

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Raihan Fadhlurrahman

NIM : 2110314089

Program Studi : Teknik Elektro

dengan ini menyatakan bahwa judul skripsi "ANALISIS DESAIN STATOR PADA MOTOR INDUKSI MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI UNTUK ~~MENINGKATKAN EFISIENSI DAN MENGURANGI RIAK TORSI~~" adalah benar dan bebas plagiarisme dengan skor 14%. Apabila pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.


Jakarta, 13 Januari 2026

Yang menyatakan,



Muhammad Raihan Fadhlurrahman

Pembimbing I



Ir. Ferdyanto S.T., M.T.

Pembimbing II



Luh Krisnawati, S.T., M.T.

ANALISIS DESAIN STATOR PADA MOTOR INDUKSI MENGUNAKAN METODE TAGUCHI UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI DAN MENGURANGI RIAK TORSI

by Muhammad Raihan Fadhlurrahman

Submission date: 30-Dec-2025 02:05PM (UTC+0700)

Submission ID: 2851866358

File name: hammad_Raihan_Fadhlurrahman_-_Muhammad_Raihan_Fadhlurrahman.docx (2.38M)

Word count: 14297

Character count: 86320

**ANALISIS DESAIN STATOR PADA MOTOR INDUKSI
MENGUNAKAN METODE TAGUCHI UNTUK
MENINGKATKAN EFISIENSI DAN MENGURANGI RIAK
TORSI**

Muhammad Raihan Fadhlurrahman

ABSTRAK

Motor induksi tiga fasa banyak digunakan pada aplikasi industri karena keandalannya yang tinggi dan konstruksi yang sederhana. Namun, performa motor induksi masih dipengaruhi oleh parameter desain stator yang dapat menimbulkan riak torsi serta menurunkan efisiensi. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain stator motor induksi tiga fasa guna mengurangi riak torsi dan meningkatkan efisiensi menggunakan metode Taguchi dan Finite Element Analysis (FEA). Variasi parameter desain meliputi geometri slot stator, material inti stator, dan lebar celah udara yang disusun menggunakan orthogonal array L25. Simulasi elektromagnetik dilakukan menggunakan ANSYS RMxpert dan Maxwell 2D. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada desain awal motor memiliki riak torsi sebesar 17.269% dengan efisiensi 86,58%. Setelah dilakukan optimasi, nilai riak torsi berhasil diturunkan sebesar 0.142%, sementara efisiensi meningkat hingga mencapai 89,69%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi metode Taguchi dan FEA mampu menghasilkan desain motor induksi dengan performa yang lebih optimal, khususnya dalam menekan riak torsi dan meningkatkan efisiensi operasional.

Kata kunci: Desain stator; Efisiensi; Finite Element Analysis (FEA); Metode Taguchi; Motor induksi tiga fasa; Riak torsi

Stator Design Analysis of Induction Motors Using the Taguchi Method to Improve Efficiency and Reduce Torque Ripple

Muhammad Raihan Fadhlurrahman

37 ABSTRACT

Three-phase induction motors are widely used in industrial applications due to their high reliability and simple construction. However, motor performance is still affected by stator design parameters, which may cause torque ripple and reduce efficiency. This study aims to optimize the stator design of a three-phase induction motor to reduce torque ripple and improve efficiency using the Taguchi method and Finite Element Analysis (FEA). Design parameters, including stator slot geometry, stator core material, and air-gap length, were arranged using an L25 orthogonal array. Electromagnetic simulations were conducted using ANSYS RMXprt and Maxwell 2D. The simulation results show that the initial motor design exhibited a torque ripple of 17.269% with an efficiency of 86,58%. After optimization, the torque ripple was significantly reduced to approximately 10.142%, while the motor efficiency increased to a maximum value of 89,69%. These results indicate that the integration of the Taguchi method and FEA is effective in producing an optimized induction motor design with lower torque ripple and higher efficiency.

Kata kunci: Finite Element Analysis (FEA); Stator design; Taguchi method; Three-phase induction motor; Torque ripple

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi tiga fasa merupakan tulang punggung sistem penggerak industri modern karena keandalannya yang tinggi dan biaya perawatan yang rendah[1]. Diperkirakan lebih dari 60 % konsumsi listrik di sektor industri berasal dari motor induksi, sehingga peningkatan efisiensi menjadi sangat krusial untuk menekan biaya operasional dan emisi karbon[2]. Selain itu, karakteristik torsi motor, khususnya riak torsi (*torque ripple*), dapat menimbulkan getaran berlebih, kebisingan, serta percepatan keausan mekanis yang menurunkan umur komponen mesin[3]. Penelitian yang pernah dilakukan memodelkan motor induksi secara digital menggunakan *Finite Element Method* (FEM) untuk menganalisis distribusi medan magnet dan torsi, tetapi belum menitikberatkan pada optimasi riak torsi dan efisiensi secara simultan [1].

Riak torsi adalah fenomena variasi periodik torsi akibat ketidaksempurnaan geometri dan harmonisa arus pada motor listrik[3]. Pada motor induksi, struktur aliran fluks yang kompleks membuat reduksi riak torsi lebih menantang dibandingkan motor permanent magnet [4]. Beberapa upaya mitigasi, seperti optimasi geometri rotor, teknik *skewing*, dan penambahan slot rotor, telah diteliti pada penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa variasi geometri pada stator dapat mengurangi riak torsi sebesar 0.6%[5]. Namun, kebanyakan penelitian tersebut belum mengintegrasikan *Taguchi Method* dengan simulasi FEA secara komprehensif khusus pada motor induksi tiga fasa untuk aplikasi industri [6].

Di samping itu, efisiensi energi motor induksi dipengaruhi oleh kerugian besi, kerugian tembaga, dan kerugian mekanis yang dapat mencapai puluhan persen dari total daya input [7]. Berbagai teknik optimasi parameter gulungan dan pemilihan material inti telah diuji menggunakan FEA untuk meminimalkan kerugian-kerugian tersebut [8]. Penelitian sebelumnya menunjukkan peningkatan efisiensi hingga 5 % pada motor satu fasa melalui optimasi FEA kondisi beban penuh[7]. Meskipun demikian, penggunaan desain eksperimen statistika untuk

mengidentifikasi kombinasi parameter optimal dengan percobaan minimal masih jarang diterapkan pada motor induksi industri [6],[8].

Metode Taguchi menawarkan kerangka desain eksperimen robust dengan *orthogonal array* untuk mengevaluasi pengaruh beberapa faktor kontrol secara efisien[9]. Dalam konteks mesin listrik, Taguchi telah diaplikasikan pada optimasi parameter geometri dan material pada motor permanent magnet maupun generator induksi eksitasi sendiri [10]. Keunggulan metode ini terletak pada kemampuannya mengurangi jumlah percobaan hingga 75 % dibandingkan desain percobaan full-factorial, tanpa mengurangi keakuratan hasil [9]. Penelitian yang pernah dilakukan menggunakan Taguchi untuk mengoptimasi *self-excited induction generator*, yang meningkatkan faktor daya dan menurunkan fluktuasi torsi[10].

Finite Element Analysis (FEA) adalah teknik simulasi numerik yang mampu memodelkan fenomena elektromagnetik dengan mempertimbangkan non-linearitas material serta kondisi batas yang kompleks [1]. FEA dapat menghitung distribusi fluks magnet, torsi, dan rugi-rugi energi dalam motor dengan akurasi tinggi untuk berbagai konfigurasi desain [9]. Penelitian sebelumnya menerapkan FEA pada motor induksi linier untuk mempelajari distribusi medan magnet dan mengoptimasi sirkuit magnet utama [4], sementara studi di *Frontiers in Energy Research* menunjukkan penggunaan model reduksi orde berbasis FEA untuk prediksi performa motor traksi secara cepat dan akurat [11]. Integrasi FEA dalam proses desain dapat mengurangi kebutuhan pembuatan prototipe fisik serta mempercepat iterasi desain [1], [10].

Penggabungan metode Taguchi dan FEA memberikan pendekatan hibrida yang memanfaatkan keunggulan simulasi numerik dan desain eksperimen robust[3],[6]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi optimasi Taguchi dan FEA menghasilkan desain motor dengan kinerja mekanik dan listrik yang superior. Namun, aplikasi terintegrasi ini pada motor induksi tiga fasa untuk pengurangan riak torsi dan peningkatan efisiensi pada kondisi industri masih sangat terbatas[6], [9].

Berdasarkan uraian di atas, penelitian skripsi ini bertujuan untuk mengoptimasi parameter desain motor induksi tiga fasa dengan memadukan

Taguchi Method dan simulasi FEA guna mengurangi riak torsi serta meningkatkan efisiensi operasional. Penelitian akan mencakup penentuan faktor desain, penyusunan *orthogonal array* dan simulasi FEA pada variasi parameter.

⁷¹ Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan memberikan pedoman bagi perancang motor industri dalam mengoptimasi desain motor induksi pada industri, sehingga dapat menurunkan biaya pemeliharaan, memperpanjang umur peralatan, serta mendukung upaya efisiensi energi dan keberlanjutan industri.

²⁴ 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penulisan tugas akhir ini ialah:

1. Bagaimana metode Taguchi dapat digunakan untuk mengoptimalkan parameter guna mengurangi torsi ripple dan meningkatkan kinerja motor?
2. Apakah desain stator hasil optimasi menggunakan metode Taguchi dapat meningkatkan performa pada simulasi dibandingkan desain awal?

¹⁷ 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penulisan tugas akhir ini ialah:

1. Mengoptimasi parameter desain stator menggunakan metode Taguchi untuk meminimalkan torsi ripple dan meningkatkan efisiensi.
2. Menganalisis hasil optimasi melalui simulasi Finite Element Analysis (FEA) untuk mendapatkan performa ³ motor induksi 3 fasa.

1.4 Batasan masalah

Adapun Batasan masalah dari penulisan tugas akhir ini ialah:

1. Penelitian ini melakukan analisis pada jenis ³ motor induksi 3 fasa
2. Penelitian ini hanya berfokus pada desain stator motor induksi 3 fasa dan tidak membahas rotor
3. Penelitian ini berfokus pada variabel geometri stator, material inti stator dan lebar celah udara
4. Pengurangan riak torsi dan peningkatan efisiensi menjadi fokus utama penelitian. Dalam penelitian ini hanya terdapat 6 variasi dari parameter yang diubah sebagai variabel bebas dengan 5 level yang berbeda
5. Penelitian ini berfokus pada kondisi motor saat running dan tidak membahas

fenomena motor saat starting

6. Software yang digunakan meliputi ansys maxwell, microsoft word, microsoft excell dan origin
7. Seluruh perhitungan dalam penelitian ini dilakukan secara komputasi menggunakan software

¹⁰**1.5 Sistematika penulisan**

Penelitian ini disusun dan diuraikan dengan sistematika ⁹ sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan permasalahan, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan dasar ilmu yang mendukung dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini.

⁶⁶**BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini dapat diuraikan rancangan alur penelitian berupa prosedur penelitian dengan flowchart, metode penelitian yang digunakan serta peralatan (tools) yang digunakan ³⁵ dalam penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil yang telah didapatkan dalam proses penelitian berupa perhitungan atau pengukuran. Pada bab ini dapat ditampilkan data hasil berupa gambar, grafik serta tabel yang selanjutnya dianalisis sebagai hasil penelitian.

¹⁰**BAB 5 PENUTUP**

Bab ini berisi kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini serta saran untuk pengembangan selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini dilakukan dengan memperhatikan beberapa penelitian terdahulu yang memiliki tema serupa seperti desain motor induksi, optimalisasi desain dan mengurangi nilai riak torsi. Beberapa penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1 dibawah ini:

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu

No.	Penelitian & Referensi	Kelebihan	Kekurangan
1	<i>“Design Optimization of Induction Motors with Different Stator Slot Rotor Bar Combinations Considering Drive Cycle”</i> (Mahmouditabar & Baker, 2024)	<ul style="list-style-type: none">• Metode Taguchi berurutan meminimalkan kombinasi slot-bar yang diuji, mengurangi sampel FEA sampai 75 % tanpa mengurangi akurasi desain• Optimasi multi-objektif di sepanjang siklus NEDC meningkatkan efisiensi rata-rata sebesar 2 %	<ul style="list-style-type: none">• Diterapkan khusus pada motor EV dan spike kombinasi SSRB—kurang fleksibel untuk aplikasi industri umum• Kompleksitas pengolahan data Taguchi berurutan memerlukan keahlian lintas disiplin
2	<i>“Analysis of the Effect of Rotor Slot Type on Torque Ripple in Induction Motors by Finite Element Method“</i>	<ul style="list-style-type: none">• Penelitian ini menggunakan simulasi metode elemen hingga (FEA) secara menyeluruh untuk mengevaluasi pengaruh berbagai	<ul style="list-style-type: none">• fokus utama penelitian ini hanya pada riak torsi, tanpa mempertimbangkan bagaimana perubahan geometri slot juga memengaruhi efisiensi

	(Asım Gökhan YETGİNa, Burhanettin DURMUŞb, 2020)	parameter geometri slot rotor terhadap riak torsi, memberikan hasil kuantitatif yang akurat dan mendalam.	
3	Performance Analysis of Induction Motor Based on Core Material – Challoop, Sultan & Bonneya (2021)	<ul style="list-style-type: none"> • Menguji 5 material inti motor via FEA untuk efisiensi & torsi. Hasil: Nickel-Iron terbaik (torsi 37,5 Nm; efisiensi 91,1%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulasi 2D statis; tidak meninjau kondisi dinamis seperti riak torsi saat beban berubah.
4	Wang P. et al., 2021 “Multi-Objective Optimization Design and Analysis on 2DoF Direct Drive Induction Motor Rotary Part”	<ul style="list-style-type: none"> • Taguchi robust design meminimalkan torque ripple 20 %–30 % pada motor 2DoF, divergen dengan FEA 3D validasi • Peningkatan efisiensi operasional hingga 2 % dalam rentang kecepatan tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • Spesifik untuk motor 2DoF—bukan motor induksi tiga-fase konvensional • Model 3D FEA memerlukan perangkat lunak dan waktu komputasi tinggi
5	⁴⁶ Analisa Efisiensi Motor Induksi 3 Phasa Hasil Rewinding dengan Pemodelan FEM – Susilo dkk. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan FEA untuk membandingkan efisiensi motor 3-fasa sebelum dan sesudah rewinding dengan variasi diameter kawat. • Menemukan perbedaan efisiensi pengujian (~2%) dan nilai efisiensi simulasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Hanya simulasi (tidak ada uji eksperimen); hasil efisiensi simulasi relatif rendah (18–20%). - Tidak meneliti aspek riak torsi.

		(kawat 0,75mm ~20%).	
6	⁵⁶ Performance Analysis of Induction Motor with Variable Air-Gaps – Onwuka dkk. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • Memvariasikan ³⁹ celah udara (0.3 mm, 0.5 mm, 1.0 mm) dan menghitung nilai torsi, efisiensi, serta riak torsi menggunakan FEM. • Dapat membandingkan performa motor pada berbagai konfigurasi gap berbeda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hanya membandingkan tiga variasi celah udara; tidak mempertimbangkan kondisi dinamis motor.
7	⁴ Design of Energy-Efficient Induction Motor using ANSYS software – Aishwarya & Brisilla (2022)	<ul style="list-style-type: none"> • Memilih material inti besi dan kawat kumparan yang optimal untuk motor EV, analisis kinerja dengan ANSYS Maxwell (FEA). • Meliputi analisis kondisi sehat dan fault untuk memastikan desain efektif; berfokus pada efisiensi tinggi dan torsi besar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hanya berbasis simulasi (ANSYS), tanpa eksperimen fisik. - Tidak mengeksplisitkan analisis riak torsi.

Berdasarkan tinjauan dari berbagai penelitian sebelumnya, penulis melakukan optimalisasi desain stator ³⁰ pada motor induksi tiga fasa tipe sangkar tupai dengan tujuan untuk mengurangi riak torsi serta meningkatkan efisiensi saat motor beroperasi. Dalam pemilihan parameter modifikasi, penelitian ini menggunakan tiga variabel utama, yaitu bentuk geometri slot stator, jenis material inti stator, dan

lebar celah udara, di mana masing-masing variabel memiliki lima tingkat variasi.

Proses perancangan dan optimalisasi dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak Ansys Electronics Desktop yang berbasis metode elemen hingga (finite element method). Selain itu, proses optimalisasi juga didukung oleh analisis statistik menggunakan pendekatan metode Taguchi.

2.2 Motor Induksi

Motor induksi merupakan salah satu jenis motor listrik yang menggunakan sumber arus bolak-balik (alternating current/AC) sebagai penggerakannya. Prinsip kerja motor ini didasarkan pada fenomena induksi elektromagnetik, di mana arus listrik pada rotor dihasilkan melalui proses induksi dari medan magnet yang berputar pada stator. Karakteristik unik dari motor induksi adalah adanya perbedaan kecepatan antara putaran rotor dengan kecepatan medan putar stator, fenomena ini dikenal dengan istilah slip. Slip didefinisikan sebagai selisih antara kecepatan sinkron (kecepatan medan stator) dengan kecepatan aktual rotor, yang dinyatakan dalam persentase terhadap kecepatan sinkron [12].

