

LMTD-Based and Effectiveness Analysis of Cooling Performance on a 5 kW Axial Flux Permanent Magnet BLDC Motor Design Using CFD Simulation

Riezky Hidayattullah^{1*}, Dori Yuvenda¹, Yolli Fernanda¹, Andre Kurniawan¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

*Corresponding author: riezkyhh@gmail.com

Received October 12th 2025; Revised October 29th 2025; Accepted November 30th 2025

Abstract

The primary issue with axial flux type BLDC motors is the high operating temperature of the stator and winding components, which can lower system efficiency and hasten the deterioration of the insulation material. This study examines the effects of geometric alterations to the cooling system, such as axial fins on the housing side and curved fins on the casing, on the temperature distribution of a 5-kW axial flux permanent magnet BLDC motor. Convection and conduction heat transport in the cooling system were modeled using ANSYS Fluent software and computational fluid dynamics (CFD) simulation techniques. The Log Mean Temperature Difference (LMTD) and the relative efficacy of the cooling design compared to the baseline state are the primary metrics examined. According to the simulation results, the maximum winding temperature can be lowered to 311 K and the cooling distribution in the rotor, casing, and housing can be improved by adopting curved fin casing and axial fin housing. As the temperature differential between the coolant and the motor surface narrows, the LMTD value drops from the initial condition (5.10 K to 13.94 K), suggesting a more effective heat transfer process. Furthermore, the cooling system's efficiency has more than doubled since its original design. Overall, the study's findings demonstrate that enhancing the cooler's geometric design can increase the BLDC motor's thermal performance and prolong component life.

Keywords: BLDC motor; LMTD; Cooling effectiveness; ANSYS Fluent; CFD

Analisis LMTD dan Efektivitas terhadap Kinerja Pendinginan pada Desain Motor BLDC 5 kW Tipe Fluks Aksial Magnet Permanen Menggunakan Simulasi CFD

Abstrak

Permasalahan utama pada motor BLDC tipe fluks aksial adalah tingginya temperatur kerja pada komponen *stator* dan *winding* yang dapat menurunkan efisiensi sistem dan mempercepat penurunan kualitas material isolasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas sistem pendinginan dengan modifikasi geometri berupa *curved fin* pada *casing* dan *axial fin* pada sisi *housing* terhadap distribusi temperatur motor BLDC 5 kW tipe magnet permanen fluks aksial. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Fluent* dengan metode simulasi dinamika fluida komputasional (CFD) untuk memodelkan transfer panas konveksi dan konduksi pada sistem pendingin. Parameter utama yang dianalisis meliputi *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) dan efektivitas relatif desain pendingin terhadap kondisi *baseline*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan *curved fin casing* dan *axial fin housing* mampu menurunkan temperatur maksimum *winding* hingga 311 K serta meningkatkan distribusi pendinginan pada *rotor*, *casing*, dan *housing*. Penurunan nilai LMTD dibandingkan kondisi awal (5,10 K terhadap 13,94 K) menunjukkan bahwa perbedaan temperatur antara fluida pendingin dan permukaan motor semakin kecil, menandakan proses transfer panas yang lebih efisien. Selain itu, efektivitas sistem pendingin meningkat lebih dari dua kali lipat dibanding desain awal. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa optimasi desain geometri pendingin dapat meningkatkan kinerja termal motor BLDC serta memperpanjang umur operasional komponen.

Kata kunci: Motor BLDC; LMTD; Efektivitas pendinginan; ANSYS *Fluent*; CFD

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi dalam bidang industri dan transportasi berdampak signifikan terhadap peningkatan konsumsi bahan bakar fosil. Kondisi ini memicu peningkatan emisi gas karbon dioksida (CO₂) yang menjadi penyumbang utama pemanasan global (Sulistyono, 2012). Seiring terbatasnya cadangan energi fosil, pengembangan teknologi ramah lingkungan menjadi prioritas, salah satunya adalah kendaraan listrik (Wang et al., 2022). Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) menjadi komponen penting dalam sistem propulsi kendaraan listrik karena memiliki efisiensi tinggi, kerapatan daya besar, serta perawatan yang rendah (Yedamale & Microchip Technology Inc, 2003). Menurut Vu & Hwang (2013) dan Mazur et al. (2024), motor BLDC lebih unggul dibanding motor DC konvensional karena menggunakan sistem komutasi elektronik yang menghasilkan efisiensi dan kinerja lebih stabil.

Fluks-aksial dan fluks radial adalah dua kategori utama yang membedakan motor BLDC. Motor BLDC fluks-aksial lebih unggul daripada motor radial dalam hal efisiensi termal, kerapatan torsi, dan ukuran yang ringkas (Hao et al., 2022). Namun, kondisi termal memiliki dampak yang signifikan terhadap kinerja motor BLDC. Suhu tinggi pada *rotor* dapat menurunkan kualitas magnet permanen, sedangkan suhu yang berlebihan pada *stator* dapat merusak insulasi belitan (Shewalkar et al., 2024; Lee & Um, 2024). Peningkatan suhu motor disebabkan oleh rugi-rugi mekanis dan elektromagnetik, termasuk resistansi udara, histeresis, gesekan, dan rugi-rugi Joule (Kuria & Hwang, 2011).

