

ANALISIS DAN SIMULASI PENGARUH BENTUK MAGNET DAN KECEPATAN PUTAR MOTOR TERHADAP FLUKS MAGNET DAN SUHU MOTOR BLDC PADA KENDARAAN LISTRIK

Hanif Abrar Ali Faturrahman¹, Fatkhur Rohman²

2141220052@student.polinema.ac.id¹, fatkhur_rohman@polinema.ac.id²

Politeknik Negeri Malang

ABSTRAK

Motor Brushless Direct Current) merupakan komponen krusial pada kendaraan listrik karena efisiensinya yang tinggi, namun kinerjanya sangat dipengaruhi oleh distribusi fluks magnet dan suhu operasional, yang salah satunya ditentukan oleh bentuk magnet permanen pada rotor. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan pengaruh variasi bentuk magnet serta kecepatan putar terhadap distribusi fluks magnet dan suhu pada motor BLDC. Variabel bebas yang dimanipulasi adalah bentuk magnet dengan dua variasi, yaitu persegi panjang (15mm x 4mm x 2mm) dan lingkaran (diameter 12mm x 2mm), serta kecepatan putar motor pada tiga tingkat: 1500, 2000, dan 3000 RPM. Variabel terikat yang diukur sebagai hasilnya adalah distribusi fluks magnet (Tesla) dan suhu operasional motor (K), sementara variabel kontrol yang dijaga konstan adalah material magnet (Neodymium grade N38) dan ukuran magnet untuk setiap variasi bentuk. Metode yang digunakan adalah simulasi numerik dengan perangkat lunak Autodesk Inventor untuk pemodelan 3D dan SimScale untuk analisis elektromagnetik dan termal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa magnet berbentuk persegi panjang secara konsisten menghasilkan nilai fluks magnet yang lebih tinggi (mencapai 1,854 T pada 3000 RPM) dibandingkan magnet berbentuk lingkaran (1,789 T pada 3000 RPM). Berlawanan dengan hipotesis awal, simulasi termal menunjukkan bahwa motor dengan magnet persegi panjang menghasilkan suhu operasional akhir yang sedikit lebih rendah (316,953 K pada 3000 RPM) dibandingkan dengan magnet lingkaran (317,524 K). Penelitian juga mengonfirmasi bahwa peningkatan kecepatan putar secara signifikan menaikkan nilai fluks magnet dan suhu operasional pada kedua bentuk magnet. Dapat disimpulkan bahwa dalam simulasi ini, magnet persegi panjang menunjukkan profil kinerja keseluruhan yang lebih unggul, baik dari segi fluks magnetik maupun manajemen termal.

Kata Kunci: BLDC, Simulasi, Fluks Magnet, Bentuk Magnet, Suhu Termal.

ABSTRACT

The BLDC (Brushless Direct Current) motor is a crucial component in electric vehicles due to its high efficiency; however, its performance is significantly influenced by magnetic flux distribution and operational temperature, which are determined, in part, by the shape of the permanent magnets on the rotor. This study aims to analyze and compare the effects of varying magnet shapes and rotational speeds on the magnetic flux distribution and temperature in a BLDC motor. The manipulated independent variables are the magnet shape, with two variations—rectangular (15mm x 4mm x 2mm) and circular (12mm diameter x 2mm)—and the motor's rotational speed at three levels: 1500, 2000, and 3000 RPM. The dependent variables measured as outcomes are the magnetic flux distribution (Tesla) and the motor's operational temperature (K), while the controlled variables kept constant are the magnet material (Neodymium grade N38) and the overall dimensions for each magnet shape variation. The method employed is a numerical simulation using Autodesk Inventor software for 3D modeling and SimScale for electromagnetic and thermal analysis. The results show that rectangular magnets consistently produce higher magnetic flux values (reaching 1.854 T at 3000 RPM) compared to circular magnets (1.789 T at 3000 RPM). Contrary to the initial hypothesis, the thermal simulation indicates that the motor with rectangular magnets yields a slightly lower final operating temperature (316.953 K at 3000 RPM) compared to the one with circular magnets (317.524 K). The study also confirms that an increase in rotational speed significantly raises both the magnetic flux value and the operational

temperature for both magnet shapes. It can be concluded that, within this simulation, the rectangular magnet demonstrates a superior overall performance profile in terms of both magnetic flux and thermal management.

Keywords: BLDC, Simulation, Magnetic Flux, Magnet Shape, Thermal Temperature.

PENDAHULUAN

Motor BLDC (Brushless DC Motor) adalah jenis motor arus searah tanpa sikat yang menawarkan efisiensi lebih tinggi dan umur lebih panjang. Motor ini memanfaatkan rotor dengan magnet permanen dan stator yang dilengkapi belitan untuk menghasilkan medan magnet. Dengan pengembangan teknologi yang efisien dan spesifik, motor BLDC semakin diandalkan dalam berbagai sektor industri, termasuk sebagai penggerak, kompresor, pompa, generator mikro turbin gas, dan sistem kendaraan hibrida listrik [1]. Prinsip kerja motor ini didasarkan pada interaksi antara arus listrik yang mengalir melalui kumparan stator dan magnet permanen pada rotor, yang menghasilkan putaran. Keunggulan utama motor BLDC meliputi efisiensi tinggi karena minimnya gesekan mekanis, umur pakai yang lebih lama tanpa komponen aus seperti sikat, serta pengurangan kehilangan energi akibat gesekan dan panas. Selain itu, motor ini juga menawarkan kestabilan operasional dan kontrol presisi dalam berbagai kecepatan putaran. Seiring dengan kemajuan teknologi, penggunaan motor BLDC diperkirakan akan semakin meluas, memberikan kontribusi signifikan terhadap efisiensi energi dan keberlanjutan di berbagai aplikasi industri.

Faktor-faktor seperti bentuk magnet dan konfigurasi material pada motor BLDC dapat memengaruhi kinerja motor secara signifikan. Sebagai contoh, bentuk magnet memengaruhi distribusi kepadatan medan magnet, yang pada gilirannya menentukan efisiensi, output torsi, dan umur motor. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa optimasi geometri magnet pada motor BLDC dapat memberikan efisiensi energi yang lebih tinggi serta mengurangi kerugian daya [2].

Pada penelitian sebelumnya dengan judul “Analisis Pengaruh Geometri Magnet Terhadap Performa Motor BLDC,” dilakukan simulasi

bentuk magnet berbentuk persegi panjang dan melengkung untuk membandingkan distribusi kepadatan medan magnet pada motor BLDC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa magnet dengan bentuk melengkung menghasilkan distribusi medan magnet yang lebih homogen, meningkatkan efisiensi torsi hingga 15% dibandingkan dengan bentuk persegi panjang.

Penelitian lain berjudul “Analisis Sebaran Fluksi Magnetik Desain Permanent Magnet Synchronous Motor 30 kW Berbasis Metode Elemen Hingga” membahas simulasi dan analisis distribusi fluksi magnetik pada motor PMSM menggunakan perangkat lunak JMAG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain motor ini tidak hanya mencapai nilai torka dan daya nominal yang diharapkan, tetapi juga menghasilkan distribusi fluksi magnetik yang optimal dengan nilai saturasi mendekati batas maksimum material inti. Studi ini memberikan wawasan tentang pentingnya desain geometri motor dan pemilihan material yang tepat untuk meningkatkan kinerja motor dalam aplikasi kendaraan listrik.

Tantangan krusial dalam optimalisasi motor BLDC untuk aplikasi kendaraan listrik adalah pengendalian kinerja elektromagnetik dan termal. Performa ini sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor desain seperti geometri magnet permanen, yang secara fundamental menentukan distribusi fluks magnet dan manajemen panas motor. Oleh karena itu, menjadi sangat relevan untuk melakukan investigasi mendalam mengenai bagaimana variasi bentuk magnet serta kecepatan putar yang dinamis dapat mengubah karakteristik fluks dan suhu motor, di mana analisis melalui simulasi numerik menjadi pendekatan

yang efektif untuk tujuan ini. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis secara komparatif kinerja antara dua bentuk magnet yang umum (persegi panjang dan lingkaran) guna mengetahui pengaruhnya terhadap fluks magnet dan suhu pada berbagai tingkat kecepatan. Maka dari itu, penelitian ini diwujudkan dalam sebuah karya ilmiah dengan judul “Analisi dan Simulasi Pengaruh Bentuk Magnet dan Kecepatan Putaran Motor Terhadap Kepadatan Medan Magnet dan Suhu Motor BLDC”.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik dan analisis dengan metode deskriptif-kuantitatif untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk magnet, seperti persegi panjang dan lingkaran, terhadap distribusi medan magnet pada motor BLDC [11]. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak untuk memodelkan motor BLDC yang dilengkapi dengan magnet berbentuk persegi panjang dan lingkaran. Data hasil simulasi dianalisis untuk mengevaluasi kinerja motor dan distribusi medan magnet yang dihasilkan oleh berbagai bentuk magnet.

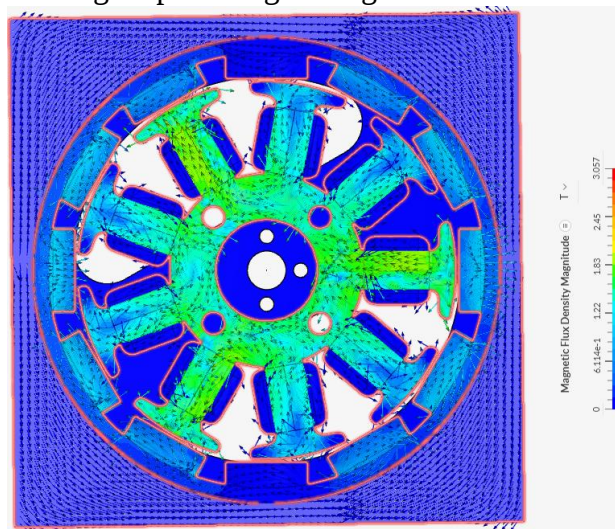
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk magnet (persegi panjang dan lingkaran) serta kecepatan putar motor (1500, 2000, dan 3000 RPM) terhadap fluks magnet (Tesla) dan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pada motor BLDC. Data diperoleh melalui simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Inventor dan SimScale. Setiap kombinasi pengujian dilakukan tiga kali untuk memperoleh nilai rata-rata motor BLDC pada berbagai variasi bentuk magnet dan kecepatan putar motor. Nilai rata-rata diperoleh dari tiga kali pengujian masing-masing kombinasi.

