

BAB II

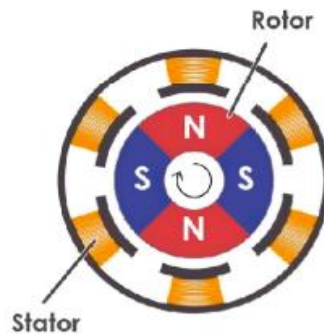
TINJAUAN PUSTAKA

2. 1 Karakteristik Motor BLDC *Outrunner*

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) telah menjadi standar aktuator dalam aplikasi wahana udara nirawak (*Unmanned Aerial Vehicle* atau UAV) dan kendaraan listrik karena efisiensi konversi energi yang tinggi dan densitas daya yang superior dibandingkan motor konvensional (Mohanraj et al., 2022; Singh, 2024). Berdasarkan konstruksi rotornya, motor BLDC diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu tipe *Inrunner* dan *Outrunner*, yang memiliki karakteristik mekanis dan aerodinamis yang sangat berbeda.

2.1.1 Prinsip Kerja dan Konstruksi *Inrunner*

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) tipe *inrunner* merupakan konfigurasi elektromekanis spesifik di mana rotor yang memuat magnet permanen ditempatkan di pusat poros internal dan dikelilingi oleh lilitan stator stasioner, sebuah desain struktural yang secara inheren menghasilkan inersia rotor yang rendah untuk memungkinkan motor mencapai kecepatan putar tinggi dengan respons dinamis yang sangat cepat (Sen, 2025).



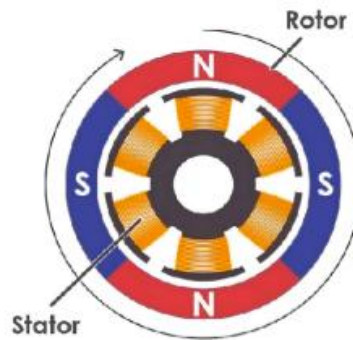
Gambar 2. 1 Konstruksi *Inrunner*

2.1.2 Prinsip Kerja dan Konstruksi *Outrunner*

Perbedaan mendasar antara *Inrunner* dan *Outrunner* terletak pada posisi komponen yang berputar. Pada tipe *Inrunner*, rotor (bagian yang berputar dan berisi magnet permanen) berada di bagian dalam stator (lilitan tembaga). Sebaliknya, pada tipe *Outrunner*, rotor berada di bagian luar dan menyelimuti stator.

Konstruksi *Outrunner* ini memberikan lengan momen yang lebih besar karena gaya magnetik bekerja pada radius yang lebih jauh dari poros pusat, sehingga menghasilkan torsi yang jauh lebih tinggi pada kecepatan putar (RPM) yang relatif lebih rendah dibandingkan tipe *Inrunner* (Chițu et al., 2018). Karakteristik ini sangat krusial untuk aplikasi drone yang membutuhkan torsi besar untuk memutar baling-baling tanpa memerlukan *gearbox* tambahan, namun desain ini juga menghadirkan tantangan tersendiri dalam manajemen getaran pada beban tinggi (Manjunatha & Kirankoushik, 2023).

Namun, konstruksi *Outrunner* memiliki implikasi aerodinamis yang signifikan. Karena *casing* bagian luar ikut berputar, permukaan motor bertindak sebagai "kipas sentrifugal alami". Meskipun hal ini membantu proses pendinginan mandiri (*self-cooling*) pada lilitan stator, putaran *casing* dengan fitur geometri tertentu (seperti lubang ventilasi atau tekstur permukaan) menjadi sumber turbulensi udara yang dominan, sehingga berkontribusi besar terhadap kebisingan aerodinamis (*aerodynamic noise*) terutama pada putaran tinggi.