Dalam aplikasinya, motor induksi memiliki peran yang sangat penting dalam berbagai aspek kehidupan modern. Untuk kebutuhan rumah tangga dan penggunaan skala kecil, umumnya digunakan motor induksi satu fasa yang memiliki daya relatif rendah. Contoh penerapannya meliputi berbagai peralatan elektronik rumah tangga seperti kipas angin untuk sirkulasi udara, mesin cuci untuk mencuci pakaian, serta pompa air untuk keperluan irigasi atau penyediaan air bersih. Sementara itu, untuk kebutuhan industri yang memerlukan daya lebih besar dan kinerja lebih tinggi, digunakan motor induksi tiga fasa yang memiliki efisiensi lebih baik dan kemampuan menangani beban yang lebih berat. Gambar 2.1 menunjukkan contoh implementasi motor induksi tiga fasa dalam industri.



Gambar 2.1 Motor pompa pendingin sentrifugal

2.3 ¹ Klasifikasi Motor Induksi

Motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi 2 yaitu motor induksi satu fasa dan motor induksi tiga fasa.

2.3.1 ¹ Motor Induksi Satu Fasa

Motor induksi satu fasa adalah motor listrik yang menggunakan sumber energi listrik satu fasa untuk mengoperasikannya [13]. Pada bagian motor induksi satu fasa terdapat satu gulungan stator dengan rotor sangkar tupai dan memerlukan alat tambahan seperti saklar untuk menghidupkannya. Motor jenis ini banyak digunakan dalam lingkup kecil seperti pemakaian rumah tangga karena kapasitas yang kecil berkisar 3 sampai 4 Hp.

2.3.2 Motor induksi tiga fasa

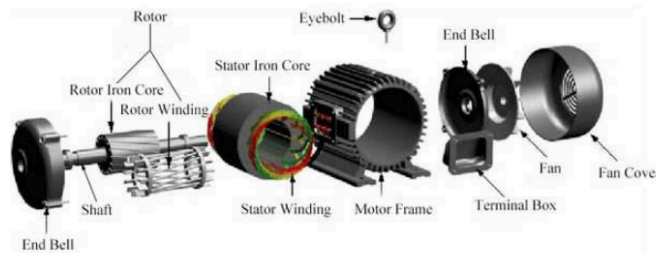
Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu motor listrik yang sering digunakan dalam dunia industri. Hal ini karena motor induksi tiga fasa dapat menghasilkan kapasitas lebih besar daripada motor induksi satu fasa. Motor induksi mempunyai medan magnet yang berputar yang dihasilkan oleh sumber energi listrik tiga fasa dan memiliki daya yang tinggi.

Kelebihan dari motor induksi tiga fasa adalah harganya yang ekonomis, menggunakan konstruksi yang kuat dan mempunyai efisiensi yang tinggi [14].

Sedangkan untuk kekurangan motor induksi tiga fasa adalah kecepatan putar motor bergantung pada beban dan arus starting tinggi [15].

2.4 ¹ Konstruksi Motor Induksi

Motor induksi terdiri dari bagian utama yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian yang tidak bergerak dari motor induksi, sedangkan rotor adalah bagian yang berputar [16]. Penjelasan tentang konstruksi motor induksi diperlihatkan pada Gambar 2.2.



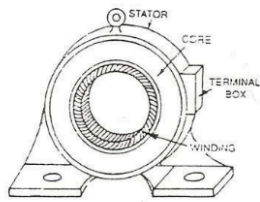
Gambar 2.2 Konstruksi motor induksi

¹ 1. Stator

Stator merupakan bagian motor listrik yang berfungsi sebagai stasioner dari sistem rotor. Penempatan stator biasanya mengelilingi rotor [17]. Bagian utama pada stator adalah rangka luar, inti stator dan belitan stator.

a. Rangka luar

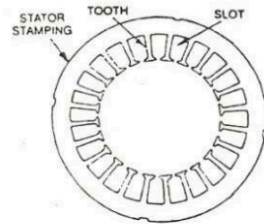
Rangka luar berfungsi untuk mendukung inti stator serta melindungi bagian dari dalam. Pada motor listrik dengan kapasitas kecil, rangka luar atau *outer frame* dibuat dengan cara dicor. Gambar 2.3 menunjukkan konstruksi stator.



Gambar 2.3 Konstruksi stator

1
b. Inti stator

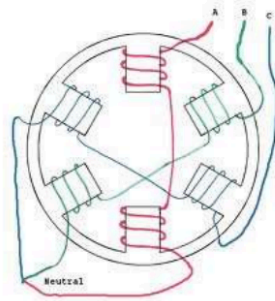
Inti stator terbuat dari bahan baja dengan dilapisi silikon yang berfungsi untuk membawa medan magnet bolak-balik yang menghasilkan histeresis dan arus eddy. Pada bingkai stator dipasang stempel yang terbuat dengan lapisan pernis tipis. Ketebalan yang digunakan bervariasi dari 0,3 mm sampai dengan 0,5 mm. Gambar 2.4 menunjukkan inti stator.



Gambar 2.4 Inti stator

c. Belitan Stator

Pada bagian inti stator terdapat belitan yang biasanya menggunakan sumber energi listrik tiga fasa. Terdapat 6 terminal belitan dengan 2 belitan pada tiap fasa yang terhubung dengan terminal motor. Semakin besar kutub dari motor listrik, maka semakin berkurang dari kecepatan motor tersebut. Gambar 2.5 menunjukkan belitan stator.



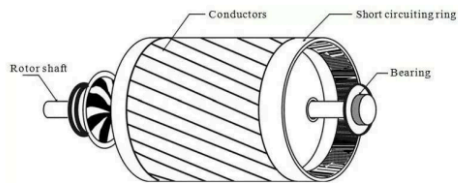
Gambar 2.5 Belitan stator

2. Rotor

Rotor terbuat dari bahan laminasi baja dengan inti silinder dipasang langsung dengan poros. Terdapat 2 jenis rotor yaitu rotor sangkar tupai dan *wound rotor*.

a. Rotor squirrel cage

Rotor *squirrel cage* terdiri dari satu set batang penghantar tembaga atau aluminium yang diletakkan dalam alur slot paralel. Batang-batang tersebut dihubungkan pendek pada kedua ujungnya dengan cincin hubungan pendek [16]. Gambar 2.6 menunjukkan rotor *squirrel cage*.

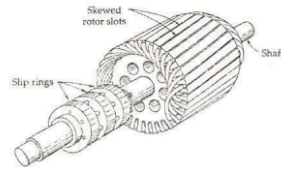


Gambar 2.6 Rotor *squirrel cage* pada motor induksi

b. Wound Rotor

Wound rotor memiliki gulungan tipe fase, lapisan ganda dan terdistribusi secara merata. Konstruksi dibuat melingkar sebanyak kutub stator. Tiga fasa digulungi kawat pada bagian dalamnya dan ujung yang lainnya

dihubungkan ke cincin kecil yang dipasang pada batang as dengan sikat yang menempel [16]. Gambar 2.7 merupakan *wound rotor*.



Gambar 2.7 *Wound rotor* Pada motor induksi

2.5 Prinsip Kerja Motor Induksi

Prinsip kerja motor induksi 3 fasa berdasarkan pada Hukum Lorentz dan Hukum Faraday. Hukum Lorentz adalah perubahan magnetik akan menimbulkan gaya. Sedangkan Hukum Faraday adalah tegangan induksi akan ditimbulkan oleh perubahan induksi magnetik pada suatu lilitan[12].

1. Tegangan induksi pada konduktor disebabkan oleh konduktor yang dipotong oleh medan magnet (Hukum Faraday).
2. Konduktor yang dihubungkan menjadi satu, menghasilkan tegangan induksi yang mengalir dari konduktor ke konduktor lainnya.
3. Berdasarkan Hukum Lorentz ketika arus berada diantara medan magnet maka akan menghasilkan gaya.
4. Konduktor akan ditarik oleh gaya untuk bergerak sepanjang medan magnetik.

Kecepatan dari motor induksi tiga fasa sangat tergantung pada frekuensi sumber tegangan dan jumlah kutub pada stator. Dirumuskan sebagai berikut :

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad (2.1)$$

dimana :

N_s = kecepatan sinkron (rpm)

f = frekuensi (hz)

P = jumlah kutub

Tegangan yang diinduksi pada rotor motor induksi ditentukan oleh kecepatan relatif rotor terhadap medan magnet yang dihasilkan oleh stator. Dalam pengoperasiannya, kecepatan rotor tidak identik dengan kecepatan medan magnet stator. Selisih antara kedua kecepatan tersebut dikenal sebagai *slip*, yang nilainya akan bertambah seiring dengan meningkatnya beban kerja [18]. Besarnya slip dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \quad (2.2)$$

Dimana :

S = Slip (%)

n_s = kecepatan sinkron (rpm)

n_r = kecepatan motor (rpm)

2.6 Efisiensi Motor Induksi

Efisiensi motor induksi merupakan hasil dari perbandingan antara daya output yang dihasilkan oleh motor induksi terhadap daya input yang dibutuhkan oleh motor tersebut. Semakin besar hasil dari presentase perbandingan yang dinyatakan dalam bentuk persen (%) maka semakin baik hasil dari efisiensi motor yang digunakan [12]. Nilai efisiensi dapat dihitung dengan persamaan 2.3.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Dimana :

η = efisiensi (%)

P_{out} = daya keluaran motor (W)

P_{in} = daya masukan (W)

Daya *output* pada motor induksi berupa daya mekanik yang dapat dicari nilainya menggunakan persamaan 2.4.

$$P_{out} = \omega \times T \quad (2.4)$$

Dimana :

P_{out} = Daya Keluaran Motor (W)⁵⁷

ω = Kecepatan sudut (rad/s)

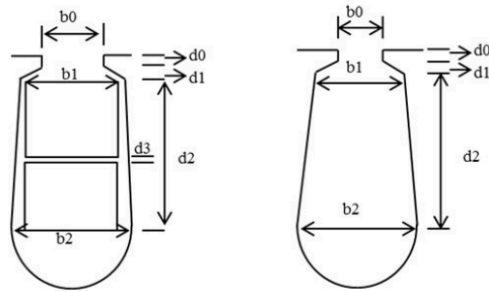
T = Torsi (Nm)

2.7 Pengurangan Nilai Riak Torsi dan peningkatan efisiensi

²⁵ Motor induksi tiga fasa merupakan salah satu jenis mesin listrik yang paling banyak digunakan dalam industri karena keandalannya, struktur sederhana, serta biaya perawatan yang rendah. Namun demikian, tantangan dalam optimalisasi performa motor induksi, seperti riak torsi (*torque ripple*) dan efisiensi masih menjadi fokus penting dalam penelitian dan pengembangan. ⁶² Salah satu pendekatan untuk mengatasi kedua permasalahan tersebut adalah melalui modifikasi desain dengan mengubah parameter geometri stator, jenis material inti, serta lebar celah udara.

1. Geometri Stator

Riak torsi pada motor induksi terjadi akibat fluktuasi induktansi pada celah udara yang berubah sesuai dengan posisi rotor, disebabkan oleh bentuk geometri slot stator dan rotor. Ketidakteraturan ini menyebabkan medan magnet tidak merata, sehingga menghasilkan harmonisa pada fluks magnetik yang memunculkan osilasi torsi selama rotasi. Perubahan geometri seperti tinggi slot, lebar mulut slot, dan bentuk ujung slot sangat memengaruhi besarnya harmonisa tersebut. Slot yang lebih dalam atau berbentuk melingkar, misalnya, cenderung meningkatkan fluktuasi medan magnet di celah udara dan memperbesar amplitudo riak torsi. Dengan demikian, pengendalian parameter geometri menjadi kunci dalam mengurangi riak torsi dan meningkatkan kestabilan torsi keluaran motor[5]. Gambar 2.8 menunjukkan geometri slot stator.



Gambar 2.8 Bentuk slot stator

Parameter b dan d pada gambar merepresentasikan dimensi utama geometri slot stator motor listrik, di mana parameter b menyatakan ukuran lebar slot pada arah horizontal, sedangkan parameter d menyatakan ukuran kedalaman atau tinggi slot pada arah vertikal. Parameter b terdiri dari b_0 yang menunjukkan lebar mulut slot pada bagian atas, b_1 yang merupakan lebar slot pada bagian leher atau bagian tengah, serta b_2 yang menunjukkan lebar slot pada bagian bawah. Sementara itu, parameter d terdiri dari d_0 yang menyatakan tinggi mulut slot, d_1 yang menunjukkan tinggi leher slot, dan d_2 yang merepresentasikan kedalaman total slot dari permukaan stator hingga dasar slot. Keseluruhan parameter ini digunakan untuk mendefinisikan bentuk dan ukuran slot stator secara geometris dalam proses perancangan dan pemodelan motor listrik.

2. Jenis material inti

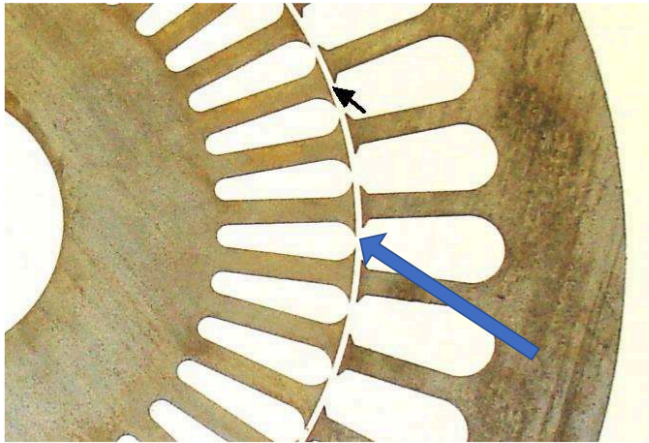
Pemilihan material inti pada stator dan rotor sangat krusial dalam mengurangi kerugian histeresis dan kerugian eddy current, yang merupakan komponen utama dari kerugian inti (core loss). Penggunaan material dengan nilai kerugian rendah seperti silicon steel atau bahkan material amorf dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi motor.

Selain efisiensi, sifat magnetik dari material inti, seperti saturasi fluks dan permeabilitas, mempengaruhi distribusi fluks di celah udara. Distribusi fluks yang merata akan mengurangi fluktuasi gaya tarik-menarik magnetik, sehingga riak torsi juga menurun[19]

3. Lebar celah udara

Lebar celah udara antara stator dan rotor juga memiliki pengaruh besar terhadap gaya tarik magnetik, efisiensi, dan riak torsi. Celah udara yang terlalu sempit dapat meningkatkan gaya tarik yang tidak merata dan menyebabkan peningkatan riak torsi, sedangkan celah udara yang terlalu besar akan menurunkan permeabilitas magnetik total, menyebabkan peningkatan arus magnetisasi dan menurunkan efisiensi.

Desain yang optimal harus mempertimbangkan kompromi antara gaya magnetik yang stabil dan minimnya kebutuhan arus magnetisasi, sehingga didapatkan kinerja motor yang seimbang antara riak torsi rendah dan efisiensi tinggi[20]. Gambar 2.9 menunjukkan lebar celah udara pada stator dan rotor



Gambar 2.9 Gambaran celah udara stator dan rotor

2.8 ³⁶ Finite Element Analysis (FEA)

Finite element analysis (FEA) merupakan metode numerik yang banyak digunakan untuk memodelkan perilaku elektromagnetik motor induksi dengan cara membagi geometri mesin menjadi elemen-elemen diskrit dan menyelesaikan persamaan Maxwell pada setiap elemen. Dengan memasukkan sifat material inti besi dan konduktor serta kondisi batas yang sesuai, FEA mampu menghasilkan distribusi induksi magnetik, perhitungan torsi elektromagnetik, serta estimasi rugi-

rugi besi dan *eddy current* secara detail hingga mempertimbangkan efek kejenuhan material dan kulit arus (*skin effect*) [21].

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.6)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.8)$$

Dimana :

H = intensitas medan magnetik

J = densitas arus listrik.

D = medan pergeseran listrik

B = densitas fluks magnetik

E = intensitas medan listrik

ρ = Rapat muatan listrik

Selain itu, prosedur FEA modern sering dikombinasikan dengan model rangkaian ekuivalen seperti pendekatan *inverse* untuk mengurangi waktu komputasi pada analisis domain waktu dan tetap menjaga akurasi perhitungan kinerja motor. Lebih lanjut, FEA juga dapat digunakan untuk mengevaluasi ketidakpastian efisiensi motor dengan memodelkan perubahan resistansi kumparan akibat suhu dan komponen rugi lain, sehingga meningkatkan keandalan prediksi performa mesin induksi tiga fasa[22].