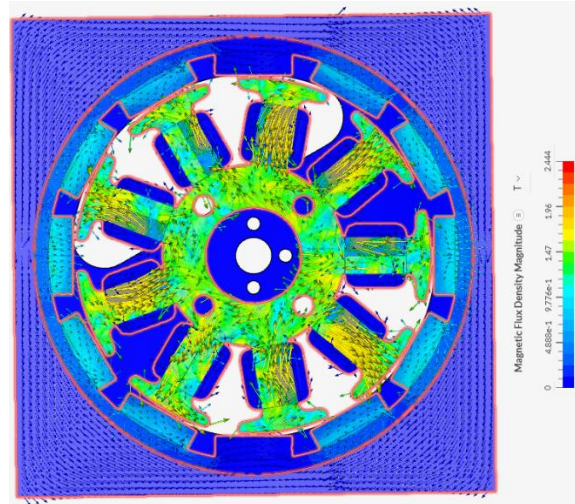
1. Hasil Simulasi Fluks Linkage pada Magnet Lingkaran dan Persegi Panjang.

Pada sub-bab ini, disajikan hasil visual dari simulasi distribusi fluks magnetik untuk kedua variasi bentuk magnet pada rentang kecepatan 1500, 2000, dan 3000 RPM. Analisis visual ini berfokus pada pola aliran dan intensitas fluks yang digambarkan melalui kontur warna.

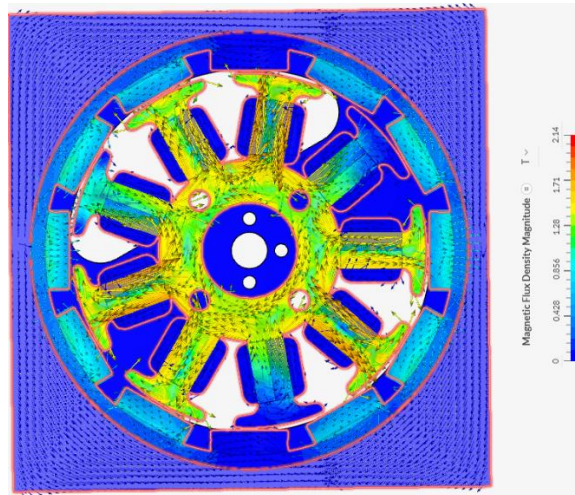
- a. Karakteristik Fluks Magnet pada magnet lingkaran.



Gambar 1. Hasil pada RPM 1500



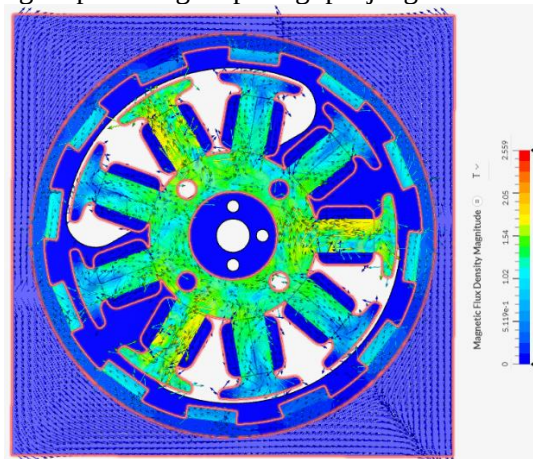
Gambar 2. Hasil pada RPM 2000



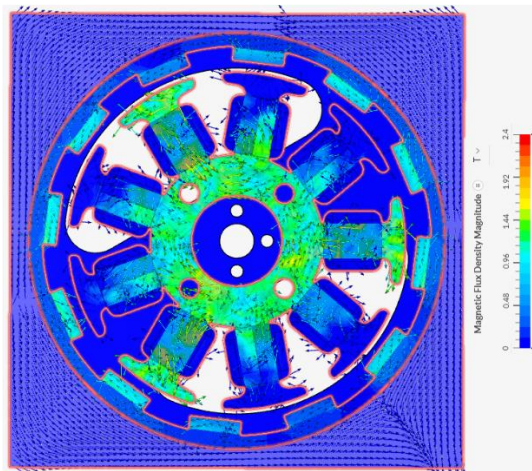
Gambar 3. Hasil pada RPM 3000

Berdasarkan hasil simulasi pada berbagai kecepatan putar motor, distribusi fluks magnet menunjukkan perubahan yang signifikan. Pada 1500 RPM (Gambar 4.1), distribusi fluks terlihat sangat ideal, ditandai dengan dominasi warna biru pada sebagian besar area motor yang mengindikasikan fluks berada dalam kondisi terkendali di dalam inti. Konsentrasi fluks berwarna hijau tampak terfokus pada area gigi stator, yang merupakan titik utama interaksi medan magnet. Ketika kecepatan meningkat menjadi 2000 RPM (Gambar 4.2), intensitas warna hijau pada gigi stator menjadi lebih pekat, serta arah aliran fluks yang ditunjukkan oleh panah terlihat lebih padat, menunjukkan medan magnet yang semakin kuat. Pada kecepatan 3000 RPM (Gambar 4.3), terjadi peningkatan signifikan dalam kepadatan fluks, ditandai dengan perubahan warna menjadi kuning cerah pada gigi stator, yang menunjukkan bahwa bagian inti bekerja di bawah beban magnetik yang tinggi.

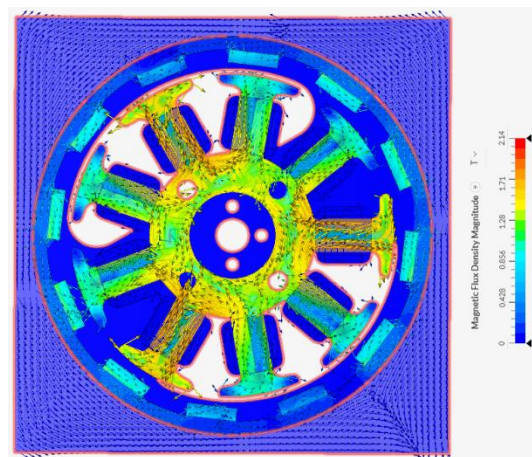
b. Karakteristik Fluks Magnet pada magnet persegi panjang



Gambar 4. Hasil pada RPM 1500



Gambar 5. Hasil pada RPM 2000



Gambar 6. Hasil pada RPM 3000

Pada kecepatan 1500 RPM (Gambar 4.), motor dengan konfigurasi magnet persegi panjang menunjukkan karakteristik operasi yang optimal. Visualisasi distribusi fluks memperlihatkan dominasi warna biru pada area luar motor, yang mengindikasikan bahwa fluks magnet di wilayah tersebut dalam keadaan rendah dan terkendali. Konsentrasi fluks dengan intensitas warna hijau tampak terfokus pada gigi stator, mencerminkan lokasi utama terjadinya interaksi antara medan magnet dan arus listrik yang diinduksi. Ketika

kecepatan dinaikkan menjadi 2000 RPM (Gambar 4.5), intensitas warna hijau pada gigi stator terlihat meningkat menjadi lebih cerah, menandakan bertambahnya kekuatan medan magnet akibat peningkatan kecepatan putar rotor. Meskipun demikian, pola distribusi fluks tetap menunjukkan keteraturan tanpa adanya gejala saturasi magnetik, yang berarti bahwa motor masih berada dalam batas kinerja material magnetik yang aman. Namun, pada kecepatan 3000 RPM (Gambar 6), terjadi perubahan visual yang paling mencolok di mana area gigi stator didominasi oleh warna kuning pekat. Perubahan ini menunjukkan bahwa kepadatan fluks magnet telah mencapai tingkat yang sangat tinggi, sehingga material inti bekerja mendekati batas saturasi magnetiknya. Kondisi tersebut dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi histeresis dan pemanasan pada motor jika beroperasi dalam durasi lama, sehingga perlu diperhatikan dalam desain pendinginan dan pemilihan material inti agar kinerja motor tetap optimal pada kecepatan tinggi.

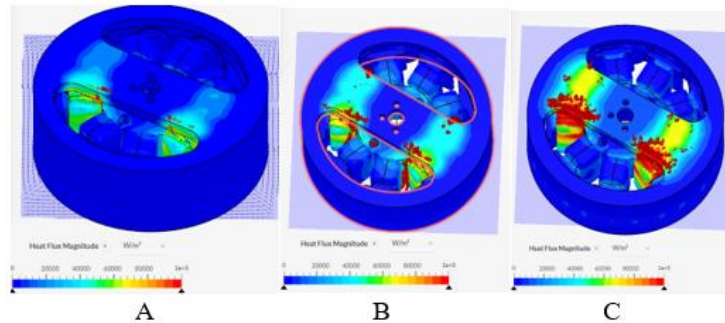
Tabel 1. Fluks Magnet

No	Bentuk magnet	Kecepatan putar rotor (RPM)	Replikasi	Fluks magnet (Tesla, T)	Rata-rata (Tesla, T)
1	Magnet Persegi Panjang	1500	1	1.626	1.627
			2	1.628	
			3	1.627	
		2000	1	1.647	1.648
			2	1.649	
			3	1.648	
		3000	1	1.853	1.854
			2	1.855	
			3	1.854	
2	Magnet Lingkaran	1500	1	1.613	1.614
			2	1.615	
			3	1.614	
		2000	1	1.634	1.635
			2	1.636	
			3	1.635	
		3000	1	1.788	1.789
			2	1.790	
			3	1.789	

Pada table 1. fluks magnet menyajikan data hasil pengukuran fluks magnet yang dihasilkan oleh BLDC motor dengan dua variasi bentuk magnet, yaitu magnet persegi panjang dan magnet lingkaran. Pengujian dilakukan pada tiga tingkat kecepatan putar rotor yang berbeda: 1500 RPM, 2000 RPM, dan 3000 RPM. Untuk setiap kombinasi perlakuan, pengukuran diulang sebanyak tiga kali (replikasi) guna memastikan validitas dan keandalan data, yang kemudian dihitung nilai rata-ratanya.

2. Hasil Simulasi Suhu pada Magnet Lingkaran dan Persegi Panjang

a. Karakteristik Suhu pada Magnet Lingkaran.

