

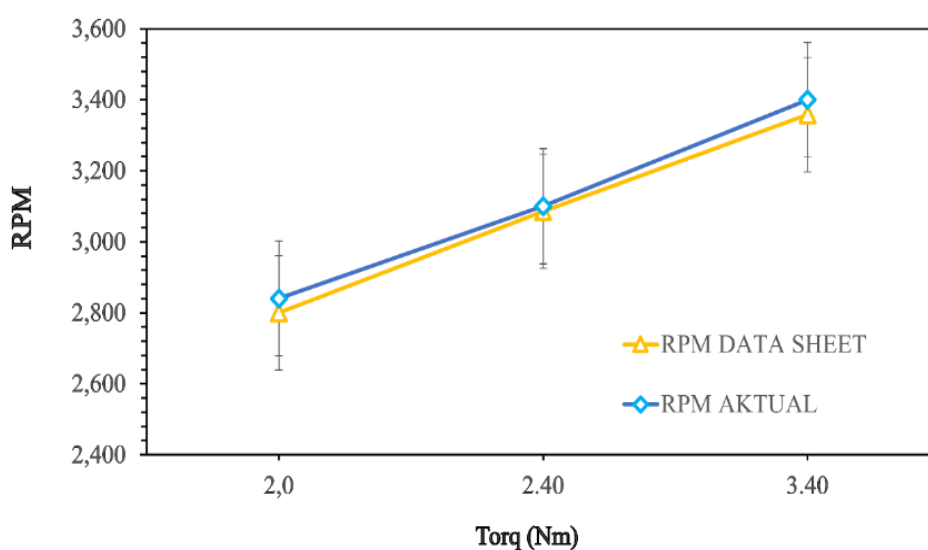
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Komparatif dan Validasi Data

Pada tahap awal penelitian, dilakukan validasi terhadap integritas data kecepatan putar (RPM) motor BLDC tipe *outrunner* melalui perbandingan antara hasil eksperimen aktual pada tegangan 72 V DC dengan data referensi (*benchmarking*) pada 100 V DC. Meskipun terdapat disparitas tegangan input sebesar 28%, data menunjukkan konsistensi yang signifikan pada rentang operasional yang diuji, sebagaimana disajikan sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Eksperimen kinerja motor BLDC *outrunner*.

RPM BENCHMARKING	BEBAN (Nm)	RPM Aktual	Standart Error (%)
2800	2,00	2840	1,43%
3086	2,40	3100	0,45%
3358	3,40	3400	1,25%



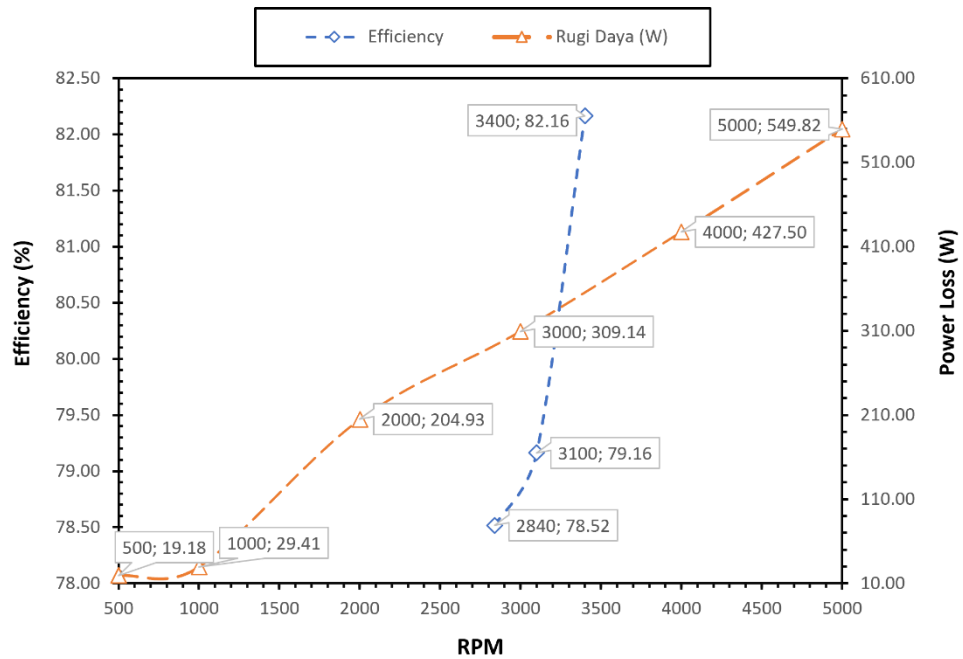
Gambar 4. 1 Perbandingan Kecepatan Rotasi (72V vs. 100V) terhadap Torsi.

Secara visual menunjukkan bahwa pada beban rendah hingga menengah (2,0 – 2,4 Nm), performa motor secara konsisten melampaui prediksi linear dari kondisi operasional 100V. Fenomena ini mengindikasikan efektivitas algoritma *switching* pada *Electronic Speed Controller* (ESC) dalam mempertahankan kecepatan putar guna mengompensasi fluktuasi tegangan input. Namun, saat beban mekanik meningkat hingga titik puncak 3,40 Nm, efisiensi sistem mulai mencapai ambang batasnya, di mana terjadi penyempitan deviasi antara RPM aktual dan data sheet. Kondisi ini merepresentasikan limitasi kemampuan kompensasi sistem kendali terhadap torsi yang lebih besar, yang mengakibatkan penurunan linearitas standard error sebesar 1.25% sebagai respons terhadap peningkatan beban mekanik yang signifikan.

4. 2 Karakteristik Energi Rugi Daya dengan Efisiensi Terhadap RPM

Berdasarkan data eksperimental pada Gambar 4. 2, ditemukan adanya korelasi yang signifikan antara eskalasi kecepatan putar (RPM) dengan profil rugi daya (*power loss*) dan efisiensi sistem. Analisis menunjukkan bahwa rugi daya tanpa beban meningkat secara tajam seiring bertambahnya rotasi per menit, di mana nilai terendah sebesar 19,18 W pada 500 RPM melonjak drastis hingga mencapai nilai ekstrem sebesar 549,82 W pada 5000 RPM. Peningkatan rugi daya yang signifikan pada kecepatan tinggi ini secara teoritis disebabkan oleh akumulasi rugi inti magnetik (*iron loss*) dan rugi mekanis akibat hambatan udara (*windage loss*) pada struktur rotor *outrunner*. Hal ini selaras dengan pernyataan (Sen, 2025) yang menyebutkan bahwa pada frekuensi tinggi, rugi-rugi magnetik pada material feromagnetik stator akan meningkat secara non-linear, yang dapat diestimasi

melalui Persamaan (2.3) dan Persamaan (2.4).



