain *two-step slotting* (TSS) yang juga dikombinasikan dengan PAO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rekayasa geometri pada tepi magnet—khususnya menggunakan TSS dan PAO—secara efektif meningkatkan frekuensi interaksi magnet–stator sekaligus menurunkan amplitudo puncak torka *cogging* hingga mencapai sekitar 99,2–99,3% dibandingkan desain awal. Modifikasi tepi magnet terbukti mampu mengurangi gaya magnet tangensial pada area kritis sehingga torka *cogging* berkurang secara signifikan, tanpa perlu mengubah struktur stator. Temuan ini memperkuat bahwa pendekatan berbasis geometrik pada magnet rotor merupakan strategi reduksi *cogging torque* yang efisien, relevan, dan mudah diimplementasikan dalam pengembangan GMP, terutama pada penelitian dengan konfigurasi slot–kutub serupa[12].

5. *Investigation Cogging torque of PMM with rotor and Stator optimization for renewable energy application* (2022). Pada penelitian yang dilakukan oleh Patia Welly Sirait, Marsul Siregar, Tajuddin Nur, dan Lanny Panjaitan (2022) dari Journal of Physics: Conference Series (IOP Publishing) Penelitian ini membahas *Cogging torque* merupakan torsi parasit yang timbul akibat perubahan reluktansi celah udara selama rotor bergerak terhadap gigi stator, sehingga menghasilkan gaya tarik yang berfluktuasi dan menimbulkan getaran, kebisingan, serta penurunan efisiensi pada generator magnet permanen (GMP). Sejumlah penelitian telah mengembangkan metode reduksi *cogging torque* melalui optimasi struktur rotor maupun stator, seperti pemotongan tepi magnet, variasi slot opening, penggunaan dummy slot, skewing, serta distribusi gigi stator tidak seragam. Studi penelitian menunjukkan bahwa kombinasi teknik pemotongan tepi magnet dan penambahan dummy slot menghasilkan reduksi *cogging torque* yang sangat signifikan, yaitu hingga 99.47% dari struktur awal, dengan penurunan nilai puncak dari 4.21736 Nm menjadi 0.0000165 Nm. Analisis dilakukan menggunakan FEMM 4.2 yang memvisualisasikan distribusi fluks dan saturasi inti sehingga perubahan geometri

dapat dibandingkan secara numerik. Temuan ini menegaskan bahwa optimasi geometri rotor–stator merupakan pendekatan paling efektif untuk menghasilkan GMP ber-*cogging torque* rendah yang cocok digunakan pada sistem energi terbarukan berkecepatan rendah seperti PLTB[13].

6. Penelitian oleh Liza Evelyn Joe dan Tajuddin Nur (2020) ini menganalisis pengaruh penggunaan dummy slot pada inti stator dan rotor terhadap pengurangan torka cogging pada mesin magnet permanen. Dengan menggunakan metode *Finite Element Method Magnetic* (FEMM 2D), empat jenis struktur mesin dianalisis, termasuk variasi desain magnet pada rotor dan penggunaan dummy slot di stator dengan desain 24 magnet 14 slot. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan dummy slot dapat mengurangi torka cogging hingga 97,17% dibandingkan dengan struktur awal, dengan tipe 1 memberikan pengurangan terbesar. Teknik ini menawarkan solusi efektif untuk meningkatkan kinerja mesin dengan mengurangi torka cogging, yang sering menyebabkan getaran dan penurunan efisiensi dalam mesin magnet permanen[4].
7. Penelitian yang dilakukan oleh Herlina Herlina, Tajuddin Nur, Maria A. Kartawidjaja, Linda Wijayanti, Kumala Indriati, dan Sheila Tobing (2023) yang berjudul *Declining Cogging Torque Technique of an Integral Slot Number for Permanent Magnet Machines* ini mengkaji penggunaan metode **Finite Element Method Magnetism (FEMM 4.2)** untuk menganalisis distribusi fluks magnetik dan pengurangan torka cogging pada mesin magnet permanen dengan 24 slot dan 8 kutub. Teknik yang diterapkan dalam penelitian ini mencakup pemotongan dua tahap (TSS) pada tepi magnet dan optimasi arka kutub. Tiga model mesin PMM diuji, yaitu model dasar (tanpa modifikasi), Model 1 (satu tahap pemotongan), dan Model 2 (dua tahap pemotongan pada tepi magnet). Hasil simulasi menunjukkan bahwa Model 2 menghasilkan pengurangan torka cogging yang paling signifikan dengan nilai puncak torka cogging mencapai 0,01 Nm, lebih rendah dibandingkan dengan Model 1 yang mencapai 0,015 Nm dan model dasar yang memiliki torka cogging sebesar 0,02 Nm. Model 2 terbukti lebih efisien dalam mengurangi torka cogging dengan distribusi fluks magnet yang lebih merata.

8. Dalam penelitian oleh Yuandika Nur Pratama dan Tajuddin Nur (2025) ini, dilakukan upaya untuk meningkatkan kinerja generator magnet permanen dengan cara mengurangi torka cogging menggunakan metode pembentukan magnet dan penerapan slot dummy pada stator. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2, dengan desain generator yang terdiri dari 24 slot stator dan 20 kutub magnet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain dengan pembentukan magnet dan slot dummy persegi panjang memberikan pengurangan torka cogging terbesar, mencapai 99,30%, diikuti dengan slot dummy segitiga (92,4%) dan setengah lingkaran (95,5%). Desain yang paling efektif adalah kombinasi pembentukan magnet dan slot dummy persegi panjang, yang berhasil meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem untuk aplikasi pembangkit tenaga angin[9].
9. Tajuddin Nur dan Sri Mawar (2020) dalam penelitiannya mengusulkan teknik pengurangan torka cogging yang baru dengan menggabungkan shaping pada tepi magnet dan penerapan dummy slot pada inti stator. Penelitian ini menggunakan mesin magnet permanen dengan 24 slot stator dan 20 kutub magnet serta dianalisis menggunakan perangkat lunak FEMM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggabungan teknik tersebut mampu mengurangi torka cogging hingga 99,47%, yang mengindikasikan bahwa pendekatan ini sangat efektif untuk meningkatkan efisiensi mesin dengan mengurangi torka cogging secara signifikan dibandingkan dengan struktur awal[14].
10. Marsul Siregar, Karel O. Bachri, Tajuddin Nur, Catherine Olivia Sereati, Liza Evelyn Joe, dan Sandra O.B.W (2020) dalam penelitiannya yang berjudul *Effect of Combination Fractional Slot Number and Slotting Technique on the Cogging Torque in Permanent Magnet Machines* mengkaji pengaruh kombinasi fractional slot number dan pemotongan satu tahap pada tepi magnet untuk mengurangi torka cogging pada generator magnet permanen. Penelitian ini menggunakan mesin dengan 24 slot dan 14 kutub, yang dianalisis menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2. Tiga struktur mesin diuji, termasuk struktur dasar tanpa modifikasi, struktur dengan pemotongan pada tepi magnet, dan struktur yang menggabungkan pemotongan tepi magnet dan slot dummy pada stator. Hasil simulasi menunjukkan

bahwa kombinasi teknik ini mampu mengurangi torka cogging hingga 97,27%, yang menjadikannya metode yang sangat efektif untuk meningkatkan efisiensi mesin[15].

11. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Tajuddin Nur, Ilyas Mansur, Karel Octavianus Bachri, dan Marsul Siregar (2020) berjudul *Study the Combining Magnet Edge Shaping and Dummy Slot on the Performance of PMG for Wind Power Applications*, pengaruh kombinasi shaping pada tepi magnet (MES) dan dummy slot pada inti stator terhadap pengurangan torka cogging pada generator magnet permanen (PMG) untuk aplikasi pembangkit tenaga angin dikaji. Mesin yang digunakan memiliki 24 slot dan 30 kutub, dan analisis dilakukan menggunakan FEMM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik kombinasi MES dan dummy slot pada stator dapat mengurangi torka cogging hingga 99,35% dibandingkan dengan struktur awal, yang menjadikannya teknik yang sangat efektif untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja PMG dalam aplikasi energi terbarukan[7].
12. Penelitian ini disusun oleh Sri Mawar Said, Tajuddin Nur, Herlina dengan judul penelitian *"The Application of Magnet Structures to Reduce the Cogging Torque Associated with Fractional Slot Number in Permanent Magnet Generators"* (2024). mengusulkan desain struktur magnet inovatif melalui kombinasi teknik *two-step slotting* dan *magnet edge shaping* yang dioptimalkan dengan *Response Surface Method* (RSM). Dengan menggunakan metodologi simulasi *2-D Finite Element Method* (FEM), studi ini berhasil membuktikan bahwa modifikasi geometri pada ujung magnet secara drastis mampu menekan fluks magnetik liar yang memicu torsi negatif. Hasil penelitian menunjukkan penurunan *cogging torque* yang sangat signifikan, yakni mencapai 99,41% pada model 24 slot/10 kutub dan 98,8% pada model 18 slot/8 kutub, sekaligus mengurangi rugi arus pusar (*eddy current losses*). Integrasi metode hibrida ini menyimpulkan bahwa pelemahan interaksi gaya tarik antara magnet dan slot stator melalui optimasi bentuk magnet efektif meningkatkan efisiensi operasional, meminimalkan getaran, serta memudahkan proses *start-up* generator, sehingga sangat ideal untuk diaplikasikan pada sistem turbin angin skala kecil.

Tabel ini merangkum penelitian tentang pengurangan torka cogging pada mesin magnet permanen (PMG) menggunakan berbagai metode. Adapun kelebihan dan kekurangannya.

Tabel 2.1 Studi literatur kelebihan dan kekurangan

No	Judul Penelitian	Metode dan Teknik	Hasil	Kelebihan	Kekurangan
1	Analisis Pengaruh Teknik Coakan Dua Langkah Terhadap Penurunan Torka Cogging Terhadap Pergeseran Poros Pada Mesin Magnet Permanen	Coakan dua langkah pada ujung magnet rotor, tiga variasi konstruksi magnet rotor, FEMM 4.2	Menurunkan torka cogging hingga 99,7%, mengurangi pergeseran poros 60% vertikal, 51% horizontal	- Pengurangan torka cogging yang sangat signifikan. - Efektif pada aplikasi kecepatan rendah.	- Memerlukan desain yang kompleks. - Implementasi lebih sulit pada beberapa mesin.
2	Enhancement of Cogging Torque Reduction on Inset PMG	Pengurangan slot opening width, magnet edge shaping, FEMM 4.2	Menurunkan torka cogging 98%, dari 0,0039818 Nm ke 0,0000869 Nm	- Efektif dalam mengurangi interaksi magnet-stator. - Menurunkan torka cogging secara signifikan.	- Memerlukan perangkat lunak simulasi yang akurat. - Meningkatkan waktu dan biaya penelitian.
3	Analisis Studi Literatur – Dummy Slot untuk Reduksi Torka Cogging	Dummy slot pada stator dan rotor, FEMM 2D	Mengurangi torka cogging hingga 97,17%, dari 0,0003716 Nm menjadi 0,0000253 Nm	- Mudah diterapkan tanpa perubahan besar pada rotor. - Teknik yang efisien.	- Meningkatkan kompleksitas desain. - Mungkin tidak cocok untuk semua konfigurasi mesin.
4	Pengurangan Torka Cogging pada Generator Magnet Permanen untuk Aplikasi Kecepatan Angin Sangat Rendah	Two-step slotting (TSS), pole arc optimization (PAO), FEMM 4.2	Menurunkan torka cogging 99,2–99,3%, mengurangi gaya magnet tangensial	- Efektif pada generator kecepatan rendah. - Mengurangi gaya magnet tangensial.	- Memerlukan waktu penelitian yang lama. - Mungkin tidak optimal untuk kecepatan tinggi.

No	Judul Penelitian	Metode dan Teknik	Hasil	Kelebihan	Kekurangan
5	Investigation Cogging Torque of PMM with Rotor and Stator Optimization for Renewable Energy Application	Pemotongan tepi magnet, slot dummy, FEMM 4.2	Mengurangi torka cogging 99,47%, dari 4,21736 Nm menjadi 0,0000165 Nm	- Efisien pada aplikasi energi terbarukan. - Mengurangi torka cogging secara drastis.	- Biaya dan waktu penelitian lebih tinggi. - Memerlukan simulasi komputer yang lebih mendalam.
6	Pengaruh Dummy Slot pada Inti Stator dan Rotor	Dummy slot pada stator dan rotor, FEMM 2D	Mengurangi torka cogging hingga 97,17% dibandingkan dengan struktur awal	- Dapat diterapkan pada desain mesin yang sudah ada. - Teknik sederhana dan efektif.	- Perubahan desain yang cukup rumit. - Keterbatasan pada beberapa jenis mesin.
7	Declining Cogging Torque Technique of an Integral Slot Number for PM Machines	Two-step slotting (TSS), FEMM 4.2	Model 2 (dua tahap pemotongan) mengurangi torka cogging hingga 0,01 Nm	- Menghasilkan distribusi fluks magnet yang lebih merata. - Mengurangi torka cogging secara signifikan.	- Hasil simulasi tidak selalu valid untuk semua kondisi. - Bisa meningkatkan kompleksitas sistem.
8	Upaya Peningkatan Kinerja Generator Magnet Permanen dengan Mengurangi Torka Cogging	Pembentukan magnet, slot dummy, FEMM 4.2	Desain dengan slot dummy persegi panjang mengurangi torka cogging hingga 99,3%	- Efektif meningkatkan efisiensi sistem pembangkit tenaga angin.	- Desain lebih kompleks. - Mungkin membutuhkan teknologi manufaktur yang lebih maju.
9	Penggabungan Shaping pada Tepi Magnet dan Slot Dummy pada Inti Stator	Magnet edge shaping (MES), slot dummy pada stator, FEMM 4.2	Mengurangi torka cogging hingga 99,47%	- Sangat efektif untuk aplikasi energi terbarukan. - Mengurangi torka cogging secara drastis.	- Pengaruh terhadap dimensi dan berat mesin. - Bisa menambah biaya pengembangan.
10	Kombinasi Fractional	Fractional slot number,	Mengurangi torka	- Menggabungkan	- Memerlukan desain dan