2.9 Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk memodifikasi desain suatu sistem guna memperoleh hasil yang optimal. Teknik ini berfokus pada optimalisasi desain dengan tujuan mengurangi variasi kinerja yang disebabkan oleh faktor-faktor luar yang tidak dapat dikendalikan secara langsung. Dengan menggunakan metode Taguchi, kebutuhan akan pengendalian kualitas

secara langsung (*online*) dapat diminimalkan karena metode ini mampu menekan variabilitas dalam kinerja dan proses produk. Alhasil, produk menjadi lebih tahan terhadap gangguan atau kebisingan, seperti variasi yang tidak dapat dikendalikan selama proses produksi atau saat digunakan[23].

Penerapan metode Taguchi dalam merancang desain yang tangguh terdiri dari tiga tahapan utama. Pertama, menentukan karakteristik kinerja yang akan dioptimalkan, memilih faktor kontrol yang dapat disesuaikan dalam proses optimasi, serta mengidentifikasi faktor-faktor kebisingan. Kedua, merancang dan melaksanakan eksperimen menggunakan *orthogonal array* untuk memperoleh data mengenai kinerja produk. Ketiga, melakukan analisis menggunakan metode rata-rata (ANOM) dan analisis varians (ANOVA) guna menentukan konfigurasi parameter yang paling optimal bagi desain yang tahan terhadap gangguan. Analisis ANOM digunakan untuk mengidentifikasi kombinasi level yang memberikan hasil kinerja terbaik, sedangkan ANOVA ²⁷ digunakan untuk mengetahui faktor mana yang memiliki pengaruh signifikan terhadap ²⁶ rasio sinyal terhadap gangguan (*signal-to-noise ratio* atau SNR). Setelah itu, perlu dilakukan tahap verifikasi guna memastikan ketahanan dan keandalan desain yang telah dihasilkan[23].

2.9.1 Analysis of mean

Untuk mengevaluasi pengaruh berbagai faktor pada tingkat atau level yang berbeda terhadap performa motor, metode Taguchi digunakan dengan mengandalkan analisis statistik rata-rata. Optimasi dilakukan melalui kombinasi *orthogonal array* dan hasil simulasi dari analisis elemen hingga (FEM). Nilai rata-rata untuk masing-masing kombinasi level faktor dihitung menggunakan pendekatan statistik berikut.

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.9)$$

Dimana :

M = Nilai rata-rata (Mean)

n = Banyak data

i = Data ke i

2.9.2 Analysis of variance

Analisis varians (ANOVA) merupakan metode statistik yang digunakan untuk membandingkan variabilitas rata-rata antar kelompok yang berbeda. Metode ini sering diterapkan untuk mengidentifikasi apakah terdapat perbedaan signifikan antara rata-rata dari beberapa kelompok. Tujuan utama dari ANOVA adalah menghitung *sum of squares* (SS), yaitu jumlah kuadrat dari penyimpangan antara nilai rata-rata pengaruh faktor dan rata-rata hasil percobaan secara keseluruhan. Perhitungan ini dirumuskan sebagai berikut.

$$SSF_x = n \sum_{i=1}^n (mX_i(Y) - mY)^2 \quad (2.10)$$

Dimana :

SS = Sum of square
X = faktor desain
Y = parameter output
n = banyak data
m = mean (rata-rata)

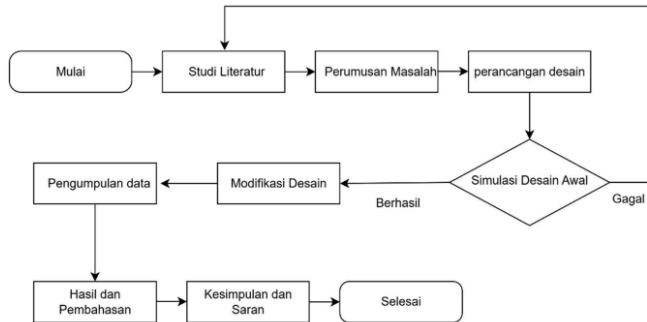
ANOVA digunakan dalam desain eksperimen yang melibatkan satu variabel dependen berupa ukuran hasil numerik berskala kontinu, serta beberapa kelompok eksperimen yang berasal dari satu atau lebih variabel independen yang bersifat kategorikal. Dalam konteks ANOVA, variabel independen disebut sebagai faktor, sedangkan variasi dalam masing-masing faktor disebut level.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan Penelitian secara garis besar digambarkan dalam diagram alir (*flowchart*) sebagaimana digambarkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Flowchart penelitian

3.1.1 Studi Literatur

Selanjutnya dilakukan *studi literatur* secara komprehensif dengan menelaah berbagai jurnal internasional dan nasional terkini tentang karakteristik riak torsi pada motor induksi tiga fasa, teknik simulasi elektromagnetik menggunakan perangkat lunak seperti Ansys Maxwell serta metode-metode optimasi desain yang telah terbukti efektif dalam mengurangi fluktuasi torsi dan meningkatkan kinerja sehingga didapat landasan teori dan parameter-parameter kritis yang akan diujikan dalam simulasi.

3.1.2 Perumusan Masalah

Setelah landasan teori terbangun, langkah Perumusan Masalah dilaksanakan dengan menetapkan ruang lingkup penelitian yang meliputi pilihan variabel utama, asumsi-asumsi yang diperbolehkan, indikator keberhasilan, serta kriteria inklusi dan eksklusi, sehingga penelitian menjadi terfokus, terukur, dan mampu

menghasilkan temuan yang spesifik tanpa terbentur kompleksitas yang melebar di luar kapasitas.

3.1.3 Perancangan Desain Awal

Penelitian ini memerlukan data awal berupa desain ¹⁹ motor induksi tiga fasa yang ⁴ digunakan pada industri. Setelah data tersebut diperoleh, dilakukan proses komputasi desain dan simulasi menggunakan perangkat lunak Ansys Maxwell untuk mendapatkan data awal. Rancangan ini merupakan desain awal motor yang akan dioptimalkan melalui metode komputasi. Parameter motor awal sebelum dioptimalisasi ditunjukkan ⁸ pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter motor awal sebelum dioptimalisasi

Parameter	Nilai
⁴ Stator outer diameter [mm]	349
Stator inner diameter [mm]	235
Rotor outer diameter [mm]	233.6
Rotor inner diameter [mm]	70
Air gap length [mm]	0.7
Stack length [mm]	300
Number of poles	4
Stator slot number	48
Rotor slot number	38
core material	D23_50

3.1.4 Simulasi Desain Awal

Tahap Running Simulation merupakan proses pelaksanaan simulasi terhadap desain yang telah disusun pada tahap pengaturan awal, dengan tujuan untuk mengevaluasi apakah desain tersebut dapat berjalan dengan lancar atau mengalami kendala. Pada tahap ini, seringkali ditemukan berbagai permasalahan yang menyebabkan simulasi gagal dijalankan, sehingga diperlukan penyesuaian ulang terhadap beberapa parameter desain. Penyesuaian ini memerlukan kajian

literatur yang lebih mendalam serta analisis terhadap hambatan yang muncul selama proses simulasi, guna menemukan ⁶⁹ solusi yang tepat terhadap permasalahan yang dihadapi.

3.1.5 Modifikasi Desain

Modifikasi dilakukan dengan mempertimbangkan tiga variabel desain utama, yaitu geometri slot stator, lebar celah udara, dan material stator. Masing-masing variabel tersebut memiliki lima tingkat variasi maka jumlah simulasi yang harus dilakukan apabila menggunakan metode full factorial adalah sebanyak $5^6 = 15.625$ simulasi. Hal ini karena ⁴⁷ setiap faktor dapat dikombinasikan dengan semua level dari faktor lainnya, sehingga seluruh kemungkinan kombinasi desain harus diuji satu per satu. Namun, dengan penerapan metode Taguchi, jumlah eksperimen dapat dikurangi secara signifikan menjadi hanya 25 percobaan tanpa mengurangi representasi variasi desain secara optimal[24]. Semua kombinasi ⁶ dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Orthogonal array L25

No	Faktor					
	A	B	C	D	E	F
1	A1	B1	C1	D1	E1	F1
2	A1	B2	C2	D2	E2	F2
3	A1	B3	C3	D3	E3	F3
4	A1	B4	C4	D4	E4	F4
5	A1	B5	C5	D5	E5	F5
6	A2	B1	C2	D3	F	F5
7	A2	B2	C3	D4	E5	F1
8	A2	B3	C4	D5	E1	F2
9	A2	B4	C5	D1	E2	F3
10	A2	B5	C1	D2	E3	F4
11	A3	B1	C3	D5	E2	F4
12	A3	B2	C4	D1	E3	F5
13	A3	B3	C5	D2	E4	F1
14	A3	B4	C1	D3	E5	F2
15	A3	B5	C2	D4	E1	F3
16	A4	B1	C4	D2	E5	F3
17	A4	B2	C5	D3	E1	F4
18	A4	B3	C1	D4	E2	F5
19	A4	B4	C2	D5	E3	F1
20	A4	B5	C3	D1	E4	F2
21	A5	B1	C5	D4	E3	F2
22	A5	B2	C1	D5	E4	F3
23	A5	B3	C2	D1	E5	F4
24	A5	B4	C3	D2	E1	F5
25	A5	B5	C4	D3	E2	F1

Setelah diperoleh kombinasi simulasi untuk setiap faktor desain, langkah berikutnya adalah menetapkan nilai modifikasi dari masing-masing parameter dalam lima level yang berbeda. Penentuan level ini didasarkan pada acuan nilai dari desain awal. Rincian nilai untuk setiap variabel dari faktor desain yang digunakan ditampilkan pada Tabel 3.3 berikut.

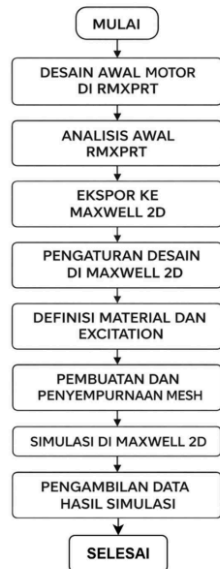
Tabel 3.3 Variabel faktor desain

Faktor desain	Level					Desain awal
	1	2	3	4	5	
Panjang slot hs0 (mm)	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.5
Panjang slot hs2 (mm)	19	20	22	23	24	21
Lebar slot bs1 (mm)	8.5	9	9.5	10	10.5	9.3
Lebar slot bs2 (mm)	10.5	11	11.5	12	12.5	11.4
Material inti	<i>Cobalt iron</i>	<i>Steel 1010</i>	<i>Steel 1018</i>	M19_24G	<i>Nickel iron</i>	D23_50
Lebar celah udara (mm)	0.4	0.6	0.8	1	1.2	0.7

Hasil yang akan dianalisis dari modifikasi keempat faktor desain tersebut meliputi riak torsi dan efisiensi. Seluruh rangkaian proses simulasi akan dijalankan menggunakan perangkat lunak Ansys Electronics Desktop.

Dalam tahap Modifikasi Desain, perbaikan atau penyesuaian dilakukan pada model atau parameter awal misalnya mengubah geometri, menyesuaikan material dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja.

3.1.6 Pengumpulan Data



Gambar 3. 2 Diagram alir pengambilan data

1. Desain Awal Motor di RMXprt

Tahapan pertama dimulai dengan pembuatan desain awal motor di RMXprt, di mana pengguna menentukan jenis mesin yang akan dianalisis. Pada tahap ini, data nameplate mesin seperti tegangan, daya, frekuensi, kecepatan nominal, serta jumlah kutub dimasukkan sebagai parameter dasar desain. Selain itu, parameter geometrik seperti diameter stator, panjang tumpukan, jumlah slot, dan dimensi rotor diinput untuk membentuk model dasar motor. Pemilihan material pada bagian stator, rotor, dan konduktor juga dilakukan untuk memastikan model representatif terhadap kondisi nyata. Hasil dari tahap ini berupa model matematis motor yang siap untuk dianalisis lebih lanjut.

2. Analisis Awal RMXprt

Selanjutnya dilakukan analisis performa awal di RMXprt untuk memperoleh gambaran umum kinerja mesin berdasarkan perhitungan analitik. RMXprt secara otomatis menghitung karakteristik utama seperti torsi nominal, arus, efisiensi, slip, serta rugi-rugi daya (*losses*) yang terjadi pada motor. Tahapan ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah desain awal sudah sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan atau masih memerlukan penyesuaian parameter sebelum masuk ke tahap simulasi numerik. Dengan demikian, tahap ini menjadi acuan awal untuk validasi hasil simulasi Maxwell 2D nantinya.

3. Ekspor ke Maxwell 2D

Tahapan berikutnya adalah ekspor model dari RMXprt ke Maxwell 2D, di mana model motor yang telah selesai dirancang akan diubah menjadi representasi dua dimensi berbasis *finite element*. Proses ekspor dilakukan menggunakan fitur *Create Maxwell 2D Design* yang secara otomatis memindahkan data geometrik, parameter lilitan, serta material dari RMXprt ke dalam lingkungan Maxwell 2D. Hasil dari proses ini berupa file proyek (*.aedt*) yang berisi model elektromagnetik motor siap untuk dianalisis secara numerik.

4. Pengaturan Desain di Maxwell 2D

Setelah model berhasil diekspor, dilakukan pengaturan desain di Maxwell 2D untuk memastikan semua parameter hasil konversi sesuai dengan kebutuhan simulasi. Pada tahap ini dilakukan verifikasi geometri, pengaturan region dan boundary condition, serta pemilihan jenis analisis yang akan digunakan, yaitu *Magnetostatic* untuk kondisi tunak atau *Transient* untuk analisis dinamis yang melibatkan perubahan waktu. Penentuan jenis analisis ini penting karena akan mempengaruhi jenis data yang diperoleh, misalnya distribusi fluks magnet, arus, atau torsi terhadap waktu

5. Definisi Material dan Excitation

Tahapan selanjutnya adalah pendefinisian material dan sumber eksitasi (*excitation*). Setiap bagian motor, baik stator maupun rotor, diberikan material yang sesuai dengan sifat magnetiknya. Sementara itu, kumparan

stator diberikan eksitasi berupa arus atau tegangan sesuai hasil perancangan pada RMxprt. Parameter seperti frekuensi sumber, kecepatan rotor, serta jumlah kutub ditentukan untuk menyesuaikan kondisi operasi nyata mesin. Selain itu, dilakukan pula pengaturan *time step* dan *total simulation time* agar hasil transien dapat direkam secara detail dan stabil. Tahap ini menghasilkan model elektromagnetik lengkap yang siap disimulasikan.

6. Pembuatan dan Penyempurnaan Mesh

Setelah semua parameter terdefinisi, dilakukan proses pembuatan dan penyempurnaan mesh. Mesh merupakan pembagian geometri menjadi elemen-elemen kecil untuk menyelesaikan persamaan medan elektromagnetik menggunakan metode elemen hingga. Pembuatan mesh dilakukan secara otomatis, namun kemudian disempurnakan secara manual (*refinement*) pada area kritis seperti celah udara (airgap), slot, dan bagian inti besi (yoke). Refinement mesh diperlukan untuk meningkatkan akurasi hasil simulasi tanpa menyebabkan waktu komputasi yang berlebihan. Kualitas mesh yang baik akan menghasilkan distribusi medan magnet dan torsi yang lebih representatif

7. Simulasi di Maxwell 2D

Tahap berikutnya adalah simulasi elektromagnetik di Maxwell 2D. Pada tahap ini, solver dijalankan untuk menghitung distribusi medan magnet, arus, torsi elektromagnetik, dan parameter lainnya berdasarkan model yang telah dibuat. Pengguna perlu memantau proses simulasi melalui *output log* untuk memastikan tidak terdapat kesalahan seperti peringatan pada material BH curve, kesalahan boundary, atau masalah konvergensi. Simulasi berjalan hingga hasil konvergen dan stabil diperoleh, menandakan bahwa solusi numerik telah mencapai nilai yang mendekati kondisi sebenarnya.

8. Pengambilan ³Data Hasil Simulasi

Setelah simulasi selesai, dilakukan pengambilan dan pengolahan data hasil simulasi. Data yang diperoleh meliputi torsi elektromagnetik terhadap waktu, distribusi fluks magnet di seluruh bagian mesin, efisiensi, rugi-rugi daya, serta gelombang arus dan tegangan pada kumparan stator.

Data-data tersebut dapat ditampilkan dalam bentuk grafik menggunakan *Field Calculator* atau diekspor dalam format tabel (CSV) untuk analisis lanjutan. Hasil ini menjadi sumber utama dalam proses evaluasi performa motor.