Gambar 4. 2 Perbandingan Efisiensi Operasional terhadap Rugi Daya (*Power Loss*) pada variasi kecepatan

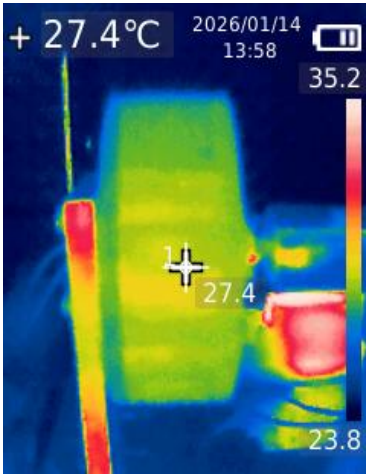
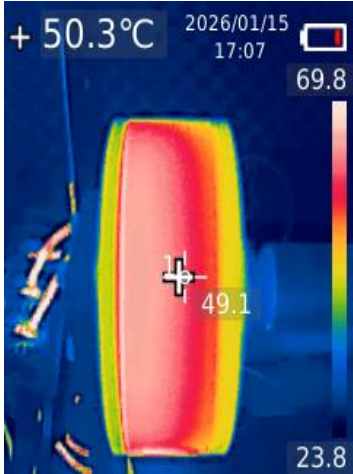
Meskipun terjadi lonjakan rugi daya yang masif, kurva efisiensi menunjukkan karakteristik performa yang optimal pada rentang kecepatan tertentu. Motor mencatat efisiensi sebesar 78,52% pada 2840 RPM (2,00Nm) dan meningkat secara progresif hingga mencapai titik optimal sebesar 82,16% pada 3400 RPM (3,40 Nm). Kenaikan efisiensi ini dihitung berdasarkan Persamaan (3.1) dan Persamaan (3.2) (Singh, 2024). Pencapaian efisiensi 82,16% pada kondisi beban puncak tersebut mengindikasikan bahwa motor telah mencapai *torque-speed region* yang paling efektif. Sebagaimana dijelaskan oleh (Tosun et al., 2021) optimasi desain motor BLDC seringkali ditujukan agar titik efisiensi maksimal berada pada beban kerja nominalnya, di mana daya mekanik keluaran jauh lebih dominan dibandingkan porsi rugi daya tetap (*fixed losses*) (Saemi & Benedict, 2022). Dalam konteks eksperimen ini, pada 3400 RPM, konversi energi listrik menjadi torsi

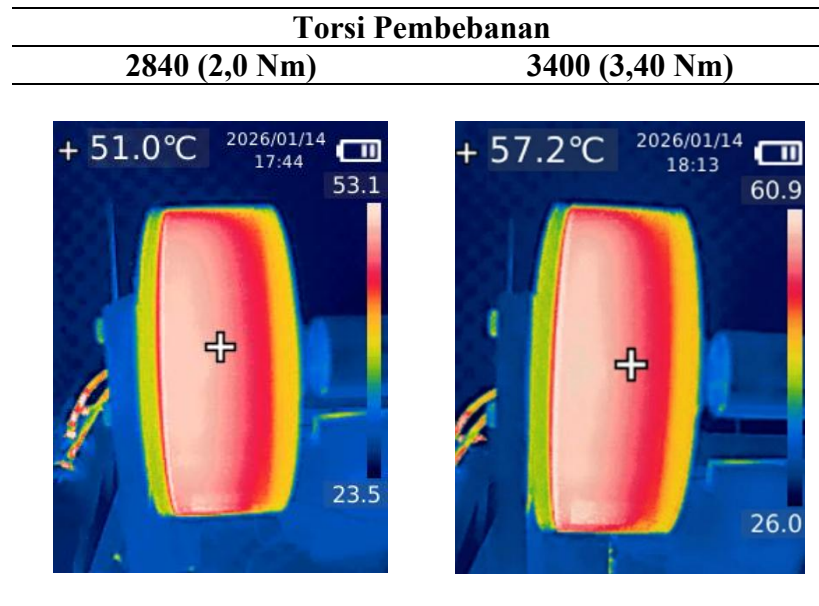
produktif mencapai rasio terbaiknya sebelum akhirnya rugi daya magnetik menjadi terlalu dominan pada RPM yang lebih tinggi (5000 RPM).

4.3 Analisis Karakteristik Respons Termal Operasional

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental yang dirangkum dalam Tabel 4.2 serta divisualisasikan melalui Gambar 4.3, Gambar 4.4, dan Gambar 4.5, ditemukan adanya korelasi multifisika yang signifikan antara peningkatan beban mekanis dengan profil efisiensi dan stabilitas termal motor BLDC T-Motor U12 II. Analisis ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai batasan operasional dan karakteristik disipasi panas pada motor tipe *outrunner*.

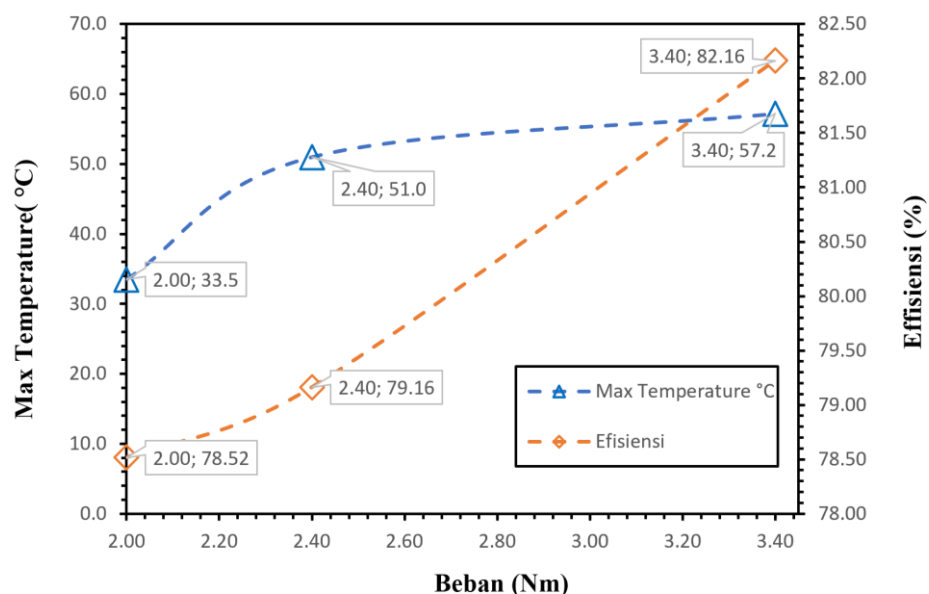
Tabel 4.2 Distribusi Panas Casing Terhadap Beban(t=60 s)