No	Judul Penelitian	Metode dan Teknik	Hasil	Kelebihan	Kekurangan
	Slot Number dan Slotting Technique pada Cogging Torque	pemotongan satu tahap, FEMM 4.2	cogging hingga 97,27%	teknik efektif untuk meningkatkan efisiensi mesin.	simulasi yang rumit. - Tidak selalu efektif untuk konfigurasi mesin lain.
11	Magnet Edge Shaping & Dummy Slot untuk PMG	Magnet edge shaping (MES), dummy slot pada stator, FEMM 4.2	Mengurangi torka cogging hingga 99,35%	- Teknik kombinasi yang sangat efektif untuk meningkatkan efisiensi. - Menghasilkan stabilitas sistem yang lebih baik.	- Perubahan besar pada desain rotor dan stator. - Biaya dan waktu yang lebih tinggi untuk pengembangan.
12	Two-Step Slotting & Magnet Edge Shaping (RSM)	Two-step slotting, magnet edge shaping, Response Surface Method, FEM 2D	Menurunkan torka cogging hingga 99,41%, mengurangi eddy current losses	- Efektif untuk turbin angin kecil. - Meminimalkan eddy current losses dan meningkatkan efisiensi operasional.	- Membutuhkan waktu simulasi yang lama. - Desain yang kompleks dan lebih mahal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Energi Kinetik

Energi kinetik adalah energi yang dimiliki oleh suatu objek akibat pergerakannya. Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), energi kinetik berasal dari aliran udara yang bergerak melewati area sapuan sudu turbin. Besarnya energi kinetik udara dipengaruhi oleh massa udara dan kecepatan angin yang mengenainya. Besaran energi kinetik yang dihasilkan oleh aliran udara dihitung menggunakan Persamaan (2.1):

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

dengan:

- E_k adalah energi kinetik (Joule),
- m adalah massa udara (kg),

- v adalah kecepatan angin (m/s).

Karena aliran udara bersifat kontinu, maka dalam analisis PLTB lebih sering digunakan konsep daya angin, yaitu energi kinetik per satuan waktu. Daya angin yang tersedia pada turbin dapat dihitung menggunakan persamaan (2.2):

$$P_{angin} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.2)$$

di mana ρ adalah massa jenis udara dan A merupakan luas penampang sapuan rotor turbin.

2.2.2 Konversi Energi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

PLTB bekerja dengan prinsip mengubah energi kinetik angin menjadi energi listrik melalui beberapa tahapan konversi. Energi kinetik angin pertama-tama diubah menjadi energi mekanik ketika angin memutar sudu turbin. Putaran tersebut kemudian diteruskan ke poros generator sehingga menghasilkan energi listrik. Secara umum, alur konversi energi pada PLTB dapat dinyatakan menggunakan persamaan (2.3):

$$E_{angin} \rightarrow E_{mekanik} \rightarrow E_{listrik} \quad (2.3)$$

Proses konversi energi ini mengikuti hukum kekekalan energi, yang menyatakan bahwa jumlah energi total tetap, namun sebagian energi mengalami kehilangan akibat rugi-rugi aerodinamika, mekanik, dan listrik. Oleh karena itu, tidak seluruh energi angin dapat diubah menjadi energi listrik.

Efisiensi konversi energi pada PLTB dapat dinyatakan pada persamaan (2.4):

$$\eta = \frac{P_{keluaran}}{P_{masukan}} \quad (2.4)$$

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi angin sebagai sumber energi utama untuk menghasilkan listrik. Energi kinetik dari hembusan angin digunakan untuk memutar turbin yang terhubung ke generator, sehingga energi mekanik dari putaran turbin diubah menjadi energi listrik[16]. Cara kerja PLTB dimulai ketika angin bertiup dan mengenai bilah turbin (*blade*), menyebabkan rotor berputar. Putaran rotor ini diteruskan melalui poros utama menuju generator. Di dalam generator, energi mekanik tersebut dikonversi menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian diatur oleh sistem kontrol agar

sesuai dengan standar tegangan sebelum disalurkan ke jaringan listrik. Komponen utama dalam PLTB terdiri atas beberapa bagian penting, yaitu turbin angin yang berfungsi menangkap energi angin, nacelle yang berisi gearbox dan generator, menara (tower) yang menopang turbin pada ketinggian optimal untuk menangkap angin, serta sistem kontrol dan proteksi yang mengatur arah putaran, kecepatan rotor, dan keamanan operasi sistem. Dengan kombinasi komponen-komponen tersebut, PLTB mampu mengubah energi angin yang bersifat fluktuatif menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan masyarakat secara berkelanjutan.

2.2.3 Hukum Betz

Hukum Betz menjelaskan batas teoritis maksimum energi angin yang dapat dikonversi oleh sebuah turbin angin. Menurut teori ini, aliran udara tidak mungkin dihentikan sepenuhnya oleh turbin, sehingga sebagian energi kinetik angin harus tetap tersisa setelah melewati turbin. Besarnya kemampuan turbin dalam menangkap energi angin dinyatakan melalui koefisien daya (C_p), yang dirumuskan pada persamaan (2.5):

$$C_p = \frac{P_{turbin}}{P_{angin}} \quad (2.5)$$

Koefisien Batas Betz adalah pada persamaan (2.6):

$$C_{p,maks} = 0.593 \quad (2.6)$$

Nilai ini menunjukkan bahwa secara teoritis, hanya sekitar 59,3% dari daya angin total yang dapat dimanfaatkan. Dalam kondisi nyata, nilai C_p umumnya lebih rendah karena pengaruh desain turbin dan kondisi lingkungan.

2.2.4 Generator

Generator adalah mesin listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Prinsip ini pertama kali ditemukan oleh Michael Faraday, yang menyatakan bahwa gaya gerak listrik (GGL) akan timbul pada suatu penghantar apabila penghantar tersebut bergerak memotong medan magnet. Proses ini menjadi dasar kerja seluruh jenis generator, baik arus searah (DC generator) maupun arus bolak-balik (AC generator). Sesuai dengan persamaan (2.7) [17]:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.7)$$

Keterangan:

$\mathcal{E}$ = gaya gerak listrik (GGL) induksi (Volt)

Φ = fluks magnet (Weber)

t = waktu (detik)

Tanda minus (−) → sesuai Hukum Lenz (arah GGL menentang perubahan fluks)

Persamaan (1), ini menunjukkan bahwa fluks magnetik yang menembus suatu permukaan tidak hanya dipengaruhi oleh besar medan magnet dan luas bidang, tetapi juga oleh orientasi bidang terhadap arah medan magnet. Ketika medan magnet tegak lurus terhadap permukaan ($\theta = 0^\circ$), nilai $\cos \theta = 1$, sehingga fluks magnetik mencapai nilai maksimum. Sebaliknya, apabila medan magnet sejajar dengan permukaan ($\theta = 90^\circ$), maka $\cos \theta = 0$ dan fluks magnetik yang menembus permukaan menjadi nol.

Fluks magnetik (Φ) merupakan besaran yang menyatakan jumlah garis gaya magnet yang menembus suatu permukaan tertentu. Secara matematis, fluks magnetik dirumuskan sebagai persamaan (2.8)[18]:

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos \theta \quad (2.8)$$

Keterangan:

B = kerapatan fluks magnet (Tesla)

A = luas penampang (m^2)

θ = sudut antara arah medan magnet dan normal bidang

Dalam konteks generator magnet permanen, rumus ini menjelaskan bahwa fluks magnetik yang masuk ke celah udara dan stator sangat dipengaruhi oleh arah medan magnet relatif terhadap permukaan gigi stator. Ketidakteraturan sudut medan magnet akibat geometri magnet dan slot stator menyebabkan fluks magnetik yang menembus stator menjadi tidak seragam. Kondisi ini berkontribusi terhadap variasi reluktansi celah udara dan memicu timbulnya gaya magnetik periodik yang berujung pada torka *cogging*.