9. Selesai

Tahap terakhir adalah penyimpanan dan pengolahan hasil akhir. Semua data numerik dan visual dari hasil simulasi disusun secara sistematis untuk digunakan dalam proses analisis, validasi, dan pembahasan pada bab hasil penelitian. Dengan selesainya tahap ini, data simulasi elektromagnetik telah siap digunakan untuk mengkaji karakteristik motor, melakukan optimasi desain, ataupun membandingkan pengaruh parameter tertentu terhadap kinerja mesin

3.1.7 Hasil dan Pembahasan

³ Setelah proses desain dan simulasi selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah pengambilan data performa motor. Data performa yang dikumpulkan mencakup riak torsi, efisiensi motor, dan daya keluaran. Ketiga parameter ini kemudian dianalisis dalam kaitannya dengan rentang waktu operasi motor, yang divisualisasikan dalam bentuk grafik. Untuk menentukan kombinasi parameter yang menghasilkan performa terbaik, dilakukan analisis menggunakan metode *Analysis of Mean* (ANOM) guna mengetahui level optimal dari tiap faktor. Selain itu, *Analysis of Variance* (ANOVA) ⁵⁵ digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh signifikan terhadap performa motor. Hasil performa setelah optimalisasi selanjutnya dibandingkan dengan performa awal sebelum dilakukan optimalisasi untuk menilai peningkatan kinerja yang diperoleh.

¹⁴ 3.1.8 Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini memberikan suatu kesimpulan dari keseluruhan hasil yang telah didapatkan didalam penelitian, yaitu hasil analisis dari optimalisasi desain *squirrel Cage induction motor* yang telah dilakukan. Saran nantinya dapat diberikan kepada peneliti selanjutnya untuk mengembangkan penelitian ini.

3.2 Perangkat Penelitian

3.2.1 Perangkat keras

- a. Laptop
 - Model sistem : Advan Workplus
 - Processor : AMD Ryzen 7 7735HS
 - Memori : 16 GB LPDDR5
 - Storage : NVME 512 GB

3.2.2 Perangkat lunak

- b. Windows 11 Home
- c. Ansys electronic dekstop
- d. Microsoft Word
- e. Microsoft Excel
- f. Origin

49

3.3 Lokasi Penelitian

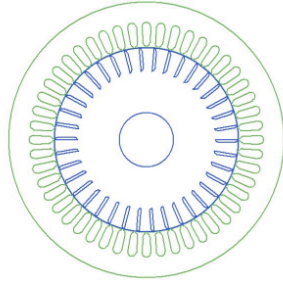
Lokasi penelitian ini dilaksanakan di **Laboratorium Energi Listrik**, Fakultas Teknik, yang merupakan fasilitas pendukung akademik dan riset dalam bidang sistem tenaga listrik, konversi energi, dan aplikasi mesin listrik. Pemilihan laboratorium ini sebagai tempat penelitian didasarkan pada ketersediaan sarana dan prasarana yang relevan dengan topik penelitian sehingga memungkinkan penelitian dilakukan secara optimal dan terukur.

24
BAB 4

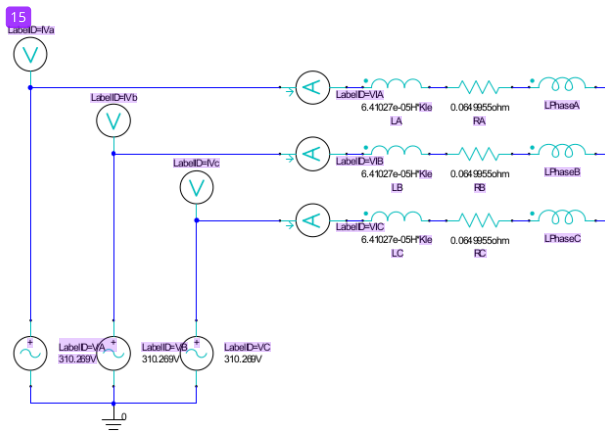
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Simulasi Desain Awal Motor

Sebelum memperoleh data hasil simulasi, proses desain dilakukan dengan memasukan data parameter yang sesuai Tabel 3.1 pada fitur RMXprt. Setelah proses tersebut maka akan didapatkan visualisasi hasil desain komputasi seperti pada Gambar 4.1

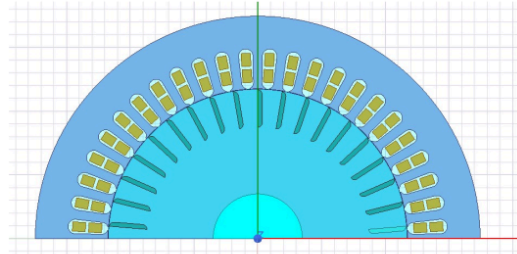


Gambar 4. 1 Desain komputasi motor induksi 3 fase



Gambar 4. 2 Rangkaian ekuivalen motor induksi

Tahapan berikutnya adalah menyusun desain dua dimensi (2D) guna memperoleh data pengukuran yang lebih rinci serta mengoptimalkan penerapan ⁶⁴metode elemen hingga (*finite element method*). Pada tahap ini, seluruh proses analisis dan perhitungan dilakukan sepenuhnya oleh perangkat lunak, sehingga setiap data pengukuran yang dihasilkan telah tervalidasi menggunakan pendekatan FEM.



Gambar 4. 3 Desain 2D dan penerapan finite element method

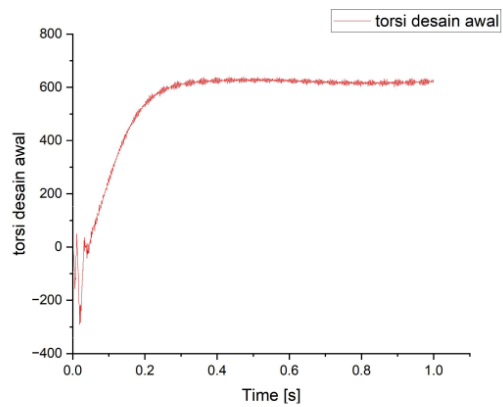
Berdasarkan hasil yang telah diperoleh dari proses simulasi pada desain awal motor, dapat diketahui bahwa performa motor pada tahap desain awal yang digunakan ditunjukkan melalui parameter-parameter hasil simulasi yang disajikan secara rinci ³²pada Tabel 4.1

Tabel 4. 1 Hasil simulasi desain awal motor induksi 3 fasa

Parameter	Nilai	Satuan
torsi	538.687 nm	Newton meter
torsi maksimum	639.7876 nm	Newton meter
torsi minimum	-290.4945 nm	Newton meter
riak torsi	8.63%	%
daya input	96227.5619 W	Watt
daya output	83315.3446 W	Watt
rugi daya	12912.2173 W	Watt
efisiensi	86.58%	%
kecepatan	1436 rpm	rpm

Setelah simulasi selesai maka grafik torsi dengan fungsi waktu didapatkan dengan hasil seperti gambar 4.3. Pada gambar 4.3 terlihat jelas bahwa torsi motor induksi 3 fasa sebelum di optimalisasi memiliki riak yang cukup besar. Berdasarkan

perhitungan motor tersebut memiliki riak sebesar 8.63% pada kecepatan kerja 1463 rpm.



Gambar 4. 4 Grafik torsi motor pada kecepatan 1463 rpm

4.2 Simulasi Faktor Desain

Simulasi faktor desain pada penelitian ini dilakukan pada kondisi rating kecepatan sebesar 1453 rpm dengan tujuan untuk menganalisis besarnya riak yang terjadi pada kondisi kecepatan rendah. Hasil yang diperoleh dari simulasi faktor desain tersebut disajikan pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4. 2 Hasil simulasi faktor desain pada orthogonal array

No	Torsi (Nm)	riak torsi (%)	Efisiensi (%)
1	522.4324	1.55642	88.03
2	540.3564	1.89950	86.73
3	537.0522	1.84200	84.86
4	554.1912	1.74833	77.06
5	532.2801	1.70450	88.47
6	541.2171	1.90041	85.31
7	590.4771	1.54271	89.69
8	523.1467	1.58147	88.44
9	532.4320	1.85318	82.33
10	534.5421	1.83695	83.33
11	536.0096	1.87603	85.02
12	538.1278	1.87413	85.93

13	543.2250	1.87529	80.53
14	564.3492	1.42344	89.67
15	522.3118	1.60905	87.90
16	543.6765	1.57315	89.30
17	529.2794	1.65374	88.03
18	529.8204	1.75695	84.22
19	529.7385	1.81033	83.93
20	561.8442	1.75833	79.82
21	535.8636	1.88146	85.75
22	539.7884	1.83358	85.47
23	538.4992	1.63157	88.96
24	518.6481	1.73384	87.15
25	532.3462	1.81859	80.36

Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap konfigurasi desain yang disusun berdasarkan *orthogonal array* Taguchi memberikan pengaruh terhadap nilai torsi, riak torsi, serta efisiensi motor. Temuan ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses perhitungan dan penentuan parameter optimal pada tahap optimasi berikutnya.

4.3 Optimalisasi desain Motor Induksi

Optimalisasi bertujuan untuk memperoleh kombinasi parameter desain yang mampu meminimalkan riak torsi sekaligus meningkatkan kinerja motor induksi secara keseluruhan, baik dari sisi performa elektromagnetik maupun karakteristik operasionalnya. Pendekatan yang digunakan mengombinasikan metode Taguchi melalui analisis *Analysis of Mean* (ANOM) untuk menentukan level optimal setiap faktor desain, serta *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk mengevaluasi tingkat signifikansi dan kontribusi masing-masing parameter terhadap variasi respon yang dihasilkan. Dengan pendekatan ini, proses optimalisasi dapat dilakukan secara sistematis dan efisien dengan jumlah percobaan yang terbatas, namun tetap mampu mengidentifikasi faktor dominan yang berpengaruh terhadap riak torsi.

4.3.1 *Analysis of Mean* (ANOM)

Pengelompokan ANOM dapat dilihat pada Tabel 4.3 Berikut

Tabel 4. 3 Pengelompokan ANOM

A panjang slot hs0	1	2	3	4	5
	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15
	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25
B panjang slot hs2	1	6	11	16	21
	2	7	12	17	22
	3	8	13	18	23
	4	9	14	19	24
	5	10	15	20	25
C lebar slot bs1	1	10	14	18	22
	2	6	15	19	23
	3	7	11	20	24
	4	8	12	16	25
	5	9	13	17	21
D lebar slot bs2	1	9	12	20	23
	2	10	13	16	24
	3	6	14	17	25
	4	7	15	18	21
	5	8	11	19	22
D material inti	1	8	15	17	24
	2	9	11	18	25
	3	10	12	19	21
	4	6	13	20	22
	5	7	14	16	23
F lebar celah udara	1	7	13	19	25
	2	8	14	20	21
	3	9	15	16	22
	4	10	11	17	23
	5	6	12	18	24

Analysis of Mean (ANOM) dilakukan dilakukan dengan mengelompokkan level-level faktor desain berdasarkan nilai rata-rata respon yang dihasilkan sehingga memudahkan identifikasi level terbaik dan terburuk. Melalui pengelompokan ini,

dapat terlihat kecenderungan pengaruh masing-masing level faktor terhadap parameter kinerja. Dengan demikian, ANOM tidak hanya menunjukkan level optimal, tetapi juga memberikan gambaran perbandingan relatif antar level faktor desain dalam memengaruhi respon yang dianalisis.

1. Pengaruh Parameter terhadap Riak Torsi

- Nilai riak torsi akibat perubahan variabel Panjang Slot hs0(A) ditunjukkan pada Tabel 4.3 berikut

Tabel 4.4 ANOM Panjang Slot hs0(A) terhadap riak torsi

Level	(A)					Mean
1	15.564	18.995	18.420	17.483	17.045	17.502
2	19.004	15.427	15.815	18.532	18.369	17.429
3	18.760	18.741	18.753	14.234	16.090	17.316
4	15.732	16.537	17.569	18.103	17.583	17.105
5	18.815	18.336	16.316	17.338	18.186	17.798

Dari variasi panjang slot hs0 lima level yang diuji, level 4 menghasilkan nilai rata-rata riak torsi terendah sebesar 17,105 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam menekan riak torsi, sedangkan level 5 menunjukkan nilai tertinggi yaitu 17,798. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa panjang slot hs0 pada level 4 merupakan pilihan terbaik untuk meminimalkan riak torsi.

- Nilai riak torsi akibat perubahan variabel panjang slot hs2(B) ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut

Tabel 4.5 ANOM panjang slot hs2(B) terhadap riak torsi

Level	(B)					Mean
1	15.564	19.004	18.760	15.732	18.815	17.575
2	18.995	15.427	18.741	16.537	18.336	17.607
3	18.420	15.815	18.753	17.569	16.316	17.375
4	17.483	18.532	14.234	18.103	17.338	17.138
5	17.045	18.369	16.090	17.583	18.186	17.455

Dari variasi panjang slot hs2 lima level yang diuji, level 4 menghasilkan nilai rata-rata riak torsi terendah sebesar 17.138 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam menekan riak torsi, sedangkan level 2 menunjukkan nilai tertinggi yaitu 17.607. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa panjang slot hs2 pada level 4 merupakan pilihan terbaik untuk meminimalkan riak torsi.

- Nilai riak torsi akibat perubahan variabel lebar slot bs1(C) ⁶ ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut

Tabel 4. 6 ANOM lebar slot bs1(C) terhadap riak torsi

Level	(C)					Mean
1	15.564	18.369	14.234	17.569	18.336	16.815
2	18.995	19.004	16.090	18.103	16.316	17.702
3	18.420	15.427	18.760	17.583	17.338	17.506
4	17.483	15.815	18.741	15.732	18.186	17.191
5	17.045	18.532	18.753	16.537	18.815	17.936

Dari variasi lebar slot bs1 lima level yang diuji, level 4 menghasilkan nilai rata-rata riak torsi terendah sebesar 17,191 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam menekan riak torsi, sedangkan level 5 menunjukkan nilai tertinggi yaitu 17,936. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa lebar slot bs1 pada level 4 merupakan pilihan terbaik untuk meminimalkan riak torsi.

- Nilai riak torsi akibat perubahan variabel lebar slot bs2 (D) ⁵³ ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut

Tabel 4. 7 ANOM lebar slot bs2 (D)

Level	(D)					Mean
1	15.564	18.532	18.741	17.583	16.316	17.347
2	18.995	18.369	18.753	15.732	17.338	17.837
3	18.420	19.004	14.234	16.537	18.186	17.276
4	17.483	15.427	16.090	17.569	18.815	17.077
5	17.045	15.815	18.760	18.103	18.336	17.612

Dari variasi lebar slot bs2 lima level yang diuji, level 4 menghasilkan nilai rata-rata riak torsi terendah sebesar 17.077 sehingga

menjadi konfigurasi paling optimal dalam menekan riak torsi, sedangkan level 2 menunjukkan nilai tertinggi yaitu 17,837. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa lebar slot bs2 pada level 4 merupakan pilihan terbaik untuk meminimalkan riak torsi.

- Nilai riak torsi akibat perubahan variabel material inti (E) ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut

Tabel 4. 8 ANOM material inti (E) terhadap riak torsi

Level	(E)					Mean
1	15.564	15.815	16.090	16.537	17.338	16.269
2	18.995	18.532	18.760	17.569	18.186	18.408
3	18.420	18.369	18.741	18.103	18.815	18.490
4	17.483	19.004	18.753	17.583	18.336	18.232
5	17.045	15.427	14.234	15.732	16.316	15.751

Dari variasi material inti lima level yang diuji, level 5 menghasilkan nilai rata-rata riak torsi terendah sebesar 15.751 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam menekan riak torsi, sedangkan level 3 menunjukkan nilai tertinggi yaitu 18.490. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa material inti pada level 5 merupakan pilihan terbaik untuk meminimalkan riak torsi.

- Nilai riak torsi akibat perubahan variabel lebar celah udara (F) ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut

Tabel 4. 9 ANOM lebar celah udara (F) terhadap riak torsi

Level	(F)					Mean
1	15.564	15.427	18.753	18.103	18.186	17.207
2	18.995	15.815	14.234	17.583	18.815	17.088
3	18.420	18.532	16.090	15.732	18.336	17.422
4	17.483	18.369	18.760	16.537	16.316	17.493
5	17.045	19.004	18.741	17.569	17.338	17.940

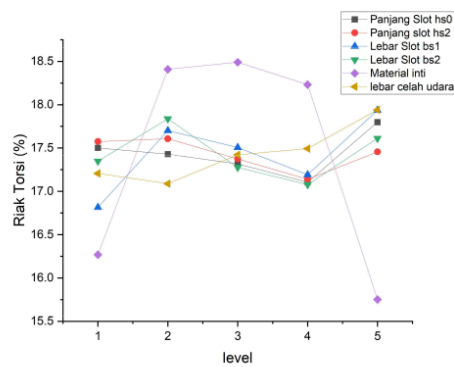
Dari variasi lebar celah udara lima level yang diuji, level 2 menghasilkan nilai rata-rata riak torsi terendah sebesar 17.088 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam menekan riak torsi, sedangkan level 5 menunjukkan nilai tertinggi yaitu 17.940. Oleh karena itu, dapat

disimpulkan bahwa panjang slot hs0 pada level 2 merupakan pilihan terbaik untuk meminimalkan riak torsi.