TANPA BEBAN	
500	5000
	



4.3.1 Analisis Komparatif Efisiensi dan Temperatur Maksimal terhadap Beban

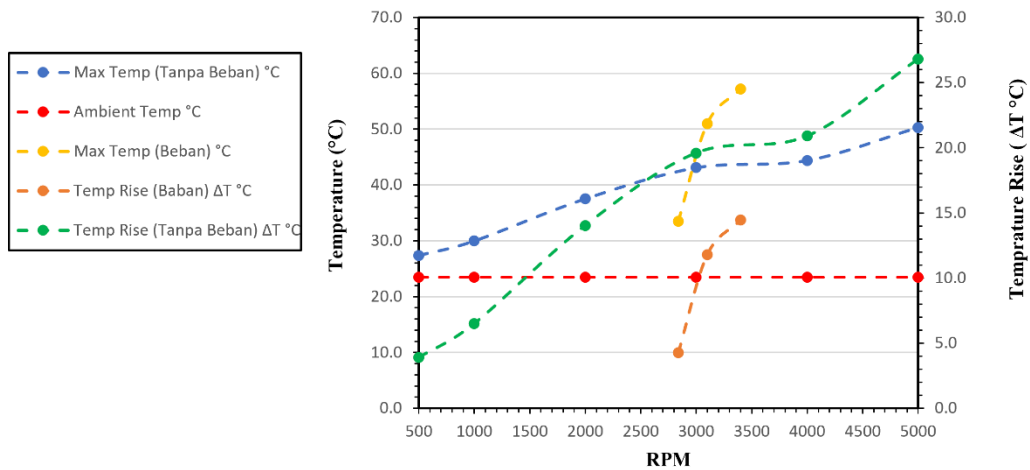
Data pada Tabel 4. 2 menunjukkan bahwa peningkatan beban torsi berbanding lurus dengan konsumsi arus (I) dan daya masukan (P_{in}). Pada beban terendah 2,00 Nm, arus yang mengalir sebesar 14,58 A, namun melonjak drastis menjadi 20,09 A pada beban puncak 3,40 Nm. Fenomena ini berdampak langsung pada dua variabel utama yang disajikan dalam Gambar 4.3:



Gambar 4.3 Karakteristik Performa Termal dan Efisiensi Motor BLDC Akibat Pengaruh Pembebanan Mekanis

Motor mencapai efisiensi tertinggi sebesar 82,16% pada beban 3,40 Nm. Sebagaimana dijelaskan oleh (Tosun et al., 2021) hal ini terjadi karena motor beroperasi pada *torque-speed region* titik desain optimal, di mana rugi daya tetap (*fixed losses*) menjadi relatif kecil terhadap daya mekanik keluaran yang dihasilkan. Namun, seiring peningkatan beban hingga 3,40 Nm, daya mekanik keluaran meningkat secara progresif melampaui laju kenaikan *fixed losses*. Hal ini menyebabkan rugi daya tetap menjadi relatif kecil secara proporsional, yang kemudian mendorong sistem mencapai efisiensi termaksimalnya. Kondisi ini membuktikan bahwa T-Motor U12 II didesain secara optimal untuk aplikasi *heavy-lift* yang membutuhkan torsi besar, di mana konversi energi listrik menjadi kerja mekanik berada pada titik paling produktif. Meskipun efisiensi mencapai titik tertinggi, pengoperasian pada beban puncak memicu eskalasi termal yang signifikan, di mana temperatur maksimal melonjak hingga 57,2°C. Suhu ini masih jauh di bawah batas kritis demagnetisasi magnet Neodymium (NdFeB) yang berkisar antara 80°C–150°C, serta batas termal isolasi kawat enamel Kelas H pada rentang 155°C–180°C. Hal ini menunjukkan bahwa motor tetap beroperasi dalam zona aman tanpa risiko demagnetisasi atau kerusakan isolasi akibat *overheating*. Fenomena ini secara fisik berkaitan erat dengan hukum kuadrat arus terhadap rugi tembaga. Untuk menghasilkan torsi sebesar 3,40 Nm, sistem membutuhkan suplai arus tinggi mencapai 20,09 A Tabel 4. 2. Peningkatan arus masukan ini menyebabkan disipasi panas yang agresif pada hambatan lilitan stator. Karakteristik termal ini dipertegas oleh data pada Gambar 4.4, yang memperlihatkan deviasi suhu yang lebar antara kondisi tanpa beban (*no-load*) dan berbeban pada frekuensi putar (RPM) yang identik. Sebagai contoh, pada RPM yang setara, kondisi berbeban

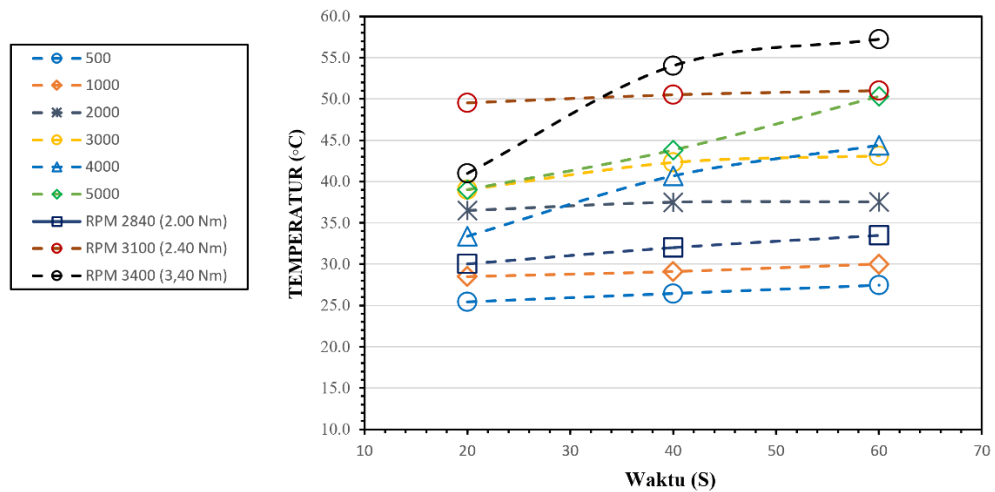
menghasilkan kenaikan suhu yang jauh lebih curam dibandingkan kondisi *no-load*. Hal ini memberikan validasi empiris bahwa dalam arsitektur motor *outrunner*, kontribusi termal dari rugi tembaga akibat pembebanan mekanis jauh lebih dominan dan destruktif dibandingkan rugi gesek udara (*windage loss*) atau rugi inti akibat rotasi kecepatan tinggi semata. Analisis ini sejalan dengan studi yang menekankan bahwa kepadatan arus pada beban puncak adalah faktor utama pembatas durasi operasional motor BLDC demi menjaga integritas material isolasi *stator*. Mempertimbangkan trade-off antara efisiensi dan beban termal tersebut, evaluasi komposit yang turut memperhitungkan stabilitas vibroakustik (Subbab 4.5) dan validitas sinyal melalui fungsi koherensi (Subbab 4.6) mengindikasikan bahwa kondisi 3100 RPM (2,40 Nm) merupakan titik kerja yang merepresentasikan karakter performa optimal secara aktual. Pada kondisi ini, motor mencapai efisiensi yang relatif tinggi (79,16%) dengan pertumbuhan arus yang masih proporsional terhadap kenaikan beban, didukung oleh nilai koherensi tertinggi (0,92) di antara seluruh titik berbeban yang diuji. Sebaliknya, kondisi 3400 RPM (3.40 Nm) diposisikan sebagai ambang batas operasional atas (*upper operational limit*), bukan titik kerja rekomendasi untuk operasi berkelanjutan.



