

Thermal performance enhancement in electric motor rotors: Evaluating the impact of rotating heat pipes

Khairu Rezqi^{a,c}, Nandy Putra^{a,1}, Sholahudin^a, Gandjar Kiswanto^b

^a Applied Heat Transfer Research Group, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

^b Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

^c National Research and Innovation Agency (BRIN), Serpong, Indonesia

¹Email correspondence: nandyputra@eng.ui.ac.id

Abstract. Effective thermal management is essential in high-performance electric motors, where rotor overheating accelerates demagnetization and reduces operational lifespan. This study investigates a horizontally mounted, wick-based rotating heat pipe (RHP) as a passive cooling solution for an induction motor rotor. The system was subjected to stepped heat loads of 20, 25, 30, and 35 W, and speeds of 0, 250, 500, and 750 RPM, with time-resolved measurements acquired to evaluate steady-state thermal resistance (R_{th}) and transient response. The results reveal a non-monotonic relationship between rotational speed and thermal performance. Contrary to initial assumptions, the RHP achieved its lowest R_{th} of 0.164 °C/W not at standstill, but at a moderate speed of 250 RPM. This performance peak is attributed to a balanced interplay where gentle centrifugal force enhances capillary-driven liquid distribution, maximizing effective evaporation without inducing flow instability. Compared to the solid rotor baseline, the RHP consistently reduced rotor temperatures by up to 6 °C and lowered thermal resistance by more than 70%. Additionally, the RHP halved the thermal time constant following each power step, indicating superior transient regulation. Identifying an optimal rotational speed window, distinct from any transitional instability zone, provides critical design insight for embedding RHPs in next-generation electric machines, where spatial constraints and thermal reliability are paramount.

Keywords: Rotating heat pipe, thermal management, electric motor, thermal resistance, rotational speed

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/hdn06j82>

PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi motor listrik yang berkelanjutan telah merevolusi berbagai sektor industri, sekaligus mendorong transisi menuju sistem yang lebih berkelanjutan dan hemat energi. Mulai dari kendaraan listrik (EV) hingga otomasi industri, motor listrik menjadi komponen penting dalam beragam aplikasi yang membentuk lanskap teknologi modern. Akan tetapi, salah satu tantangan utama dalam pengoperasian motor listrik adalah pengelolaan panas yang efektif. Kelebihan panas ini dapat menurunkan kinerja, efisiensi, dan umur pakai motor, yang pada akhirnya berpotensi menimbulkan biaya perawatan tinggi, kegagalan sistem, serta penurunan keandalan operasional. Karena panas yang dihasilkan oleh kerugian elektromagnetik maupun gesekan mekanis, serta akumulasi panas yang berlebihan dapat memengaruhi komponen sebuah motor, terutama pada rotor, sehingga menurunkan efisiensi dan keandalannya [1].

Rotor dalam motor listrik memiliki peran penting dalam mengubah energi listrik menjadi energi mekanik [2]. Namun, komponen ini juga menjadi pusat utama pembangkitan panas akibat rugi arus eddy, histeresis, serta gesekan mekanis [3]. Akumulasi panas lokal pada rotor dapat menimbulkan gradien temperatur yang

berpotensi menyebabkan ekspansi termal, perubahan sifat material, hingga kerusakan material isolasi yang melindungi lilitan motor [4]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai metode pendinginan telah dikembangkan, seperti pendinginan udara, pendinginan cair, serta konveksi paksa [5-7]. Meskipun efektif pada tingkat tertentu, metode-metode tersebut memiliki keterbatasan terutama pada aplikasi berperforma tinggi yang menuntut efisiensi, bobot ringan, dan desain kompak. Oleh karena itu, diperlukan solusi manajemen termal yang lebih efisien dan ringkas untuk meningkatkan kinerja sekaligus memperpanjang umur motor listrik.

Salah satu solusi yang saat ini mendapat perhatian luas adalah integrasi RHP dalam sistem motor listrik. RHP merupakan perangkat manajemen panas pasif yang bekerja berdasarkan mekanisme perubahan fasa fluida kerja untuk mentransfer panas [8-11]. Secara prinsip, *heat pipe* terdiri atas tabung tertutup dengan struktur sumbu kapiler (wick) yang memungkinkan cairan bergerak dari sisi dingin menuju sisi panas, di mana cairan tersebut kemudian menguap dan membawa energi panas [12]. Uap kemudian bergerak ke sisi dingin untuk mengembun dan melepaskan panas, sebelum akhirnya kembali ke sumber panas dalam siklus yang berulang. Efisiensi heat pipe terletak

pada kemampuannya mentransfer panas dengan beda temperatur yang sangat kecil, sehingga sangat ideal untuk aplikasi yang membutuhkan pengendalian termal yang tinggi [13].