Maka, dampak perubahan variabel pada setiap level terhadap nilai riak torsi dapat dilihat pada Tabel 4.9 berikut.

Tabel 4. 10 ANOM riak torsi

Level(i)	Ai	Bi	Ci	Di	Ei	Fi
1	17.502	17.575	16.815	17.347	16.269	17.207
2	17.429	17.607	17.702	17.837	18.408	17.088
3	17.316	17.375	17.506	17.276	18.490	17.422
4	17.105	17.138	17.191	17.077	18.232	17.493
5	17.798	17.455	17.936	17.612	15.751	17.940



Gambar 4. 5 Grafik ANOM riak torsi

Grafik menunjukkan hubungan antara level faktor desain terhadap riak torsi (%) untuk beberapa parameter, yaitu panjang slot stator (hs0, hs2, bs1), lebar slot stator (bs2), material inti, dan lebar celah udara. Analisis dilakukan dengan pendekatan *smaller-the-better*, sehingga nilai riak torsi yang lebih rendah menunjukkan kinerja yang lebih baik.

Secara umum, faktor material inti menunjukkan variasi nilai riak torsi yang paling signifikan dibandingkan faktor lainnya. Hal ini ditunjukkan oleh perubahan kurva yang paling tajam, terutama pada level 5 yang menghasilkan nilai riak torsi

terendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pemilihan material inti sangat berpengaruh terhadap karakteristik medan magnet dan distribusi fluks, yang pada akhirnya memengaruhi besarnya riak torsi motor induksi.

Parameter panjang slot stator (hs0 dan hs2) menunjukkan tren perubahan yang relatif moderat. Nilai riak torsi cenderung menurun hingga level 4, kemudian meningkat kembali pada level 5. Hal ini mengindikasikan adanya kondisi geometris optimum pada level menengah, di mana interaksi antara medan magnet dan arus stator menjadi lebih merata sehingga fluktuasi torsi dapat ditekan.

Untuk lebar slot stator (bs1 dan bs2), terlihat bahwa perubahan level memberikan pengaruh yang cukup stabil terhadap riak torsi, dengan variasi yang tidak terlalu tajam. Meskipun demikian, nilai riak torsi terendah umumnya diperoleh pada level 4, yang menunjukkan bahwa pengaturan lebar slot yang tepat dapat membantu mengurangi ketidakteraturan distribusi fluks di celah udara.

Sementara itu, lebar celah udara memperlihatkan kecenderungan peningkatan riak torsi pada level yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya reluctance celah udara, yang dapat memperburuk kontinuitas fluks magnet dan meningkatkan fluktuasi torsi elektromagnetik.

Berdasarkan nilai riak torsi minimum level terbaik untuk setiap faktor ditentukan sebagai berikut: panjang slot hs0 pada level 4, panjang slot hs2 pada level 4, lebar slot bs1 pada level 1, lebar slot bs2 pada level 4, material inti pada level 5, dan lebar celah udara pada level 1 (A4, B4, C1, D2, E5, F1).

2. Pengaruh Parameter terhadap Efisiensi

- Nilai Efisiensi akibat perubahan variabel panjang slot hs0 (A) ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut

Tabel 4. 11 ANOM Panjang Slot hs0(A) terhadap efisiensi

Level	(A)					Mean
1	88.03	86.73	84.86	77.06	88.47	85.03
2	85.31	89.69	88.44	82.33	83.33	85.82
3	85.02	85.93	80.53	89.67	87.90	85.81
4	89.30	88.03	84.22	83.93	79.82	85.06
5	85.75	85.47	88.96	87.15	80.36	85.54

Dari variasi panjang slot hs0 lima level yang diuji, level 2 menghasilkan nilai rata-rata efisiensi tertinggi sebesar 85.82 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam efisiensi, sedangkan level 1 menunjukkan nilai terendah yaitu 85.03. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa panjang slot hs0 pada level 4 merupakan pilihan terbaik untuk efisiensi.

- Nilai Efisiensi akibat perubahan variabel panjang slot hs2 (B) ditunjukkan pada Tabel 4.11 berikut

Tabel 4. 12 ANOM panjang slot hs2(B) terhadap efisiensi

Level	(B)					Mean
1	88.03	85.31	85.02	89.30	85.75	86.68
2	86.73	89.69	85.93	88.03	85.47	87.17
3	84.86	88.44	80.53	84.22	88.96	85.40
4	77.06	82.33	89.67	83.93	87.15	84.03
5	88.47	83.33	87.90	79.82	80.36	83.98

Dari variasi panjang slot hs2 lima level yang diuji, level 2 menghasilkan nilai rata-rata efisiensi tertinggi sebesar 87.17 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam efisiensi, sedangkan level 5 menunjukkan nilai terendah yaitu 83.89. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa panjang slot hs0 pada level 2 merupakan pilihan terbaik untuk efisiensi.

- Nilai Efisiensi akibat perubahan variabel lebar slot bs1 (C) ditunjukkan pada Tabel 4.12 berikut.

Tabel 4. 13 ANOM lebar slot bs1(C) terhadap efisiensi

Level	(C)					Mean
1	88.03	83.33	89.67	84.22	85.47	86.14
2	86.73	85.31	87.90	83.93	88.96	86.57
3	84.86	89.69	85.02	79.82	87.15	85.31
4	77.06	88.44	85.93	89.30	80.36	84.22
5	88.47	82.33	80.53	88.03	85.75	85.02

Dari variasi lebar slot bs1 lima level yang diuji, level 2 menghasilkan nilai rata-rata efisiensi tertinggi sebesar 86.57 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam efisiensi, sedangkan level 4 menunjukkan nilai terendah yaitu 84.22. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa lebar slot bs1 pada level 2 merupakan pilihan terbaik untuk efisiensi.

- Nilai Efisiensi akibat perubahan variabel lebar slot bs2 (D) ¹² ditunjukkan pada Tabel 4.13 berikut.

Tabel 4. 14 ANOM lebar slot bs2 (D) terhadap efisiensi

Level	(D)					Mean
1	88.03	82.33	85.93	79.82	88.96	85.01
2	86.73	83.33	80.53	89.30	87.15	85.41
3	84.86	85.31	89.67	88.03	80.36	85.65
4	77.06	89.69	87.90	84.22	85.75	84.93
5	88.47	88.44	85.02	83.93	85.47	86.27

Dari variasi lebar slot bs2 lima level yang diuji, level 5 menghasilkan nilai rata-rata efisiensi tertinggi sebesar 86.27 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam efisiensi, sedangkan level 4 menunjukkan nilai terendah yaitu 84.93. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa lebar slot bs1 pada level 5 merupakan pilihan terbaik untuk efisiensi.

- Nilai Efisiensi akibat perubahan variabel material inti (E) ¹¹ ditunjukkan pada Tabel 4.14 berikut.

Tabel 4. 15 ANOM material inti (E) terhadap efisiensi

Level	(E)					Mean
1	88.03	88.44	87.90	88.03	87.15	87.91
2	86.73	82.33	85.02	84.22	80.36	83.73
3	84.86	83.33	85.93	83.93	85.75	84.76
4	77.06	85.31	80.53	79.82	85.47	81.64
5	88.47	89.69	89.67	89.30	88.96	89.22

Dari variasi material inti lima level yang diuji, level 5 menghasilkan nilai rata-rata efisiensi tertinggi sebesar 89.22 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam efisiensi, sedangkan level 4 menunjukkan nilai terendah yaitu 81.64. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa material inti pada level 5 merupakan pilihan terbaik untuk efisiensi.

- Nilai Efisiensi akibat perubahan variabel lebar celah udara(F) ditunjukkan pada Tabel 4.15 berikut.

Tabel 4. 16 ANOM lebar celah udara (F) terhadap efisiensi

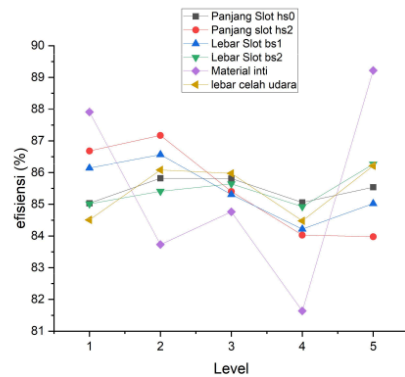
Level	(F)					Mean
1	88.03	89.69	80.53	83.93	80.36	84.51
2	86.73	88.44	89.67	79.82	85.75	86.08
3	84.86	82.33	87.90	89.30	85.47	85.97
4	77.06	83.33	85.02	88.03	88.96	84.48
5	88.47	85.31	85.93	84.22	87.15	86.22

Dari variasi lebar slot bs2 lima level yang diuji, level 5 menghasilkan nilai rata-rata efisiensi tertinggi sebesar 86.22 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam efisiensi, sedangkan level 4 menunjukkan nilai terendah yaitu 84.48. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa lebar slot bs1 pada level 5 merupakan pilihan terbaik untuk efisiensi.

Maka, dampak perubahan variabel pada setiap level terhadap nilai efisiensi dapat dilihat pada Tabel 4.16 berikut.

Tabel 4. 17 ANOM efisiensi

Level(i)	Ai	Bi	Ci	Di	Ei	Fi
1	85.030	86.683	86.143	85.014	87.910	84.510
2	85.821	87.170	86.565	85.408	83.731	86.082
3	85.812	85.402	85.308	85.646	84.761	85.973
4	85.058	84.028	84.219	84.925	81.638	84.477
5	85.538	83.976	85.023	86.265	89.219	86.216



Gambar 4. 6 Grafik ANOM efisiensi

Panjang slot stator hs0 menunjukkan pengaruh yang relatif moderat terhadap efisiensi motor induksi. Nilai efisiensi cenderung meningkat seiring kenaikan level hingga mencapai kondisi optimum pada level 5. Hal ini mengindikasikan bahwa panjang slot stator pada level tersebut mampu memberikan keseimbangan yang lebih baik antara luas penampang konduktor dan distribusi fluks magnet, sehingga rugi-rugi tembaga dapat ditekan dan efisiensi motor meningkat.

Panjang slot stator hs2 memperlihatkan variasi efisiensi yang tidak bersifat linier. Efisiensi tertinggi diperoleh pada level 2, kemudian cenderung menurun pada level-level berikutnya. Fenomena ini menunjukkan bahwa perubahan panjang slot stator yang berlebihan dapat meningkatkan rugi-rugi tembaga atau menyebabkan distribusi fluks yang kurang merata, sehingga efisiensi motor tidak lagi meningkat.

Lebar slot stator bs1 menunjukkan tren peningkatan efisiensi pada level awal hingga mencapai nilai maksimum pada level 2, kemudian mengalami penurunan pada level selanjutnya. Kondisi ini mengindikasikan adanya lebar slot optimum yang mampu mengatur kerapatan arus dan mengurangi konsentrasi fluks berlebih di daerah tertentu, sehingga efisiensi motor dapat dimaksimalkan.

Lebar slot stator bs2 memberikan pengaruh yang relatif stabil terhadap efisiensi, dengan kecenderungan peningkatan nilai efisiensi pada level yang lebih tinggi. Efisiensi maksimum dicapai pada level 5, yang menunjukkan bahwa pengaturan lebar slot stator yang lebih besar pada faktor ini mampu memperbaiki distribusi arus dan menurunkan rugi-rugi elektromagnetik.

Material inti merupakan faktor yang paling dominan dalam memengaruhi efisiensi motor induksi. Grafik ANOM menunjukkan fluktuasi efisiensi yang signifikan antar level, dengan penurunan tajam pada level 4 dan peningkatan paling besar pada level 5. Hal ini mengindikasikan bahwa karakteristik magnetik material inti, seperti permeabilitas dan rugi-rugi besi, sangat berpengaruh terhadap efisiensi keseluruhan motor.

Lebar celah udara menunjukkan kecenderungan peningkatan efisiensi seiring dengan kenaikan level. Efisiensi tertinggi dicapai pada level 5, yang mengindikasikan bahwa pengaturan celah udara pada level tersebut mampu meningkatkan kontinuitas fluks magnet dan mengurangi efek saturasi lokal, tanpa menurunkan kinerja motor secara signifikan.

Berdasarkan nilai efisiensi tertinggi pada masing-masing kurva, level terbaik untuk setiap faktor ditentukan sebagai berikut: panjang slot hs0 pada level 5, panjang slot hs2 pada level 2, lebar slot bs1 pada level 2, lebar slot bs2 pada level 5, material inti pada level 5, dan lebar celah udara pada level 5 (A5, B2, C2, D5, E5, F5).

3. Pengaruh Parameter terhadap Torsi

- Nilai torsi akibat perubahan variabel panjang slot hs0 (A) ⁷ ditunjukkan pada Tabel 4.17 berikut.

Tabel 4. 18 ANOM Panjang Slot hs0(A) terhadap torsi

Level	(A)					Mean
1	522.4324	540.3564	537.0522	554.1912	532.2801	537.2625
2	541.2171	590.4771	523.1467	532.432	534.5421	544.363
3	536.0096	538.1278	543.225	564.3492	522.3118	540.8047
4	543.6765	529.2794	529.8204	529.7385	561.8442	538.8718
5	535.8636	539.7884	538.4992	518.6481	532.3462	533.0291

Dari variasi panjang slot hs0 lima level yang diuji, level 2 menghasilkan nilai rata-rata torsi tertinggi sebesar 544.363 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam efisiensi, sedangkan level 1 menunjukkan nilai terendah yaitu 533.0291. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa panjang slot hs0 pada level 4 merupakan pilihan terbaik untuk meningkatkan torsi.

- Nilai torsi akibat perubahan variabel panjang slot hs2 (B) ditunjukkan pada Tabel 4.18 berikut

Tabel 4. 19 ANOM panjang slot hs2(B) terhadap torsi

Level	(B)					Mean
1	522.4324	541.2171	536.0096	543.6765	535.8636	535.8398
2	540.3564	590.4771	538.1278	529.2794	539.7884	547.6058
3	537.0522	523.1467	543.225	529.8204	538.4992	534.3487
4	554.1912	532.432	564.3492	529.7385	518.6481	539.8718
5	532.2801	534.5421	522.3118	561.8442	532.3462	536.6649

Dari variasi panjang slot hs2 lima level yang diuji, level 2 menghasilkan nilai rata-rata torsi tertinggi sebesar 547.6058 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam torsi, sedangkan level 3 menunjukkan nilai terendah yaitu 534.3487. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa panjang slot hs0 pada level 2 merupakan pilihan terbaik untuk torsi.

- Nilai torsi akibat perubahan variabel lebar slot bs1 (C) ditunjukkan pada Tabel 4.19 berikut.

Tabel 4. 20 ANOM lebar slot bs1(C) terhadap torsi

Level	(C)					Mean
1	522.4324	534.5421	564.3492	529.8204	539.7884	538.1865
2	540.3564	541.2171	522.3118	529.7385	538.4992	534.4246
3	537.0522	590.4771	536.0096	561.8442	518.6481	548.8062
4	554.1912	523.1467	538.1278	543.6765	532.3462	538.2977
5	532.2801	532.432	543.225	529.2794	535.8636	534.616

Dari variasi lebar slot bs1 lima level yang diuji, level 3 menghasilkan nilai rata-rata torsi tertinggi sebesar 548.8062 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam torsi, sedangkan level 2 menunjukkan nilai terendah yaitu 534.4246. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa lebar slot bs1 pada level 2 merupakan pilihan terbaik untuk efisiensi.

- Nilai torsi akibat perubahan variabel lebar slot bs2 (D) ditunjukkan pada Tabel 4.20 berikut.

Tabel 4. 21 ANOM lebar slot bs2 (D) terhadap torsi

Level	(D)					Mean
1	522.4324	532.432	538.1278	561.8442	538.4992	538.6671
2	540.3564	534.5421	543.225	543.6765	518.6481	536.0896
3	537.0522	541.2171	564.3492	529.2794	532.3462	540.8488
4	554.1912	590.4771	522.3118	529.8204	535.8636	546.5328
5	532.2801	523.1467	536.0096	529.7385	539.7884	532.1927

Dari variasi lebar slot bs2 lima level yang diuji, level 4 menghasilkan nilai rata-rata torsi tertinggi sebesar 546.5328 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam torsi, sedangkan level 5 menunjukkan nilai terendah yaitu 532.1927. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa lebar slot bs1 pada level 4 merupakan pilihan terbaik untuk torsi.

- Nilai torsi akibat perubahan variabel material inti (E) ditunjukkan pada Tabel 4.21 berikut.

