

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Motor menunjukkan stabilitas operasional yang signifikan dengan efisiensi yang meningkat secara progresif dari 78,5% pada beban 2,00 Nm hingga mencapai titik tertinggi sebesar 82.16% pada beban puncak 3,40 Nm. Meskipun terdapat disparitas tegangan input, hasil *benchmarking* menunjukkan kesalahan relatif yang rendah, yakni maksimal 1.25%, yang memvalidasi konsistensi performa motor dalam mengompensasi beban mekanik. Analisis spektral FFT mengonfirmasi bahwa eskalasi kecepatan putar (RPM) memicu kenaikan level amplitudo secara menyeluruh, terutama pada rentang frekuensi 1.000–10.000 Hz. Fenomena resonansi struktural teridentifikasi pada titik 4.000 RPM dengan lonjakan amplitudo RMS hingga mencapai nilai puncak -4.97 dBfs. Hal ini menunjukkan bahwa emisi bising sangat dipengaruhi oleh respons dinamis struktural sistem. Terdapat korelasi yang konsisten antara peningkatan beban mekanis, intensitas vibroakustik, dan akumulasi panas. Kondisi dengan intensitas RMS tertinggi (beban 3,4 Nm) menghasilkan suhu operasional sebesar 57,2°C berakibat langsung pada beban mekanis yang memicu energi vibrasi struktural (*structural vibration energy*) tertinggi pada nilai RMS -13.90 dBfs. Penggunaan fungsi koherensi memberikan tingkat kepercayaan tinggi terhadap puncak resonansi yang teramati, dengan nilai rata-rata 0,8 hingga 0,92. Hal ini mengonfirmasi bahwa karakteristik elektromagnetik dan mekanis pada motor BLDC *outrunner* 4.000 Watt stabil untuk diimplementasikan pada aplikasi *heavy lift drone*, yang membutuhkan keseimbangan antara efisiensi

energi dan keandalan struktural. Berdasarkan evaluasi multifisika yang terintegrasi, kondisi 3100 RPM pada beban 2,40 Nm teridentifikasi sebagai titik kerja dengan karakter performa optimal secara aktual, mempertimbangkan keseimbangan antara efisiensi konversi energi (79,16%), stabilitas respons vibroakustik, dan validitas sinyal tertinggi (koherensi 0,92). Sementara itu, kondisi 3,40 Nm yang mencatatkan efisiensi puncak (82,16%) diidentifikasi berada pada ambang saturasi termal dan akustik, sehingga lebih sesuai diposisikan sebagai batas atas operasional (*upper operational limit*) ketimbang titik kerja rekomendasi.

5.2 Saran

1. Penelitian berikutnya dapat mengeksplorasi sistem pendinginan aktif berbasis *forced-air cooling* atau *liquid cooling*, serta membandingkannya dengan sistem pendinginan pasif pada casing berputar. Analisis distribusi suhu spasial yang lebih detail menggunakan kamera termal resolusi tinggi akan membantu merancang strategi manajemen panas yang optimal.
2. Pengujian jangka panjang (*durability testing*) terhadap suhu, getaran, dan kebisingan pada siklus operasi berulang dapat dilakukan untuk menganalisis efek kelelahan termomekanik. Parameter RMS dan fungsi koherensi dapat dijadikan indikator awal dalam sistem pemantauan kondisi (*condition monitoring system*).
3. Penelitian ke depan dapat memanfaatkan model pembelajaran mesin (*machine Learning*) untuk memprediksi kerusakan atau penurunan performa motor berdasarkan data *time series* hasil pengujian vibroakus

tik dan termal. Pendekatan ini berpotensi menghasilkan sistem deteksi dini (*early fault detection system*) untuk aplikasi industri dan UAV otonom.

4. Analisis Akustik Lebih Detail: Pengujian selanjutnya dapat dilakukan dengan mengonversi seluruh data spektrum menjadi nilai Sound Pressure Level (SPL) dalam satuan dBfsA secara menyeluruh untuk memastikan kepatuhan terhadap standar kebisingan lingkungan yang lebih ketat.