Beberapa studi menunjukkan bahwa optimalisasi sistem pendinginan dapat meningkatkan performa termal motor BLDC. Vu & Hwang (2013) menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics*

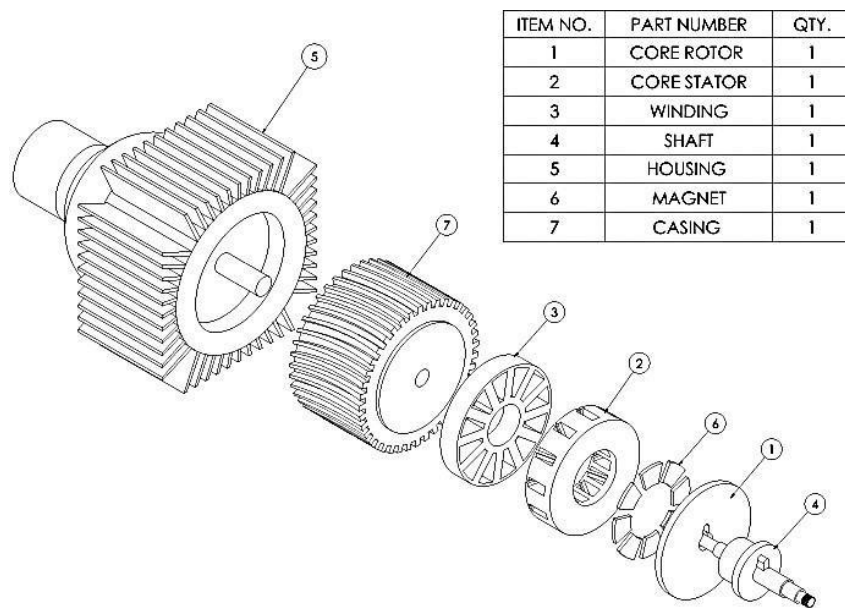
(CFD) untuk membandingkan desain motor dengan kipas pendingin dan menemukan bahwa variasi desain mampu menurunkan suhu distribusi secara signifikan. Nurmansyah et al. (2024) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan aliran udara dari 10 m/s menjadi 30 m/s dapat menurunkan suhu *winding* motor hingga 28,79 K. Selanjutnya, Ramesh et al. (2021) menjelaskan bahwa penggunaan sirip (*fin*) dapat meningkatkan laju perpindahan panas melalui perluasan permukaan konduksi. Chang et al. (2008) membuktikan bahwa penggunaan *curved fin* menghasilkan distribusi suhu yang lebih merata, sementara Albana et al. (2023) menemukan bahwa *axial fin-servo* memberikan performa pendinginan terbaik pada motor listrik. Berdasarkan temuan-temuan tersebut, penelitian ini menganalisis pengaruh *curved fin casing* dan penambahan *axial fins* terhadap temperatur kerjanya pada desain motor BLDC 5 kW tipe magnet permanen fluks aksial dengan metode simulasi CFD menggunakan ANSYS *Fluent*.

II. METODE PENELITIAN

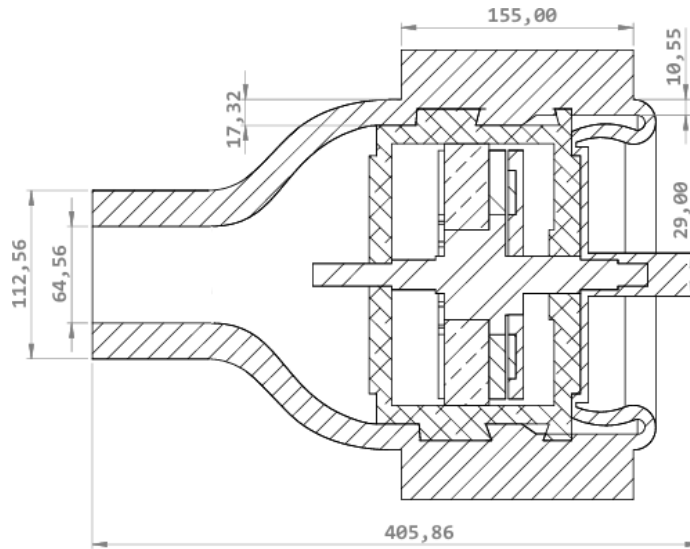
Metode yang diterapkan pada penelitian ini adalah metode numerik berbasis simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pendekatan CFD memanfaatkan perhitungan komputasi untuk menyelesaikan permasalahan aliran fluida dan perpindahan panas secara numerik menggunakan algoritma diskret (Gammaidoni et al., 2023). Dalam studi ini, proses simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Fluent* 2025 R1 *Student Version*, yang dipilih karena fleksibilitasnya dalam menangani analisis fluida pada geometri kompleks dengan *mesh* tidak terstruktur secara efisien (Grover et al., 2022).