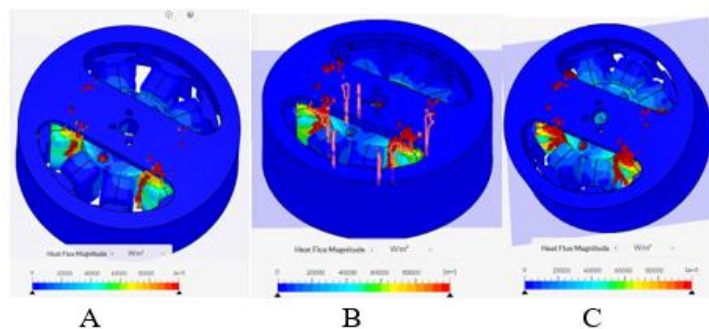


Gambar 7. Hasil pada (A). RPM 1500, (B). RPM 2000, (C). RPM 3000

Desain motor BLDC ini menggunakan housing silinder yang juga berfungsi sebagai rotor dalam konfigurasi outrunner, dengan dua buah jendela besar yang saling berhadapan sebagai jalur ventilasi utama. Desain terbuka ini sangat mempengaruhi proses pendinginan motor karena memungkinkan sirkulasi udara bebas untuk mendinginkan komponen internal penghasil panas, terutama kumparan stator.

Pada gambar 4.7 simulasi termal, dianalisis magnitudo fluks panas yang timbul dari kerugian tembaga pada lilitan dan kerugian inti pada besi stator. Pada kecepatan awal 1500 RPM, manajemen termal motor sangat baik, dengan sebagian besar badan motor berwarna biru pekat yang menandakan fluks panas rendah, dan konsentrasi panas hanya pada area gigi stator dengan warna sian serta sedikit titik panas (hotspots) berwarna merah. Data temperatur mendukung observasi ini, menunjukkan kenaikan suhu yang terkendali dari 25.00°C (298.150 K) pada detik ke-0 menjadi 36.04°C (309.192 K) pada detik ke-100. Seiring dengan peningkatan kecepatan menjadi 2000 RPM, beban termal meningkat signifikan, yang secara visual ditandai dengan perubahan warna gigi stator menjadi hijau dan titik-titik panas yang berkembang menjadi gugusan yang jauh lebih padat. Hal ini sejalan dengan data temperatur yang menunjukkan kenaikan suhu dari 24.85°C menjadi 39.85°C dalam rentang waktu yang sama. Puncaknya, pada kecepatan 3000 RPM, simulasi menunjukkan kondisi termal paling kritis di mana gigi stator "menyala" dengan warna dominan kuning cerah dan gugusan titik panas telah menjadi sangat besar menyerupai semburan api. Data numerik mengonfirmasi kondisi ini, dengan temperatur yang melonjak paling tinggi, mencapai 44.85°C (318.0 K) pada akhir simulasi. Peningkatan temperatur yang progresif di setiap tingkatan kecepatan ini secara jelas mengilustrasikan bagaimana beban kerja yang lebih tinggi menghasilkan panas yang lebih besar, yang berisiko menyebabkan overheating jika motor dioperasikan secara terus-menerus pada kecepatan puncak.

b. Karakteristik Suhu pada Magnet Persegi Panjang.



Gambar 8. Hasil pada (A). RPM 1500, (B). RPM 2000, (C). RPM 3000

Pada gambar 8. simulasi termal untuk motor dengan magnet persegi panjang, dianalisis magnitudo fluks panas yang timbul dari kerugian tembaga pada lilitan dan kerugian inti pada besi stator. Pada kecepatan awal 1500 RPM, kondisi termal masih terkendali, dengan visual motor didominasi warna biru dan konsentrasi panas ringan pada gigi stator berwarna sian serta beberapa titik panas (hotspots) berwarna merah yang sudah jelas. Data numerik mendukung ini, dengan temperatur maksimal naik secara bertahap dari 20.00°C (293.150 K) menjadi 35.58°C (308.727 K) setelah 100 detik. Saat kecepatan ditingkatkan menjadi 2000 RPM, beban termal meningkat, yang secara visual ditandai dengan area gigi stator yang lebih hijau, gugusan titik panas yang lebih padat, dan munculnya jejak-jejak panas vertikal. Hal ini sejalan dengan temperatur maksimal yang tercatat lebih tinggi, mencapai 38.89°C (312.042 K). Puncaknya pada 3000 RPM, simulasi menampilkan kondisi panas paling intens, dimana gigi stator "menyala" kuning cerah sementara gugusan titik panas merah menjadi sangat besar dan dominan. Data temperatur mengonfirmasi kondisi kritis ini dengan suhu maksimal yang melonjak hingga 43.80°C (316.953 K). Peningkatan visual dan numerik yang progresif ini mengilustrasikan secara detail bagaimana kecepatan putar yang lebih tinggi secara drastis meningkatkan beban termal pada motor.

Tabel 2. Temperatur

No	Bentuk magnet	Kecepatan putar rotor (RPM)	Replikasi	Temperatur (K)	Rata-rata (K)
1	Magnet Lingkaran	1500	1	309.191	309.192
			2	309.193	
			3	309.192	
		2000	1	312.548	312.549
			2	312.550	
			3	312.549	
		3000	1	317.523	317.524
			2	317.525	
			3	317.524	
2	Magnet Persegi Panjang	1500	1	308.726	308.727
			2	308.728	
			3	308.727	
		2000	1	312.041	312.042
			2	312.043	
			3	312.042	
		3000	1	316.952	316.953
			2	316.954	
			3	316.953	

Tabel 2. menyajikan data hasil pengukuran Temperatur magnet yang dihasilkan oleh BLDC motor dengan dua variasi bentuk magnet, yaitu magnet persegi panjang dan magnet lingkaran. Pengujian dilakukan pada tiga tingkat kecepatan putar rotor yang berbeda: 1500 RPM, 2000 RPM, dan 3000 RPM. Untuk setiap kombinasi perlakuan, pengukuran diulang sebanyak tiga kali (replikasi) guna memastikan validitas dan keandalan data, yang kemudian dihitung nilai rata-ratanya.

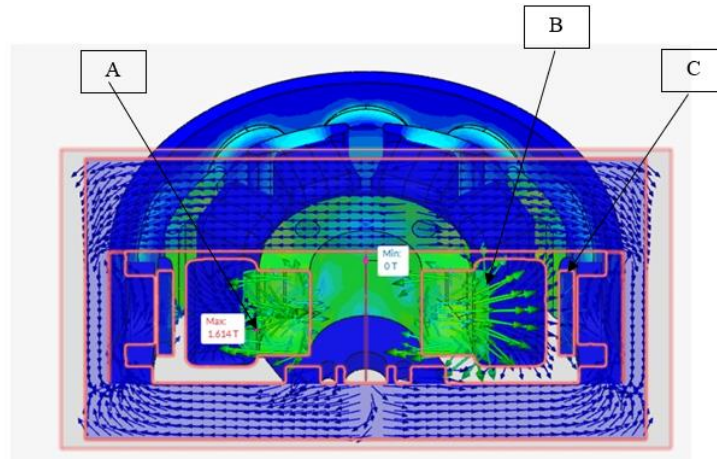
Pembahasan

1. Pengaruh Bentuk Magnet terhadap Fluks Magnet pada Motor BLDC

Pada bagian ini, akan dibahas secara mendalam hasil simulasi yang telah disajikan. Pembahasan mencakup analisis nilai kuantitatif fluks magnet, interpretasi aliran fluks, serta penjelasan detail pada area-area kunci yang ditunjuk pada gambar.

2. Magnet Lingkaran

a. Magnet Lingkaran RPM 1500



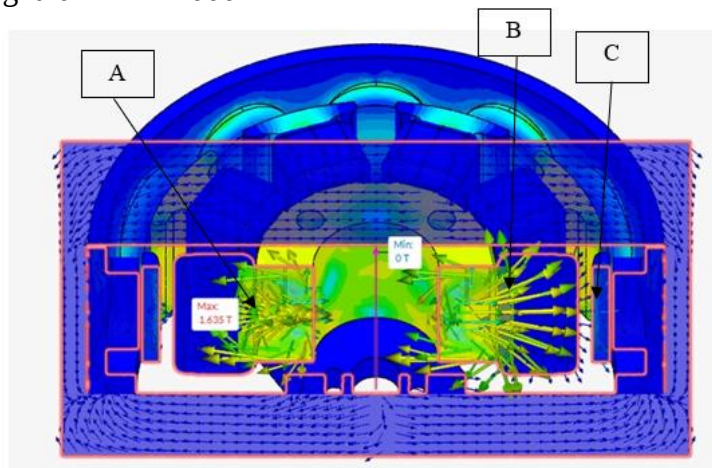
Gambar 9. Magnet Lingkaran RPM 1500

Pada simulasi kerapatan fluks magnetik untuk kecepatan 1500 RPM, diperlihatkan medan magnet yang timbul dari interaksi antara magnet permanen berbentuk lingkaran pada rotor dan fluks dari arus listrik yang mengalir pada kumparan stator. Dari hasil simulasi pada gambar 4.1, didapatkan nilai kepadatan fluks magnetik maksimal sebesar 1.614 Tesla (T). Pada kecepatan ini, motor menunjukkan persebaran distribusi fluks yang sangat optimal, dengan warna biru yang dominan pada bagian terluar motor (housing dan yoke stator). Hal ini mengindikasikan bahwa jalur fluks magnetik terkandung dengan baik di dalam inti motor dan tidak terjadi banyak kebocoran fluks. Konsentrasi fluks yang lebih kuat, ditandai dengan warna dominan hijau, terlihat jelas pada bagian gigi stator (stator teeth) yang berhadapan langsung dengan magnet rotor. Area ini adalah lokasi kunci terjadinya konversi energi elektromagnetik menjadi torsi mekanik. Tidak adanya indikator warna merah atau kuning pekat menunjukkan bahwa pada 1500 RPM, inti stator masih jauh dari titik saturasi magnetik, sehingga motor dapat beroperasi dengan efisiensi tinggi.