Gambar 4.4 Perbandingan Karakteristik Termal Motor BLDC pada Kondisi Tanpa Beban (*No-Load*) dan Kondisi Berbeban terhadap Variasi Kecepatan Putar (RPM)

4.3.2 Analisis Respons Termal Transien Awal dan Karakteristik Kenaikan Suhu

Evaluasi perilaku termal motor secara dinamis pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa laju kenaikan suhu (*heating rate*) dipengaruhi secara signifikan oleh intensitas beban operasional. Pada kondisi beban puncak (3,40 Nm), kurva temperatur memperlihatkan tren kenaikan paling agresif yang belum mencapai titik jenuh (*steady-state*) hingga detik ke-60. Hal ini selaras dengan pemodelan termal oleh (Saemi & Benedict, 2022) yang menyatakan bahwa pada motor dengan kerapatan daya tinggi, akumulasi panas pada lilitan stator terjadi lebih cepat dibandingkan kemampuan disipasi struktur *outrunner* ke lingkungan, yang diperparah oleh peningkatan rugi daya magnetik secara non-linear pada frekuensi tinggi.



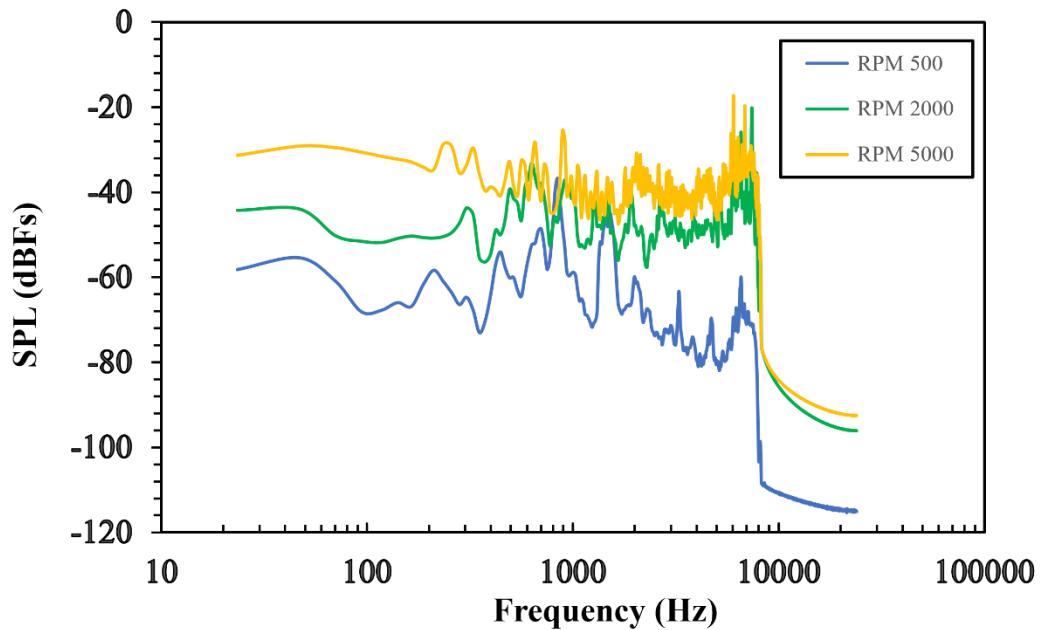
Gambar 4.5 Perbandingan Kenaikan Temperatur Terhadap Waktu pada Berbagai Variasi Kecepatan Putar (RPM) dan Beban Torsi

Integrasi data ini membuktikan adanya *trade-off* teknis pada T-Motor U12 II, di mana beban puncak 3,40 Nm memberikan efisiensi konversi energi optimal sebesar 82,16%, namun secara bersamaan memaksa motor beroperasi pada ambang batas saturasi termal. Fenomena tersebut mengonfirmasi bahwa pencapaian efisiensi maksimal pada titik kerja nominal harus disertai dengan strategi manajemen panas yang intensif guna mencegah degradasi material isolasi dan menjaga konsistensi performa jangka panjang.

4. 4 Analisis Spektrum Vibroakustik pada Kondisi Transien Tanpa Beban

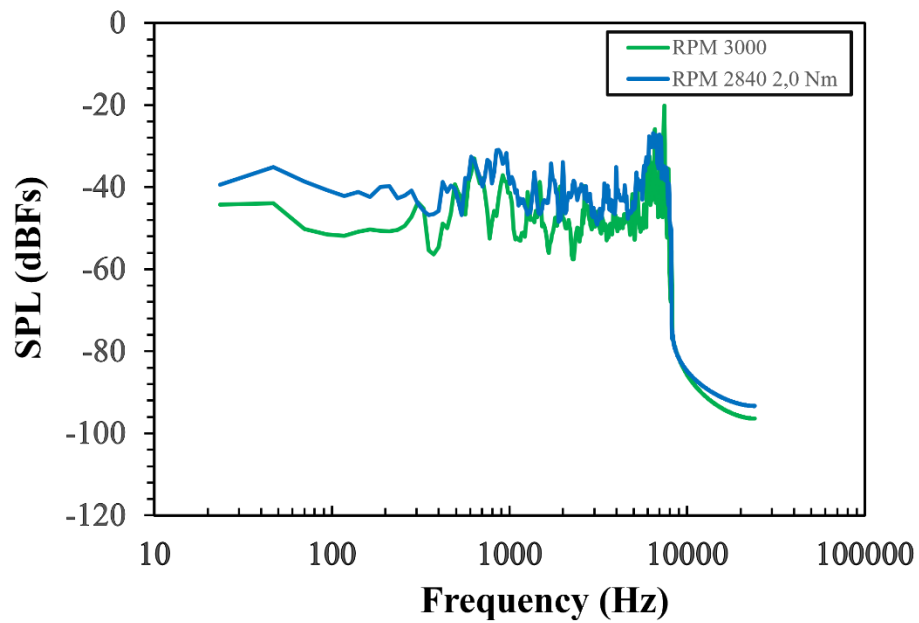
Analisis spektral getaran dilakukan menggunakan algoritma FFT sesuai Persamaan (3.4) dengan fokus pada jendela waktu (*time window*) 10–20 detik untuk menangkap fase transien yang stabil. Evaluasi dilakukan dalam dua tahap sistematis untuk membedakan pengaruh kecepatan putar dan beban mekanis terhadap emisi bising motor. Pada kondisi tanpa beban, karakteristik spektrum amplitudo untuk variasi 500–5000 RPM disajikan pada Gambar 4. 6. Hasil menunjukkan bahwa kenaikan percepatan putaran RPM memicu kenaikan level amplitudo secara