Gambar 2. 2 Konstruksi *Outrunner*

2.1.3 Sistem Komutasi Elektronik

Berbeda dengan motor DC konvensional yang menggunakan sikat karbon (*brush*) dan komutator mekanis untuk membalik arah arus, motor BLDC menggunakan sistem komutasi elektronik yang diatur oleh *Electronic Speed Controller* (ESC). ESC mengatur urutan penyalaan fasa pada stator biasanya 3 fasa berdasarkan posisi rotor (Usman et al., 2016).

Untuk mengatur kecepatan dan torsi, ESC menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM). Sinyal PWM bekerja dengan dipotong tegangan DC menjadi pulsa on off dengan frekuensi tinggi. Meskipun efisien, proses *switching* frekuensi tinggi ini membangkitkan gaya harmonisa pada struktur motor yang dapat memicu getaran struktural tak terkendali dan kebisingan frekuensi tinggi yang sering terdengar sebagai suara denging (*whine noise*) pada motor listrik (Qiu et al., 2022). Strategi kontrol yang tepat diperlukan untuk memitigasi harmonisa ini agar tidak memperburuk respons akustik motor (Akram & Aljanabi, 2024).

2. 2 Sumber Getaran dan Kebisingan

Getaran dan kebisingan pada motor listrik merupakan manifestasi energi yang terbuang dan tidak terkonversi menjadi gerak rotasi. Sumber utamanya dapat dikategorikan menjadi tiga domain: elektromagnetik, mekanikal, dan aerodinamis (Batra et al., 2023).

2.2.1 Sumber *Electromagnetic Noise*

Sumber elektromagnetik sering kali menjadi masalah utama getaran pada motor BLDC. Fenomena ini dijelaskan melalui teori *Maxwell Stress Tensor*, di mana medan magnet di celah udara (*air gap*) tidak hanya menghasilkan torsi tangensial (yang memutar motor), tetapi juga menghasilkan gaya radial yang menarik stator dan rotor untuk saling mendekat (Saiteja & Ashok, 2024). Gaya radial ini berfluktuasi seiring putaran rotor dan menyebabkan deformasi elastis pada stator, yang kemudian merambat sebagai getaran ke *casing* motor.

Selain itu, terdapat fenomena *Cogging Torque*, yaitu torsi yang tersendat-sendat akibat interaksi gaya tarik magnet permanen pada rotor dengan gigi-gigi (*slots*) inti besi stator. *Cogging torque* terjadi bahkan saat motor tidak dialiri arus listrik, dan menciptakan riak torsi (*torque ripple*) saat motor beroperasi (Lee et al., 2017). Frekuensi dasar dari *cogging torque* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$f_{\text{cogging}} = \frac{n \times LCM(N_s N_p)}{60} \quad (2.1)$$

Keterangan:

f_{cogging} : Frekuensi Cogging (Hz)

n : Kecepatan putar rotor (RPM)

LCM : Kelipatan Persekutuan Terkecil

N_s : jumlah slot *stator*

N_p : jumlah kutub magnet *rotor*

2.2.2 Sumber Eksitasi Mekanis

Sumber eksitasi mekanis berkaitan erat dengan ketidaksempurnaan dinamika struktur dan interaksi kontak antar komponen yang bergerak. Dua parameter utama yang menjadi sumber eksitasi ini adalah:

1. Rotor Unbalance

Terjadi apabila pusat massa rotor tidak berimpit presisi dengan sumbu putarnya. Kondisi ini membangkitkan gaya inersia sentrifugal yang berfluktuasi secara sinusoidal pada frekuensi fundamental putaran (1x RPM), menyebabkan defleksi poros dan

getaran struktural.

2. *Bearing Faults*

Kerusakan pada elemen gelinding (*rolling elements*) atau lintasan (*raceway*) bantalan akan menghasilkan impuls gaya berulang saat komponen berputar. Interaksi kontak fisik yang tidak sempurna ini membangkitkan getaran dengan karakteristik frekuensi tinggi yang spesifik, bergantung pada geometri bantalan tersebut.