Penjelasan Tanda Panah dan Interaksi Fluks:

- (Yoke Stator): Menunjuk ke punggung stator yang berfungsi sebagai jalur kembali (*return path*) untuk fluks magnet. Penyebaran fluks di area ini merata dan berdensitas rendah (ditandai warna biru). Interaksi ini menunjukkan bahwa sirkuit magnetik sangat efisien, di mana fluks terkendali dengan baik di dalam inti dan tidak ada kebocoran yang signifikan ke luar motor.
- (Gigi Stator): Menunjuk ke gigi stator, tempat penyebaran fluks paling terkonsentrasi (warna hijau). Di sinilah interaksi utama terjadi: medan magnet dari rotor melintasi celah udara dan ditarik ke dalam gigi stator, menghasilkan gaya tarik kuat yang merupakan dasar dari pembentukan torsi mekanik.
- (Magnet Permanen): Menunjuk ke magnet permanen pada rotor yang menjadi sumber penyebaran fluks. Fluks menyebar keluar dari magnet ini secara radial, melintasi celah udara, dan berinteraksi langsung dengan gigi stator (B) untuk memulai siklus gaya elektromagnetik.

b. Magnet Lingkaran RPM 2000



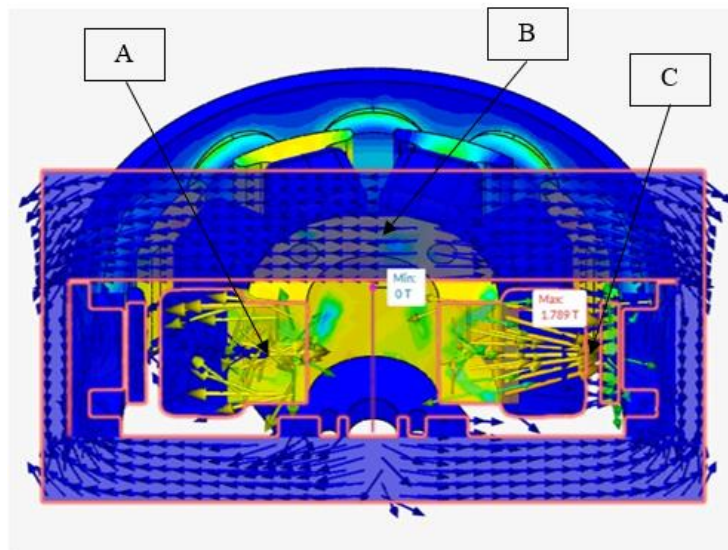
Gambar 10. Magnet Lingkaran RPM 2000

Seiring dengan peningkatan kecepatan putar rotor menjadi 2000 RPM, hasil simulasi pada Gambar 2. menunjukkan adanya peningkatan intensitas medan magnet. Nilai kepadatan fluks magnetik maksimal yang tercatat naik menjadi 1.635 T. Peningkatan ini disebabkan oleh frekuensi eksitasi arus pada kumparan stator yang lebih tinggi untuk mencapai kecepatan putar tersebut. Distribusi fluks secara umum masih menunjukkan pola yang sehat dan terkendali, dengan area terluar tetap berwarna dominan biru. Namun, jika dibandingkan dengan hasil 1500 RPM, area dengan warna hijau pada gigi stator terlihat sedikit lebih intens dan meluas. Ini menandakan bahwa inti stator bekerja lebih keras untuk menyalurkan fluks magnetik yang lebih besar guna menghasilkan torsi yang dibutuhkan pada kecepatan yang lebih tinggi. Sama seperti sebelumnya, tidak adanya area saturasi (warna merah) mengonfirmasi bahwa motor masih beroperasi dalam rentang kerja yang aman dan efisien, meskipun dengan beban magnetik yang sedikit lebih tinggi.

Penjelasan Tanda Panah dan Interaksi Fluks:

- (Yoke Stator): Tetap berfungsi sebagai jalur kembali fluks yang terkendali. Meskipun menanggung beban fluks yang sedikit lebih tinggi, penyebarannya masih merata di sepanjang punggung stator, menjaga efisiensi sirkuit magnetik.
- (Gigi Stator): Interaksi di sini menjadi lebih kuat. Penyebaran fluks yang lebih padat (warna hijau lebih pekat dan meluas) menunjukkan bahwa lebih banyak garis gaya magnet yang terkonsentrasi untuk menghasilkan torsi yang lebih besar sesuai kebutuhan kecepatan yang lebih tinggi pada kecepatan 2000 RPM.
- (Magnet Permanen): Tetap menjadi sumber fluks yang stabil, berinteraksi dengan medan putar stator yang lebih cepat.

c. Magnet Lingkaran RPM 3000



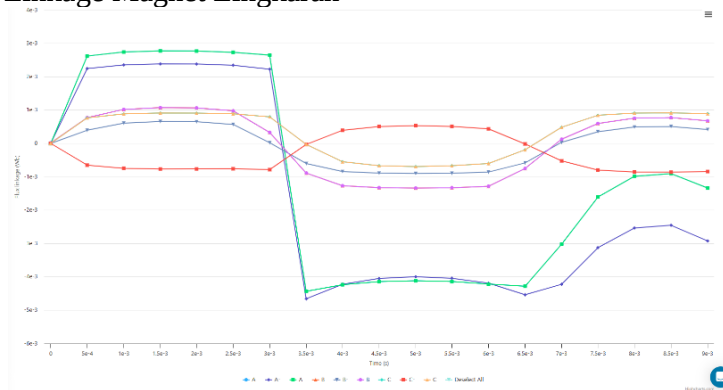
Gambar 11. Magnet Lingkaran RPM 3000

Pada kecepatan putar tertinggi yang diuji, yaitu 3000 RPM, simulasi pada Gambar 3. memperlihatkan peningkatan kepadatan fluks magnetik yang signifikan. Nilai kepadatan fluks magnetik maksimal melonjak drastis hingga mencapai 1.789 T. Peningkatan yang tajam ini menunjukkan bahwa pada kecepatan tinggi, beban kerja elektromagnetik pada motor menjadi jauh lebih besar. Hal ini terlihat jelas pada visualisasi, di mana area pada gigi stator yang sebelumnya berwarna hijau kini didominasi oleh warna kuning yang pekat. Warna kuning ini mengindikasikan tingkat kepadatan fluks yang sangat tinggi dan mendekati batas kemampuan material inti stator untuk menampungnya. Meskipun persebaran fluks pada bagian yoke stator masih berwarna biru, konsentrasi tinggi pada gigi stator menandakan motor beroperasi mendekati batas performa magnetiknya. Belum munculnya warna merah secara luas masih dapat diartikan bahwa motor belum mengalami saturasi total, namun efisiensi motor kemungkinan mulai sedikit menurun pada kecepatan ini akibat meningkatnya kerugian inti (core losses).

Penjelasan Tanda Panah dan Interaksi Fluks:

- a) (Yoke Stator): Penyebaran fluks di area sekitarnya mulai menunjukkan densitas yang lebih tinggi (warna sian/biru muda), menandakan seluruh sirkuit magnetik bekerja di bawah tekanan yang lebih besar.
- b) (Gigi Stator): Warna berubah menjadi kuning pekat, menunjukkan penyebaran fluks yang sangat padat dan mendekati jenuh. Interaksi di sini menjadi sangat kuat namun mulai tidak efisien, karena material inti kesulitan menyalurkan fluks yang berlebih. Kondisi ini berisiko meningkatkan kerugian inti (core loss) dan panas.
- c) (Magnet Permanen): Berinteraksi dengan medan stator yang sangat kuat dan cepat. Hal ini memaksa fluks untuk menyebar dengan intensitas maksimal, menyebabkan tekanan magnetik tertinggi pada seluruh komponen motor.

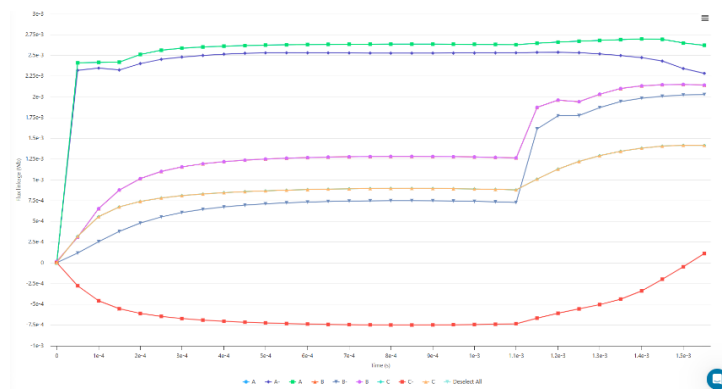
3. Grafik Fluks Linkage Magnet Lingkaran



Gambar 12. Grafik Fluks linkage RPM 1500



Gambar 13. Grafik Fluks linkage RPM 2000



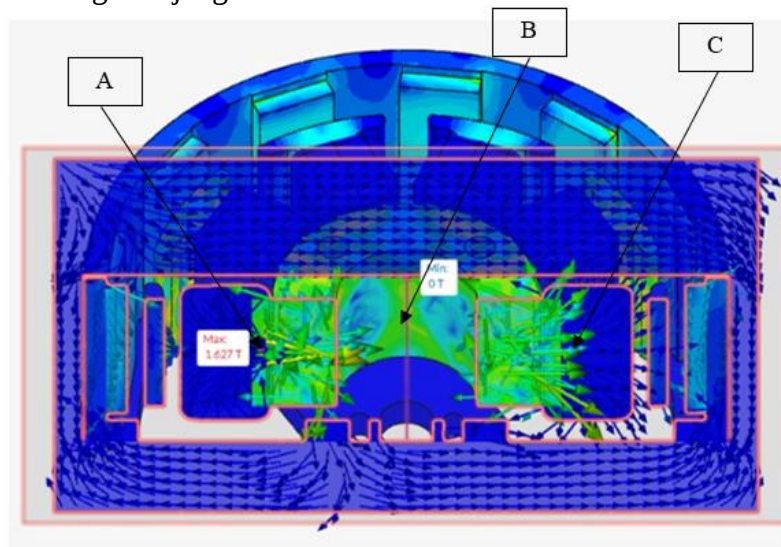
Gambar 14. Grafik Fluks linkage RPM 3000