menyeluruh, terutama pada rentang frekuensi 1000 – 10000 Hz. Tren data eksperimental ini menunjukkan karakteristik yang konsisten dengan model teoritis pada Persamaan (2.1), di mana frekuensi eksitasi cogging torque ($f_{cogging}$) meningkat linier terhadap kecepatan putar (n) (Dewi Rianti Mandasari et al., 2023).



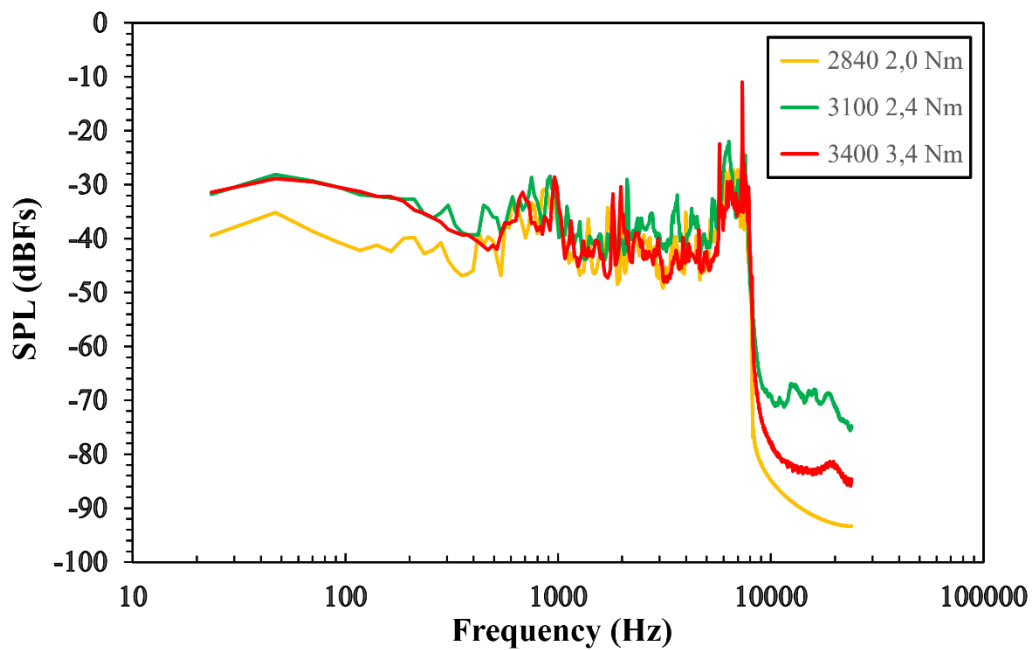
Gambar 4. 6 Respons Vibroakustik pada Variasi Kecepatan Tanpa Beban.

Dampak beban mekanis terhadap respons vibroakustik dianalisis melalui perbandingan spesifik antara kondisi 3000 RPM (No-Load) dan 2840 RPM (Load 2.0 Nm) sebagaimana disajikan pada Gambar 4. 7. Dalam pengamatan ini, perbedaan kecepatan (RPM) memberikan pengaruh yang dominan terhadap pergeseran frekuensi eksitasi pada spektrum. Di sisi lain, penerapan beban mekanis sebesar 2.0 Nm (kurva biru) cenderung memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap peningkatan amplitudo respons, yang ditandai dengan densitas spektral yang lebih padat dan intensitas dBfs yang lebih tinggi secara konsisten di hampir seluruh rentang frekuensi dibandingkan kondisi tanpa beban (kurva hijau).



Gambar 4. 7 Vibroakustik: Tanpa Beban (3000 RPM) vs. Berbeban (2,0 Nm, 2840 RPM).

Peningkatan amplitudo pada Gambar 4. 8 membuktikan adanya kontribusi gaya eksitasi radial akibat ketidaksimetrisan fluks magnetik (*harmonic magnetic forces*) seiring dengan meningkatnya arus kerja pada lilitan stator sesuai Persamaan (2.2). Secara fisik, energi vibroakustik yang terukur merepresentasikan porsi daya input yang tidak terkonversi menjadi torsi mekanis pada poros. Berdasarkan data eksperimental, fenomena getaran struktur ini memiliki korelasi dengan peningkatan suhu motor. Energi tersebut teramati terdisipasi menjadi panas, yang secara teoritis melibatkan mekanisme redaman internal material, di mana proses konversi energi tersebut tetap dipengaruhi oleh kompleksitas parameter fisik sistem lainnya.