Oleh karena itu, optimasi geometri pada generator magnet permanen, seperti pembentukan tepi magnet dan penambahan dummy slot, bertujuan untuk mengendalikan distribusi sudut

medan magnet agar fluks magnetik yang menembus stator menjadi lebih merata. Dengan demikian, fluktuasi fluks magnetik dapat dikurangi tanpa menurunkan nilai fluks utama yang dibutuhkan untuk proses pembangkitan energi listrik.

Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi dapat timbul ketika suatu penghantar bergerak dengan kecepatan tertentu di dalam medan magnet. Fenomena ini dikenal sebagai GGL induksi akibat penghantar bergerak (*motional EMF*) dan dinyatakan dengan persamaan (2.9)[19]:

$$E = b \cdot l \cdot v \quad (2.9)$$

Keterangan :

E = Gaya gerak listrik (GGL) yang diinduksi (Volt)

B = Kerapatan fluks magnet (Weber/m² atau Tesla)

l = Panjang konduktor yang memotong medan magnet (meter)

v = Kecepatan gerak konduktor (meter/detik)

Dimana E adalah GGL induksi (Volt), B adalah densitas fluks magnetik (Tesla), l adalah panjang penghantar yang memotong medan magnet (meter), dan v adalah kecepatan gerak penghantar (m/s). Persamaan ini menunjukkan bahwa besar GGL induksi berbanding lurus dengan kuat medan magnet, panjang penghantar, dan kecepatan gerak penghantar. Dalam konteks generator listrik, pergerakan konduktor akibat putaran rotor menyebabkan penghantar memotong garis-garis medan magnet, sehingga menimbulkan GGL induksi pada penghantar tersebut. Semakin besar kecepatan gerak penghantar atau densitas fluks magnetik, maka GGL induksi yang dihasilkan akan semakin besar.

Pada generator sinkron, khususnya Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), gaya gerak listrik (GGL) yang diinduksikan pada kumparan stator bergantung pada fluks magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen pada rotor serta kecepatan putar medan magnet. Secara matematis, GGL induksi pada generator sinkron dinyatakan oleh persamaan (2.10) [12]:

$$E = 4.44 f N \Phi \quad (2.10)$$

Keterangan:

E = tegangan RMS (Volt)

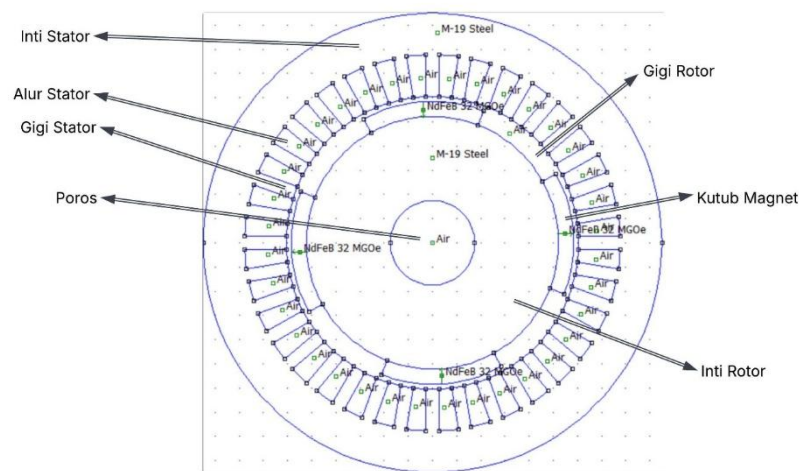
f = frekuensi (Hz)

N = jumlah lilitan

Φ = fluks magnet maksimum (Weber)

Di mana E adalah GGL induksi (Volt), f adalah frekuensi listrik (Hz), N adalah jumlah lilitan kumparan stator, dan Φ adalah fluks magnet per kutub (Weber). Faktor 4.44 merupakan konstanta yang berasal dari asumsi bentuk gelombang fluks magnet sinusoidal serta hubungan antara nilai maksimum dan nilai efektif (RMS) dari GGL yang dihasilkan.

Persamaan ini menunjukkan bahwa besar tegangan induksi pada PMSG berbanding lurus dengan frekuensi, jumlah lilitan, dan fluks magnet yang melintasi kumparan stator. Oleh karena itu, pengendalian fluks magnet dan kecepatan putar rotor menjadi faktor utama dalam menentukan performa tegangan keluaran generator sinkron.



Gambar 2.1 Bagian Generator Magnet Permanen di FEMM 4.2

Generator terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator sebagai bagian diam yang mengandung lilitan untuk menghasilkan medan magnet, dan rotor sebagai bagian berputar yang memotong garis-garis gaya magnet. Energi mekanik untuk memutar rotor biasanya berasal dari turbin air, turbin uap, atau turbin angin seperti pada PLTB.

Pada generator medan elektromagnet, medan magnet dihasilkan oleh arus eksitasi *direct current* (DC) yang dialirkan ke kumparan medan pada rotor sehingga menghasilkan fluks magnet yang memotong kumparan stator dan menimbulkan gaya gerak listrik (GGL)

induksi. Jenis ini memungkinkan pengaturan besar kecilnya tegangan keluaran melalui kontrol arus eksitasi, namun memerlukan sumber daya tambahan, *slip ring*, dan perawatan rutin. Sementara itu, pada generator medan magnet permanen (GMP), medan magnet dihasilkan oleh magnet permanen yang terpasang pada rotor tanpa memerlukan eksitasi eksternal, sehingga desainnya lebih sederhana, efisien, dan minim perawatan. Namun, kelemahannya adalah medan magnet bersifat tetap sehingga tegangan keluaran tergantung pada kecepatan putaran rotor, serta magnet dapat mengalami demagnetisasi akibat suhu tinggi. GMP banyak digunakan pada sistem energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) karena efisiensinya tinggi, bobotnya ringan, dan kemampuannya beroperasi pada kecepatan rendah tanpa memerlukan eksitasi tambahan.

Rumus dasar yang menggambarkan proses induksi elektromagnetik pada generator adalah:

Untuk menentukan kecepatan generator, itu bergantung pada berapa jumlah kutub magnet pada generator, dengan persamaan rumus (2.11)[20]:

$$Ns = 120 \times \frac{f}{p} \quad (2.11)$$

Keterangan :

Ns = Kecepatan sinkron (rpm)

f = frekuensi (Hz)

p = jumlah kutub magnet

Mengetahui kecepatan generator sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap frekuensi listrik, efisiensi kerja, dan kestabilan sistem pembangkit. Kecepatan putaran rotor menentukan frekuensi keluaran listrik berdasarkan jumlah kutub generator, sehingga harus dijaga agar sesuai dengan standar frekuensi seperti 50 Hz[21]. Selain itu, kecepatan juga berhubungan dengan torka dan daya yang dihasilkan, di mana perubahan kecepatan dapat memengaruhi efisiensi serta performa sistem secara keseluruhan. Dalam pembangkit listrik tenaga bayu, data kecepatan generator digunakan untuk menilai kemampuan turbin dalam mengonversi energi angin menjadi energi listrik secara optimal. Dengan demikian, pengukuran kecepatan generator menjadi parameter utama dalam memastikan kinerja generator yang stabil, efisien, dan sesuai kebutuhan sistem.

2.2.5 Rotor

Rotor merupakan bagian mesin listrik yang berputar dan berfungsi sebagai elemen utama dalam proses konversi energi elektromagnetik[22]. Rotor terletak di bagian dalam stator dan dipisahkan oleh celah udara (air-gap). Pada motor listrik, rotor menerima energi listrik dari interaksi medan magnet untuk menghasilkan energi mekanik, sedangkan pada generator, rotor menerima energi mekanik dari penggerak mula untuk menghasilkan energi listrik.