Analisis simulasi transien pada motor ini, yang menggunakan stator dari material Stainless Steel di SimScale, secara mendasar bertujuan untuk menghasilkan gelombang berbentuk trapesium di ketiga kecepatan (1500, 2000, dan 3000 RPM) sesuai dengan logika komutasi 6-step. 1500 RPM pada gambar 4.9, hasil simulasi paling mendekati bentuk ideal ini, di mana arus menunjukkan pola trapesium dengan puncak $\pm 0,00277$ A dan mengalami proses komutasi yang jelas pada 0,0035 detik, meskipun disertai anomali numerik seperti lonjakan ke -0,00443 A pada fasa A, 2,34 pada B-B, dan -2,51 pada fasa C. Namun, pada kecepatan yang lebih tinggi, muncul keanehan signifikan pada grafik karena material stator yang tidak sesuai menyebabkan distorsi masif. Walaupun pada gambar 4.10 di 2000 RPM logika dasarnya tetap trapesium, pengaruh kuat dari Back-EMF dan arus eddy yang besar pada stator stainless steel meredam dan menghaluskan

sudut-sudut tajam gelombang, sehingga bentuknya terdistorsi dan secara visual menjadi aneh menyerupai gelombang sinusoidal dengan puncak fluks 0,0045 Wb dan 0,0025 Wb, sambil tetap menunjukkan "noise" numerik seperti -1,70 dan 0,525. Keanehan ini menjadi lebih ekstrem pada gambar di 3000 RPM; di sini, arus eddy yang sangat masif menciptakan efek pengereman elektromagnetik yang begitu kuat sehingga bentuk gelombang trapesium yang seharusnya muncul terdistorsi total menjadi seperti respons tangga yang mengalami saturasi, terlihat dari adanya plato di 0,00275 Wb dan lonjakan kedua yang aneh pada $t = 0,0011$ detik, serta diperparah oleh anomali data yang ekstrem seperti nilai awal 1,75 dan lonjakan -4,65. Jadi, meskipun tujuannya adalah bentuk gelombang yang sama (trapesium), keanehan pada grafik di 2000 dan 3000 RPM adalah manifestasi dari distorsi parah akibat kerugian arus eddy yang sangat besar pada stator Stainless Steel, yang kekuatannya meningkat seiring dengan RPM.

4. Magnet Persegi Panjang

a. Magnet Persegi Panjang RPM 1500



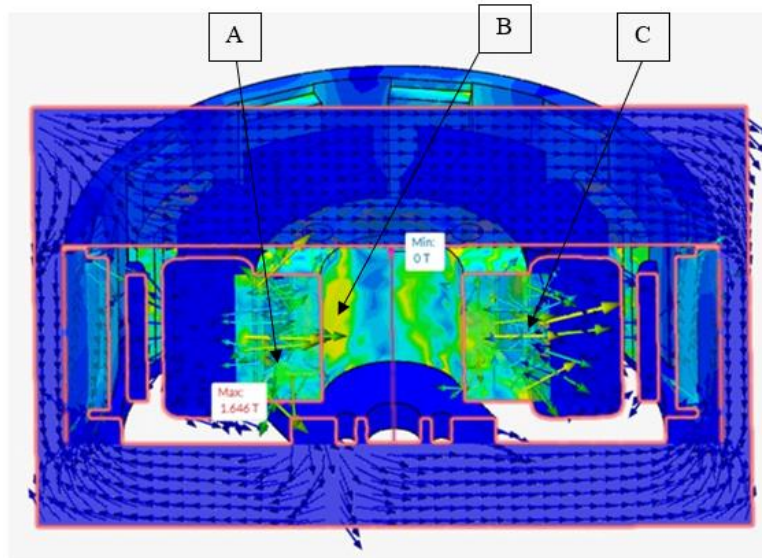
Gambar 15. Magnet Persegi Panjang RPM 1500

Hasil simulasi pada gambar 4. menunjukkan nilai kepadatan fluks magnetik maksimal yang tercatat adalah 1.627 T. Skala warna pada animasi menggambarkan tingkat kepadatan fluks, di mana warna biru merepresentasikan tingkat yang aman dan rendah, sedangkan hijau hingga merah menandakan konsentrasi yang semakin tinggi. Dapat diamati bahwa motor beroperasi secara optimal, ditandai dengan warna dominan biru pada area yoke atau punggung stator, yang mengartikan fluks magnetik berhasil diarahkan dan terkonsentrasi pada jalur yang seharusnya. Interaksi visual yang paling signifikan terjadi pada bagian gigi stator, di mana warna hijau pekat menunjukkan konsentrasi fluks yang kuat, yang merupakan kunci dari timbulnya gaya elektromagnetik untuk memutar rotor. Tidak adanya warna kuning atau merah menandakan bahwa pada kecepatan ini, material inti motor masih sangat mampu menangani beban magnetik tanpa mendekati titik jenuh.

Penjelasan Tanda Panah dan Interaksi Fluks:

- a) (Yoke Stator): Berfungsi sebagai jalur kembali fluks yang sangat terkendali. Penyebaran fluks yang merata dan berdensitas rendah (warna biru) di sepanjang punggung stator memastikan efisiensi operasional sangat tinggi.
- b) (Gigi Stator): Menjadi pusat interaksi utama. Penyebaran fluks yang kuat dan terpusat (hijau pekat sedikit titik berwarna kuning) pada gigi stator menjadi kunci pembangkitan gaya elektromagnetik untuk memutar rotor.

- c) (Magnet Permanen): Sebagai sumber fluks, bentuk persegi panjang memberikan penyebaran medan magnet yang lebih terfokus ke area permukaan gigi stator, yang berkontribusi pada nilai fluks yang sedikit lebih tinggi dibandingkan magnet lingkaran.
- b. Magnet Persegi Panjang RPM 2000



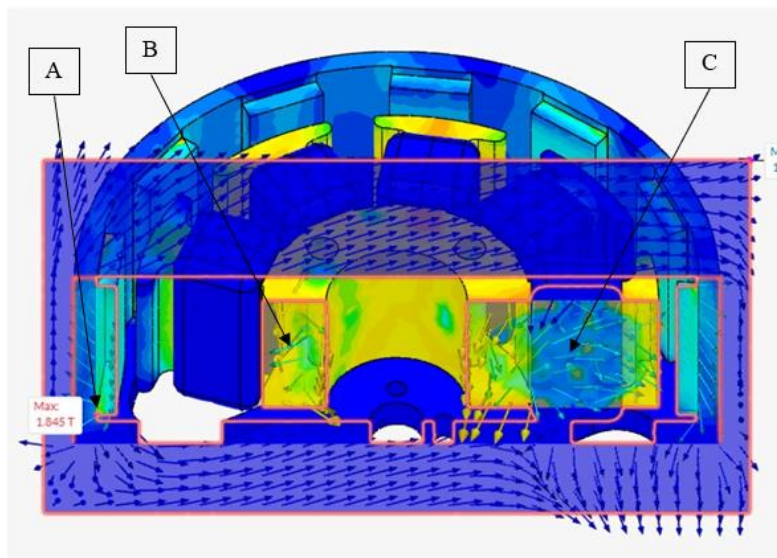
Gambar 16. Magnet Persegi Panjang RPM 2000

Ketika kecepatan motor ditingkatkan menjadi 2000 RPM, interaksi antara medan magnet putar dari stator dan magnet permanen pada rotor menjadi lebih intens. Hal ini secara langsung tercermin dari hasil simulasi pada gambar 4.5 yang menunjukkan peningkatan nilai kepadatan fluks magnetik maksimal menjadi 1.648 T. Secara visual, pola distribusi fluks tetap konsisten, di mana bagian terluar motor tetap berwarna biru, menandakan tidak ada kebocoran fluks yang berarti. Namun, jika diperhatikan lebih detail pada area gigi stator, intensitas warna hijau menjadi sedikit lebih cerah dan areanya sedikit meluas. Ini mengindikasikan bahwa untuk mencapai kecepatan yang lebih tinggi, motor menghasilkan medan magnet yang lebih kuat. Meskipun demikian, motor tetap beroperasi dalam kondisi yang sangat aman, karena belum ada tanda-tanda saturasi.

Penjelasan Tanda Panah dan Interaksi Fluks:

- (Yoke Stator): Jalur fluks tetap aman dan terkendali. Interaksi di bagian ini tidak menunjukkan tanda-tanda kebocoran, dimana pada aliran fluks membentuk gelombang aliran fluks yang stabil.
- (Gigi Stator): Penyebaran fluks menjadi lebih intens (warna hijau lebih cerah). Interaksinya menghasilkan densitas fluks yang lebih tinggi dibandingkan magnet lingkaran pada RPM yang sama, menunjukkan potensi torsi yang lebih besar.
- (Magnet Permanen): Berinteraksi secara efisien dengan medan putar stator yang lebih cepat untuk menghasilkan kecepatan lebih tinggi tanpa kehilangan kontrol fluks.

c. Magnet Persegi Panjang RPM 3000



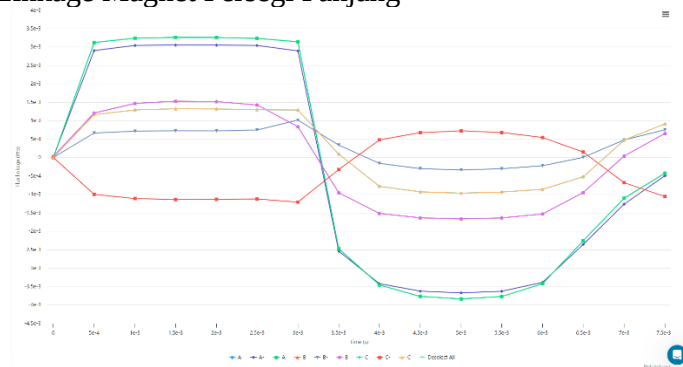
Gambar 17. Magnet Persegi Panjang RPM 3000

Pada pengujian kecepatan puncak 3000 RPM, hasil simulasi pada gambar 4.6 menampilkan lonjakan performa dan beban magnetik yang signifikan. Nilai kepadatan fluks magnetik maksimal meningkat tajam hingga 1.845 T. Perubahan paling dramatis terlihat pada interaksi visual di dalam motor. Area gigi stator yang sebelumnya berwarna hijau kini telah berubah menjadi dominan kuning pekat. Perubahan warna yang mencolok ini secara visual mengomunikasikan bahwa kepadatan fluks di area tersebut sangat tinggi dan inti material bekerja di bawah tekanan magnetik yang jauh lebih besar dibandingkan pada kecepatan yang lebih rendah. Warna kuning yang intens menandakan bahwa inti besi mulai mendekati batas kemampuannya dalam menyalurkan fluks magnet. Meskipun motor belum mencapai kondisi saturasi total (ditandai warna merah), pengoperasian pada kondisi ini dapat menyebabkan peningkatan kerugian inti (core loss) yang berpotensi menurunkan efisiensi dan menghasilkan panas berlebih. Namun, jalur fluks secara keseluruhan masih terkendali dengan baik, seperti yang ditunjukkan oleh area biru pada yoke stator.