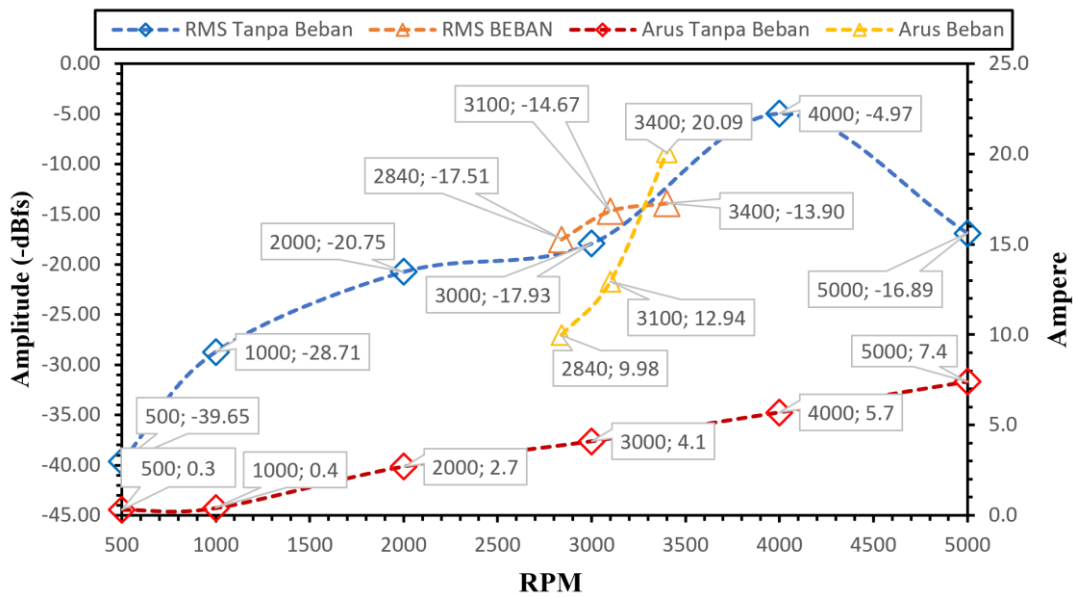


Gambar 4. 8 Dampak variasi beban mekanis dan RPM terhadap spektrum emisi akustik motor

Analisis Korelasi Variabel terlihat pada Tabel 4. 2 dan Gambar 4. 8, di mana suhu pada beban puncak 3,4 Nm mengalami peningkatan signifikan hingga 57,2°C , jauh melampaui kondisi tanpa beban yang hanya mencapai 50,3°C pada kecepatan maksimal. Dengan demikian, integrasi data pada Gambar 4. 6, Gambar 4. 7, dan Gambar 4. 8, secara nyata membuktikan bahwa kombinasi RPM tinggi dan beban maksimal secara simultan memperkuat intensitas bising sekaligus mempercepat degradasi termal motor BLDC *outrunner*.

4. 5 Korelasi Amplitudo RMS Vibroakustik dan Konsumsi Arus terhadap Variasi Kecepatan Putar pada Kondisi Berbeban dan Tanpa Beban

Analisis korelasi multifisika pada bagian ini bertujuan untuk memetakan interaksi langsung antara parameter elektrikal dan respons fisik mekanikal pada motor BLDC T-Motor U12 II 60 kV dalam lingkungan terkontrol *Anechoic Chamber*. Berdasarkan data eksperimental yang tersaji pada Gambar 4. 9, terlihat adanya tren eskalasi yang konsisten pada seluruh variabel uji seiring dengan peningkatan kecepatan putar dan beban mekanis. Secara statistik, konsumsi arus tanpa beban meningkat secara moderat dari 0,3 A pada 500 RPM hingga mencapai 7,04 A pada 5000 RPM. Sebaliknya, pemberian beban mekanis melalui *magnetic brake* memicu lonjakan arus yang sangat tajam, pada 2840 RPM arus tercatat sebesar 9,98 A dan melonjak drastis hingga 20,09 A pada kecepatan 3400 RPM. Peningkatan arus ini berkorelasi linear dengan intensitas disipasi energi mekanis tak-produktif (*stray kinetic energy*) yang termanifestasi sebagai getaran struktural dan direpresentasikan melalui nilai Root Mean Square (RMS) vibroakustik, yang pada kondisi berbeban mencapai nilai tertinggi sebesar -13,90 dBfs pada 3400 RPM.



Gambar 4. 9 Korelasi Amplitudo RMS Vibroakustik dan Konsumsi Arus terhadap Variasi Kecepatan Putar (RPM) pada Kondisi Berbeban dan Tanpa Beban

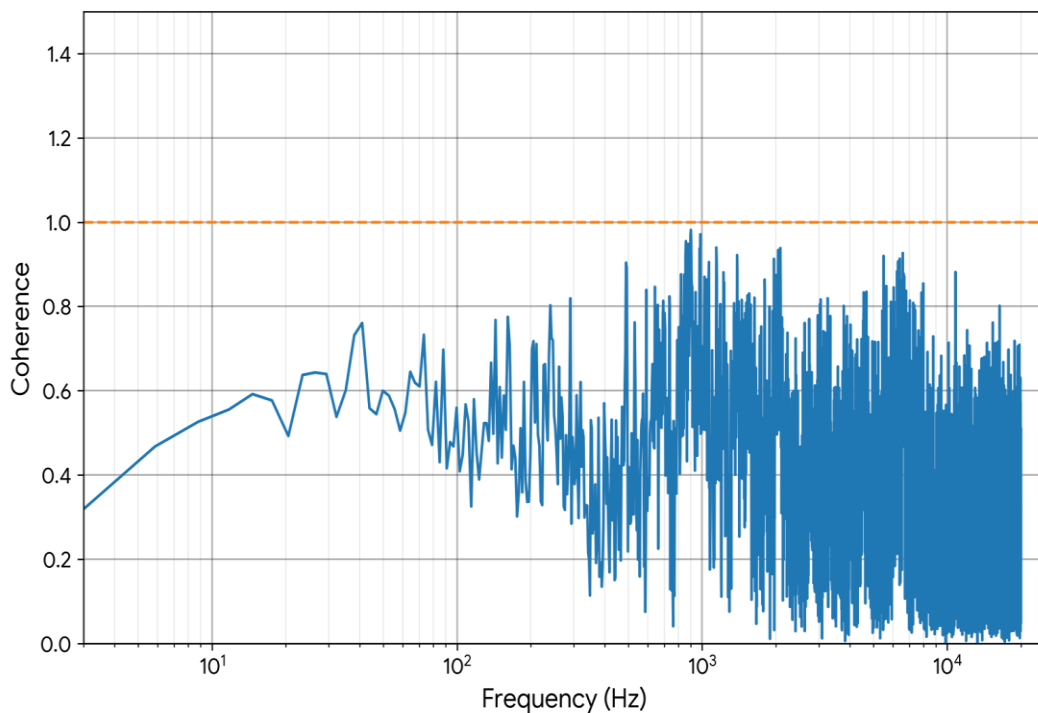
Hasil pengujian ini memvalidasi adanya titik kritis operasional motor akibat fenomena resonansi struktural. Fenomena tersebut teramati secara spesifik pada kondisi tanpa beban di kecepatan 4000 RPM, di mana nilai RMS melonjak signifikan hingga mencapai nilai puncak $-4,97$ dBfs. Secara teoretis, lonjakan ini mengindikasikan bahwa frekuensi fundamental dari gaya eksitasi elektromagnetik atau *cogging torque* selaras dengan frekuensi pribadi (*natural frequency*) dari struktur rangka uji atau *casing* motor. Penurunan nilai RMS menjadi $-16,89$ dBfs pada 5000 RPM menunjukkan bahwa sistem telah melewati fase resonansi struktural tersebut, meskipun konsumsi arus tetap meningkat.