1. Desain Motor BLDC AFPM

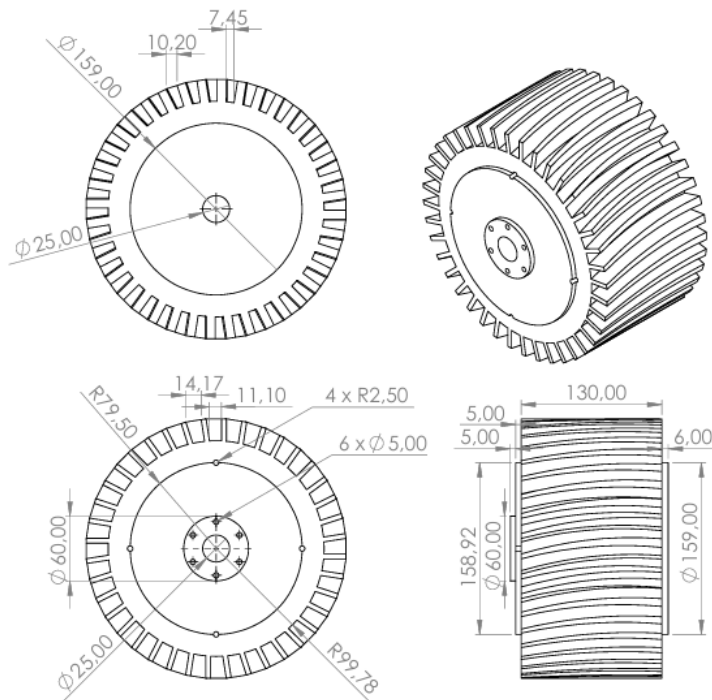
Desain motor BLDC yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada model yang digunakan oleh Nurmansyah et al. (2024). Pada penelitian ini, dilakukan modifikasi pada bagian *casing* menggunakan *curved fins* serta penambahan *axial fins* pada sisi *housing*. Pemodelan tiga dimensi motor BLDC dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* 2022, untuk hasil rancangan dapat dilihat pada Gambar 1-4.



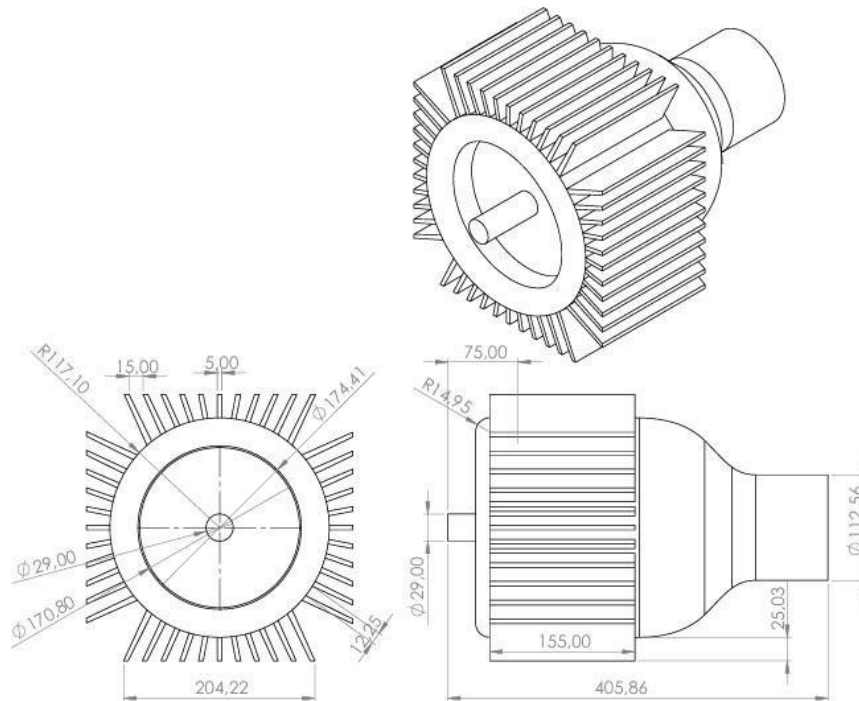
Gambar 1. *Explode view* Desain Motor BLDC AFPM



Gambar 2. Section View Motor BLDC AFPM



Gambar 3. Dimensi Curved Fins Casing



Gambar 4. Dimensi *Housing* dengan *Axial Fins*

2. Material Motor BLDC AFPM

Material yang digunakan dalam pemodelan motor BLDC tipe AFPM pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1. Pemilihan material dilakukan berdasarkan kesesuaian sifat termalnya terhadap kondisi operasi motor dan ketersediaan material di perangkat lunak ANSYS *Fluent* 2025 R1. Aluminium digunakan pada *housing* dan *casing* karena memiliki konduktivitas termal tinggi yang baik dalam penghantaran panas, sedangkan baja (*steel*) dipilih pada bagian inti rotor, stator, dan poros karena kekuatan mekaniknya yang tinggi. Nilai properti termal seperti densitas, kalor jenis, dan konduktivitas termal diambil dari pustaka material standar dalam ANSYS *Material Database* serta didukung oleh referensi literatur (Nurmansyah et al., 2024).

Tabel 1. *Material Properties* Motor BLDC AFPM

Part	Materials	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg K)	Thermal Conductivity (W/m K)
<i>Fluid</i>	<i>Air</i>	1,225	1006,43	0,0242
<i>Housing</i>	<i>Aluminium</i>	2719	871	202,4
<i>Casing</i>	<i>Aluminium</i>	2719	871	202,4
<i>Core Rotor</i>	<i>Steel</i>	7800	470	44
<i>Core Stator</i>	<i>Steel</i>	7800	470	44
<i>Shaft</i>	<i>AISI 4000 Steel</i>	7750	470	40
<i>Winding</i>	<i>Copper</i>	8978	381	387,6
<i>Magnet</i>	<i>Ferrite Magnet</i>	8030	502,48	16,27