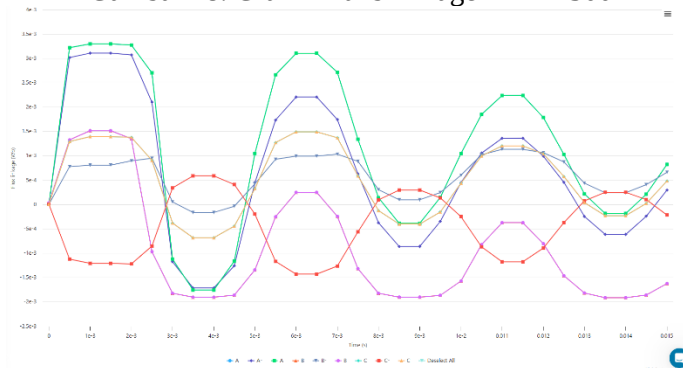
Penjelasan Tanda Panah dan Interaksi Fluks:

- (Yoke Stator): Tetap berwarna biru, menunjukkan bahwa meskipun beban puncak, interaksi fluks di bagian luar masih terkendali dan penyebarannya efisien.
- (Gigi Stator): Didominasi warna kuning pekat, menandakan penyebaran fluks yang sangat padat dan mendekati titik jenuh. Interaksi di sini sangat kuat, namun menempatkan material inti di bawah tekanan magnetik yang sangat besar, yang berpotensi meningkatkan kerugian inti dan panas.
- (Magnet Permanen): Memberikan output fluks maksimal. Interaksinya pada kecepatan ini menyebabkan beban termal dan magnetik tertinggi pada motor.

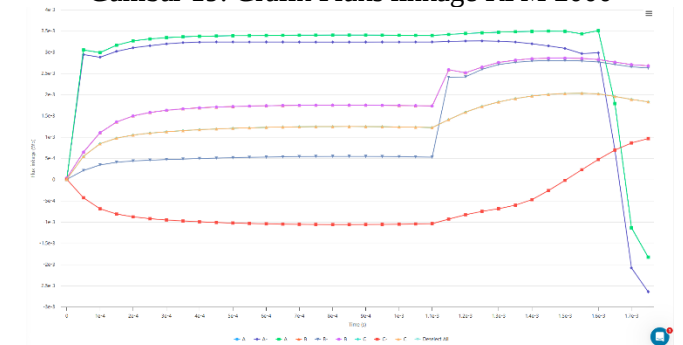
d. Grafik Fluks Linkage Magnet Persegi Panjang



Gambar 18. Grafik Fluks linkage RPM 1500



Gambar 19. Grafik Fluks linkage RPM 2000

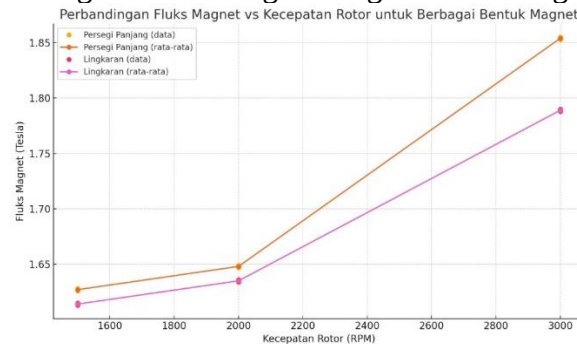


Gambar 20. Grafik Fluks linkage RPM 3000

Pada gambar 20. kecepatan dasar 1500 RPM, sistem menunjukkan perilaku yang paling mendekati ideal dengan bentuk gelombang arus trapesium yang jelas, di mana nilai puncak arus antar kumparan C-C tercatat sebesar 0,00153 A dan proses komutasi pada 0,0035 detik ditandai penurunan arus A-A menjadi -0,00247 A, meskipun sebuah anomali numerik sempat muncul pada B-C sebesar 9,53. Meningkatkan ke 2000 RPM pada gambar, terjadi eskalasi drastis pada beban arus, dengan arus fasa A melonjak dari sebelumnya hanya $\pm 0,00277$ A menjadi lebih dari 260 A, dan arus antar kumparan B-B melampaui 253 A. Pada kecepatan ini, bentuk gelombang trapesium tetap dipertahankan namun dengan frekuensi komutasi yang lebih tinggi dan tajam, disertai ketidakstabilan numerik yang lebih parah seperti munculnya nilai tidak logis 878 A pada fasa B dan -565 A pada C-C. Pada puncaknya di 3000 RPM pada gambar, tren ini berlanjut secara ekstrem sistem tetap mempertahankan karakteristik trapesium yang tajam namun dengan amplitudo arus yang sangat masif, di mana fasa A mencapai lebih dari 340 A, fasa B 285 A, dan fasa C di atas 200 A. Stabilitas sistem pada kecepatan ini menjadi tantangan utama, yang dibuktikan oleh munculnya anomali numerik yang lebih ekstrem seperti -993 A pada C-C dan nilai tidak realistis 1.182 A. Secara keseluruhan, rangkaian simulasi ini secara

konsisten menggambarkan bahwa peningkatan kecepatan pada motor BLDC secara langsung menyebabkan lonjakan eksponensial pada amplitudo arus dan meningkatkan intensitas anomali transien, yang menggarisbawahi pentingnya perancangan sistem kontrol, proteksi, dan pendinginan yang sangat robust untuk aplikasi berkecepatan tinggi.

e. Perbandingan Fluks Magnet antara Magnet Lingkaran dan Magnet Persegi Panjang.

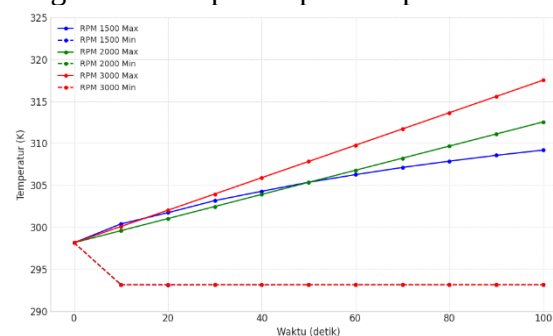


Gambar 21. Grafik Perbandingan Fluks magnet.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa secara umum, nilai fluks magnet meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan putar rotor pada kedua jenis bentuk magnet. Pada magnet berbentuk persegi panjang, rata-rata fluks magnet tercatat sebesar 1,627 T pada 1500 RPM, meningkat menjadi 1,648 T pada 2000 RPM, dan mencapai 1,854 T pada 3000 RPM. Sementara itu, pada magnet berbentuk lingkaran, fluks magnet juga menunjukkan tren yang sama, dengan nilai rata-rata sebesar 1,614 T pada 1500 RPM, 1,635 T pada 2000 RPM, dan 1,789 T pada 3000 RPM.

Dari grafik pada gambar 4.15 yang dihasilkan, terlihat bahwa bentuk magnet persegi panjang menghasilkan fluks magnet yang lebih tinggi dibandingkan magnet lingkaran pada setiap tingkat kecepatan rotor. Hal ini menunjukkan bahwa geometri magnet permanen memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi medan magnet di dalam motor, yang selanjutnya akan berdampak pada performa torsi dan efisiensi kerja motor secara keseluruhan. Selain itu, grafik juga memperlihatkan bahwa selisih fluks antara kedua bentuk magnet semakin besar seiring bertambahnya kecepatan. Misalnya, pada 1500 RPM selisih fluks hanya sekitar 0,013 T, sementara pada 3000 RPM meningkat hingga sekitar 0,065 T. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh bentuk magnet terhadap efisiensi medan magnet semakin dominan pada kecepatan tinggi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pemilihan bentuk magnet yang tepat sangat penting dalam perancangan motor BLDC, terutama untuk aplikasi yang membutuhkan kinerja pada kecepatan tinggi. Magnet berbentuk persegi panjang memberikan keuntungan dalam hal peningkatan fluks magnetik, yang secara langsung berkontribusi pada peningkatan output torsi dan efisiensi motor.

f. Pengaruh Bentuk Magnet terhadap Temperatur pada Motor BLDC

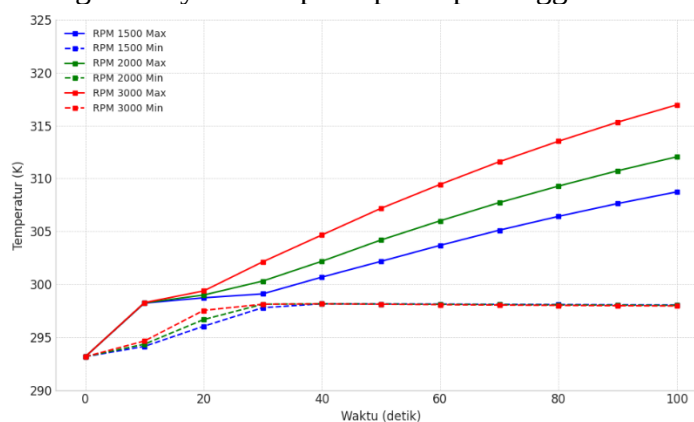


Gambar 22. Grafik Temperatur Magnet Lingkaran

Pada gambar 22. grafik pada gambar ini menyajikan informasi visual mengenai

perkembangan temperatur pada sebuah sistem magnet lingkaran yang diuji dengan tiga kecepatan rotasi berbeda: 1500 RPM, 2000 RPM, dan 3000 RPM. Tujuan utama dari grafik ini adalah untuk menunjukkan bagaimana temperature baik maksimum maupun minimum berubah seiring waktu, dari detik ke-0 hingga detik ke-100, serta bagaimana perubahan temperatur tersebut dipengaruhi oleh laju rotasi magnet.