Tabel 4. 22 ANOM material inti (E)

Level	(E)					Mean
1	522.4324	523.1467	522.3118	529.2794	518.6481	523.1637
2	540.3564	532.432	536.0096	529.8204	532.3462	534.1929
3	537.0522	534.5421	538.1278	529.7385	535.8636	535.0648
4	554.1912	541.2171	543.225	561.8442	539.7884	548.0532
5	532.2801	590.4771	564.3492	543.6765	538.4992	553.8564

Dari variasi material inti lima level yang diuji, level 5 menghasilkan nilai rata-rata torsi tertinggi sebesar 553.8564 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam torsi, sedangkan level 2 menunjukkan nilai terendah yaitu 534.1929. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa material inti pada level 5 merupakan pilihan terbaik untuk torsi.

- Nilai torsi akibat perubahan variabel lebar celah udara ⁵⁴(F) ditunjukkan pada Tabel 4.22 berikut.

Tabel 4. 23 ANOM lebar celah udara (F)

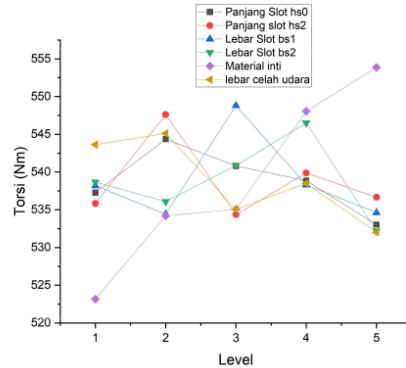
Level	(F)					Mean
1	522.4324	590.4771	543.225	529.7385	532.3462	543.6438
2	540.3564	523.1467	564.3492	561.8442	535.8636	545.112
3	537.0522	532.432	522.3118	543.6765	539.7884	535.0522
4	554.1912	534.5421	536.0096	529.2794	538.4992	538.5043
5	532.2801	541.2171	538.1278	529.8204	518.6481	532.0187

Dari variasi lebar slot bs2 lima level yang diuji, level 5 menghasilkan nilai rata-rata torsi tertinggi sebesar 545.112 sehingga menjadi konfigurasi paling optimal dalam torsi, sedangkan level 5 menunjukkan nilai terendah yaitu 532.0187. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa lebar slot bs1 pada level 5 merupakan pilihan terbaik untuk torsi.

Maka, dampak perubahan variabel pada setiap level terhadap nilai torsi dapat dilihat pada Tabel 4.23 berikut.

Tabel 4. 24 ANOM torsi

Level(i)	Ai	Bi	Ci	Di	Ei	Fi
1	537.262	535.840	538.187	538.667	523.164	543.644
2	544.363	547.606	534.425	536.090	534.193	545.112
3	540.805	534.349	548.806	540.849	535.065	535.052
4	538.872	539.872	538.298	546.533	548.053	538.504
5	533.029	536.665	534.616	532.193	553.856	532.019



Gambar 4. 7 Grafik ANOM torsi

Panjang slot stator hs0 menunjukkan pengaruh yang cukup nyata terhadap nilai torsi motor induksi. Nilai torsi meningkat dari level 1 hingga mencapai nilai maksimum pada level 2, kemudian cenderung menurun pada level-level berikutnya. Hal ini menunjukkan bahwa panjang slot stator pada level 2 mampu menghasilkan distribusi fluks magnet dan arus stator yang paling efektif dalam menghasilkan gaya elektromagnetik, sedangkan perubahan yang terlalu besar justru menurunkan kemampuan pembangkitan torsi.

Panjang slot stator hs2 memperlihatkan pola perubahan torsi yang serupa, di mana torsi maksimum juga dicapai pada level 2. Setelah level tersebut, nilai torsi mengalami penurunan yang relatif bertahap. Kondisi ini mengindikasikan bahwa terdapat panjang slot optimum yang mampu memaksimalkan interaksi antara medan magnet stator dan rotor, sementara

penyimpangan dari kondisi tersebut dapat mengurangi torsi yang dihasilkan.

Lebar slot stator bs1 memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap torsi, dengan nilai maksimum diperoleh pada level 3. Peningkatan torsi pada level menengah ini menunjukkan bahwa lebar slot stator yang optimal dapat meningkatkan kerapatan arus dan distribusi fluks magnet secara lebih merata, sehingga gaya elektromagnetik yang dihasilkan menjadi lebih besar.

Lebar slot stator bs2 menunjukkan bahwa torsi meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada level 4, kemudian menurun kembali pada level 5. Hal ini menandakan adanya nilai lebar slot optimum yang mampu meningkatkan kopling magnetik antara stator dan rotor. Lebar slot yang terlalu besar justru dapat menyebabkan penurunan kerapatan fluks dan menurunkan torsi.

Material inti merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap torsi motor induksi. Grafik ANOM menunjukkan peningkatan torsi yang hampir linier seiring kenaikan level, dengan nilai tertinggi dicapai pada level 5. Kondisi ini mengindikasikan bahwa material inti pada level tersebut memiliki karakteristik magnetik yang lebih baik, sehingga mampu meningkatkan densitas fluks dan gaya elektromagnetik yang dihasilkan.

Lebar celah udara menunjukkan pengaruh yang cukup jelas terhadap nilai torsi. Torsi maksimum dicapai pada level 1, kemudian cenderung menurun pada level-level selanjutnya. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya celah udara yang meningkatkan reluctansi magnetik, sehingga mengurangi kopling fluks antara stator dan rotor dan menurunkan torsi motor.

Berdasarkan nilai torsi maksimum pada masing-masing kurva, level terbaik untuk setiap faktor ditentukan sebagai berikut: panjang slot hs0 pada level 2, panjang slot hs2 pada level 2, lebar slot bs1 pada level 3, lebar slot bs2 pada level 4, material inti pada level 5, dan lebar celah udara pada level 1 (A2, B2, C3, D4, E5, F1).

4.3.2 Analysis of Variance (ANOVA)

Pada tahap sebelumnya, tabel ANOM digunakan untuk mengidentifikasi kombinasi faktor desain yang berpotensi menghasilkan kinerja sesuai dengan target yang ditetapkan. Selanjutnya, analisis ANOVA diterapkan untuk mengintegrasikan hasil analisis tersebut guna mengevaluasi pengaruh dan tingkat kontribusi masing-masing faktor desain. Melalui ANOVA, dapat ditentukan kombinasi parameter desain yang paling sesuai dalam memenuhi ketiga parameter keluaran yang diinginkan. Adapun hasil perhitungan ANOVA disajikan untuk menunjukkan kontribusi setiap faktor desain terhadap ketiga parameter output yang dianalisis.

1. Sum of square Panjang Slot hs0 [A]

Hasil sum of square slot hs0 pada riak torsi, efisiensi, dan torsi ditunjukkan pada Tabel 4.24 sampai Tabel 4.26 berikut.

Tabel 4. 25 Sum of square [A] pada riak torsi

	mXi	mY	sum	ssf
riak	17.502	17.430	0.0051178	1.296259
	17.429	17.430	0.0000003	
	17.316	17.430	0.0130223	
	17.105	17.430	0.1056202	
	17.798	17.430	0.1354913	

Berdasarkan Tabel 4.24, nilai SSF riak torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor A (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 1.296259, yang menunjukkan kontribusi total faktor A terhadap variasi riak torsi.

Tabel 4. 26 Sum of square [A] pada efisiensi

	mXi	mY	sum	ssf
efisiensi	85.030	85.452	0.1776752	3.028659
	85.821	85.452	0.1362084	
	85.812	85.452	0.1294874	
	85.058	85.452	0.1549275	
	85.538	85.452	0.0074332	

Berdasarkan Tabel 4.25, nilai SSF efisiensi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor A (m_{Xi}) dan rata-rata keseluruhan (m_Y) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 3.028659, yang menunjukkan kontribusi total faktor A terhadap variasi efisiensi.

Tabel 4. 27 Sum of square [A] pada torsi

	m_{Xi}	m_Y	sum	ssf
torsi	537.262	538.866	2.5720076	353.0813
	544.363	538.866	30.2147223	
	540.805	538.866	3.7576737	
	538.872	538.866	0.0000313	
	533.029	538.866	34.0718298	

Berdasarkan Tabel 4.26, nilai SSF torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor A (m_{Xi}) dan rata-rata keseluruhan (m_Y) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 353.0813, yang menunjukkan kontribusi total faktor A terhadap variasi torsi.

2. Sum of square panjang slot hs2 [B]

Hasil sum of square slot hs2 pada riak torsi, efisiensi, dan torsi ditunjukkan pada Tabel 4.27 sampai Tabel 4.28 berikut.

Tabel 4. 28 Sum of square [B] pada riak torsi

	m_{Xi}	m_Y	sum	ssf
riak	17.575	17.430	0.0210142	0.706341
	17.607	17.430	0.0314537	
	17.375	17.430	0.0030711	
	17.138	17.430	0.0851121	
	17.455	17.430	0.0006172	

Berdasarkan Tabel 4.27, nilai SSF riak torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor B (m_{Xi}) dan rata-rata keseluruhan (m_Y) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square*

factor (SSF) sebesar 0.706341, yang menunjukkan kontribusi total faktor B terhadap variasi riak torsi.

Tabel 4. 29 Sum of square [B] pada efisiensi

	mXi	mY	sum	ssf
efisiensi	86.683	85.452	1.5150022	43.36553
	87.170	85.452	2.9514438	
	85.402	85.452	0.0024574	
	84.028	85.452	2.0266904	
	83.976	85.452	2.1775127	

Berdasarkan Tabel 4.28, nilai SSF efisiensi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor B (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 43.36553, yang menunjukkan kontribusi total faktor B terhadap variasi efisiensi.

Tabel 4. 30 Sum of square [B] pada torsi

	mXi	mY	sum	ssf
torsi	535.840	538.866	9.1589033	559.0233
	547.606	538.866	76.3808179	
	534.349	538.866	20.4078785	
	539.872	538.866	1.0112153	
	536.665	538.866	4.8458450	

Berdasarkan Tabel 4.29, nilai SSF torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor B (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 559.0233, yang menunjukkan kontribusi total faktor B terhadap variasi torsi.

3. Sum of square lebar slot bs1 [C]

Hasil sum of square slot bs1 pada riak torsi, efisiensi, dan torsi ditunjukkan pada Tabel 4.30 sampai Tabel 4.32 berikut.

Tabel 4. 31 Sum of square [C] pada riak torsi

	mXi	mY	sum	ssf
Riak	16.815	17.430	0.3786029	3.857809
	17.702	17.430	0.0738458	
	17.506	17.430	0.0057524	
	17.191	17.430	0.0569536	
	17.936	17.430	0.2564072	

Berdasarkan Tabel 4.30, nilai SSF riak torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor C (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 3.857809, yang menunjukkan kontribusi total faktor C terhadap variasi riak torsi.

Tabel 4. 32 Sum of square [C] pada efisiensi

	mXi	mY	sum	ssf
efisiensi	86.143	85.452	0.4777979	17.21245
	86.565	85.452	1.2401713	
	85.308	85.452	0.0205266	
	84.219	85.452	1.5203161	
	85.023	85.452	0.1836784	

Berdasarkan Tabel 4.31, nilai SSF efisiensi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor C (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 17.21245, yang menunjukkan kontribusi total faktor C terhadap variasi efisiensi.

Tabel 4. 33 Sum of square [C] pada torsi

	mXi	mY	sum	ssf
torsi	538.187	538.866	0.4620030	686.9072
	534.425	538.866	19.7278816	
	548.806	538.866	98.8042362	
	538.298	538.866	0.3232241	
	534.616	538.866	18.0640980	

Berdasarkan Tabel 4.32, nilai SSF torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor C (mX_i) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 686.9072, yang menunjukkan kontribusi total faktor C terhadap variasi torsi.

4. Sum of square lebar slot bs2 [D]

Hasil sum of square slot bs2 pada riak torsi, efisiensi, dan torsi ditunjukkan pada Tabel 4.33 sampai Tabel 4.35 berikut.

Tabel 4. 34 Sum of square [D] pada riak torsi

	mX_i	mY	sum	ssf
riak	17.347	17.430	0.0068432	1.770807
	17.837	17.430	0.1660474	
	17.276	17.430	0.0235948	
	17.077	17.430	0.1246097	
	17.612	17.430	0.0330664	

Berdasarkan Tabel 4.33, nilai SSF riak torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor D (mX_i) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 1.770807, yang menunjukkan kontribusi total faktor D terhadap variasi riak torsi.

Tabel 4. 35 Sum of square [D] pada efisiensi

	mX_i	mY	sum	ssf
efisiensi	85.014	85.452	0.1919258	5.851817
	85.408	85.452	0.0018755	
	85.646	85.452	0.0377731	
	84.925	85.452	0.2770955	
	86.265	85.452	0.6616934	

Berdasarkan Tabel 4.34, nilai SSF efisiensi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor D (mX_i) dan rata-rata keseluruhan (mY)

yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 5.851817, yang menunjukkan kontribusi total faktor D terhadap variasi efisiensi

Tabel 4. 36 Sum of square [D] pada torsi

	mXi	mY	sum	ssf
torsi	538.667	538.866	0.0396360	574.965
	536.090	538.866	7.7094409	
	540.849	538.866	3.9307503	
	546.533	538.866	58.7769396	
	532.193	538.866	44.5362429	

Berdasarkan Tabel 4.35, nilai SSF torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor D (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 574.965, yang menunjukkan kontribusi total faktor D terhadap variasi torsi.

5. Sum of square material inti [E]

Hasil sum of square material inti pada riak torsi, efisiensi, dan torsi ditunjukkan pada Tabel 4.36 sampai Tabel 4.38 berikut.

Tabel 4. 37 Sum of square [E] pada riak torsi

	mXi	mY	sum	ssf
riak	16.269	17.430	1.3477332	34.45555
	18.408	17.430	0.9574843	
	18.490	17.430	1.1230484	
	18.232	17.430	0.6430375	
	15.751	17.430	2.8198069	

Berdasarkan Tabel 4.36, nilai SSF riak torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor E (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 34.45555, yang menunjukkan kontribusi total faktor E terhadap variasi riak torsi.

Tabel 4. 38 Sum of square [E] pada efisiensi

	mXi	mY	sum	ssf
efisiensi	87.910	85.452	6.0438149	191.1007
	83.731	85.452	2.9597158	
	84.761	85.452	0.4776444	
	81.638	85.452	14.5473262	
	89.219	85.452	14.1916396	

Berdasarkan Tabel 4.37, nilai SSF efisiensi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor E (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 191.1007, yang menunjukkan kontribusi total faktor E terhadap variasi efisiensi

Tabel 4. 39 Sum of square [E] pada torsi

	mXi	mY	sum	ssf
torsi	523.164	538.866	246.5693856	2959.832
	534.193	538.866	21.8396207	
	535.065	538.866	14.4503987	
	548.053	538.866	84.4004545	
	553.856	538.866	224.7064558	

Berdasarkan Tabel 4.38, nilai SSF torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor E (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 2959.832, yang menunjukkan kontribusi total faktor E terhadap variasi torsi.

6. Sum of square lebar celah udara [F]

Hasil sum of square lebar celah udara pada riak torsi, efisiensi, dan torsi ditunjukkan pada Tabel 4.39 sampai Tabel 4.41 berikut.

Tabel 4. 40 Sum of square [F] pada riak torsi

	mXi	mY	sum	ssf
riak	17.207	17.430	0.0498677	2.151912
	17.088	17.430	0.1166752	
	17.422	17.430	0.0000649	
	17.493	17.430	0.0040024	
	17.940	17.430	0.2597722	

Berdasarkan Tabel 4.39, nilai SSF riak torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor F (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 2.151912, yang menunjukkan kontribusi total faktor F terhadap variasi riak torsi.

Tabel 4. 41 Sum of square [F] pada efisiensi

	mXi	mY	sum	ssf
efisiensi	84.510	85.452	0.8860751	15.43968
	86.082	85.452	0.3975489	
	85.973	85.452	0.2715079	
	84.477	85.452	0.9491439	
	86.216	85.452	0.5836606	

Berdasarkan Tabel 4.40, nilai SSF efisiensi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor F (mXi) dan rata-rata keseluruhan (mY) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 15.43968, yang menunjukkan kontribusi total faktor F terhadap variasi efisiensi

Tabel 4. 42 Sum of square [F] pada torsi

	mXi	mY	sum	ssf
torsi	543.644	538.866	22.8257675	617.0104
	545.112	538.866	39.0101675	
	535.052	538.866	14.5468096	
	538.504	538.866	0.1309774	
	532.019	538.866	46.8883658	

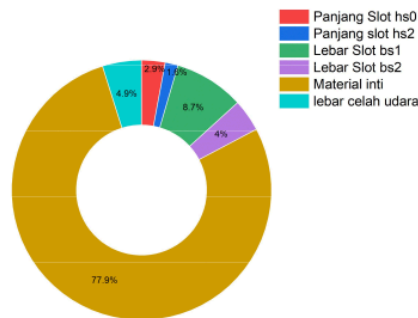
Berdasarkan Tabel 4.41, nilai SSF torsi diperoleh dari selisih antara rata-rata tiap level faktor F (m_{Xi}) dan rata-rata keseluruhan (m_Y) yang dikuadratkan sehingga menghasilkan nilai *sum* pada setiap level. Penjumlahan seluruh nilai *sum* tersebut menghasilkan nilai *sum of square factor* (SSF) sebesar 617.0104, yang menunjukkan kontribusi total faktor F terhadap variasi torsi.