Pada mesin listrik magnet permanen, rotor umumnya dilengkapi dengan magnet permanen yang berfungsi sebagai sumber medan magnet utama. Medan magnet yang dihasilkan rotor membentuk fluks magnetik yang berinteraksi dengan kumparan stator. Interaksi ini memungkinkan terjadinya proses induksi elektromagnetik yang menjadi dasar pembangkitan gaya gerak listrik atau torka elektromagnetik. Secara fisik, rotor dapat dibuat dalam berbagai konfigurasi, seperti rotor magnet permanen permukaan (surface-mounted), rotor magnet tertanam (interior permanent magnet), rotor sangkar, maupun rotor belitan. Pemilihan jenis dan geometri rotor sangat memengaruhi karakteristik medan magnet, kestabilan operasi, dan performa keseluruhan mesin listrik.

2.2.6 Stator

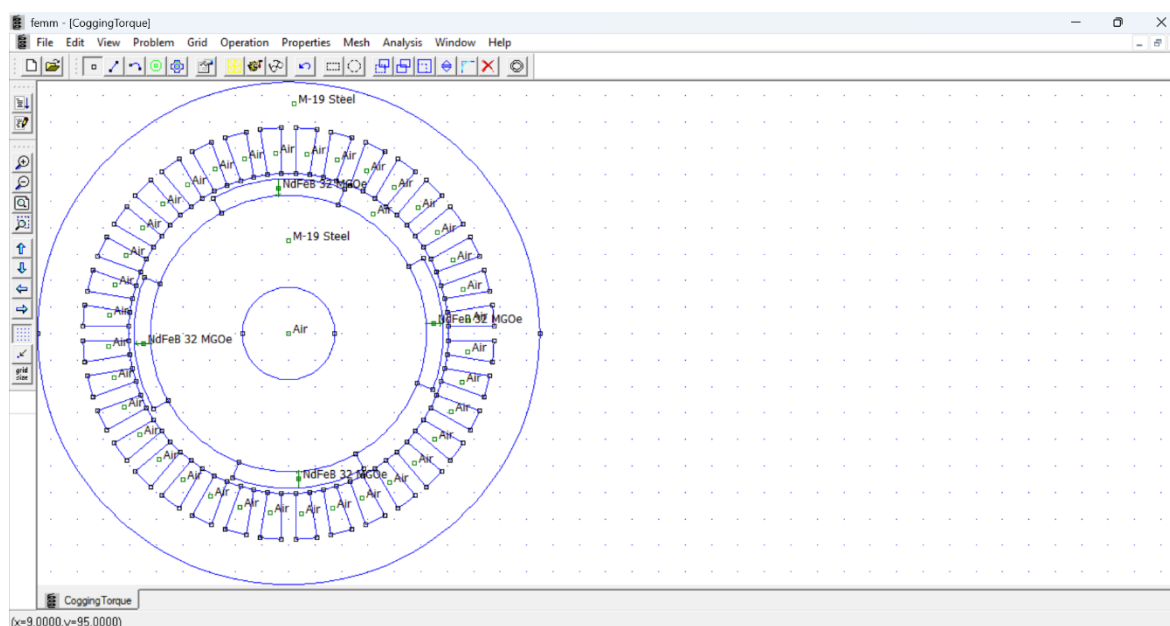
Stator merupakan bagian mesin listrik yang bersifat diam (tidak berputar) dan berfungsi sebagai tempat pembentukan medan magnet utama serta lokasi kumparan listrik. Stator mengelilingi rotor dan dipisahkan oleh celah udara (air-gap). Pada stator inilah terjadi proses utama pembangkitan fluks magnetik yang berinteraksi dengan rotor untuk memungkinkan terjadinya konversi energi elektromagnetik.

Secara umum, stator tersusun atas inti besi feromagnetik berlapis (laminated core) dan kumparan stator (stator winding). Inti besi stator berfungsi sebagai jalur fluks magnetik, sedangkan kumparan stator berfungsi menghasilkan medan magnet ketika dialiri arus listrik atau sebagai tempat timbulnya gaya gerak listrik pada mode generator. Penggunaan laminasi bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi arus eddy dan rugi histeresis.

Pada mesin listrik arus bolak-balik, stator menghasilkan medan magnet berputar (rotating magnetic field) yang kecepatannya bergantung pada frekuensi sumber dan jumlah kutub mesin. Medan magnet berputar inilah yang menjadi dasar sinkronisasi dan transfer energi elektromagnetik antara stator dan rotor.

2.2.7 Finite Element Method Magnetics (FEM 4.2)

Finite Element Method Magnetics (FEMM 4.2) merupakan perangkat lunak analisis berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) yang digunakan untuk mempelajari dan memvisualisasikan fenomena elektromagnetik secara dua dimensi (2D) maupun sumbu simetri (*axisymmetric*)[23][24][25][26]. Seperti pada gambar 2.2 dibawah :



Gambar 2.2 Contoh desain generator di FEMM 4.2

Prinsip dasar dari metode elemen hingga adalah membagi suatu domain atau area analisis menjadi elemen-elemen kecil berbentuk segitiga (mesh) untuk memecahkan persamaan diferensial kompleks seperti persamaan Maxwell secara numerik. Menggunakan metode torka *cogging* di FEMM 4.2 dalam penelitian ini, menggunakan metode *Maxwell Stress Tensor* digunakan untuk menghitung torka *cogging*[10][11][12]. Melalui pendekatan ini, FEMM 4.2 mampu menghitung parameter-parameter elektromagnetik seperti distribusi fluks magnet, kepadatan induksi magnetik (B), intensitas medan magnet (H), gaya magnetik, serta torka elektromagnetik secara akurat. Program ini juga menyediakan visualisasi dalam bentuk kontur warna dan vektor medan, yang memudahkan pengguna untuk memahami karakteristik magnetik suatu sistem atau komponen listrik. Selain itu, FEMM 4.2 dilengkapi dengan pustaka material magnetik yang luas seperti baja silikon, *ferrite*, dan magnet permanen (NdFeB), sehingga dapat digunakan untuk analisis berbagai mesin listrik, transformator, aktuator, maupun perangkat elektromagnetik lainnya. Dengan kemampuannya dalam memodelkan interaksi antara medan magnet dan geometri material,

FEMM 4.2 menjadi salah satu perangkat penting dalam bidang analisis dan perancangan sistem elektromagnetik modern.

Metode FEA pada FEMM sangat efektif untuk menganalisis fenomena yang bersifat nonlinier, seperti saturasi material inti besi, distribusi fluks yang tidak seragam akibat struktur slot, serta interaksi medan magnet antara rotor dan stator[27]. Dengan demikian, FEMM memungkinkan evaluasi pengaruh variasi desain geometri—seperti jumlah slot, bentuk magnet, variasi celah udara, dan *dummy slot* terhadap performa elektromagnetik mesin sebelum dilakukan fabrikasi fisik. Oleh karena itu, FEMM dapat dikatakan sebagai implementasi praktis dari metode *Finite Element Analysis* (FEA) yang secara khusus difokuskan pada analisis medan magnet, sehingga sangat sesuai digunakan dalam penelitian optimasi desain generator atau motor listrik berbasis simulasi numerik.