2.3 Karakteristik dan Manajemen Termal

Kinerja dan umur pakai motor BLDC sangat bergantung pada manajemen panas. Panas yang berlebih merupakan musuh utama komponen elektrik dan magnetik.

2.3.1 Rugi Daya

Panas yang timbul pada motor adalah hasil dari rugi-rugi daya yang tidak terkonversi menjadi energi mekanik. Terdiri dari dua komponen utama:

1. *Copper Loss* (Rugi Tembaga)

Panas yang dihasilkan pada lilitan stator bersumber dari resistansi kawat tembaga saat dialiri arus. Besarnya rugi-rugi ini adalah:

$$P_{cu} = I^2 R \quad (2.2)$$

Keterangan:

P_{cu} : Rugi-rugi tembaga (Watt)

I^2 : Arus efektif yang mengalir pada lilitan (Ampere)

R : Resistansi lilitan *stator* (Ohm)

2. Rugi Inti Besi (*Iron Loss*)

Panas yang dihasilkan pada lilitan stator akibat resistansi kawat tembaga saat dialiri arus. Besarnya rugi-rugi ini dirumuskan sebagai:

$$P_{fe} = K_h f B_{max}^a + K_e f^2 B_{max}^2 \quad (2.3)$$

Keterangan

P_{fe} : Total rugi inti besi (Watt)

K_h : Koefisien rugi histeresis material

f : Frekuensi medan magnet (Hz)

B_{max} : Densitas fluks magnetik maksimum

a : Konstanta Steinmetz

K_e : Koefisien rugi arus eddy material

Adapun frekuensi magnetik (f) bergantung pada jumlah kutub motor dan kecepatan putar:

$$f = \frac{P \cdot n}{120} \quad (2.4)$$

f : Frekuensi medan magnet (Hz)

P : Jumlah total kutub magnet *rotor*

n : Kecepatan putar motor (RPM)

2.3.2 Pengaruh suhu terhadap Performa

Kenaikan suhu memiliki dampak negatif ganda terhadap performa motor. Pertama, resistansi lilitan tembaga akan meningkat seiring kenaikan suhu, yang menyebabkan penurunan efisiensi (semakin banyak daya listrik yang berubah menjadi panas). Kedua, dan yang paling kritis, adalah risiko

demagnetisasi. Magnet permanen (seperti Neodymium) memiliki batas suhu kerja; jika suhu melewati titik tertentu (*knee point*), kekuatan medan magnet akan melemah secara permanen, menurunkan torsi motor secara drastis (Palanivel & Padmanabhan, 2018).

2.3.3 Interaksi Termal dengan Mekanis

Aspek termal dan aspek mekanis memiliki keterkaitan yang erat (*thermo mechanical interaction*). Panas tidak hanya berdampak pada karakteristik kelistrikan, tetapi juga mengubah sifat fisik material. Teori pemuaian termal menjelaskan bahwa dimensi material akan berubah saat dipanaskan. Pada motor, perbedaan koefisien muai antara poros baja, *bearing*, dan *housing* aluminium dapat mengubah *clearance* (celah) pada bantalan. Saemi dan Benedict (2022) menekankan bahwa pemodelan termal yang akurat sangat penting karena panas berlebih dapat melunakkan material isolator (enamel) pada lilitan, mengurangi kekakuan struktural stator dan secara langsung mengubah karakteristik respons getaran motor.

2. 4 Metodologi Pengukuran Standar

Untuk memastikan validitas data eksperimental, pengujian harus dilakukan berdasarkan standar yang baku dan lingkungan yang terkontrol.

2.4.1 Karakteristik *Anechoic Chamber*

Pengujian akustik presisi memerlukan *Anechoic Chamber* (ruang anechoic). Ruang ini dirancang untuk menciptakan kondisi *Free Field* (medan bebas), di mana gelombang suara merambat keluar dari sumber tanpa dipantulkan kembali. Hal ini dicapai dengan melapisi dinding

menggunakan *wedges* (busa peredam berbentuk baji). Parameter penting dalam chamber adalah *Background Noise* Rendah dan *Cut off Frequency*.