3. Simulasi Numerik Menggunakan *Computational Fluid Dynamics*

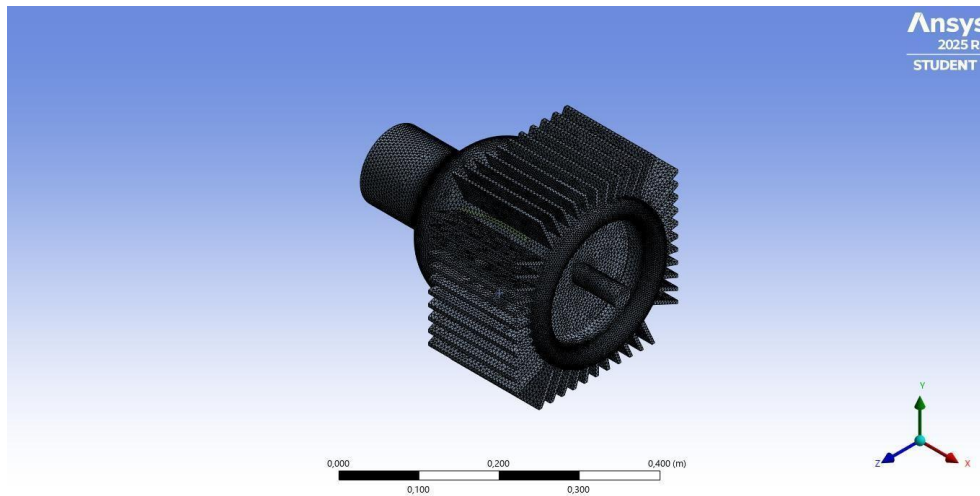
Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode analisis numerik yang digunakan untuk memahami karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas dengan menyelesaikan persamaan konservasi massa, momentum, dan energi secara komputasional. Metode ini memungkinkan analisis

detail terhadap distribusi aliran dan temperatur pada sistem dengan geometri kompleks yang sulit diuji secara eksperimental (White, 2009). CFD menjadi salah satu pendekatan penting dalam analisis termal karena mampu memberikan hasil prediksi yang mendekati kondisi aktual melalui penerapan algoritma diskritisasi numerik (Çengel & Ghajar, 2015).

Dalam penelitian ini, proses simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS *Fluent* 2025 R1 *Student Version* untuk menganalisis distribusi suhu dan efektivitas pendinginan pada motor BLDC tipe fluks aksial. Desain motor dibuat menggunakan *software SolidWorks* 2022, kemudian diimpor ke dalam ANSYS *Fluent* untuk proses *pre-processing*. Tahapan simulasi meliputi penentuan domain fluida, kondisi batas, serta pemilihan model turbulensi yang sesuai untuk karakteristik aliran udara. Pendekatan ini mengikuti metode yang digunakan oleh Vu & Hwang (2013) dan Kuria & Hwang (2011), di mana analisis termal motor listrik dilakukan dengan memperhatikan efek aliran udara terhadap penurunan temperatur komponen. Parameter *mesh* yang digunakan ditampilkan pada Tabel 2, sedangkan hasil *meshing* divisualisasikan pada Gambar 5.

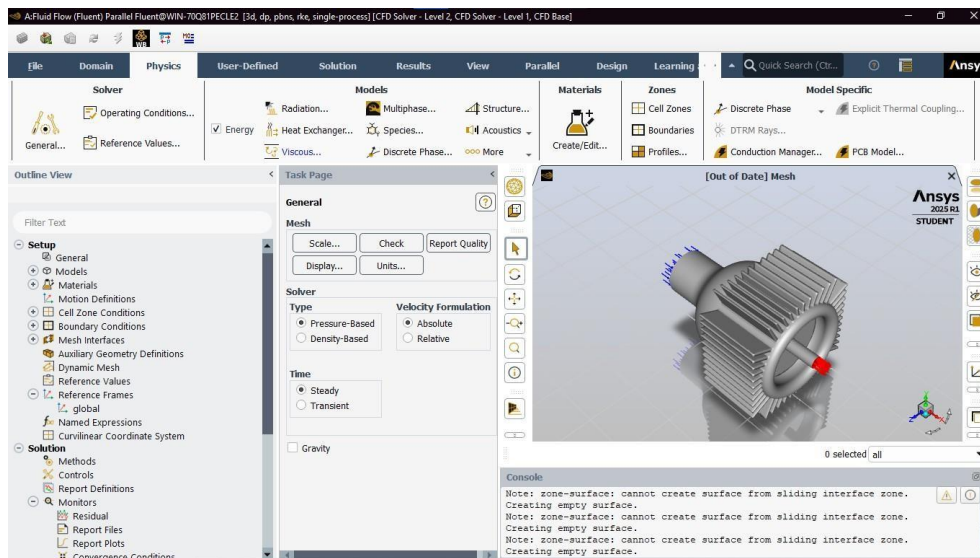
Tabel 2. Parameter *Meshing*

Parameter	Pilihan/Nilai
<i>Scoping Method</i>	<i>Geometry Selection</i>
<i>Element Size</i>	0,0053 mm
<i>Defeature Size</i>	<i>Default</i>
<i>Growth Rate</i>	1,1 mm
<i>Capture Curvature</i>	<i>Yes</i>
<i>Scoping Method</i>	<i>Geometry Selection</i>
<i>Boundary Scoping Method</i>	<i>Named Selection</i>
<i>Boundary</i>	<i>Multiple Entities</i>
<i>Inflation Option</i>	<i>Smooth Transition</i>
<i>Maximum Layers</i>	7
<i>Growth Rate</i>	1,15 mm
<i>Physics Preference</i>	CFD
<i>Solver Preference</i>	<i>Fluent</i>
<i>Mesh Type</i>	<i>Tetrahedral</i>
<i>Element Size</i>	0,17 mm
<i>Target Skewness</i>	0,3 mm
<i>Smoothing</i>	<i>High</i>
<i>Mesh Metric</i>	<i>Orthogonal Quality</i>
Jumlah elemen	1.003.687
Jumlah node	331.279