2.2.8 Mathlab

MATLAB (*Matrix Laboratory*) merupakan perangkat lunak komputasi numerik yang dikembangkan oleh *MathWorks* dan banyak digunakan dalam bidang teknik, sains, serta penelitian untuk melakukan perhitungan matematis, analisis data, dan pemodelan sistem[28][29]. MATLAB menggunakan bahasa pemrograman berbasis matriks yang memudahkan pengguna dalam melakukan operasi numerik, aljabar linier, pemrosesan sinyal, serta analisis hasil simulasi secara efisien. Salah satu keunggulan utama MATLAB adalah kemampuannya dalam visualisasi data melalui pembuatan grafik dua dimensi (2D) maupun tiga dimensi (3D) secara interaktif, sehingga hasil perhitungan atau data eksperimen dapat ditampilkan dalam bentuk kurva, diagram, atau plot dengan tampilan yang jelas dan informatif. Dalam konteks analisis sistem elektromagnetik, MATLAB sering digunakan untuk mengolah hasil perhitungan numerik dari perangkat lunak lain seperti FEMM, kemudian menampilkan hubungan antar variabel seperti torka terhadap sudut, fluks terhadap waktu, atau parameter lain dalam bentuk grafik. Dengan kemampuan visualisasi dan analisis numeriknya, MATLAB menjadi alat bantu penting dalam proses interpretasi data dan penyusunan hasil penelitian secara kuantitatif serta terstruktur.

2.2.9 Medan Magnet dan Distribusi Fluks (B_n dan B_t)

Pada mesin listrik GMP, proses konversi energi elektromagnetik terutama terjadi di celah udara (*air-gap*) antara rotor dan stator[30]. Medan magnet yang dibangkitkan magnet

permanen/arus belitan akan membentuk garis-garis fluks, dan besarnya dinyatakan oleh kepadatan fluks magnet (magnetic flux density) B dengan satuan Tesla (T). Distribusi B di celah udara penting karena menentukan fluks yang mengait kumparan, bentuk gelombang GGL, serta besar-kecilnya gaya/torsi elektromagnetik dan *ripple*[31].

Dalam analisis mesin berputar, vektor B pada celah udara umumnya diuraikan menjadi dua komponen terhadap lintasan pengamatan (misalnya garis melingkar di tengah air-gap):

1. B_n (*Normal Component*)

Komponen kepadatan fluks yang tegak lurus terhadap lintasan/permukaan (sering ekuivalen dengan komponen radial, B_r pada mesin *radial-flux*). Komponen ini biasanya dominan pada kondisi no-load dan sangat terkait dengan besar fluks utama yang menyeberangi celah udara dan masuk ke gigi stator. Pada studi model medan no-load, B_n sering digunakan untuk menilai apakah puncak fluks mendekati saturasi material serta bagaimana bentuk sebaran fluks sepanjang keliling air-gap[32].

2. B_t (*tangential component*)

Komponen kepadatan fluks yang sejajar (tangensial) terhadap lintasan/permukaan (sering ekuivalen dengan B_θ). B_t biasanya lebih kecil dibanding B_n , tetapi sangat penting karena berkontribusi langsung pada gaya geser elektromagnetik di celah udara yang menjadi sumber torsi serta ripple. Pada banyak metode perhitungan torsi berbasis *Maxwell Stress Tensor* (MST), torsi atau tegangan geser berhubungan dengan hasil kali B_n dan B_t , sehingga variasi B_t akibat slotting, fringing, dan perubahan permeansi akan memengaruhi torsi *ripple* dan torka *cogging*[32].

Secara konseptual, tegangan geser elektromagnetik di celah udara, dapat dituliskan bentuk umum pada persamaan (2.12):

$$\tau_t \approx \frac{B_n B_t}{\mu_0} \quad (2.12)$$

dengan:

- τ_t = tegangan geser elektromagnetik (N/m²)
- B_n = komponen fluks normal (T)
- B_t = komponen fluks tangensial (T)

- μ_0 = permeabilitas ruang hampa

dan torsi (untuk mesin 2D *radial-flux*) sering diturunkan dari integral sepanjang keliling *air-gap* (bentuk yang umum dipakai di literatur MST) dinyatakan pada persamaan (2.13):

$$T \propto \int_0^{2\pi} B_n(\theta) B_t(\theta) d\theta \quad (2.13)$$

Artinya:

- Jika B_n bersilasi kuat karena pengaruh slotting (gigi-slot), permeansi efektif berubah periodik $\rightarrow$ timbul gaya tarik yang berubah-ubah.
- Jika pada saat yang sama muncul B_t (akibat distorsi medan, fringing, interaksi magnet-slot), maka hasil kali $B_n B_t$ ikut beriak $\rightarrow$ memunculkan torsi riak termasuk *cogging torque* pada kondisi tanpa arus (*no-load*).

Dalam simulasi berbasis FEM/FEA (misal FEMM atau software lain), B_n dan B_t biasanya diekstraksi dengan mendefinisikan garis/contour pada radius tertentu di tengah *air-gap*, lalu membaca komponen normal dan tangensial terhadap kontur tersebut. Namun perlu diperhatikan bahwa di area ujung gigi/slot opening, medan dapat “tajam” dan secara numerik menimbulkan *error*, sehingga praktik umum untuk evaluasi gaya/torsi adalah mengambil nilai di tengah *air-gap* agar lebih stabil secara numerik.

2.2.10 Torka *Cogging* pada Magnet Permanen

Torka *cogging* adalah torka parasit yang muncul akibat interaksi antara gaya magnet permanen pada rotor dengan variasi reluktansi gigi stator[5][9][11]. Fenomena ini terjadi meskipun tidak ada arus yang mengalir pada kumparan, karena berasal dari ketidakteraturan distribusi fluks magnet di daerah celah udara[33]. Torka *cogging* bersifat periodik dan akan muncul pada sudut mekanis tertentu, sehingga menimbulkan getaran, kebisingan, dan gangguan kehalusan putaran mesin magnet permanen, khususnya pada kecepatan rendah[12][34].

Beberapa faktor utama yang menyebabkan torka *cogging* antara lain:

1. Ketidakkonsistenan reluktansi celah udara akibat bentuk gigi stator dan posisi magnet rotor.

2. Interaksi harmonik antara jumlah slot stator dan kutub magnet rotor.
3. Distribusi fluks yang tidak seragam pada tepi magnet permanen.
4. Perbedaan lebar slot, bentuk gigi stator, dan bentuk magnet yang menyebabkan variasi gaya tarik magnetik.

Fenomena ini bersifat bawaan dari mesin magnet permanen sehingga tidak dapat dihilangkan sepenuhnya, namun dapat diminimalkan melalui rekayasa desain.

Torka *cogging* memberikan efek yang cukup signifikan pada performa, terutama pada aplikasi kecepatan rendah seperti GMP untuk turbin angin. Dampaknya antara lain:

1. Getaran dan noise mekanik meningkat.
2. Kesulitan memulai putaran awal (start-up torque lebih besar).
3. Penurunan kehalusan rotasi (*torque ripple*).
4. Menurunnya efisiensi operasional pada beban rendah.
5. Potensi memperpendek umur bantalan akibat vibrasi.

Oleh sebab itu, reduksi torka *cogging* merupakan parameter penting pada desain generator magnet permanen untuk energi terbarukan.