Berdasarkan hasil perhitungan *sum of squares* yang telah diperoleh, dapat diidentifikasi besarnya persentase pengaruh perubahan masing-masing faktor desain terhadap parameter keluaran, yang meliputi riak torsi, efisiensi dan torsi. Seluruh hasil perhitungan *sum of squares* dari setiap faktor desain tersebut selanjutnya dirangkum dan disajikan dalam bentuk Tabel 4.42 untuk memudahkan analisis dan perbandingan kontribusi antar faktor.

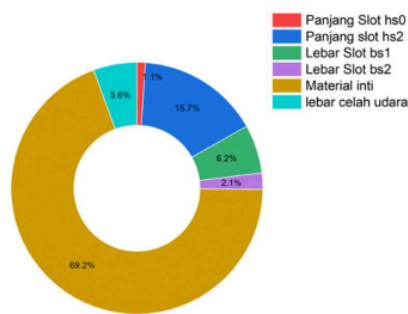
Tabel 4. 43 Analysis of variance pada ketiga parameter output

Faktor Desain	riak torsi		efisiensi		torsi	
	SSF	efek	SSF	efek	SSF	efek
A	1.296259	2.93%	3.028659	1.10%	353.0813	6.14%
B	0.706341	1.60%	43.36553	15.71%	559.0233	9.72%
C	3.857809	8.72%	17.21245	6.24%	686.9072	11.94%
D	1.770807	4.00%	5.851817	2.12%	574.965	10.00%
E	34.45555	77.89%	191.1007	69.24%	2959.832	51.47%
F	2.151912	4.86%	15.43968	5.59%	617.0104	10.73%
TOTAL	44.23868	100.00%	275.9988	100.00%	5750.819	100.00%

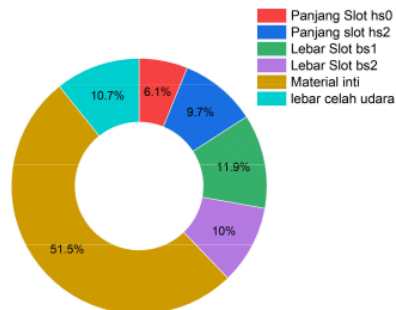
Berdasarkan Tabel 4.42 di atas hasil ANOVA di atas dapat dijelaskan menggunakan diagram lingkaran pada Gambar 4.7 sampai Gambar 4.9 berikut yang menggambarkan persentase pengaruh perubahan setiap faktor desain pada performa motor



Gambar 4. 8 Persentase pengaruh perubahan faktor desain pada riak torsi



Gambar 4. 9 Persentase pengaruh perubahan faktor desain pada Efisiensi



Gambar 4. 10 Persentase pengaruh perubahan faktor desain pada torsi

Berdasarkan hasil ANOM pada tahap sebelumnya, diperoleh bahwa level faktor desain yang optimal untuk parameter riak torsi adalah A4, B4, C1, D2, E5, dan F1. Sementara itu, untuk meningkatkan efisiensi, kombinasi level faktor desain yang terpilih adalah A5, B2, C2, D5, E5 dan F5, sedangkan untuk parameter daya keluaran, level optimal ditentukan pada A2, B2, C3, D4, E5,

dan F1. Kombinasi level tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam proses penentuan faktor desain dengan mempertimbangkan hasil analisis ANOVA. Hasil ANOVA yang telah dibahas sebelumnya menunjukkan tingkat pengaruh dan kontribusi masing-masing faktor desain terhadap setiap parameter keluaran. Dengan demikian, informasi ini dapat dimanfaatkan untuk melakukan optimalisasi desain motor secara lebih terarah dengan memprioritaskan faktor-faktor yang memiliki pengaruh paling signifikan terhadap kinerja motor induksi.

4.3.3 Pemilihan Faktor Desain

Berdasarkan grafik ANOM, variasi panjang slot hs_0 menunjukkan pengaruh yang relatif moderat terhadap ketiga respon. Level 4 memberikan keseimbangan terbaik karena menghasilkan riak torsi yang lebih rendah dibanding level lain tanpa menurunkan efisiensi dan torsi secara signifikan. Hasil ANOVA juga menunjukkan bahwa kontribusi faktor ini tidak dominan, sehingga pemilihan level yang stabil dan tidak ekstrem lebih disarankan. Oleh karena itu, level 4 dipilih sebagai level paling sesuai untuk panjang slot hs_0 .

Pada grafik ANOM, panjang slot hs_2 menunjukkan pengaruh yang cukup konsisten terhadap efisiensi dan torsi. Level 3 menghasilkan nilai efisiensi dan torsi yang relatif lebih tinggi dan stabil, serta tidak memicu kenaikan riak torsi yang signifikan. Kontribusi ANOVA menunjukkan bahwa faktor ini berpengaruh menengah, sehingga pemilihan level 3 lebih optimal karena memberikan performa elektromagnetik yang seimbang.

Lebar slot bs_1 memperlihatkan kecenderungan peningkatan performa pada level tinggi. Grafik ANOM menunjukkan bahwa level 5 memberikan efisiensi dan torsi yang lebih baik, dengan riak torsi masih dalam batas yang dapat diterima. Dari hasil ANOVA, faktor ini memiliki kontribusi yang cukup berarti, sehingga pemilihan level terbaik menjadi penting. Oleh karena itu, level 5 dipilih karena mampu memaksimalkan output tanpa memperburuk karakteristik dinamis motor.

Faktor lebar slot bs2 menunjukkan pengaruh yang jelas terhadap seluruh respon. Pada grafik ANOM, level 5 memberikan kombinasi terbaik antara efisiensi tinggi dan torsi maksimum, serta cenderung menurunkan riak torsi dibanding level lain. Meskipun kontribusi ANOVA tidak sebesar material inti, tren ANOM menunjukkan bahwa peningkatan level bs2 berdampak positif, sehingga level 5 merupakan pilihan paling optimal.

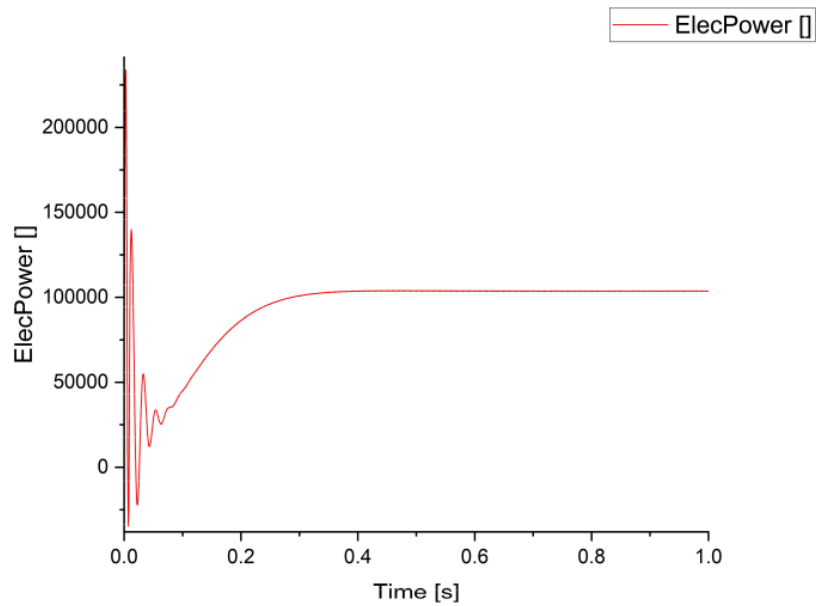
Material inti merupakan faktor paling dominan berdasarkan hasil ANOVA, dengan kontribusi tertinggi terhadap efisiensi, torsi, dan riak torsi. Grafik ANOM secara konsisten menunjukkan bahwa level 5 menghasilkan efisiensi tertinggi, torsi terbesar, dan riak torsi terendah. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik magnetik material pada level ini (seperti permeabilitas tinggi dan rugi inti rendah) sangat mendukung kinerja motor secara keseluruhan. Oleh karena itu, level 5 adalah pilihan terbaik dan paling berpengaruh.

Lebar celah udara memiliki pengaruh menengah namun signifikan terhadap karakteristik elektromagnetik motor. Dari grafik ANOM, level 5 menunjukkan peningkatan efisiensi dan torsi, meskipun perubahannya tidak sedrastis material inti. Hasil ANOVA mendukung bahwa faktor ini tetap perlu dioptimalkan. Dengan mempertimbangkan kestabilan medan magnet dan performa keseluruhan, level 5 dipilih sebagai level paling sesuai.

Dengan demikian, kombinasi desain optimal yang diperoleh berdasarkan hasil analisis statistik adalah panjang slot hs0 0.7 mm [A4], Panjang slot hs2 22 mm [B3], Lebar slot bs1 10.5 mm [C5], Lebar slot bs2 12.5 mm [D5], material inti *nickel iron* [E5], dan lebar celah udara 1.2 mm [F5]. Penerapan kombinasi faktor tersebut mampu menghasilkan desain motor yang lebih optimal dengan mempertimbangkan kontribusi dan pengaruh masing-masing faktor desain terhadap parameter kinerja yang menjadi fokus penelitian.

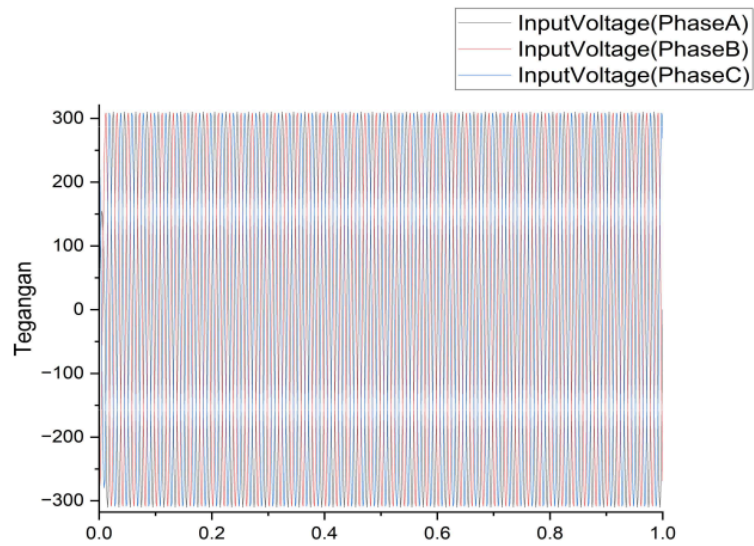
4.4 Hasil Optimalisasi

Berdasarkan hasil simulasi software Ansys Electronic Desktop yang dilakukan, didapatkan hasil performa motor sebagai berikut.



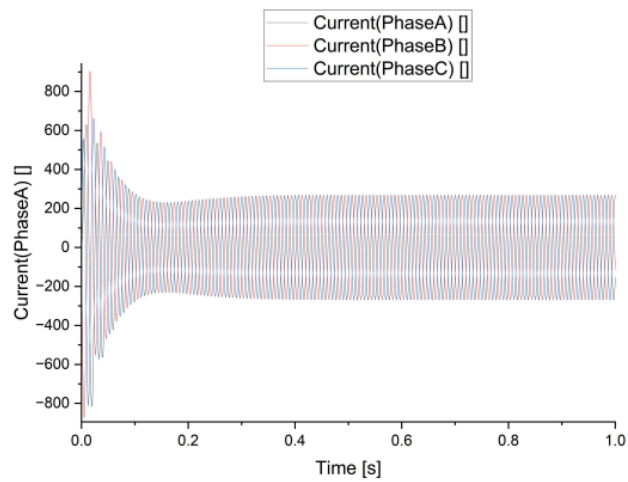
Gambar 4. 11 Grafik daya pada desain akhir motor

Grafik respons daya listrik menunjukkan bahwa motor mengalami fase transien yang sangat dinamis pada awal pengoperasian ($t = 0$ hingga 0,4 detik), ditandai dengan lonjakan daya awal (*overshoot*) yang melebihi 200.000 Watt akibat *inrush current* sebelum osilasinya meredam dengan cepat. Memasuki detik ke-0,4, motor berhasil mencapai kondisi tunak (*steady state*) secara stabil pada kisaran daya 103.000 hingga 104.000 Watt



Gambar 4. 12 Grafik tegangan pada desain akhir

Berdasarkan grafik, sistem kelistrikan motor menunjukkan karakteristik yang stabil di mana Input Voltage tiga fasa (Fasa A, B, dan C) beroperasi secara konsisten pada rentang amplitudo tegangan sekitar 311 Volt (puncak ke netral) di sepanjang durasi satu detik.



Gambar 4. 13 Grafik arus pada desain akhir motor

Berdasarkan rangkaian grafik simulasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem motor beroperasi dengan stabilitas tinggi yang didukung oleh suplai Input Voltage tiga fasa yang konstan pada amplitudo sekitar 311 Volt, meskipun terjadi dinamika signifikan pada fase awal pengoperasian. Saat *startup* ($t = 0$ hingga 0,4 detik), muncul lonjakan arus mula (Current) yang mencapai puncak ekstrem di kisaran 900 Ampere, yang secara langsung menyebabkan lonjakan daya listrik (ElecPower) hingga melebihi 200.000 Watt sebagai respons transien untuk mengatasi inersia beban. Namun, sistem menunjukkan performa pengendalian yang sangat baik karena mampu meredam osilasi tersebut dengan cepat (*settling time* sekitar 0,4 detik) hingga mencapai kondisi tunak (*steady state*) dengan arus yang stabil di kisaran 250

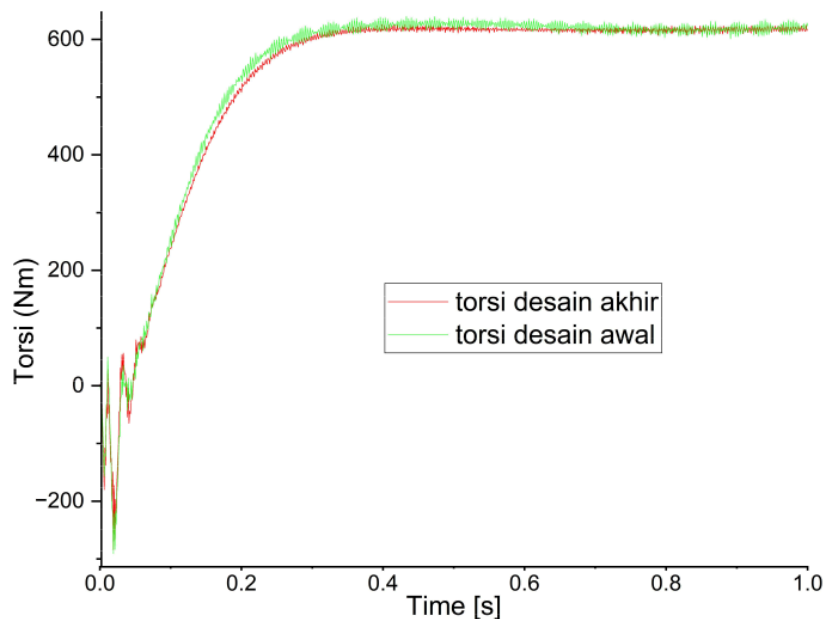
Berikut adalah hasil simulasi dari desain optimalisasi ¹³ yang disajikan dalam bentuk Tabel 4.43

Tabel 4. 44 Hasil simulasi setelah optimalisasi

Parameter	hasil desain akhir	hasil desain awal	Satuan
torsi	532.0106	538.687	Newton meter
torsi maksimum	626.207	639.7876	Newton meter
torsi minimum	-285.0074	-290.4945	Newton meter
riak torsi	17.12774896	17.26943661	%
daya input	92926.0329	96227.5619	Watt
daya output	82261.5862	83315.3446	Watt
rugi daya	10664.4467	12912.2173	Watt
efisiensi	88.524	86.580	%
kecepatan	1436	1436	rpm

Berdasarkan hasil data simulasi, dapat disimpulkan bahwa desain akhir merupakan hasil optimasi yang lebih unggul dari sisi efisiensi maupun riak torsi dibandingkan desain awal. Peningkatan kinerja paling signifikan terlihat pada parameter efisiensi yang mengalami kenaikan dari 86,58% menjadi 88,52%, yang secara langsung dipengaruhi oleh keberhasilan pengurangan rugi daya secara substansial, dari 12.912,2173 W menjadi 10.664,4467 W atau setara dengan penurunan sekitar 17,4%. Meskipun terjadi sedikit penurunan pada daya keluaran, dari 83.315,3446 W menjadi 82.261,5862 W, desain akhir tetap menunjukkan

performa yang lebih baik karena mampu menurunkan daya input secara signifikan, yakni dari 96.227,5619 W menjadi 92.926,0329 W, dengan kondisi kecepatan operasi yang tetap konstan pada 1436 rpm. Selain itu, dari aspek mekanis, desain akhir memperlihatkan karakteristik putaran yang lebih halus dengan penurunan nilai riak torsi dari 17,269% menjadi 17,127%, yang menandakan berkurangnya getaran dan meningkatnya kestabilan torsi. Walaupun nilai torsi rata-rata dan torsi maksimum masing-masing sedikit menurun, dari 538,687 Nm menjadi 532,0106 Nm dan dari 639,7876 Nm menjadi 626,207 Nm, secara keseluruhan desain akhir lebih direkomendasikan karena mampu memberikan efisiensi yang lebih tinggi serta riak torsi yang lebih rendah.