Dalam konteks motor listrik, penerapan RHP pada rotor menawarkan berbagai keuntungan. Dengan meningkatkan kemampuan pelepasan panas dari rotor, RHP dapat mengurangi gradien temperatur internal sehingga motor tetap beroperasi dalam batas temperatur optimal. Selain itu, RHP memiliki konduktivitas termal yang tinggi dengan konsumsi energi yang minimal [14, 15], sehingga sesuai untuk desain motor hemat energi, terutama pada sistem yang kompak dan berperforma tinggi [16]. Meskipun memiliki potensi yang menjanjikan, penelitian terkait penerapan RHP dalam pendinginan motor listrik masih menyisakan kesenjangan signifikan. Sebagian besar penelitian yang ada mengenai manajemen termal motor masih berfokus pada sistem pendinginan aktif atau modifikasi eksternal, sementara data eksperimental terkait performa RHP yang sepenuhnya terintegrasi pada struktur rotor motor dalam kondisi operasi realistik masih sangat terbatas.

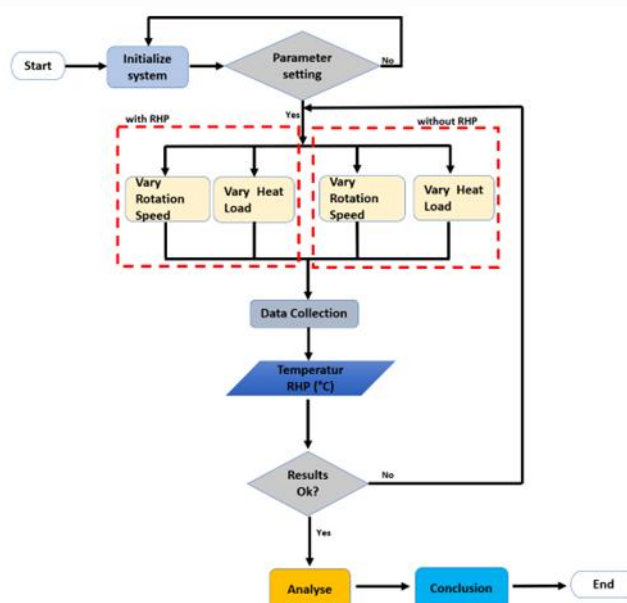
Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan karakterisasi eksperimental pada rotor motor yang terintegrasi RHP. Untuk itu, dirancang suatu sistem uji yang memungkinkan analisis komparatif langsung antara rotor standar dan rotor dengan RHP dalam kondisi yang dapat dikontrol secara presisi. Tujuan utama

penelitian ini adalah menganalisis secara kuantitatif pengaruh RHP terhadap distribusi temperatur dan resistansi termal pada berbagai variasi beban panas dan kecepatan rotasi motor listrik, serta mengevaluasi efektivitasnya dalam meminimalkan kenaikan temperatur berlebih, baik pada kondisi stabil maupun dinamis.

Hasil penelitian yang diperoleh, diharapkan dapat memberikan kerangka dasar yang kuat untuk memvalidasi model simulasi, sekaligus menjadi masukan penting dalam merancang solusi manajemen termal pasif. Pada akhirnya, penelitian ini mendukung pengembangan mesin listrik yang lebih andal dan efisien energi untuk berbagai aplikasi berkebutuhan khusus, termasuk kendaraan listrik, kedirgantaraan, dan robotika.

METODOLOGI

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 eksperimen dilakukan dengan dua konfigurasi: pertama, rotor yang dilengkapi dengan RHP, dan kedua, rotor tanpa RHP yang berfungsi sebagai pembanding dasar (*baseline*). Kedua konfigurasi tersebut diuji pada berbagai kecepatan rotasi dan beban panas untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap temperatur rotor. Variabel tersebut dipilih karena memiliki dampak langsung terhadap pembangkitan panas internal selama motor beroperasi, khususnya pada kondisi kecepatan rendah dengan torsi tinggi.



Gambar 1. Flowchart experiment: Rotating Heat Pipe with and without rotating heat pipe

Prosedur pengujian diawali dengan inisialisasi sistem dan pengaturan parameter. Beban panas divariasikan antara 20 W hingga 35 W, sedangkan

kecepatan rotasi berkisar dari 0 hingga 2.000 RPM, dengan fokus khusus pada rentang 0–750 RPM yang relevan dengan siklus akselerasi awal kendaraan listrik

(EV) maupun aplikasi motor servo. Pada setiap skenario, pengukuran temperatur dilakukan secara real-time menggunakan termokopel tipe K yang dipasang pada poros rotor serta di permukaan struktur RHP. Sensor ini merekam respons termal baik pada kondisi stabil maupun transien.

Untuk memastikan integritas data, setiap hasil pengukuran melewati proses pemeriksaan kualitas. Data yang menunjukkan inkonsistensi atau penyimpangan dari tren yang diharapkan akan dieliminasi. Kondisi eksperimen kemudian disesuaikan, dan pengukuran diulang kembali hingga didapatkan himpunan data yang dapat diandalkan, sehingga hanya data yang memenuhi kriteria konsistensi dan ketelitian yang digunakan dalam analisis.

Selanjutnya, analisis komparatif difokuskan pada distribusi temperatur rotor dengan dan tanpa integrasi RHP. Parameter utama seperti perbedaan temperatur (ΔT), resistansi termal, dan konduktivitas termal efektif dihitung pada seluruh kondisi pengujian. Hal ini memungkinkan evaluasi langsung terhadap kinerja RHP dalam mengurangi akumulasi panas.