4. 6 Analisis Fungsi Koherensi dan Validasi Resonansi Multifisika

Tujuan dari analisis koherensi dalam studi ini adalah untuk menunjukkan hubungan linier antara sinyal rotasi motor pada berbagai variasi pembebanan dan kecepatan. Fungsi ini diterapkan secara sistematis untuk menentukan respons

keseluruhan terhadap struktur mekanik motor BLDC outrunner berdasarkan analisis vibroakustik di dalam anechoic chamber. Gambar 4. 10 menunjukkan koherensi antara sinyal pada kondisi tanpa beban untuk variasi kecepatan rendah dan tinggi (500 rpm vs 5000 rpm). Nilai koherensi rata-rata yang teramati berada pada kisaran 0,8 hingga 0,9 menunjukkan bahwa puncak spektrum yang muncul merupakan manifestasi dari interaksi elektromagnetik dan mekanis yang stabil.

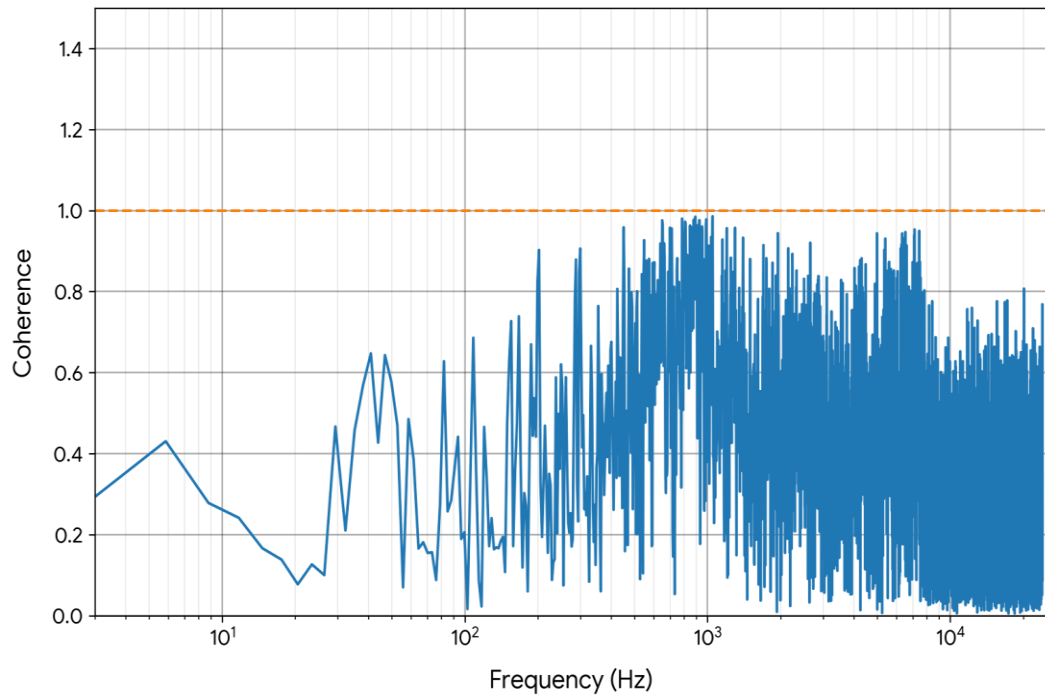
Hal ini memberikan tingkat kepercayaan tinggi bahwa dinamika motor tetap konsisten meski terjadi eskalasi RPM yang signifikan.



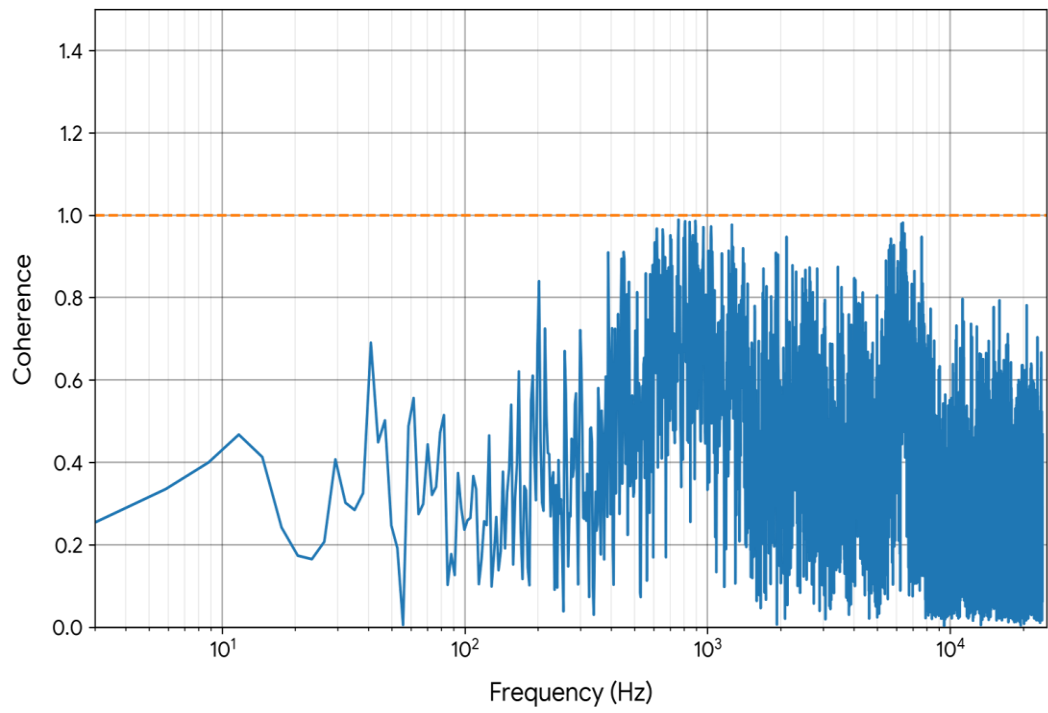
Gambar 4. 10 koherensi sinyal vibroakustik 500 RPM vs 5000 RPM kondisi tanpa beban.