Gambar 5. Hasil Meshing

Setelah melakukan proses *meshing*, tahapan selanjutnya adalah proses *setup* data yang diperlukan dan menetapkan *boundary condition*. Untuk proses *setup* dapat dilihat pada Gambar 6, untuk parameter *boundary condition* dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 6. Proses Setup

Tabel 3. Parameter *Boundary Condition*

Zone	Type	Material Name	Remark
<i>Core Stator</i>	<i>Solid</i>	<i>Steel</i>	Nilai <i>heat generation</i> diterapkan melalui kolom <i>source term</i> untuk setiap zona padat.
<i>Winding</i>	<i>Solid</i>	<i>Copper</i>	Nilai <i>heat generation</i> dimasukkan ke bagian <i>source term</i> sesuai karakteristik bahan konduktor.
<i>Inlet 1</i>	<i>Velocity Inlet</i>	<i>Air</i>	Besaran kecepatan udara ditetapkan sebesar 30 m/s, dengan temperatur awal 300 K. Nilai <i>turbulent intensity</i> diatur 3,7% dan <i>turbulent viscosity ratio</i> sebesar 8 untuk merepresentasikan kondisi aliran masuk.
<i>Inlet 2</i>	<i>Velocity Inlet</i>	<i>Air</i>	Kecepatan udara ditetapkan 30 m/s pada sisi masuk kedua, dengan suhu 300 K. Parameter <i>turbulent intensity</i> sebesar 3,7% dan <i>viscosity ratio</i> 8 digunakan untuk kondisi aliran tersebut.
<i>Outlet</i>	<i>Pressure Outlet</i>		Tetap menggunakan setingan <i>default</i>
<i>Wall Casing</i>	<i>Wall</i>	<i>Aluminium</i>	Opsi <i>Thermal</i> diatur pada mode perpindahan panas <i>coupled</i> guna memungkinkan interaksi panas antara permukaan dan fluida.
<i>Wall Stator</i>	<i>Wall</i>	<i>Steel</i>	Pengaturan <i>Thermal</i> dipilih dalam mode <i>coupled</i> untuk mengakomodasi perpindahan panas konduktif dan konvektif secara simultan.
<i>Wall Rotor</i>	<i>Wall</i>	<i>Steel</i>	Mode <i>Thermal coupled</i> diterapkan untuk menghubungkan transfer panas antara rotor dan udara di sekitarnya.
<i>Wall Winding</i>	<i>Wall</i>	<i>Copper</i>	Parameter <i>Thermal</i> diatur <i>coupled</i> untuk mensimulasikan aliran panas konduktif dari gulungan ke lingkungan.
<i>Wall Magnet</i>	<i>Wall</i>	<i>Ferrite Magnet</i>	Pengaturan <i>Thermal</i> diset ke <i>coupled</i> untuk memungkinkan perpindahan panas dua arah antara magnet dan fluida pendingin.
<i>Wall Shaft</i>	<i>Wall</i>	<i>AISI 4000 Steel</i>	Mode <i>coupled heat transfer</i> digunakan pada poros untuk menghubungkan konduksi internal dengan konveksi eksternal.

Sumber panas utama pada motor BLDC berasal dari rugi daya listrik pada komponen *stator* dan *winding*. Rugi tembaga (*copper loss*) muncul akibat resistansi pada kumparan, sedangkan rugi besi (*iron loss*) disebabkan oleh efek histeresis dan arus *eddy* pada material inti *stator*. Kedua rugi tersebut menyebabkan peningkatan suhu internal motor, sehingga perlu dimodelkan secara akurat dalam simulasi termal (Çengel & Ghajar, 2015; Nurmansyah et al., 2024). Pada putaran 5000 rpm, total panas yang dihasilkan mencapai 210 W pada *stator* dan 477,145 W pada *winding*. Berdasarkan volume komponen, nilai *heat flux* yang digunakan dalam simulasi adalah 402.145,55 W/m³ untuk *stator* dan 1.186.987,22 W/m³ untuk *winding*.

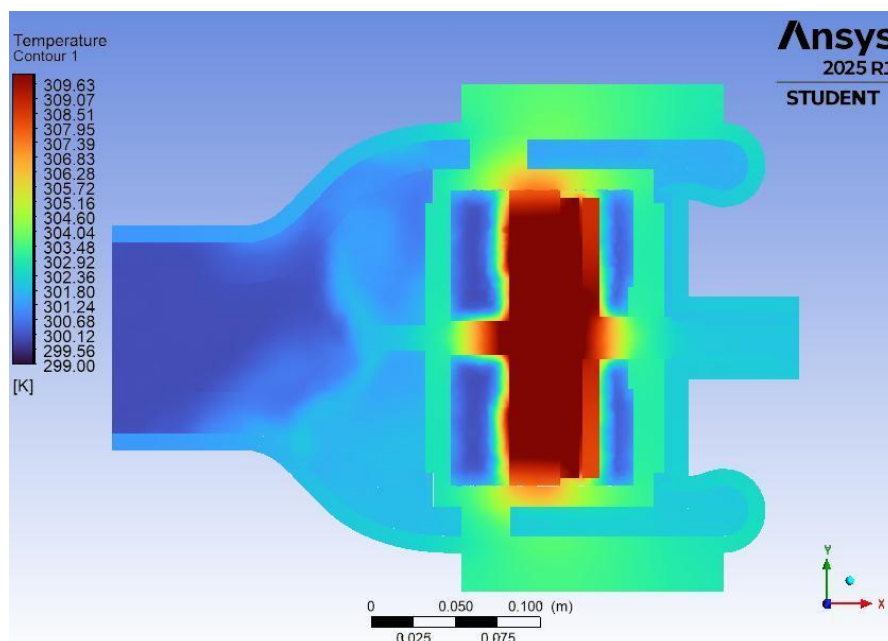
Simulasi numerik dilakukan menggunakan ANSYS *Fluent* untuk memperoleh parameter termal yang dibutuhkan dalam analisis *Log Mean Temperature Difference (LMTD)* dan efektivitas sistem pendingin. Simulasi dijalankan dengan *pressure-based solver* dalam kondisi *steady-state* karena aliran udara dianggap konstan terhadap waktu. Model turbulensi yang digunakan adalah *k-ε realizable* dengan *standard wall function* untuk memodelkan aliran udara di sekitar permukaan sirip pendingin (White,