Melalui pendekatan ini, reproduksibilitas hasil dapat terjamin sekaligus memberikan pemahaman yang komprehensif terkait pengendalian termal pasif pada kondisi operasional yang realistis. Dengan membandingkan kedua konfigurasi, penelitian ini menunjukkan kontribusi RHP dalam meningkatkan transfer panas rotor, sekaligus menekankan potensinya untuk memperbaiki keandalan, efisiensi, dan keselamatan operasional motor. Temuan ini mendukung pengembangan lebih lanjut sistem pendinginan pasif terintegrasi untuk mesin listrik berperforma tinggi dan berukuran kompak pada aplikasi kendaraan listrik, robotika, serta kedirgantaraan.

Rancangan dan Pengaturan Eksperimen

Sebuah sistem eksperimen dirancang untuk menyelidiki secara sistematis kinerja termal RHP yang diintegrasikan ke dalam rotor motor listrik. Sebagaimana ditunjukkan pada skema di Gambar 2. Komponen inti dari perangkat uji terdiri atas rotor yang dimodifikasi khusus, yang berfungsi sebagai objek utama pengujian. Untuk menjaga agar karakteristik termal rotor dapat diamati secara independen, rotor digerakkan oleh motor listrik AC eksternal melalui sistem *belt-drive*, dengan kecepatan rotasi yang dikendalikan secara presisi pada rentang 0 hingga 750 RPM menggunakan *inverter* khusus, serta diverifikasi secara independen oleh *proximity sensor*.

Untuk mensimulasikan beban panas secara terkontrol dan terukur, elemen pemanas tipe kartrid

dipasang pada bagian evaporator. Daya masukan pemanas diatur dalam rentang 20 hingga 35 W menggunakan pengatur tegangan AC, dan dipantau secara akurat melalui *power meter* yang merekam tegangan, arus, serta konsumsi energi secara real time.

Dalam rangka membangun peta termal yang komprehensif, sepuluh termokopel tipe-K ditempatkan secara strategis pada titik-titik penting, meliputi evaporator, kondensor, permukaan rotor, serta lingkungan sekitar, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Untuk sensor pada benda berputar, penggunaan *slip ring* dengan fidelitas tinggi sangat disarankan agar didapatkan transmisi sinyal yang bersih dan tanpa gangguan. Keseluruhan data temperatur dicatat menggunakan sistem akuisisi data dari *National Instruments*, yaitu DAQ-9174 dengan modul NI-9214. Hal ini dilakukan agar perekaman data dengan resolusi tinggi dapat dilakukan serentak pada semua kanal. Pengendalian keseluruhan sistem eksperimen ini dijalankan oleh *programmable logic controller* (PLC) yang terhubung dengan *human-machine interface* (HMI).

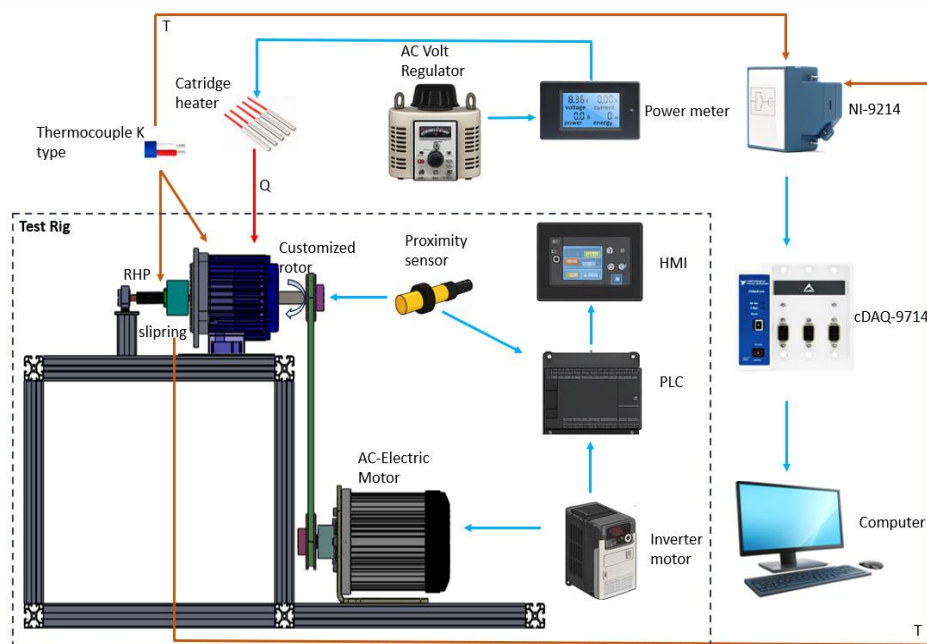
Setiap skenario pengujian ditentukan berdasarkan kombinasi beban panas dan kecepatan rotasi tertentu, dan dipertahankan selama satu jam untuk memastikan sistem mencapai kondisi termal yang stabil sebelum data akhir direkam sepenuhnya. Sepanjang prosedur pengujian selama 15 jam, temperatur lingkungan tetap stabil dengan rata-rata 27,42 °C, sehingga memberikan kondisi dasar termal yang konsisten untuk seluruh pengukuran. Desain dan pengendalian yang cermat ini memungkinkan penilaian kinerja termal intrinsik RHP secara andal dan dapat direproduksi di bawah kondisi operasi dinamis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