DAFTAR PUSTAKA

- Akram, S., & Aljanabi, M. (2024). A Comprehensive Investigation of Brushless Direct Current (BLDC) Motors: Current State, Advanced Control Strategies, and Utilization Systems. *Salud, Ciencia y Tecnologia - Serie de Conferencias*, 3. <https://doi.org/10.56294/sctconf2024865>
- Awaar, V. K., Nagilla, A., Bannuru, S., Veeramaneni, S., Veerla, P., & Hussien Abbas, A. (2023). Position sensorless field-oriented control of BLDC motor for EV applications. *E3S Web of Conferences*, 391. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101176>
- Batra, R., Ezhilarasan, G., Kumar, D., & Jain, S. K. (2023). Advances in BLDC motor control: A thorough examination of torque ripple reduction and speed regulation techniques. *Multidisciplinary Reviews*, 6. <https://doi.org/10.31893/multirev.2023ss053>
- Castro, A. G. D., Paulo Guazzelli, R. U., Stefan Dos Santos, T. C. A., Carlos De Oliveira, M. R., William Pereira, C. A., & Jose Monteiro, R. B. A. (2018). Zero sequence power contribution on BLDC motor drives. Part I: A theoretical investigation. *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2018 - Proceedings*, 1016–1023. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627265>
- Chițu, M. M., Vasile, A., & Negroiu, R. (2018). Evaluation of brushless DC motors functionality in automotive electronic systems. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 10977. <https://doi.org/10.1117/12.2325846>

- Dewi Rianti Mandasari, Yulianto, K., Amelia, L., Aziz, A., Endra Dwi Purnomo, Faisal, & Cuk Supriyadi Ali Nandar. (2023). Design and Optimization of Brushless DC Motor for Electric Boat Thruster. *Evergreen*, *10*(3), 1928–1937. <https://doi.org/10.5109/7151773>
- Du, J., Li, C., Zhao, J., Ren, H., Zhang, K., Song, X., Chen, L., Yu, S., & Mi, Y. (2022). Investigation of Eddy Current Loss and Structure Design with Magnetic-Thermal Coupling for Toothless BLDC High-Speed PM Motor. *Machines*, *10*(2). <https://doi.org/10.3390/machines10020118>
- Febriansyah, D., Purnomo, E. D., Fadjrinn, B. N., Harmadi, R., & Nandar, C. S. A. (2023). Thermal growth prediction on 4 MW steam turbine casing using finite element method. *AIP Conference Proceedings*, *2646*(1), 50069. <https://doi.org/10.1063/5.0113778>
- Jomsa-Nga, J., Teesakul, P., Poolphaka, P., & Supatti, U. (2024). Performance Analysis Comparison between Six Step with Hysteresis and Field Oriented Control. *2024 International Conference on Materials and Energy: Energy in Electrical Engineering, ICOME-EE 2024*. <https://doi.org/10.1109/ICOME-EE64119.2024.10845554>
- Kanase, D., Chavan, S., & Mehta, H. (2025). AI-Enhanced Control and Simulation of BLDC Motors for Autonomous Vehicle Applications. *2025 Global Conference in Emerging Technology, GINOTECH 2025*. <https://doi.org/10.1109/GINOTECH63460.2025.11076633>
- Kocwa, P., Tutaj, A., Drabek, T., & Piątek, P. (2025). BLDC Motor Models for Multi-Domain Modeling of Electric Power Tools. *Energies*, *18*(21). <https://doi.org/10.3390/en18215851>