2009). Kondisi batas ditetapkan berupa *velocity inlet* 30 m/s dan *pressure outlet* pada tekanan atmosfer, sementara seluruh dinding motor dianggap *no-slip wall* agar interaksi fluida dengan permukaan dapat direpresentasikan secara fisik.

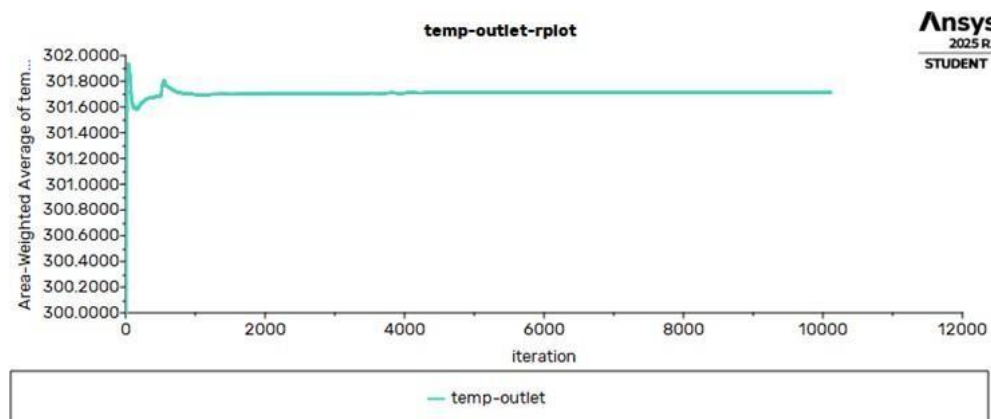
Data hasil simulasi diekstraksi melalui *surface monitor* pada *area inlet* dan *outlet* untuk memperoleh temperatur udara masuk dan keluar. Nilai tersebut digunakan dalam perhitungan LMTD serta untuk menentukan efektivitas sistem pendingin berdasarkan perbandingan antara laju perpindahan panas aktual dan teoritis. Prosedur ini memungkinkan penilaian kinerja termal desain sirip pendingin secara menyeluruh dan memberikan dasar evaluasi terhadap peningkatan performa pendinginan motor BLDC.

III. HASIL PENELITIAN

Pada Gambar 7 menampilkan hasil distribusi temperatur pada motor BLDC ditunjukkan dengan kontur warna, sedangkan pada Gambar 8 menampilkan perubahan temperatur pada area *outlet* berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan menggunakan *software ANSYS Fluent*. Adapun Tabel 4 menyajikan data temperatur pada setiap komponen utama motor BLDC sebagai hasil perhitungan termal dari simulasi.



Gambar 7. Distribusi Temperatur



Gambar 8. Temperatur Outlet

Tabel 4. Temperatur Komponen Motor BLDC

No.	Komponen	Temperatur (K)
1.	<i>Winding</i>	311,57
2.	<i>Rotor</i>	310,24
3.	<i>Casing</i>	307,39
4.	<i>Housing</i>	305,72

IV. PEMBAHASAN

1. Analisis Distribusi Temperatur

Pada hasil simulasi termal motor BLDC pada Gambar 7, area berwarna merah menunjukkan zona dengan temperatur tertinggi yang terpusat padabagian *winding* dan *stator*. Kedua komponen ini menjadi sumber panas utama akibat terjadinya rugi tembaga (*copper loss*) dan rugi inti (*iron loss*) selama motor beroperasi (Kuria & Hwang, 2011). Temperatur maksimum terdeteksi pada permukaan *winding* sebesar 311,57 K, sedangkan temperatur terendah beradapada sisi *inlet* sebesar 299 K. Perbedaan sebesar 12,57 K ini menunjukkan bahwa mekanismeperpindahan panas dari bagian dalammenuju *casing* berlangsung cukup efektif. Proses tersebut terjadi melalui kombinasi konduksi dan konveksi, di mana panas dari *stator* dihantarkan ke *casing* dan kemudian dilepaskan ke udara eksternal akibat aliran udara berkecepatan 30 m/s.

Hasil simulasi ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya oleh Nurmansyah et al. (2024), yang mengidentifikasi *winding* dan *stator* sebagai pusat konsentrasi panas pada motor BLDC. Namun, dengan penerapan desain *curved fin casing* dan *axial fins*, temperatur maksimum pada penelitian ini berhasil diturunkan dari 339,04 K menjadi 311,57 K, atau mengalami penurunan sekitar 27,47 K. Hal ini membuktikan bahwa desain pendingin yang diusulkan mampu meningkatkan efektivitas pelepasan panas dan menjaga stabilitas temperatur kerja motor pada kondisi operasi tinggi.