Analisis akurasi sinyal berlanjut pada Gambar 4. 11 dan Gambar 4. 12, di mana nilai koherensi rata-rata masing-masing adalah 0,90 dan 0,92. Nilai ini menunjukkan tingkat keandalan yang sangat tinggi dalam merepresentasikan puncak resonansi. Demikian pula, nilai koherensi untuk transisi beban tinggi pada Gambar 4. 13 dan perbandingan beban puncak pada Gambar 4. 14 masing-masing

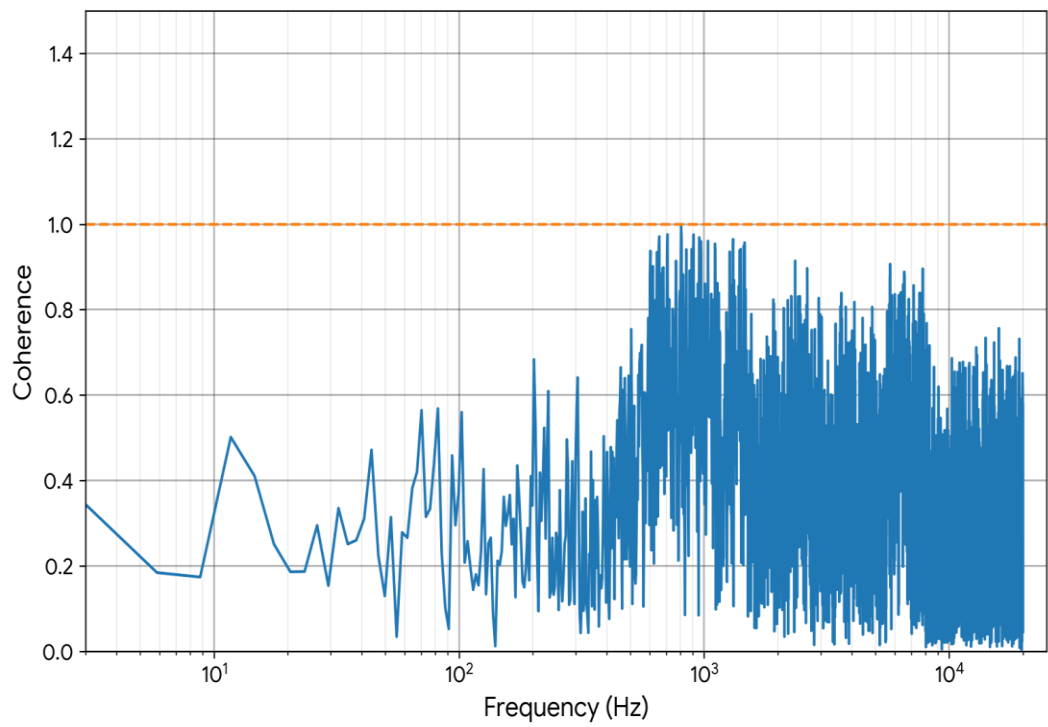
adalah 0,85 dan mendekati nilai 1. Korelasi ini menegaskan tingkat kepercayaan yang tinggi terhadap identifikasi puncak resonansi, khususnya pada fenomena lonjakan RMS di 4000 rpm dengan magnitudo -4.97 dBfs.



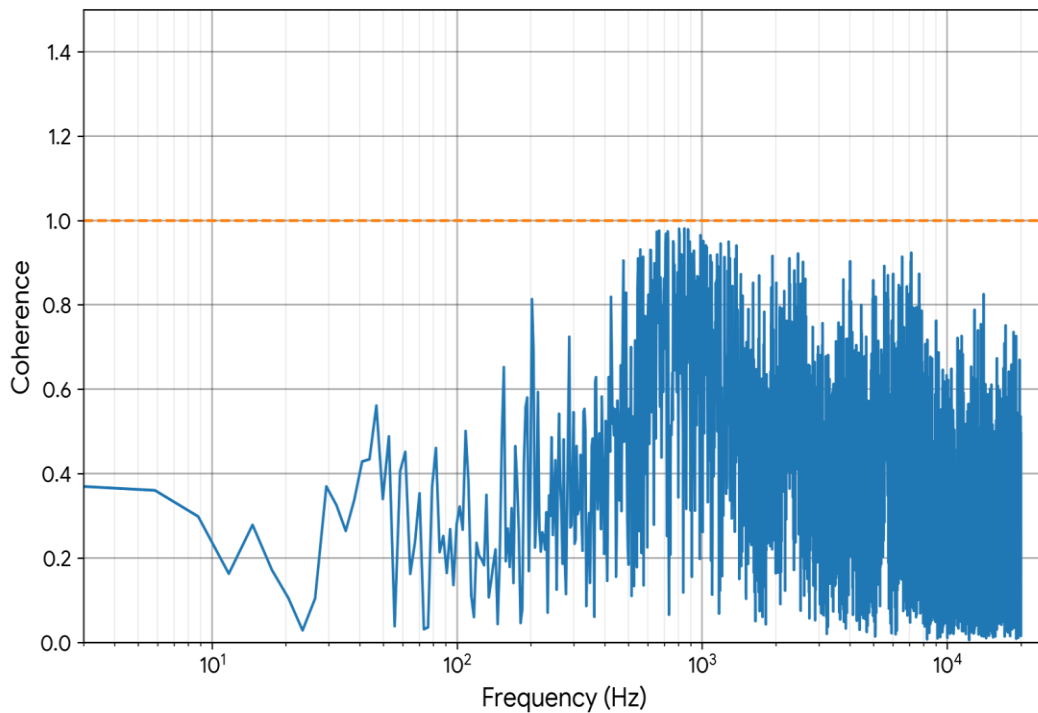
Gambar 4. 11 Koherensi sinyal pada kondisi tanpa beban (3000 RPM) vs beban awal (2840 RPM, 2,0 Nm).



Gambar 4. 12 Koherensi sinyal pada RPM 2840 (2,0 Nm) vs 3100 (2,40 Nm)



Gambar 4. 13 Koherensi sinyal pada RPM 3100 (2,40 Nm) vs 3400 (3,40 Nm).



Gambar 4. 14 Koherensi sinyal pada RPM 2840 (2,0 Nm) vs 3400 (3,40 Nm).

Nilai koherensi yang mendekati ideal pada beban puncak 3,4 Nm mengindikasikan keselarasan pola frekuensi antara energi vibroakustik disipatif dengan akumulasi termal sebesar 57,2 °C. Berdasarkan observasi spektrum frekuensi yang melampaui ambang batas validitas 0,8, fenomena ini menunjukkan bahwa emisi vibroakustik yang tidak berkontribusi pada torsi mekanis produktif teridentifikasi selaras sebagai manifestasi getaran dan panas melalui mekanisme *structural damping*. Penentuan batas fungsi koherensi ini memberikan konfirmasi teknis bahwa motor BLDC outrunner 4000 Watt yang diuji memiliki korelasi operasional antar-domain yang konsisten untuk aplikasi *heavy lift drone*. Nilai koherensi yang mendekati 1,0 tersebut memperkuat atribusi bahwa puncak yang teramati pada spektrum merupakan frekuensi resonansi dari struktur motor.