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa temperatur maksimum mengalami peningkatan secara bertahap seiring dengan bertambahnya waktu pada ketiga nilai RPM yang diuji, di mana semua pengujian dimulai dari temperatur awal 298.15 K. Tren ini dapat diamati dengan jelas di seluruh rentang waktu pengamatan. Pada kecepatan 1500 RPM, temperatur maksimum awal berada di 298.15 K dan meningkat secara bertahap hingga mencapai 309.192 K pada detik ke-100, menunjukkan total kenaikan temperatur sebesar 11.04 K. Temperatur minimumnya, setelah turun dari 298.15 K, menunjukkan kestabilan tinggi dan bertahan di sekitar 293.15 K. Untuk 2000 RPM, temperatur maksimum tercatat naik dari 298.15 K hingga mencapai 312.549 K, menunjukkan lonjakan yang lebih signifikan dengan total kenaikan 14.40 K. Temperatur minimumnya pun tetap relatif stabil di kisaran 293.15 K, yang menunjukkan bahwa fluktuasi temperatur terjadi terutama pada nilai maksimum. Sementara itu, pada 3000 RPM, temperatur maksimum melonjak lebih tinggi, dari 298.15 K hingga 317.524 K, sebuah kenaikan sebesar 19.37 K. Ini adalah kenaikan temperatur tertinggi yang tercatat di antara semua uji, memperlihatkan bahwa semakin tinggi putaran magnet, semakin besar panas yang dihasilkan. Temperatur minimumnya yang stabil di 293.15 K menegaskan bahwa sebagian besar panas terkonsentrasi pada area tertentu seperti pada kumparan dan stator karena pada komponen tersebut terdapat aliran arus sedang pada shaf dan hosing atau rotor mengalami kenaikan temperatur karenam bagian ini yabf aberputar pada rpm tinggi.



Gambar 23. Grafik Suhu Magnet Persegi Panjang

Pada gambar 23. grafik ini menampilkan hasil pengamatan temperatur dari sebuah sistem yang menggunakan magnet persegi panjang dalam kondisi rotasi. Data dikumpulkan pada tiga tingkat kecepatan putar: 1500 RPM, 2000 RPM, dan 3000 RPM, selama interval waktu 0 hingga 100 detik. Untuk setiap kecepatan, dua parameter temperatur diukur, yaitu temperatur maksimum dan temperatur minimum. Dari hasil pengamatan, terlihat bahwa baik temperatur maksimum maupun minimum mengalami tren peningkatan seiring waktu, dengan laju yang bergantung pada kecepatan putar. Seluruh pengujian untuk magnet ini dimulai dari temperatur dasar 293.15 K. Pada kecepatan 1500 RPM, temperatur maksimum awal tercatat sebesar 293.15 K, yang meningkat secara bertahap hingga 308.727 K, dengan total kenaikan 15.58 K. Sementara itu, temperatur minimumnya juga meningkat perlahan dari 293.15 K menjadi 298.040 K, sebuah kenaikan landai sebesar 4.89 K. Pada kecepatan 2000 RPM, kenaikan temperatur

maksimum lebih signifikan, yaitu dari 293.15 K menjadi 312.042 K di akhir pengamatan, sebuah kenaikan sebesar 18.89 K. Temperatur minimumnya pun menunjukkan kenaikan yang stabil dari 293.15 K menjadi 298.002 K (kenaikan 4.85 K). Sedangkan pada kecepatan tertinggi yaitu 3000 RPM, temperatur maksimum mencapai puncaknya di 316.953 K (kenaikan 23.80 K dari awal), sementara temperatur minimumnya juga naik secara konsisten hingga 297.945 K (kenaikan 4.80 K). Tren ini menunjukkan bahwa pemanasan akibat putaran magnet semakin tinggi seiring dengan kenaikan RPM, dan kenaikan pada temperatur minimum mengindikasikan bahwa panas pada sistem ini cenderung menyebar lebih merata.

Analisis Hipotesis.

Analisis hipotesis ini bertujuan untuk menguji kebenaran dugaan sementara yang telah dirumuskan berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang disajikan. Hipotesis penelitian ini akan dievaluasi dengan membandingkan prediksi awal dengan data hasil simulasi.

Hipotesis penelitian yang diajukan adalah sebagai berikut:

- a) Hipotesis Mengenai Bentuk Magnet: "Bentuk magnet lingkaran diperkirakan menghasilkan fluks magnet yang lebih merata dan suhu yang lebih rendah dibandingkan bentuk persegi panjang."
- b) Hipotesis Mengenai Kecepatan Putar: "Peningkatan kecepatan putar motor cenderung meningkatkan suhu operasional motor, namun juga dapat memengaruhi intensitas dan distribusi fluks magnet."

Evaluasi Hipotesis.

1. Pengujian Hipotesis Bentuk Magnet

- a. Pengaruh terhadap Fluks Magnet: Hipotesis menyatakan bahwa magnet lingkaran akan menghasilkan fluks yang lebih merata. Meskipun "kerataan" fluks tidak diukur secara kuantitatif, hasil simulasi menunjukkan bahwa magnet berbentuk persegi panjang secara konsisten menghasilkan nilai rata-rata fluks magnet yang lebih tinggi dibandingkan magnet lingkaran pada setiap tingkat kecepatan (1500, 2000, dan 3000 RPM). Sebagai contoh, pada 3000 RPM, fluks magnet persegi panjang mencapai 1,854 T, sedangkan magnet lingkaran hanya 1,789 T. Dengan demikian, jika besaran fluks dianggap sebagai indikator performa, hipotesis ini **tidak terbukti** karena magnet persegi panjang menunjukkan kinerja yang lebih unggul.
- b. Pengaruh terhadap Suhu: Hipotesis menyatakan bahwa magnet lingkaran akan menghasilkan suhu yang lebih rendah. Namun, data hasil simulasi pada tabel temperatur menunjukkan hal yang sebaliknya. Pada setiap tingkatan RPM, motor dengan magnet persegi panjang justru menghasilkan temperatur akhir yang sedikit lebih rendah dibandingkan magnet lingkaran. Contohnya, pada 3000 RPM, temperatur rata-rata untuk magnet persegi panjang adalah 316.953 K, sementara untuk magnet lingkaran adalah 317.524 K. Dengan demikian, hipotesis yang menyatakan magnet lingkaran menghasilkan suhu lebih rendah, **ditolak**.

2. Pengujian Hipotesis Kecepatan Putar

- a. Pengaruh terhadap Fluks Magnet: Hipotesis menyatakan bahwa peningkatan kecepatan akan memengaruhi intensitas fluks magnet. Hasil penelitian dengan jelas mendukung pernyataan ini. Grafik perbandingan fluks menunjukkan bahwa untuk kedua bentuk magnet, nilai fluks magnet meningkat secara progresif seiring dengan kenaikan kecepatan dari 1500 RPM ke 3000 RPM. Dengan demikian, hipotesis ini **diterima**.
- b. Pengaruh terhadap Suhu: Hipotesis menyatakan bahwa peningkatan kecepatan

cenderung meningkatkan suhu operasional. Data hasil simulasi temperatur pada kedua grafik (Gambar Grafik Temperatur Magnet Lingkaran dan Persegi Panjang) secara gamblang menunjukkan bahwa temperatur maksimum selalu meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan putar. Sebagai contoh, pada magnet lingkaran, suhu naik dari 309.192 K pada 1500 RPM menjadi 317.524 K pada 3000 RPM. Dengan demikian, hipotesis ini **diterima**.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi numerik yang telah dilakukan terhadap pengaruh bentuk magnet dan kecepatan putar pada motor BLDC, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh Bentuk Magnet terhadap Fluks Magnet: Bentuk magnet berpengaruh signifikan terhadap nilai fluks magnet yang dihasilkan. Hasil penelitian secara konsisten menunjukkan bahwa magnet berbentuk persegi panjang menghasilkan nilai fluks magnet rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan magnet berbentuk lingkaran pada setiap tingkat kecepatan (1500, 2000, dan 3000 RPM). Pada kecepatan puncak 3000 RPM, magnet persegi panjang mampu mencapai fluks magnet sebesar 1,854 T, sementara magnet lingkaran mencapai 1,789 T.
2. Pengaruh Bentuk Magnet terhadap Suhu: Berlawanan dengan hipotesis awal, motor yang menggunakan magnet berbentuk persegi panjang menunjukkan manajemen termal yang lebih baik dengan menghasilkan suhu operasional akhir yang lebih rendah dibandingkan motor dengan magnet berbentuk lingkaran. Pada 3000 RPM, suhu rata-rata motor dengan magnet persegi panjang adalah 316,953 K, sedangkan motor dengan magnet lingkaran mencapai 317,524 K.
3. Pengaruh Kecepatan Putar terhadap Fluks Magnet dan Suhu: Terbukti bahwa peningkatan kecepatan putar motor secara signifikan meningkatkan nilai fluks magnet dan suhu operasional. Tren ini berlaku untuk kedua variasi bentuk magnet, di mana kenaikan dari 1500 RPM ke 3000 RPM secara progresif menaikkan nilai fluks dan temperatur akhir motor.
4. Kinerja Keseluruhan: Dalam lingkup simulasi ini, dapat disimpulkan bahwa magnet berbentuk persegi panjang menunjukkan profil kinerja keseluruhan yang lebih unggul. Desain ini tidak hanya mampu menghasilkan fluks magnet yang lebih tinggi yang berpotensi menghasilkan torsi lebih besar tetapi juga beroperasi pada suhu yang sedikit lebih rendah, menjadikannya pilihan yang lebih baik untuk performa dan manajemen termal pada motor BLDC yang diuji.

Saran

Berdasarkan hasil, simpulan, dan keterbatasan yang ada dalam penelitian ini, diajukan beberapa saran yang dapat menjadi acuan untuk pengembangan penelitian di masa mendatang agar diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif dan aplikatif:

1. Validasi Eksperimental untuk Verifikasi Hasil Simulasi. Mengingat penelitian ini sepenuhnya bergantung pada hasil simulasi numerik menggunakan perangkat lunak SimScale dan Inventor, langkah lanjutan yang paling krusial adalah melakukan validasi melalui eksperimen fisik. Disarankan untuk membuat prototipe motor BLDC nyata dengan dua konfigurasi magnet (persegi panjang dan lingkaran) sesuai spesifikasi desain yang telah dirancang. Pengujian di laboratorium dengan menggunakan alat ukur seperti Tesla meter dan thermal gun akan sangat penting untuk memverifikasi apakah data fluks dan suhu hasil simulasi akurat dan dapat direplikasi. Validasi ini akan memberikan tingkat kepercayaan yang lebih tinggi pada temuan penelitian dan menjembatani kesenjangan antara teori dan aplikasi praktis.