2. Analisis Log Mean Temperature Difference (LMTD)

Perhitungan *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) digunakan untuk mengevaluasi perbedaan temperatur rata-rata logaritmik antara permukaan *casing* dan *housing* motor BLDC (T_s) dengan temperatur fluida pendingin padasisi masuk(T_{in}) dan keluar (T_{out}). Nilai ini mempresentasikan *driving force* perpindahan panas yangterjadi selama proses pendinginan berlangsung(Çengel & Ghajar, 2015). Nilai *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) dihitung berdasarkan perbedaan temperatur udara pada sisi masuk dan keluar sebagaimana dijelaskan Çengel & Ghajar, (2015) dan Shah & Sekulic', (2003). Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 5 untuk setiap variasi desain casing motor BLDC.

Tabel 5. Hasil Perhitungan LMTD

Model	T_s (K)	T_{in} (K)	T_{out} (K)	ΔT_1 (K)	ΔT_2 (K)	ΔT_{lm} (K)
<i>Baseline</i>	315,14	300	302,33	15,4	12,81	13,94
Penelitian saat ini	306	300	301,71	6	4,29	5,10

Berdasarkan Tabel 5, nilai LMTD pada model referensi (*baseline*) sebesar 13,94 K, sedangkan pada desain penelitian saat ini hanya 5,10 K. Penurunan nilai LMTD ini mengindikasikan bahwa perbedaan temperatur rata-rataantarfluidapendingin danpermukaanmotor semakinkecil akibat pelepasanpanas yang lebih merata. Hal ini sejalan dengan konsep yang dijelaskan oleh Shah & Sekulic' (2003) bahwa penurunan nilai ΔT_{lm} menggambarkan peningkatan efektivitas perpindahan panas dalam system penukar kalor. Selain itu, (Escalona & Leyva, 2021) menunjukkan bahwa evaluasi metode LMTD dan ϵ -NTU dapat digunakan untuk memahami hubungan antara efisiensi pendinginan dan koefisien perpindahan panas menyeluruh. Selanjutnya, Bergman et al. (2011) mengemukakan bahwa semakin kecil nilai ΔT_{lm} dengan laju perpindahan panas yang tinggi, maka efektivitas desain pendinginan semakin baik karena panas dilepas lebih cepat walaupun *driving force* menurun.

3. Analisis Sistem Pendingin

Efektivitas pendinginan dalam penelitian ini dianalisis dengan membandingkan laju perpindahan panas aktual (Q) antara *baseline* dengan desain penelitian saat ini sebagaimana pendekatan perbandingan metode LMTD dan ϵ -NTU yang dijelaskan oleh Escalona & Leyva (2021). Data (Q) diperoleh dari hasil simulasi CFD ANSYS *Fluent* pada *surface integral* pada dinding *casing* dan *housing*, sedangkan luas permukaan (A) ditentukan dari *report surface area* pada permukaan *casing* yang bersentuhan langsung dengan fluida pendingin.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Efektivitas Sistem Pendingin

Model	Q (W)	A (m ²)	ΔT_{lm} (K)	Efektivitas relatif
<i>Baseline</i>	283,43	0,4808	13,94	1
Penelitian saat ini	611,63	0,9824	5,10	2,16

Efektivitas pendinginan dianalisis dengan membandingkan laju perpindahan panas aktual (Q) pada desain *baseline* dengan desain penelitian saat ini. Berdasarkan Tabel 7, pada kondisi *baseline* diperoleh $Q = 283,43 \text{ W}$ dengan luas permukaan perpindahan panas $0,4808 \text{ m}^2$ dan nilai $\Delta T_{lm} = 13,94 \text{ K}$. Sementara itu pada penelitian baru menghasilkan $Q = 611,63 \text{ W}$ dengan luas permukaan $0,9824 \text{ m}^2$ dan nilai $\Delta T_{lm} = 5,10 \text{ K}$. Nilai efektivitas relatif meningkat menjadi 2,16, yang berarti sistem pendinginan baru mampu melepaskan panas lebih dari dua kali lipat dibanding *baseline*.

Hasil ini menegaskan bahwa meskipun nilai LMTD menurun, kemampuan sistem dalam membuang panas meningkat signifikan akibat kenaikan *total heat transfer coefficient* (UA). Hal ini sesuai dengan teori dasar perpindahan panas, di mana laju perpindahan panas sebanding dengan luas permukaan kontak dan koefisien konveksi (Bergman et al., 2011; Bhambere et al., 2025).

V. KESIMPULAN

Penerapan *curved fin casing* dan *axial fin* pada motor BLDC terbukti meningkatkan performa sistem pendinginan secara signifikan. Berdasarkan hasil simulasi termal, desain tersebut mampu menurunkan temperatur maksimum motor dari 339,04 K menjadi 311,57 K, atau terjadi penurunan sekitar 8,10% dibandingkan desain *baseline*. Nilai *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) juga menurun dari 13,94 K menjadi 5,10 K, yang menunjukkan bahwa distribusi temperatur di sekitar motor menjadi lebih merata dan proses pelepasan panas berlangsung lebih efisien. Selain itu, efektivitas sistem pendinginan meningkat dengan nilai relatif sebesar 2,16 kali dibandingkan desain awal, menandakan bahwa modifikasi sirip memberikan kontribusi nyata dalam mempercepat perpindahan panas dari *stator* dan *winding* menuju udara pendingin. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan variasi kecepatan udara pendingin serta meninjau pengaruh material sirip terhadap performa termal guna memperoleh desain pendinginan yang lebih optimal. Selain itu, validasi eksperimental dapat dilakukan agar hasil simulasi memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dan dapat dijadikan acuan dalam pengembangan motor BLDC berdaya besar di masa mendatang.