Torka *cogging* dapat dihitung dari interaksi antara komponen fluks magnet normal dan tangensial di celah udara. Salah satu formulasi umum yang banyak digunakan dalam penelitian dan dianalisis menggunakan metode elemen hingga adalah:

Pada GMP, TC berkaitan erat dengan fluks magnetik (Φ_g) yang melintasi celah udara (R_g). Ketidakteraturan distribusi fluks saat berinteraksi dengan variasi reluktansi celah udara di sepanjang keliling mesin menimbulkan gaya magnetik periodik. Fenomena ini menjadi penyebab utama munculnya TC, yang besarnya ditentukan oleh karakteristik fluks celah udara dan perubahan reluktansi yang terjadi. Dinyatakan pada persamaan (2.14)[10][35].

$$CT = -\frac{1}{2}\Phi_g^2 \frac{dR_g}{d\theta} \quad (2.14)$$

Reluktansi celah udara (R_g) ditentukan oleh jarak antara magnet rotor dan permukaan alur stator. Hubungan reluktansi tersebut, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.14),

selanjutnya dinyatakan kembali dalam bentuk parameter geometris celah udara, dinyatakan pada Persamaan (2.15):

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} \quad (2.15)$$

Keterangan: Φ_g = 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, CT muncul karena ketidakseragaman reluktansi celah udara akibat geometri mesin, dan dapat dikurangi dengan membuat distribusi celah udara dan fluks magnet lebih seragam. celah antara permukaan magnet dan bukaan alur stator memiliki jarak yang seragam pada setiap kutub[13]. Kondisi ini menyebabkan kerapatan fluks magnet tangensial di ujung magnet menjadi maksimum, sehingga menimbulkan gaya tarik magnetik yang signifikan antara ujung magnet dan alur stator. Besaran gaya tersebut, dinyatakan pada Persamaan (2.16):

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} (B_n B_t) \quad (2.16)$$

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

Selain komponen gaya tangensial, magnet juga menghasilkan gaya normal yang bekerja tegak lurus terhadap permukaannya. Gaya ini umumnya terdistribusi pada bagian tengah magnet dan berarah menuju gigi stator. Besaran gaya magnet normal tersebut, dinyatakan pada Persamaan (2.17):

$$F_n = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \quad (2.17)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2.16) ke dalam Persamaan (2.18), diperoleh bentuk komprehensif parameter-parameter yang memengaruhi nilai *cogging* torque. Hubungan tersebut selanjutnya dirumuskan secara lengkap, dinyatakan pada Persamaan (2.18).

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

$$CT = \frac{L_{stk}}{\mu_0} \int_0^{2\pi} r^2 B_n B_t d\theta$$
(2.18)

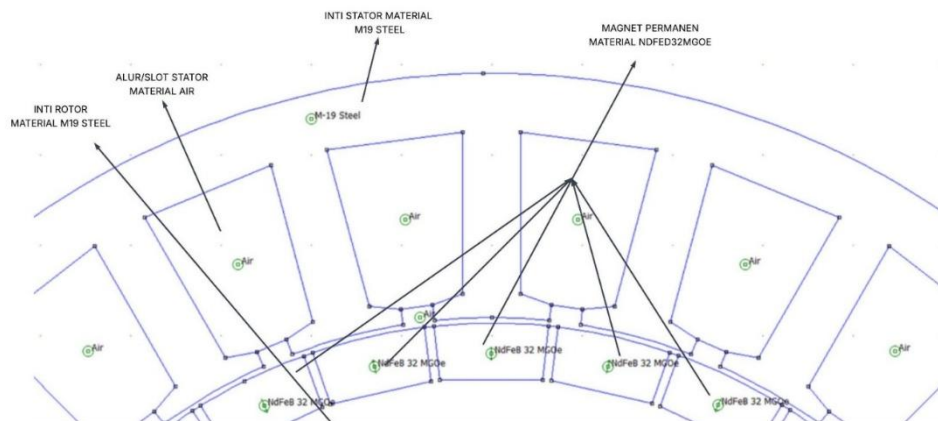
Pada Persamaan (2.18), torka *cogging* dipengaruhi oleh beberapa parameter, yaitu panjang tumpukan mesin, jari-jari pengukuran torka, serta distribusi kerapatan fluks magnet pada celah udara. Namun demikian, faktor yang memberikan kontribusi paling dominan terhadap besarnya torka *cogging* pada mesin magnet permanen adalah komponen kerapatan fluks magnet arah tangensial B_t [4].

Keterangan :

- T_c : torka *cogging* (N.m)
- B_n : densitas fluks komponen normal (T)
- B_t : densitas fluks komponen tangensial (T)
- L_{stk} : panjang tumpukan stator (m)
- r : jari-jari rotor (m)
- μ_0 : permeabilitas ruang hampa

2.2.11 Material dan Karakteristik

1. Material Inti Stator dan Rotor (M19 *Electrical Steel*)



Gambar 2.3 Stator dan rotor pada GMP

Pada gambar 2.3, diatas inti besi menggunakan M19 steel merupakan salah satu jenis baja listrik (*electrical steel*) berorientasi non-silikon yang memiliki permeabilitas magnetik tinggi serta rugi-rugi inti (*core losses*) yang rendah pada frekuensi kerja menengah hingga tinggi. Baja tipe M19 dirancang khusus untuk aplikasi mesin listrik seperti motor, generator, dan transformator, karena kemampuannya dalam menahan fluks magnet yang besar sekaligus menjaga disipasi energi magnetik tetap rendah[36]. Sifat penting dari M19 meliputi nilai saturasi fluks tidak boleh melebihi 1,5 Tesla[12], permeabilitas tinggi, dan resistivitas yang lebih baik dibanding baja karbon biasa, sehingga mampu mengurangi rugi-rugi histeresis dan arus eddy. Pada GMP, penggunaan M19 pada inti stator maupun inti rotor memberikan jalur magnetik yang efisien untuk membawa fluks dari magnet permanen, menjaga kestabilan kinerja mesin, serta mendukung penurunan rugi-rugi elektromagnetik.

Selain itu, pemilihan M19 membantu menjaga kualitas distribusi fluks selama proses optimalisasi desain, terutama saat terjadi variasi bentuk gigi stator, dummy slot, atau pemotongan tepi magnet. Kemampuan material ini untuk tetap bekerja dalam zona non-saturasi (di bawah ± 1.5 Tesla) sangat penting untuk mencegah distorsi harmonisa dan pembentukan torka *cogging* yang berlebihan. Oleh karena itu, M19 merupakan material inti yang sesuai untuk desain GMP dengan kebutuhan densitas fluks yang stabil dan efisien.

2. Material Slot dan Celah Udara (*Airgap*)

Area slot pada stator dan celah udara (*airgap*) di antara rotor dan stator dimodelkan sebagai udara karena udara memiliki permeabilitas mendekati μ_0 , yaitu 4×10^{-7} H/m, sehingga hampir tidak dapat menghantarkan fluks magnetik dibandingkan material ferromagnetik[37]. Kontras antara permeabilitas tinggi inti M19 dan permeabilitas rendah udara menyebabkan reluktansi *airgap* menjadi komponen reluktansi terbesar dalam rangkaian magnetik GMP. Kondisi ini sangat menentukan bentuk jalur fluks, kepadatan fluks pada ujung gigi stator, dan menjadi faktor utama penyebab torka *cogging*, karena perubahan geometri gigi stator dan posisi rotor menyebabkan perubahan reluktansi udara secara periodik[33][38].

Pada desain mesin, pemodelan slot sebagai udara juga berfungsi untuk mensimulasikan area non-ferromagnetik yang tidak membawa fluks, sehingga distribusi

fluks bergerak mengitari gigi stator secara natural mengikuti medan magnet permanen. Kondisi ini menjadi dasar mengapa teknik seperti dummy slot atau perubahan bentuk *slot opening* dapat mempengaruhi densitas fluks dan mengurangi ketidakseragaman fluks yang terfokus, sehingga berkontribusi terhadap reduksi torka *cogging*[10][11] .