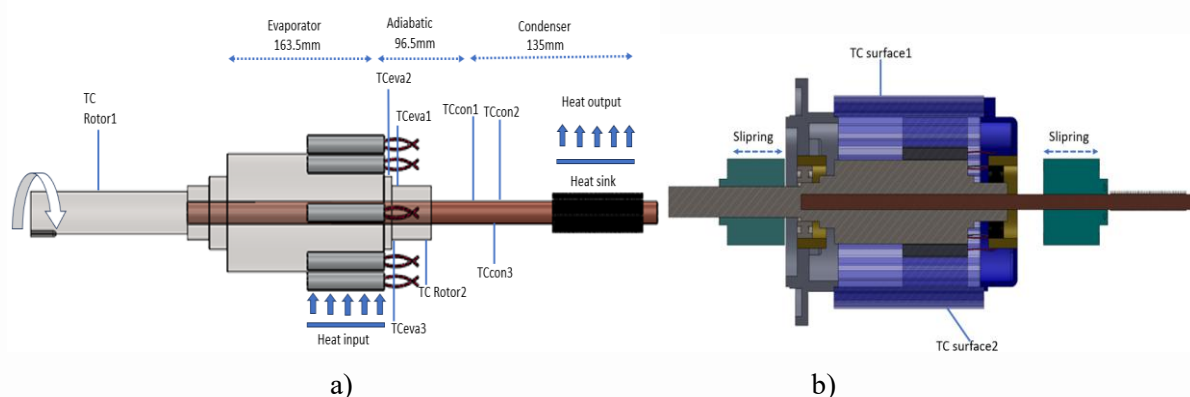
Respons Temperatur pada Kecepatan Sedang 0–750 RPM

Hasil eksperimen yang ditunjukkan pada Gambar 4 mencakup kondisi dari keadaan diam (0 RPM) hingga 750 RPM, sehingga memberikan gambaran mengenai aktivasi dan efektivitas operasional RHP. Uji beban panas bertahap sebesar 20, 25, 30, dan 35 W diterapkan pada masing-masing dari empat kecepatan rotasi, dengan setiap tahap dipertahankan selama empat jam untuk memastikan stabilisasi termal dan memungkinkan analisis pada kondisi stabil.

Pada 0 RPM (panel kiri atas), temperatur rotor tanpa RHP meningkat secara kuasi-linear dari 37,5 °C menjadi 55 °C dalam 14.400 detik. Kurva RHP mengikuti tren serupa, namun secara keseluruhan sekitar 2 °C lebih rendah dan berakhir pada 53 °C.



Gambar 2. Schematic diagram experiment Rotating Heat Pipe



Gambar 3. The arrangement of thermocouples (a) on the rotating heat pipe, rotor, and (b) electric motor casing for real-time temperature monitoring

Saat poros berada dalam kondisi tidak berputar, kondensat di dalam pipa yang terletak secara horizontal tidak memiliki jalur pengembalian yang dominan menuju evaporator, selain melalui mekanisme pemompaan kapiler yang relatif lambat melalui sumbu kapiler (wick). Oleh sebab itu, fluida kerja cenderung terakumulasi di sekitar ujung kondensor, yang menyebabkan penurunan luas area evaporasi efektif dan membuat resistansi termal hanya sedikit lebih rendah dibandingkan dengan rotor standar ($\Delta T \approx 2^\circ\text{C}$). Perilaku pengembalian yang stagnan ini mencerminkan karakteristik khas dari heat pipe konvensional yang bekerja pada orientasi horizontal, di mana pengaruh gravitasi dan sentrifugal tidak ada, sehingga pergerakan fluida sepenuhnya bergantung pada mekanisme kapiler..

Di putaran 250 RPM (kanan atas), rotor tanpa RHP mencapai temperatur puncak sebesar 54°C pada beban 35 W, sementara temperatur rotor dengan RHP tetap

stabil, yaitu sekitar 50°C . Adapun perbedaan rata-rata temperaturnya adalah sebesar 4°C .

Akibat adanya gaya sentrifugal yang lemah, lapisan kondensat mulai bergerak dan menyebar secara rata di dinding dalam, lalu mengalir kembali ke evaporator. Hal ini menyebabkan lapisan film menjadi lebih tipis, memperluas antarmuka dua fase, dan mencegah terbentuknya zona pengeringan lokal. Akibatnya, rotor yang dilengkapi RHP mampu mempertahankan temperatur sekitar 4°C lebih rendah dibandingkan dengan rotor tanpa RHP pada beban termal yang sama. Peningkatan kinerja ini dikaitkan dengan adanya pengembalian kondensat akibat gaya sentrifugal, sehingga terjadi peningkatan redistribusi cairan, pengurangan pengeringan lokal, serta penurunan resistansi termal efektif.

Pada kecepatan 500 RPM (bawah kiri), temperatur rotor tanpa RHP meningkat dari temperatur awal 38°C menjadi 55°C , sementara temperatur rotor yang terintegrasi dengan RHP stabil sekitar 50°C . Hal ini

memperlebar perbedaan kondisi stasioner menjadi 5 °C.