2. Eksplorasi Geometri Magnet dan Material Inti yang Lebih Beragam. Penelitian ini terbatas pada perbandingan dua bentuk magnet. Untuk pengembangan desain yang lebih optimal, disarankan agar penelitian selanjutnya mengeksplorasi geometri magnet lain seperti magnet melengkung (arc-shaped), yang menurut studi literatur dapat menghasilkan medan yang lebih homogen, atau desain tersegmentasi. Selain itu, mengingat material inti stator yang digunakan adalah stainless steel yang memiliki keterbatasan, sangat disarankan untuk melakukan studi komparatif dengan material inti yang lebih umum seperti baja silikon (silicon steel). Analisis ini akan memperjelas apakah keunggulan termal magnet persegi panjang tetap berlaku dengan material inti yang memiliki kerugian histeresis dan arus eddy yang lebih rendah.
3. Analisis pada Rentang Kecepatan yang Lebih Luas dan Beban Bervariasi. Penelitian ini dibatasi pada tiga titik kecepatan dalam kondisi eksitasi arus yang konstan. Disarankan untuk memperluas rentang pengujian kecepatan, baik pada kecepatan yang lebih rendah maupun lebih tinggi, untuk mengidentifikasi titik saturasi magnetik material inti secara lebih akurat—sebuah fenomena yang mulai terindikasi pada 3000 RPM. Selain itu, simulasi dengan variasi beban torsi pada kecepatan konstan juga akan memberikan wawasan penting tentang efisiensi motor dalam berbagai kondisi operasional yang lebih realistis untuk aplikasi kendaraan listrik.
4. Integrasi Analisis Torsi dan Efisiensi. Meskipun fluks magnet berkorelasi kuat dengan torsi, penelitian ini tidak secara langsung melaporkan output torsi dan efisiensi motor sebagai variabel terikat. Disarankan agar penelitian selanjutnya mengintegrasikan analisis torsi (baik torsi rata-rata maupun torque ripple) dan perhitungan efisiensi motor sebagai parameter output utama. Data torsi dapat diekstrak dari simulasi dan akan memberikan gambaran paling langsung mengenai efektivitas setiap desain magnet dalam menghasilkan gaya putar mekanis, yang merupakan fungsi esensial dari sebuah motor listrik..

DAFTAR PUSTAKA

- S. Ganesh, S. S. Sankar, and N. Selvaganesan, "Design and analysis of BLDC motor for aerospace application using FEM," 2017 Int. Conf. Intell. Comput. Instrum. Control Technol. ICICICT 2017, vol. 2018-Janua, no. 1, pp. 1137–1142, 2017, doi: 10.1109/ICICICT1.2017.8342730.
- A. Kumar, R. Gandhi, R. Wilson, and R. Roy, "Analysis of Permanent Magnet BLDC Motor Design with Different Slot Type," 2020 IEEE Int. Conf. Power Electron. Smart Grid Renew. Energy, PESGRE 2020, pp. 1–6, 2020, doi: 10.1109/PESGRE45664.2020.9070532.
- M. Thickness, O. Torque, and R. Effects, "Modifikasi Motor BLDC Whellhub Berdasarkan Analisa Efek Ketebalan Magnet Terhadap Torsi dan RPM Modifying BLDC Wheelhub Motor Based On Analysis Of Magnet Thickness On Torque And Rpm Effects".
- H. Jamaludin, "ANALISIS SEBARAN FLUKSI MAGNETIK DESAIN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR 30 KW BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA Mobil Listrik Nasional View project," no. August 2015, pp. 0–13, 2015, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/359016994>
- C. F. Yuliyanto and Asrori, "Pengaruh Jumlah Slot Stator Terhadap Kecepatan Putaran dan Suhu pada Motor BLDC," J. Mech. Eng., vol. 1, no. 3, p. 11, 2024, doi: 10.47134/jme.v1i3.2962.
- Sudarta, "BLDC Motor Desain," vol. 16, no. 1, pp. 1–23, 2022.
- S. N. Fajri and M. Khumaedi, "Penerapan Modul Pembelajaran Solidworks Untuk Meningkatkan Kompetensi Membuat Model 3D," J. Pendidik. Tek. Mesin Unnes, vol. 16, no. 1, p. 129902, 2016.
- E. F. Adelina, W. Hadi, and A. Setiawan, "Unjuk Kerja Motor Brushless Direct Current 3 Phase Tipe Axial Flux dengan

- Perbedaan Bentuk Magnet Neodymium,” *J. Arus Elektro Indones.*, vol. 7, no. 2, p. 64, 2021, doi: 10.19184/jaei.v7i2.25500.
- O. A. Qudsi and S. D. Nugraha, “Desain dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Melalui Pengaturan Fluks,” *INOVTEK - Seri Elektro*, vol. 1, no. 1, p. 36, 2019, doi: 10.35314/ise.v1i1.1231.
- Dewi Rianti Mandasari, Budi Sudiarto, Lia Amelia, and Cuk Supriyadi Ali Nandar, “Electric Boat Propulsion with IPM BLDC Motors: Performance and Efficiency Analysis,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 13, no. 2, pp. 84–92, 2024, doi: 10.22146/jnteti.v13i2.10131.
- P. Irasari, H. S. Alam, and M. Kasim, “Magnetic Simulation and Analysis of Radial Flux Permanent Magnet Generator using Finite Element Method,” *J. Mechatronics, Electr. Power, Veh. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 23–30, 2012, doi: 10.14203/j.mev.2012.v3.23-30.
- A. Idris, “Desain Dan Simulasi Motor Brushless DC Radial Flux Berbasis Finite Element Method (FEM) Dengan Kapasitas Daya 2 KW Untuk Kendaraan Listrik,” 2021, [Online]. Available: <https://repository.its.ac.id/87493/>
- Y. C. Wibowo and S. Riyadi, “AnalisaPembebanan padaMotorBrushless DC(BLDC),” *Semin. Nas. Instrumentasi, Kontrol, dan Otomasi*, pp. 10–11, 2018.5
- H. Herizal, “Desain Dan Simulasi Axial Flux Permanent Magnet Motor Bldc 5 Kw Untuk Kendaraan Listrik,” *Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*, pp. 1–94, 2018.
- J. Beno, A. . Silen, and M. Yanti, “UNJUK KERJA MOTOR LISTRIK BLDC 350 WATT DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE ANSYS,” *Braz Dent J.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–12, 2022.
- E. F. Adelina, W. Hadi, and A. Setiawan, “Unjuk Kerja Motor Brushless Direct Current 3 Phase Tipe Axial Flux dengan Perbedaan Bentuk Magnet Neodymium,” *J. Arus Elektro Indones.*, vol. 7, no. 2, p. 64, 2021, doi: 10.19184/jaei.v7i2.25500.
- F. Dinansyar, “Pengaturan Kecepatan Motor Brushless Dc Menggunakan Kontroler Fuzzy Berbasis Linear Quadratic Regulator,” *J. Tek. ITS*, pp. 1–58, 2016.
- Dewi Rianti Mandasari, Budi Sudiarto, Lia Amelia, and Cuk Supriyadi Ali Nandar, “Electric Boat Propulsion with IPM BLDC Motors: Performance and Efficiency Analysis,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 13, no. 2, pp. 84–92, 2024, doi: 10.22146/jnteti.v13i2.10131.
- M. Korkosz, J. Prokop, B. Pakla, and P. Bogusz, “Frequency analysis in fault detection of dual-channel BLDC motors with combined star–delta winding,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 15, no. 7, pp. 824–836, 2021, doi: 10.1049/elp2.12056.
- R. Agung, SKRIPSI KENDALI TORSI MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MENGGUNAKAN METODE DIRECT TORQUE CONTROL (DTC) Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam Menyelesaikan Pendidikan Program Sarjana Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas T. 2021.
- R. Kurniawan, E. A. Hakim, and M. Irfan, “Analisis Pengaruh Variasi Lebar Air Gap Pada Motor Brushless DC Radial Fluks,” *J. Mechatron. Electr. Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal.umm.ac.id/index.php/JMEE/article/view/11830%0Ahttps://ejournal.umm.ac.id/index.php/JMEE/article/download/11830/9637>
- OWNVERTER, “BLDC control,” web, [Online]. Available: https://docs.owntech.org/latest/examples/OWNVERTER/BLDC_hall_sensor/?utm_source=chatgpt.com
- P. Alaeinovin, S. Chiniforoosh, and J. Jatskevich, “Evaluating misalignment of hall sensors in brushless DC motors,” 2008 IEEE Electr. Power Energy Conf. - Energy Innov., no. 1, pp. 1–6, 2008, doi: 10.1109/EPC.2008.4763350.
- <https://community.nxp.com/>, “Hall sensor based 6-step BLDC motor control”, [Online]. Available: https://community.nxp.com/t5/S32M-Knowledge-Base/S32M276-Hall-sensor-based-6-step-BLDC-motor-control/ta-p/2035021?utm_source=chatgpt.com
- H. Herizal, “Desain Dan Simulasi Axial Flux Permanent Magnet Motor Bldc 5 Kw Untuk Kendaraan Listrik,” *Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*, pp. 1–94, 2018.
- S. P. List and R. Guide, “NdFeB Magnet Grades,” Bunting, 2023.

- J. Li et al., "Tuning magnetic properties, thermal stability and microstructure of NdFeB magnets with diffusing Pr-Zn films," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 41, pp. 81–87, 2020, doi: 10.1016/j.jmst.2019.09.024.
- R. Nurmansyah, D. Yuvenda, and R. Lapisa, "Analisis Pengaruh Kecepatan Aliran Sistem Pendingin Terhadap Temperatur Kerja Pada Desain Motor BLDC Tipe Permanen Magnet Fluks Aksial Menggunakan Ansys Fluent," *J. Pendidik. Tambusai*, vol. 8, no. 2, pp. 29687–29695, 2024.