Gambar 4. 14 Grafik perbandingan Torsi desain awal dan desain akhir

Berdasarkan grafik perbandingan riak torsi terhadap waktu, terlihat bahwa desain akhir (garis merah) menunjukkan performa yang lebih stabil dibandingkan desain awal (garis hijau). Pada fase awal transien ($t < 0,1$ s), kedua desain sama-sama mengalami fluktuasi torsi yang signifikan, namun desain awal memperlihatkan amplitudo riak yang lebih besar dengan osilasi negatif dan positif

yang lebih tajam. Seiring bertambahnya waktu dan sistem mendekati kondisi tunak, riak torsi pada desain akhir tampak lebih teredam, ditunjukkan oleh fluktuasi torsi yang lebih kecil dan pola yang lebih halus di sekitar nilai torsi rata-rata. Sementara itu, desain awal masih menunjukkan riak torsi yang relatif lebih kasar meskipun telah mencapai kondisi steady state. Hal ini mengindikasikan bahwa optimasi pada desain akhir berhasil mengurangi riak torsi, sehingga menghasilkan torsi yang lebih stabil dan berpotensi meningkatkan kenyamanan operasi serta keandalan motor.

Berikut adalah hasil desain akhir yang ditampilkan ¹³ pada Tabel 4.45

Tabel 4. 45 Parameter desain akhir motor induksi 3 fasa

Parameter	Nilai
⁵ Stator outer diameter [mm]	349
Stator inner diameter [mm]	235
Rotor outer diameter [mm]	234.3
Rotor inner diameter [mm]	70
Panjang slot hs0 [mm]	0.7
Panjang slot hs2 [mm]	22
Lebar slot bs1 [mm]	10.5
Lebar slot bs2 [mm]	12.5
⁵ Air gap length [mm]	0.7
⁴ Rated speed [r/min]	1463
Rated current [A]	196
core material	D23_50

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis menggunakan metode Taguchi yang dikombinasikan dengan ANOM dan ANOVA, parameter desain yang berpengaruh terhadap kinerja motor induksi meliputi panjang slot stator (hs_0 dan hs_2), lebar slot stator (bs_1 dan bs_2), material inti, serta lebar celah udara. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa material inti merupakan faktor paling dominan, dengan kontribusi sebesar 77,89% terhadap riak torsi, 69,24% terhadap efisiensi, dan 51,47% terhadap torsi. Parameter lain seperti lebar slot bs_1 dan bs_2 , serta lebar celah udara memberikan kontribusi menengah, sedangkan panjang slot stator memiliki pengaruh relatif lebih kecil namun tetap signifikan terhadap distribusi fluks dan karakteristik elektromagnetik motor.

Perbandingan antara desain awal dan desain hasil optimasi menunjukkan peningkatan kinerja yang nyata. Pada desain awal, motor memiliki efisiensi sebesar 86,58%, riak torsi sebesar 17,27%, dan rugi daya sebesar 12.912,22 W. Setelah dilakukan optimasi desain, efisiensi meningkat menjadi 88,52%, riak torsi menurun menjadi 17,13%, dan rugi daya berhasil ditekan menjadi 10.664,45 W, atau berkurang sekitar 17,4%. Daya input juga menurun dari 96.227,56 W menjadi 92.926,03 W, sementara kecepatan operasi tetap konstan pada 1436 rpm. Meskipun terjadi sedikit penurunan torsi rata-rata dari 538,69 Nm menjadi 532,01 Nm, desain akhir tetap lebih unggul karena menghasilkan torsi yang lebih stabil, efisiensi yang lebih tinggi, serta riak torsi yang lebih rendah dibandingkan desain awal.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas ruang lingkup optimasi dengan mempertimbangkan

parameter desain rotor, seperti bentuk dan ukuran batang rotor, jumlah slot rotor, serta material konduktor rotor. Parameter-parameter tersebut berpotensi memberikan pengaruh tambahan terhadap riak torsi, rugi-rugi rotor, dan karakteristik starting motor yang belum dibahas secara mendalam pada penelitian ini.

Selain itu, penelitian selanjutnya dapat mengombinasikan metode Taguchi dengan algoritma optimasi lain, seperti ⁴¹ Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), atau Response Surface Methodology (RSM), guna memperoleh solusi optimasi global yang lebih komprehensif. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan akurasi hasil optimasi serta mengeksplorasi hubungan nonlinier antar parameter desain yang tidak sepenuhnya terakomodasi oleh metode Taguchi.

REFERENSI

- P. Bozek, T. Krenicky, and V. Prajova, "Digital Induction Motor Model Based on the Finite Element Method," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 8, p. 5124, Apr. 2023, doi: 10.3390/app13085124.
- [2] M. J. Hasan and F. A. Jumaa, "Review of modeling induction motor based on FEM analysis with design strategies," 2024, p. 050016. doi: 10.1063/5.0237711.
- [3] H. Feng, S. Zhang, J. Wei, X. Xu, C. Gao, and L. Ai, "Torque ripple reduction of brushless DC motor with convex arc-type permanent magnets based on robust optimization design," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 16, no. 5, pp. 565–574, May 2022, doi: 10.1049/elp2.12176.
- [4] J. A. Domínguez, N. Duro, and E. Gaudio, "Finite Element Analysis of Different Transverse Flux Linear Induction Motor Models to Improve the Performance of the Main Magnetic Circuit," *Machines*, vol. 12, no. 2, p. 89, Jan. 2024, doi: 10.3390/machines12020089.
- [5] A. G. Yetgin and B. Durmuş, "Analysis of the effect of rotor slot type on torque ripple in induction motors by finite element method," *El-Cezeri J. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 536–542, 2020, doi: 10.31202/ecjse.664132.
- [6] C.-H. Lin, "Altered Grey Wolf Optimization and Taguchi Method with FEA for Six-Phase Copper Squirrel Cage Rotor Induction Motor Design," *Energies*, vol. 13, no. 9, p. 2282, May 2020, doi: 10.3390/en13092282.
- [7] I. N. Michael and P. I. I. Eneh, "Optimization of a Single-Phase Induction Motor Using Finite Element Method," *Int. J. Res. Publ. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 4441–4449, Mar. 2025, doi: 10.55248/gengpi.6.0225.1020.
- [8] O. Iegorov, O. Iegorova, M. Kundenko, and A. Milenin, "Single-Phase Induction Motors Winding Parameters Optimization with Maximum Efficiency," in *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, IEEE, Sep. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240878.

- [9] L. Zhang, "Optimization of asynchronous motor with Taguchi method based on Finite Element Analysis," *MATEC Web Conf.*, vol. 382, p. 01010, Jun. 2023, doi: 10.1051/mateconf/202338201010.
- [10] R. Boukenoui, R. Bradai, and A. Kheldoun, "A Taguchi method-based optimization algorithm for the analysis of the wind driven-self-excited induction generator," *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 15, no. 2, p. 769, Jun. 2024, doi: 10.11591/ijpeds.v15.i2.pp769-783.
- [11] H. Cai, R. Huang, H. Zhai, H. Xu, S. Liu, and J. Xu, "Fast and Accurate Traction Induction Machine Performance Calculation Method for Integrated Onboard Charging in Vehicle to Grid Application," *Front. Energy Res.*, vol. 10, Apr. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.875706.
- [12] Sarjono, R. Gianto, and A. Hiendro, "Evaluasi Kinerja Motor Induksi 3 Fasa 100 Hp / 75 Kw Pada Panel Star – Delta Di Pdam Tirta Raya Adi Sucipto," *J. Tek. Elektro Univ. Tanjungpura*, vol. 2, no. 1, p. 8, 2020, [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/j3eituntan/article/view/42557/75676587020>
- [13] S. Nuari, Atmam, and E. Zondra, "Analisis Starting Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Programmable Logic Controller (PLC)," *SainETIn*, vol. 2, no. 2, pp. 60–67, Nov. 2018, doi: 10.31849/sainetin.v2i2.2019.
- [14] M. K. Shihab, I. M. A. Nrartha, and I. M. B. Sukmadana, "ANALISIS ARUS STARTING DAN TORSI PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA TERHADAP PEMASANGAN KAPASITOR SECARA REAL TIME BERBASIS ATMEGA 2560," *DIELEKTRIKA*, vol. 5, no. 2, pp. 99–107, Sep. 2018, doi: 10.29303/dielektrika.v5i2.167.
- [15] P. Harahap, "Pengaruh Jatuh Tegangan Terhadap Kerja Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Simulink MATLAB," *Media Elektr.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–18, 2016.
- [16] B. Baharudin, S. Jie, and M. Mustamin, "Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Karakteristik (Unjuk Kerja) Motor Induksi Tiga Fasa," *J. Fokus*

Elektroda Energi List. Telekomun. Komputer, Elektron. dan Kendali), vol. 2, no. 3, pp. 1–5, 2017, doi: 10.33772/jfe.v2i3.7901.

- [17] B. Sugiyantoro, T. Haryono, and Y. Farqadain, “Perancangan Dan Pengujian Motor Induksi Tiga Fase Multi-Kutub,” *44 Jnteti*, vol. 1, no. 1, pp. 44–48, 2012.
- [18] S. Diantoro, D. Nugroho, and A. A. Nugroho, “ANALISA PENGARUH PERUBAHAN FREKUENSI DAN TEGANGAN TERHADAP EFISIENSI MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK,” *Elektrika*, vol. 16, no. 2, p. 127, Nov. 2024, doi: 10.26623/elektrika.v16i2.8852.
- [19] A. F. Challoop, A. J. Sultan, and M. F. Bonneya, “Performance Analysis of Induction Motor Based on Core Material . Keywords : Introduction :,” 2021.
- [20] I. K. Onwuka, P. I. Obi, O. Oputa, and C. S. Ezeonye, “Performance Analysis of Induction Motor with Variable Air-Gaps using Finite Element Method,” *NIPES - J. Sci. Technol. Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 112–124, 2023, doi: 10.5281/zenodo.7729203.
- [21] M. Carbonieri and N. Bianchi, “A complete and fast analysis procedure for three-phase induction motors using finite element, considering skewing and iron losses,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 5, 2021, doi: 10.3390/app11052428.
- [22] H. H. Lee, K. Il Woo, H. S. Park, and H. D. Jeon, “Evaluation of uncertainty for the efficiency of three-phase induction motor using FEA,” *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 59, no. 3, pp. 817–823, 2019, doi: 10.3233/JAE-171055.
- [23] F. Ferdianto, G. Fatwa, A. Erlangga, and I. Marbawi, “Performance Analysis of Permanent Magnet BLDC Motor for Reducing Cogging Torque Using Taguchi Method,” *Elkha*, vol. 16, no. 1, p. 28, 2024, doi: 10.26418/elkha.v16i1.76582.
- [24] P. Woolf, “CHEMICAL PROCESS DYNAMICS AND”.

ANALISIS DESAIN STATOR PADA MOTOR INDUKSI MENGUNAKAN METODE TAGUCHI UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI DAN MENGURANGI RIAK TORSI

ORIGINALITY REPORT

14%

SIMILARITY INDEX

12%

INTERNET SOURCES

6%

PUBLICATIONS

5%

STUDENT PAPERS

Rayandi Reynaldi

PRIMARY SOURCES

1

eskripsi.usm.ac.id

Internet Source

4%

2

Yogesh Bichpuriya. "Design and testing of heuristic for market splitting in electric power exchange", TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference, 11/2009

Publication

1%

3

repository.its.ac.id

Internet Source

1%

4

www.mdpi.com

Internet Source

<1%

5

H.N. Lin, P. Seangwong, N. Fernando, A. Sitaratiwat, P. Khunkitti. "Torque Capability Enhancement of Commercial Interior Permanent Magnet Motors using T-Shaped Notched and Merged Barrier Rotor Topology", Results in Engineering, 2025

Publication

<1%

6	text-id.123dok.com Internet Source	<1 %
7	digilibadmin.unismuh.ac.id Internet Source	<1 %
8	repository.unissula.ac.id Internet Source	<1 %
9	repository.upnvj.ac.id Internet Source	<1 %
10	Submitted to UPN Veteran Jakarta Student Paper	<1 %
11	dspace.uui.ac.id Internet Source	<1 %
12	repositori.usu.ac.id Internet Source	<1 %
13	repository.ub.ac.id Internet Source	<1 %
14	Submitted to Saint Leo University Student Paper	<1 %
15	Vladyslav Pliuhin, Yevgen Tsegelnyk, Sergiy Plankovskyy, Oleksandr Aksonov, Volodymyr Kombarov. "Chapter 42 Implementation of Induction Motor Speed and Torque Control System with Reduced Order Model in ANSYS Twin Builder", Springer Science and Business Media LLC, 2023	<1 %

16	erepo.unud.ac.id Internet Source	<1 %
17	123dok.com Internet Source	<1 %
18	etd.umy.ac.id Internet Source	<1 %
19	journals.usm.ac.id Internet Source	<1 %
20	repository.trisakti.ac.id Internet Source	<1 %
21	arxiv.org Internet Source	<1 %
22	id.statsidea.com Internet Source	<1 %
23	repository-penerbitlitnus.co.id Internet Source	<1 %
24	repository.umsu.ac.id Internet Source	<1 %
25	Submitted to Universitas Bengkulu Student Paper	<1 %
26	pt.scribd.com Internet Source	<1 %
27	www.scribd.com	

Internet Source

<1 %

28

adoc.pub

Internet Source

<1 %

29

digilib.unila.ac.id

Internet Source

<1 %

30

docplayer.info

Internet Source

<1 %

31

id.123dok.com

Internet Source

<1 %

32

Submitted to Institut Teknologi Kalimantan

Student Paper

<1 %

33

Submitted to Sriwijaya University

Student Paper

<1 %

34

eprints.undip.ac.id

Internet Source

<1 %

35

docobook.com

Internet Source

<1 %

36

gurumuda.net

Internet Source

<1 %

37

riut.utfpr.edu.br

Internet Source

<1 %

38

es.scribd.com

Internet Source

<1 %

39	eprints.umm.ac.id Internet Source	<1 %
40	eprints.upnyk.ac.id Internet Source	<1 %
41	link.springer.com Internet Source	<1 %
42	vdocuments.site Internet Source	<1 %
43	anyflip.com Internet Source	<1 %
44	digilib.uinsgd.ac.id Internet Source	<1 %
45	ojs.cahayamandalika.com Internet Source	<1 %
46	openjournal.unpam.ac.id Internet Source	<1 %
47	publikasiilmiah.ums.ac.id Internet Source	<1 %
48	repository.iain-manado.ac.id Internet Source	<1 %
49	repository.unibos.ac.id Internet Source	<1 %
50	www.pustaka.ut.ac.id Internet Source	<1 %

51	www.worldnovel.online Internet Source	<1 %
52	Submitted to TU Delft Student Paper	<1 %
53	eprints.mercubuana-yogya.ac.id Internet Source	<1 %
54	etheses.iainponorogo.ac.id Internet Source	<1 %
55	journal.ipb.ac.id Internet Source	<1 %
56	journals.unizik.edu.ng Internet Source	<1 %
57	repository.uhamka.ac.id Internet Source	<1 %
58	repository.umy.ac.id Internet Source	<1 %
59	ejournal.unsri.ac.id Internet Source	<1 %
60	haryadi29.blogspot.com Internet Source	<1 %
61	ijece.iaescore.com Internet Source	<1 %
62	kimia.fmipa.um.ac.id Internet Source	<1 %

63	lib.unnes.ac.id Internet Source	<1 %
64	media.neliti.com Internet Source	<1 %
65	repository.uhn.ac.id Internet Source	<1 %
66	repository.unsri.ac.id Internet Source	<1 %
67	teplo-life.com Internet Source	<1 %
68	www.researchgate.net Internet Source	<1 %
69	zh.scribd.com Internet Source	<1 %
70	Chih-Hong Lin. "Altered Grey Wolf Optimization and Taguchi Method with FEA for Six-Phase Copper Squirrel Cage Rotor Induction Motor Design", Energies, 2020 Publication	<1 %
71	johannessimatupang.wordpress.com Internet Source	<1 %

Exclude quotes

On

Exclude matches

Off

Exclude bibliography On