Peningkatan kecepatan putar atau dua kali lipat percepatan sentrifugal, menghasilkan rezim dinamika fluida yang lebih optimal. Lapisan kondensat yang hampir seragam terbentuk di sepanjang lingkaran bagian dalam, sementara vorteks sekunder yang dipicu oleh efek Coriolis meningkatkan pencampuran antara fase uap dan cair. Pengamatan ini sejalan dengan studi eksperimental sebelumnya pada pipa yang berputar secara aksial, yang menunjukkan bahwa lapisan cair yang lebih tipis pada kecepatan menengah mengurangi resistansi termal total, dengan syarat inti uap tidak tersumbat. Data yang didapatkan pada eksperimen ini mencerminkan prinsip tersebut, yang ditunjukkan melalui peningkatan perpindahan panas sehingga menurunkan suhu sekitar 5 °C.

Pada kecepatan tertinggi 750 RPM (kanan bawah), selisih temperatur terlihat paling signifikan. Di mana suhu rotor tanpa RHP mencapai 55 °C, sedangkan pada konfigurasi dengan RHP tetap berada di bawah 49 °C, sehingga memberikan penurunan temperatur sebesar 6 °C secara konsisten.

Pada pengujian dengan kecepatan tertinggi, sistem beroperasi dalam rezim yang paling stabil dan efisien. Gaya sentrifugal yang dominan menghasilkan stratifikasi atau pemisahan lapisan uap-cair yang jelas, di mana kondensat membentuk lapisan anular (cincin) yang stabil di dinding dalam, sementara uap terkonsentrasi di bagian inti. Kondisi aliran berkecepatan tinggi ini menghilangkan hambatan pada sisi kondensor yang sebelumnya membatasi kinerja pada putaran rendah, sehingga tercapai perbedaan temperatur maksimum sekitar 6 °C. Walaupun pada kecepatan yang sangat ekstrem, kinerja berpotensi menurun karena adanya fenomena liquid carryover (terbawahnya cairan) atau keterbatasan aliran uap, sehingga ambang batas operasional tersebut tidak tercapai dalam kondisi eksperimental saat ini.

Selama uji eksperimental berlangsung, beban panas tetap dijaga konstan, sehingga perbedaan temperatur yang diamati dapat dipastikan sepenuhnya berasal dari karakteristik pembuangan panas dari masing-masing konfigurasi.

Resistansi Termal Rotor dengan dan tanpa Pipa Panas Berputar sebagai Fungsi Beban Panas dan Kecepatan Putar

Data resistansi termal yang disajikan pada Gambar 5 mengungkapkan adanya dua mekanisme perpindahan panas yang secara fundamental berbeda, yang bekerja pada rotor standar dan rotor yang terintegrasi dengan RHP.

Pada rotor standar tanpa RHP, nilai resistansi termal (R_{th}) berkisar antara 0,484 hingga 0,612 °C/W

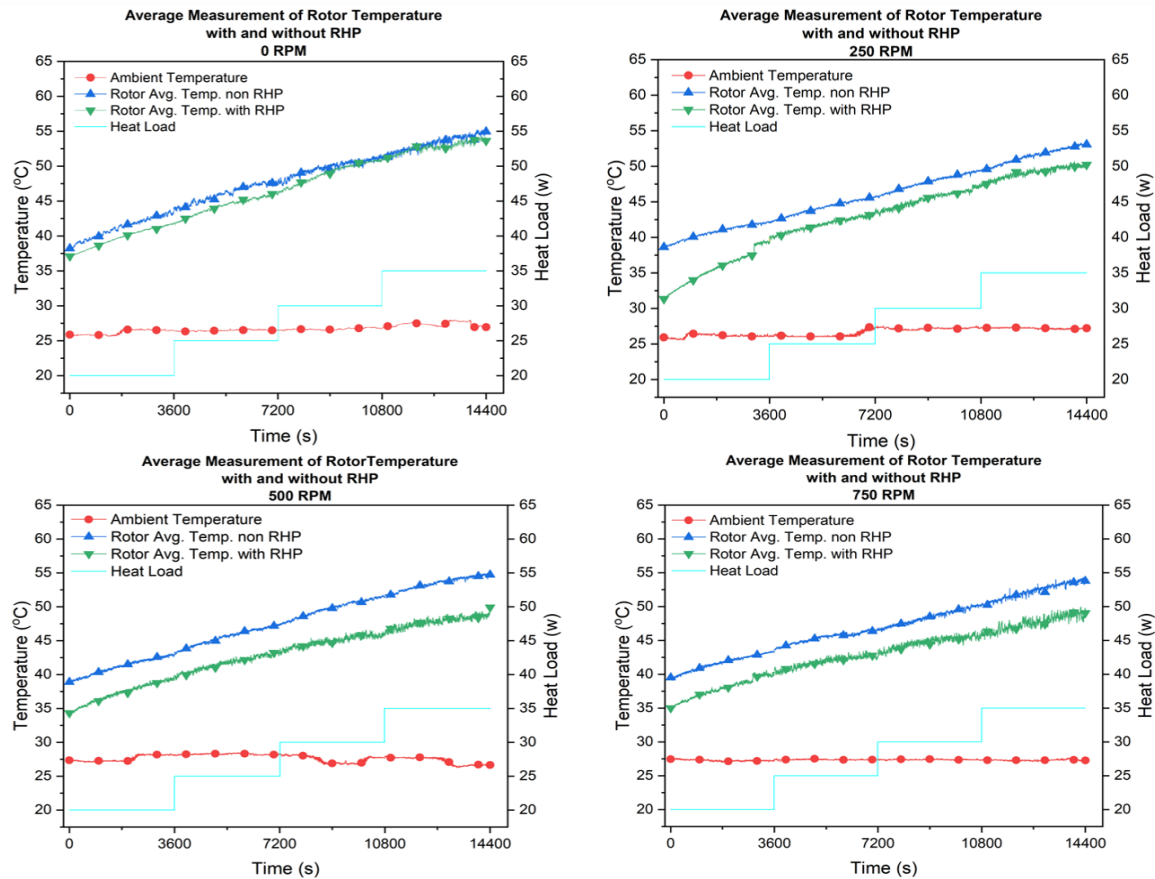
dengan beban panas antara 20 dan 35 W. Yang menarik, resistansi termal justru meningkat seiring dengan kecepatan rotasi dan mencapai puncaknya pada 500 RPM.