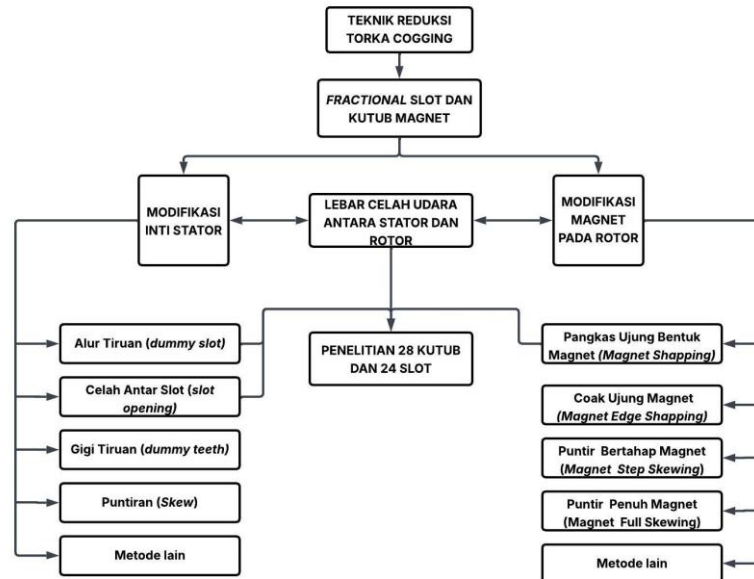
3. Material Magnet Permanen (NdFeB 32 – Neodymium Iron Boron Grade 32)

Magnet NdFeB Grade 32 (Neodymium Iron Boron 32 MGOe) merupakan jenis magnet permanen dengan densitas energi tinggi yang umum digunakan pada GMP karena memiliki nilai remanensi (Br) sekitar 1.1–1.2 Tesla, koefisien koersivitas tinggi, dan kemampuan mempertahankan gaya magnet pada temperatur operasi yang luas. NdFeB 32 memiliki energi produk maksimum sekitar 32 Mega-Gauss Oersted (MGOe), menjadikannya magnet yang efisien untuk menghasilkan fluks tinggi dalam struktur mesin listrik berukuran kompak. Sifat magnet yang kuat ini memungkinkan GMP menghasilkan tegangan induksi besar pada kecepatan rendah, sehingga cocok untuk aplikasi energi terbarukan seperti PLTB.

Dalam konteks reduksi torka *cogging*, magnet NdFeB 32 memiliki karakteristik fluks yang relatif kuat dan tajam pada ujung magnet. Hal ini menyebabkan bentuk geometri magnet (seperti edge shaping, notching, atau pemotongan tepi magnet) sangat berpengaruh terhadap distribusi fluks di airgap. Pada desain Anda, penggunaan NdFeB 32 memberikan fluks tinggi namun tetap dapat dioptimalkan dengan pemotongan tepi magnet sehingga densitas fluks maksimum dapat diturunkan dari 1.5 Tesla menjadi 1.1 Tesla, yang berarti material inti tidak memasuki saturasi dan profil torka *cogging* dapat ditekan dengan lebih efektif.

2.2.12 Teknik Reduksi Torka *Cogging*

Struktur hierarki teknik yang digunakan untuk mereduksi torka *cogging* pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.4[10].



Gambar 2.4 Teknik reduksi CT pada GMP.

1. Modifikasi Inti Stator

Teknik pada sisi stator dilakukan untuk menghaluskan perubahan reluktansi atau membuat pola interaksinya dengan magnet rotor menjadi tidak sinkron. Beberapa metode dalam kategori ini meliputi:

- Gigi tiruan (*dummy teeth*), yaitu menambahkan gigi tambahan kecil agar perubahan reluktansi menjadi lebih acak dan puncak *cogging* torque berkurang.
- Putiran penuh (*full skew*), yaitu memutar seluruh gigi stator sepanjang panjang stack untuk menghilangkan komponen harmonik utama penyebab *cogging*.
- Gigi tidak seragam (*aximetry teeth*), yaitu memodifikasi gigi stator agar tidak simetris sehingga fluks tidak berubah secara bersamaan.
- Alur tiruan (*dummy slot*), yaitu menambah slot buatan untuk memecah pola interaksi slot–magnet yang menyebabkan *cogging* torque.
- Metode lain, termasuk perubahan bentuk tooth-tip, pengaturan slot opening, dan optimasi ukuran celah antar gigi.

2. Modifikasi Magnet Rotor

Kelompok ini berfokus pada perubahan bentuk dan struktur magnet untuk memperhalus distribusi fluks pada celah udara. Ujung magnet merupakan daerah dengan gradien fluks

tertinggi sehingga menjadi sasaran utama modifikasi. Metode yang termasuk kategori ini adalah:

- a. Coak ujung magnet (magnet edge notch), yaitu memberikan coakan pada tepi magnet untuk memecah konsentrasi fluks sehingga nilai *cogging* torque turun signifikan.
- b. Pangkas ujung magnet (Magnet Edge Shaping), yaitu memodifikasi bentuk permukaan magnet, seperti dipangkas miring atau dibulatkan agar pola fluks lebih halus.
- c. Putiran bertahap (step skew), yaitu memberikan skew secara bertingkat agar harmonik *cogging* torque terpecah.
- d. Putiran penuh (full skew), yaitu memutar magnet rotor sepanjang panjang stack untuk menghilangkan harmonik dominan penyebab *cogging*.
- e. Metode lain seperti segmentasi magnet, variasi orientasi magnetisasi, dan penggunaan pola magnetisasi terdistribusi.

Parameter-parameter tersebut merupakan dasar utama dalam upaya reduksi torka *cogging*[39]. Pada penelitian ini, pemilihan desain Fractional Slot Number (FSN) Desain pecahan sangat cocok untuk aplikasi PLTB yang mana efektif dalam menurunkan torka *cogging*, namun dapat menimbulkan sub-harmonisa pada medan elektromagnetik[15][40], dan panjang celah udara dilakukan sejak tahap awal karena kedua faktor tersebut merupakan parameter fundamental yang sangat memengaruhi besar kecilnya torka *cogging*, bahkan sebelum diterapkannya modifikasi geometri lebih lanjut pada struktur mesin. *Fractional slot number* adalah rasio jumlah slot stator terhadap jumlah kutub magnet rotor. Konfigurasi fractional slot seperti 24 slot–28 kutub magnet (*pole*) diketahui menghasilkan *cogging* torque lebih rendah karena tidak terjadi resonansi harmonik antara slot dan kutub.

Panjang celah udara berpengaruh langsung terhadap kekuatan gaya magnet. Semakin kecil celah udara, gaya magnet meningkat sehingga potensi *cogging* torque juga naik. Dengan mengoptimalkan air-gap, fluktuasi gaya magnet dapat diminimalkan. Keseluruhan bagan menunjukkan bahwa reduksi torka *cogging* dapat ditempuh melalui perubahan pada stator, perubahan pada magnet rotor, atau pengaturan kombinasi slot–kutub magnet (*pole*) serta celah udara. Penggabungan beberapa teknik umumnya memberikan hasil reduksi yang lebih baik, dan seluruh pendekatan ini umum dianalisis menggunakan metode elemen hingga seperti FEMM 4.2.