VI. REFERENSI

- Albana, M. H., Guntur, H. L., & Khrisna Putra, A. B. (2023). The Effect of Fins Design on the Thermal Characteristics of Electric Motors for Electric Vehicles. *2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation, ICAMIMIA 2023 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA60881.2023.10427619>
- Bergman, L. T., Lavine, S. A., Incropera, P. F., & Dewitt, P. D. (2011). *Introduction to Heat Transfer* (L. Ratts & R. Marchione, Eds.; 6th ed.). Wiley.
- Bhambere, M. B., Chaudhari, S. S., & Banait, H. R. (2025). Experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement using perforated fins in electric motor. *International*

- Communications in Heat and Mass Transfer*, 166, 109115.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109115>
- Çengel, A. Y., & Ghajar, J. A. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications, Fifth Edition* (Fifth Edition). McGraw-Hill Education.
- Chang, S. W., Chiang, K. F., Zheng, Y., Huang, C. C., & Chen, P. H. (2008). Detailed heat transfer measurements of curved fin channels. *Heat Transfer Engineering*, 29(10), 849–863.
<https://doi.org/10.1080/01457630802125641>
- Gammaidoni, T., Zembi, J., Battistoni, M., Biscontini, G., & Mariani, A. (2023). CFD Analysis of an Electric Motor's Cooling System: Model Validation and Solutions for Optimization. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103349. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103349>
- Grover, R. O., Yang, X., Parrish, S., Nocivelli, L., Asztalos, K. J., Som, S., Li, Y., Burns, C., Van Gilder, J., Attal, N., & Avanesian, O. (2022). CFD simulations of electric motor end ring cooling for improved thermal management. *Science and Technology for Energy Transition (STET)*, 77(4).
<https://doi.org/10.2516/stet/2022015>
- Hao, Z., Ma, Y., Wang, P., Luo, G., & Chen, Y. (2022). A Review of Axial-Flux Permanent-Magnet Motors: Topological Structures, Design, Optimization and Control Techniques. In *Machines* (Vol. 10, Issue 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/machines10121178>
- Kuria, J., & Hwang, P. (2011). Optimizing Heat Sink Geometry for Electric Vehicle BLDC Motor Using CFD. *Sustainable Research and Innovation Proceedings*, 3(0), 1–9.
<http://41.204.187.99/Index.Php/Sri/Article/View/47>
- Lee, J., & Um, S. (2024). Effective thermal management scheme for advanced traction motors with internal oil-and external water-cooling systems. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 38(7), 3849–3862. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-0653-4>
- Mazur, M., Skarka, W., Kobielski, M., Kaździelawa, D., Kubica, R., Haas, C., & Unterberger, H. (2024). Heat Exchange Analysis of Brushless Direct Current Motors. *Energies*, 17(24).
<https://doi.org/10.3390/en17246469>
- Nurmansyah, R., Yuwenda, D., & Lapisa, R. (2024). Analisis Pengaruh Kecepatan Aliran Sistem Pendingin Terhadap Temperatur Kerja Pada Desain Motor BLDC Tipe Permanen Magnet Fluks Aksial Menggunakan Ansys Fluent. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8(2), 29687–29695.
- Ramesh, C., Subbiah, A., Sivakumar, K., & Sri Gokul, T. (2021). *Design and Material Optimization of Cooling Fins in Electric Motors* (Vol. 25). <http://annalsofrscb.ro>
- Escalona, A. A. S., & Leyva, E. G. (2021). Determination of overall heat transfer coefficients comparing LMTD and ϵ -NTU methods. *Thermal Science and Engineering*, 4(1), 42.
<https://doi.org/10.24294/tse.v4i1.1511>
- Shah, Remesh. K., & Sekulić, D. P. (2003). Thermodynamic Modeling and Analysis. In *Fundamentals of Heat Exchanger Design* (pp.735–808). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9780470172605.ch11>
- Shewalkar, A., Dhoble, A., & Thawkar, V. (2024). Review on cooling techniques and analysis methods of an electric vehicle motor. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149.
<https://doi.org/10.1007/s10973-024-13091-x>
- Sulistiyono. (2012). Pemanasan Global (Global Warming) dan Hubungannya Dengan Penggunaan Bahan Bakar Fosil. *Swara Patra : Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, 2(2), Vol.2 No. 2.
<https://ejournal.ppsdmmigas.esdm.go.id/sp/index.php/swarapatra/article/view/60>

- Vu, D. T., & Hwang, P. (2013). New Cooling System Design of BLDC Motor for Electric Vehicle Using Computation Fluid Dynamics Modeling. *Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, 29(5), 318–323. <https://doi.org/10.9725/kstle.2013.29.5.318>
- Wang, X., Li, B., Gerada, D., Huang, K., Stone, I., Worrall, S., & Yan, Y. (2022). A critical review on thermal management technologies for motors in electric cars. *Applied Thermal Engineering*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117758>
- White, M. F. (2009). *Fluid Mechanics* (7th ed.). Mcgraw-Hill.
- Yedamale, P., & Microchip Technology Inc. (2003). *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*.