Fenomena ini disebabkan oleh dinamika fluida yang kompleks di dalam celah udara sempit antara rotor dan selubung stasioner (casing). Pada kecepatan rendah, konveksi alami dan radiasi membentuk jalur perpindahan panas yang relatif stabil. Namun, saat rotor mulai berputar, terbentuk aliran vorteks fluktuatif yang memerangkap udara, di mana udara ini berfungsi sebagai lapisan insulasi dinamis. Peningkatan resistansi konvektif di dalam celah udara ini dampaknya lebih besar daripada peningkatan pendinginan apapun pada permukaan selubung eksternal, sehingga menyebabkan peningkatan nilai R_{th} sistem secara keseluruhan.

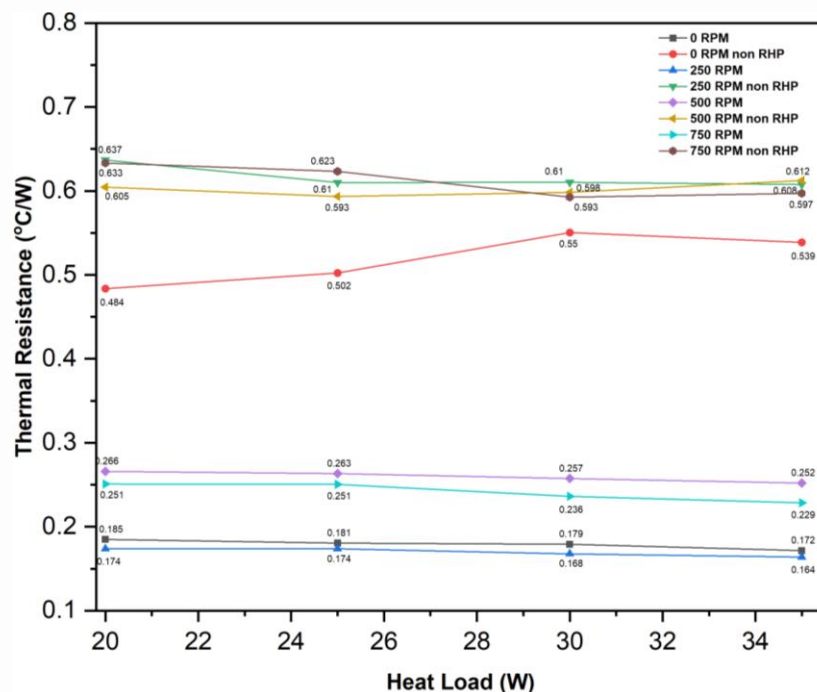
Sebaliknya, rotor yang terintegrasi dengan RHP, menunjukkan peningkatan signifikan dalam manajemen termal, dengan nilai R_{th} yang secara konsisten berada di bawah 0,28 °C/W. Peningkatan ini didorong oleh pergeseran paradigma pada mekanisme dominan, dari konduksi menjadi perpindahan panas dua fasa (evaporasi-kondensasi), yang secara fundamental lebih efisien. Perilaku pada sistem ini menyerupai superkonduktor termal, memungkinkan perpindahan panas yang tinggi hanya dengan perbedaan suhu yang minimal, sehingga R_{th} menjadi sangat rendah.

Perilaku RHP terhadap kecepatan rotasi bersifat nonmonotonik dan menunjukkan adanya sebuah titik operasi optimal yang menentang asumsi konvensional. Pada 0 RPM, mode stasioner (diam), sistem beroperasi sebagai pipa kalor berbasis sumbu. Dalam orientasi horizontal ini, gravitasi menciptakan genangan cairan yang stabil di dasar tabung, di mana sumbu menarik fluida melalui aksi kapilaritas, sehingga mencapai kinerja dasar yang sangat efisien dengan resistansi termal (R_{th}) serendah 0,172 °C/W.