2.4.2 Standar ISO 3746

Penelitian ini mengacu pada standar ISO 3746:2010 mengenai “*Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane*”. Pengambilan data dilakukan di dalam *mini anechoic chamber* dengan penempatan posisi mikrofon pada jarak kisaran dekat (10 cm) dari permukaan referensi motor guna mengukur *Sound Pressure Level* (SPL) secara presisi sesuai dengan parameter geometri bidang pengukuran ruang terkontrol berdasarkan metode survei tersebut.

2.4.3 Prinsip Analisis Spektrum Frekuensi (FFT)

Sinyal getaran yang diakuisisi dalam ranah waktu (time domain) perlu dikonversi ke ranah frekuensi (frequency domain) menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk keperluan analisis diagnostik. Proses transformasi ini menguraikan sinyal kompleks menjadi komponen spektral penyusunnya sehingga anomali spesifik pada kinerja mesin dapat terdeteksi secara presisi (Manjunatha & Kirankoushik, 2023).

2. 5 Penelitian Terdahulu

Berikut adalah matriks perbandingan penelitian terdahulu yang relevan dengan topik karakterisasi motor BLDC dalam kurun waktu 5 tahun terakhir:

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu

Penelitian (Tahun)	Fokus Penelitian	Metode	Hasil Utama
Saiteja & Ashok (2024)	Identifikasi sumber <i>vibro acoustic</i> pada BLDC untuk kendaraan listrik.	<i>Model-Based Multiphysics Analysis</i> .	Menemukan bahwa harmonisa PWM dan gaya <i>radial stator</i> adalah kontributor utama kebisingan akustik pada beban tinggi.
Kocwa et al. (2025)	Pemodelan multi domain (elektrik, termal, mekanik) pada <i>power tools</i> .	Simulasi Numerik & Validasi Eksperimental terbatas.	Mengembangkan model yang mampu memprediksi kenaikan suhu motor, namun kurang fokus pada korelasi vibrasi spektral.
Manjunatha & Kirankoushik (2023)	Analisis getaran BLDC pada beban torsi tinggi.	Analisis Eksperimental (FFT).	Mengkonfirmasi bahwa amplitudo getaran meningkat signifikan pada frekuensi resonansi struktural saat dibebani.
Du et al. (2022)	Investigasi <i>Eddy Current Loss</i> dan desain struktur dengan kopling magnetik-termal.	Simulasi FEA (<i>Finite Element Analysis</i>).	Menunjukkan bahwa desain slot stator sangat mempengaruhi distribusi panas akibat <i>Iron Loss</i> .
Qiu et al. (2022)	Evaluasi harmonisa <i>sideband</i> dan respons akustik dengan strategi PWM berbeda.	Studi Komparatif Eksperimental.	Membuktikan bahwa strategi kontrol PWM berpengaruh langsung terhadap spektrum kebisingan frekuensi tinggi.

Berdasarkan tinjauan di atas, mayoritas penelitian cenderung terpolarisasi pada simulasi numerik atau hanya fokus pada satu aspek fisika saja (misalnya hanya termal atau hanya akustik). Meskipun banyak yang meneliti BLDC, belum banyak yang melakukan studi eksperimental komprehensif pada tipe Outrunner yang mengkorelasikan saturasi panas dengan perubahan spektrum getaran dan kebisingan secara simultan di lingkungan terkontrol (*Anechoic Chamber*). Penelitian ini hadir untuk mengisi kekosongan data empiris tersebut.

2.6 Kerangka Pemikiran

Kerangka Pemikiran ini didasarkan pada korelasi sebab dan akibat antara input energi, proses konversi electromechanical, dan respon fisik yang dihasilkan. Berikut adalah skema logika penelitian:

Gambar 2.3 Kerangka Berpikir