- Lee, C.-M., Seol, H.-S., Lee, J.-Y., Lee, S.-H., & Kang, D.-W. (2017). Optimization of Vibration and Noise Characteristics of Skewed Permanent Brushless Direct Current Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2711269>
- Manjunatha, K. C., & Kirankoushik, M. (2023). Vibration Analysis of BLDC Motor used in Electric Vehicle at High Torque Load. *2023 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies, i-PACT 2023*. <https://doi.org/10.1109/I-PACT58649.2023.10434720>
- Mohanraj, D., Arul David, R., Verma, R., Sathiyasekar, K., Barnawi, A. B., Chokkalingam, B., & Mihet-Popa, L. (2022). A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access*, 10, 54833–54869. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011>
- Palanivel, A., & Padmanabhan, S. (2018). Software-based performance estimation and real-time thermal analysis of brushless direct current motor with corroded permanent magnets. *Computers and Electrical Engineering*, 71, 938–952. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.09.024>
- Purnama, H., Guardi, A., Dewi, D. K., Hermawan, H., & Purnomo, E. D. (2024). The dynamic analysis of additional blade stage to steam turbine rotor design. *AIP Conference Proceedings*, 3069(1), 20038. <https://doi.org/10.1063/5.0206061>
- Purnomo, E. D., Mandasari, D. R., Nandar, C. S. A., Aziz, A., Amelia, L., Nurgroho, F. S., Mubarak, A. R., & Faisal. (2024). The Experimental Study of Acoustic Wave Characteristics Depends on The Load Conditions To Convert Internal Combustion Engine Outboard Motor Into Electric Outboard Motor.

Evergreen, 11(3), 2791–2799. <https://doi.org/10.5109/7236918>

Qiu, Z., Chen, Y., Liu, X., Zhang, L., & Cheng, H. (2022). Evaluation and comparison of sideband harmonics and acoustic responses with continuous and discontinuous PWM strategies in permanent magnet synchronous motor for electric vehicles. *International Journal of Hydromechatronics*, 5(2), 109–123. <https://doi.org/10.1504/ijhm.2022.123132>

Rajan, A. A., & Vasantharathna, S. (2010). Fuzzy logic based reconfigurable optimal switching controller for BLDC motor for reduced harmonics. *2010 9th International Power and Energy Conference, IPEC 2010*, 578–583. <https://doi.org/10.1109/IPECON.2010.5697061>

Saemi, F., & Benedict, M. (2022). Thermal Modeling of Brushless DC Motors for Vehicle Conceptual Design. *Aeromechanics for Advanced Vertical Flight Technical Meeting 2022*.

Saiteja, P., & Ashok, B. (2024). Investigation of Model-Based Multiphysics Analysis on Vibro-Acoustic Noise Sources Identification In Brushless DC Motor for Electric Vehicles. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 12(4), 5625–5652. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01208-9>

Sen, M. (2025). A Review of BLDC Motors : Types , Application , Failure Modes and Detection. *Energies*, 18, 1–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en18246402>

Singh, S. K. (2024). Control and Modelling of Brushless DC Motor. *2024 3rd International Conference on Power Electronics and IoT Applications in Renewable Energy and Its Control, PARC 2024*, 286–291.

<https://doi.org/10.1109/PARC59193.2024.10486343>

Tosun, O., Serteller, N. F. O., & Yalcin, G. (2021). Comprehensive Design and Optimization of Brushless Direct Current Motor for the Desired Operating Conditions. In A. D., V. A., & S. T. (Eds.), *Proceedings of the 2021 25th International Conference Electronics, ELECTRONICS 2021*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

<https://doi.org/10.1109/IEEECONF52705.2021.9467459>

Usman, A., Joshi, B. M., & Rajpurohit, B. S. (2016). A review of modeling, analysis and control methods of Brushless DCMotors. *2016 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, ICCPEIC 2016*, 337–343. <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2016.7557254>

Vedadi, M. (2025). Optimized Cascaded Position Control of BLDC Motors Considering Torque Ripple. *2nd International Conference on Emerging Technologies in Electronics, Computing and Communication, ICETECC 2025*. <https://doi.org/10.1109/ICETECC65365.2025.11071137>