Salah satu temuan penting dari penelitian ini adalah bahwa kinerja optimal sistem secara tak terduga ditemukan pada kecepatan rotasi rendah, bukan pada kondisi statis. Pada 250 RPM, resistansi termal mencapai nilai minimum absolut sebesar 0,164 °C/W. Puncak kinerja ini dikaitkan dengan adanya interaksi sinergis, di mana gaya sentrifugal ringan tidak bersifat mengganggu, melainkan justru membantu distribusi fluida. Gaya ini mengangkat dan menyebarkan kumpulan cairan akibat gravitasi secara lebih efektif di sekeliling dinding dalam pipa. Mekanisme tersebut memastikan pembasahan yang lebih merata dan menyeluruh pada seluruh struktur sumbu kapiler internal, sehingga memaksimalkan luas efektif untuk proses evaporasi yang pada akhirnya meminimalkan resistansi termal.



Gambar 4. Diagram eksperimen rotor dengan dan tanpa rotating heat pipe



Gambar 5. Perbandingan resistansi termal rotor dengan dan tanpa penggunaan *rotating heat pipe* pada berbagai beban panas dan kecepatan putar (RPM)

Seiring dengan meningkatnya kecepatan rotasi hingga 500 RPM, sistem mulai memasuki fase transisi ketidakstabilan, di mana resistansi termal meningkat

tajam akibat adanya percikan fluida dan terbentuknya zona pengeringan parsial pada bagian evaporator.

Penyelidikan lebih lanjut pada titik data 750 RPM memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai

sistem yang mulai memasuki rezim stabil yang didominasi oleh gaya sentrifugal. Pada rotor yang terintegrasi dengan RHP, kecepatan ini menandakan titik pemulihan kinerja yang signifikan dari puncak ketidakstabilan pada 500 RPM. Hal ini tercermin dari penurunan tajam nilai resistansi termal yang mendekati tingkat efisiensi tinggi sebagaimana hasil pengamatan pada kecepatan rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pada 750 RPM, gaya sentrifugal telah cukup kuat untuk membentuk annulus cairan yang stabil dan kokoh di sepanjang dinding bagian dalam. Mekanisme pemompaan yang efektif ini memastikan kembalinya kondensat secara konstan dan merata ke bagian evaporator, sehingga siklus dua-fase dapat kembali beroperasi dengan efisiensi dan stabilitas tinggi. Pada rotor tanpa RHP, kondisi 750 RPM menghasilkan resistansi termal terendah dibandingkan dengan seluruh kecepatan yang diuji. Hal ini terjadi karena adanya sedikit peningkatan konveksi udara eksternal pada rotasi yang lebih tinggi, meskipun efek tersebut tetap relatif kecil jika dibandingkan dengan dampak transformatif dari RHP.

Secara keseluruhan, analisis komparatif ini menegaskan dampak transformatif dari integrasi RHP. RHP tidak hanya menurunkan nilai absolut R_{th} lebih dari 70%, tetapi juga mengungkap interaksi kompleks antara gaya rotasional dan fenomena dua fase. Temuan ini menyoroti pentingnya mempertimbangkan secara cermat rezim operasional RHP dalam perancangan, khususnya dalam memahami ketidakstabilan transisi serta pemulihan berikutnya menuju mode stabil yang didominasi oleh gaya sentrifugal. Pengetahuan semacam ini sangat krusial untuk mengoptimalkan mesin listrik berkecepatan tinggi yang mengutamakan stabilitas termal dan solusi pendinginan pasif yang ringkas.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dilakukan pengkajian dan uji eksperimental pengukuran peningkatan kinerja termal yang signifikan pada rotor motor listrik melalui pengintegrasian rotating heat pipe (RHP) yang berbasis sumbu kapiler. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa RHP secara fundamental mengubah mekanisme perpindahan panas, sehingga menghasilkan peningkatan kinerja di atas 70%. Hal ini dibuktikan dengan angka penurunan resistansi termal yang signifikan jika dibandingkan dengan rotor motor standar.

Dari hasil analisis terungkap hubungan yang kompleks dan nonmonotonik antara resistansi termal RHP dan kecepatan putar. Pada kondisi stasioner atau

0 RPM, sistem pada RHP mencapai puncaknya. Peristiwa ini terjadi karena adanya efek sinergis antara aksi kapiler pada sumbu dan kestabilan pada genangan fluida yang disebabkan oleh gravitasi ketika berada pada posisi horizontal, di mana pasokan fluida sangat optimal menuju ke evaporator.

Selain itu, penting untuk diketahui bahwa penelitian ini mengidentifikasi adanya rezim transisi ketidakstabilan pada kecepatan rotasi rendah, di mana kinerja termal secara paradoks menurun. Fenomena ini terjadi karena adanya gaya sentrifugal yang mengganggu kestabilan kolam fluida akibat gravitasi, sehingga menghambat suplai fluida ke sumbu (wick) dan memicu pengeringan (dry out) sesaat. Seiring dengan peningkatan kecepatan rotasi lebih lanjut, sistem memasuki rezim stabil yang didominasi oleh gaya sentrifugal, di mana tercipta anulus (cincin) cairan yang seragam, sehingga kinerja RHP dapat pulih dan meningkat kembali.

Meskipun penelitian ini berfokus pada RHP silinder dengan satu loop dan pada rotasi sedang ≤ 750 RPM, untuk penelitian di masa mendatang perlu mengeksplorasi operasi pada kecepatan lebih tinggi, penggunaan fluida kerja alternatif, serta variasi kemiringan. Penggabungan temuan eksperimental ini dengan simulasi termofluidik berfidelitas tinggi akan semakin menyempurnakan peta jalan desain, yang pada akhirnya mampu mempercepat adopsi solusi termal berbasis RHP pada mesin listrik generasi berikutnya yang berperforma tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis pertama mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Republik Indonesia atas bantuan pendanaan yang memungkinkan terselenggaranya studi doctoral ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Khairu Rezqi: Konseptualisasi, metodologi, investigasi eksperimental, analisis formal, visualisasi data, penulisan draf original. Nandy Putra: konseptualisasi, revisi dan editing naskah, supervisi. Sholahudin: supervisi, visualisasi, revisi dan editing. Gandjar Kiswanto : editing naskah.

DANA PENELITIAN

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia atas dukungan dan pendanaan melalui hibah BIMA (No. NKB-950/UN2.RST/HKP.05.00/2024) yang memungkinkan terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Nonneman, B. Van Der Sijpe, I. T'Jollyn, S. Vanhee, J. Druant, and M. De Paepe, "Evaluation of High Performance Rotor Cooling Techniques for Permanent Magnet Electric Motors," in *2021 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2021*, 2021, doi: 10.1109/IEMDC47953.2021.9449603.
- [2] M. Aishwarya and R. M. Brisilla, "Design of Energy-Efficient Induction motor using ANSYS software," *Results in Engineering*, vol. 16, 2022/12// 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100616.
- [3] H. Luo, Y. Zhang, H. Wang, G. Liu, and F. Zhang, "Cooling Structure Design of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machine With Axial Ventilation Self-Cooling Rotor," *IEEE Access*, Article vol. 12, pp. 27005-27016, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3352608.
- [4] Y. Gai *et al.*, "Shaft cooling and the influence on the electromagnetic performance of traction motors," *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017, doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002307.
- [5] A. Tikadar, D. Johnston, N. Kumar, Y. Joshi, and S. Kumar, "Comparison of electro-thermal performance of advanced cooling techniques for electric vehicle motors," *Applied Thermal Engineering*, vol. 183, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116182.
- [6] J. A. P. Selvin Raj *et al.*, "Thermal management strategies and power ratings of electric vehicle motors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, 2024/1// 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.113874.
- [7] K. Sandip Garud and M.-Y. Lee, "Thermal management characteristics of electric vehicle driving motor with oil spray cooling based on spray locations and oil types," *Applied Thermal Engineering*, vol. 248, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123234.
- [8] S. F. Li and Z. H. Liu, "Parametric study of rotating heat pipe performance: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Review vol. 117, 2020, Art no. 109482, doi: 10.1016/j.rser.2019.109482.
- [9] H. Jiang, J. Chen, Y. Fu, and Y. Xu, "Strength analysis of axial rotating heat pipe grinding wheel under thermo-mechanical coupling," *Jingangshi yu Moliao Moju Gongcheng/Diamond and Abrasives Engineering*, Article vol. 41, no. 2, pp. 9-16, 2021, doi: 10.13394/j.cnki.jgszz.2021.2.0002.
- [10] Z. Wang, A. Turan, and T. Craft, "Review of the State of the Art for Radial Rotating Heat Pipe Technology Potentially Applicable to Gas Turbine Cooling," *Thermo*, Review vol. 3, no. 1, pp. 127-147, 2023, doi: 10.3390/thermo3010009.
- [11] L. Zhang *et al.*, "Analysis for green grinding of Ti-6Al-4V titanium alloys with profile rotating heat pipe-grinding wheel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Article 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11868-2.
- [12] Z. Uddin, S. Harmand, and S. Ahmed, "Computational modeling of heat transfer in rotating heat pipes using nanofluids: A numerical study using PSO," *International Journal of Thermal Sciences*, Article vol. 112, pp. 44-54, 2017, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.09.035.
- [13] N. Putra and B. Ariantara, "Electric motor thermal management system using L-shaped flat heat pipes," *Applied Thermal Engineering*, vol. 126, pp. 1156-1163, 2017/11/05/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.090>.
- [14] M. Celik *et al.*, "Experimental and numerical investigation of contact heat transfer between a rotating heat pipe and a steel strip," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Article vol. 122, pp. 529-538, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.009.
- [15] H. Wang, Y. Bao, M. Liu, S. Zhu, X. Du, and Y. Hou, "Experimental study on dynamic characteristics of cylindrical horizontal axially rotating heat pipe," *Applied Thermal Engineering*, Article vol. 209, 2022, Art no. 118248, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118248.
- [16] B. Denkena, B. Bergmann, K. Kono, R. Ishiguro, and H. Klemme, "Characterization of heat conductivity of eccentrically rotating heat pipes used for cooling of motor spindles," *MM Science Journal*, Article vol. 2021, no. July, pp. 4698-4705, 2021, doi: 10.17973/MMSJ.2021_7_2021078.