

ANALISIS AKAR PENYEBAB GETARAN BERLEBIH PADA MOTOR LISTRIK MESIN BUBUT GEMINIS GE5-650S DENGAN METODE FIVE WHYS

M Nopal Alhafiz¹, Faiz Alamsyah¹, Indra Feriadi¹, Ariyanto¹

¹Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, Sungailiat

Corresponding Author: muhammadnopalsmc@gmail.com

ABSTRAK

Motor listrik pada mesin bubut Geminis-GE 5-650 S mengalami gangguan berupa getaran berlebih yang tetap terjadi meskipun telah dilakukan penggantian bearing sebanyak dua kali. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi akar penyebab getaran berlebih pada motor listrik menggunakan metode 5 Whys. Pengumpulan data dilakukan melalui inspeksi visual, pengukuran getaran, wawancara teknisi, dan studi manual book. Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara sistematis menggunakan metode 5 Whys untuk menelusuri hubungan sebab-akibat hingga diperoleh akar penyebab permasalahan. Hasil analisis menunjukkan bahwa akar penyebab getaran bukan berasal dari bantalan, melainkan dari keausan pada areaudukan bantalan poros hasil perbaikan sebelumnya. Keausan tersebut menyebabkan perubahan dimensi poros, meningkatkan kelonggaran radial, mengganggu kestabilan putaran rotor, dan menimbulkan getaran berlebih pada motor listrik. Temuan ini menjelaskan mengapa penggantian bantalan yang dilakukan sebelumnya tidak mampu menghilangkan getaran karena tidak menyentuh akar penyebab kerusakan. Berdasarkan hasil tersebut, direkomendasikan perbaikan poros yang disertai penerapan prosedur perbaikan dan inspeksi pasca-perbaikan serta penguatan program pemeliharaan preventif untuk mencegah terulangnya kegagalan serupa.

Kata Kunci: 5 Whys, getaran berlebih, mesin bubut Geminis GE5-650S, motor listrik, poros.

ABSTRACT

The electric motor of the Geminis-GE 5-650 S lathe machine experienced excessive vibration that persisted despite two bearing replacement attempts. This study aimed to identify the root cause of the excessive vibration using the 5 Whys method. Data were collected through visual inspection, vibration measurement, technician interviews, and a review of the equipment manual. The collected data were then systematically analyzed using the 5 Whys method to trace the cause-and-effect relationship until the root cause was identified. The analysis revealed that the excessive vibration was not caused by bearing failure but by wear on the shaft bearing seat resulting from a previous repair. The wear reduced the shaft dimensions, increased the radial clearance, disrupted rotor rotational stability, and ultimately generated excessive vibration. These findings explain why previous bearing replacements failed to eliminate the vibration, as they did not address the actual root cause of the problem. Based on these findings, shaft restoration or replacement is recommended, together with the implementation of standardized repair procedures, post-repair inspections, and also strengthening preventive maintenance program to minimize the risk of similar failures in the future.

Keywords: 5 Whys, excessive vibration, Geminis-GE 5-650 S lathe, electric motor, shaft wear.

1. PENDAHULUAN

Mesin bubut adalah salah satu jenis mesin perkakas yang dalam proses kerjanya bergerak memutar benda kerja, dengan menggunakan mata potong pahat sebagai alat untuk menyayat permukaan benda kerja tersebut (Atmantawarna & Darmanto, 2013). Salah satu mesin bubut yang digunakan untuk mendukung produksi, penelitian dosen, serta pengerjaan proyek akhir mahasiswa di Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung adalah mesin bubut Geminis-GE 5-650 S. Dalam pengoperasiannya, motor listrik yang berfungsi sebagai penggerak utama bekerja secara terus-menerus sehingga cukup rentan mengalami gangguan, dan salah satu masalah yang paling sering muncul adalah getaran yang melebihi batas normal.

Berdasarkan hasil observasi, motor listrik penggerak mesin bubut Geminis-GE 5-650 S mengalami getaran berlebih saat beroperasi. Upaya untuk menangani masalah ini sudah pernah dilakukan, yaitu dengan mengganti bantalan rotor motor sebanyak dua kali dan memperbaiki keausan poros dengan metode *brazing*, namun getaran masih tetap terjadi. Fakta ini menunjukkan bahwa kerusakan bantalan bukanlah satu-satunya faktor penyebab, melainkan ada kemungkinan terdapat faktor lain yang hingga saat ini belum berhasil diidentifikasi. Jika dibiarkan, getaran berlebih dapat mempercepat keausan komponen, menurunkan keandalan mesin, meningkatkan potensi kerusakan, serta menyebabkan bertambahnya waktu henti (*downtime*) akibat kegiatan perbaikan yang tidak terencana (Akbar & Karmiadi, 2021).

Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah pendekatan yang mampu menelusuri akar penyebab masalah secara sistematis dan menyeluruh. Metode 5 *Whys* dinilai sesuai untuk digunakan dalam kondisi ini, karena metode tersebut bekerja dengan cara mengajukan pertanyaan "mengapa" secara berulang hingga penyebab paling mendasar dari suatu masalah dapat ditemukan. Penelitian ini pun dirancang dengan tujuan mengidentifikasi penyebab sesungguhnya di balik getaran berlebih pada motor listrik mesin bubut Geminis-GE 5-650 S melalui penerapan metode 5 *Whys*, sehingga rekomendasi perbaikan yang dihasilkan nantinya benar-benar tepat sasaran dan dapat berkontribusi pada peningkatan keandalan mesin secara berkelanjutan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan metode 5 *Whys* sebagai pendekatan analisis akar penyebab pada berbagai kasus kegagalan komponen dan proses produksi. Saputra & Santoso (2024) menerapkan metode 5 *Whys* yang dipadukan dengan *Root Cause Analysis* (RCA) untuk menelusuri penyebab cacat produksi di lingkungan industri manufaktur, dan menunjukkan bahwa pendekatan tersebut efektif menemukan akar penyebab yang tidak tampak melalui analisis gejala permukaan semata. Di sisi lain, penelitian mengenai gangguan pada motor listrik selama ini lebih banyak difokuskan pada deteksi kerusakan komponen melalui analisis sinyal getaran, seperti yang dilakukan oleh Ariyansah & Yongkimandala (2023) yang mendeteksi kerusakan bantalan pada motor listrik melalui analisis sinyal getaran. Namun, penelitian tersebut umumnya berhenti pada tahap identifikasi gejala kerusakan komponen dan belum menelusuri akar penyebab kegagalan hingga ke faktor teknis yang lebih mendasar, seperti kesalahan material atau riwayat perbaikan komponen sebelumnya.

Kontribusi penelitian ini terletak pada penerapan metode 5 *Whys* untuk mengidentifikasi akar penyebab getaran berlebih yang tetap terjadi setelah penggantian

bantalan berulang. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada identifikasi kerusakan bantalan melalui analisis getaran, penelitian ini menunjukkan bahwa penyebab utama berasal dari riwayat proses perbaikan poros menggunakan metode *brazing* yang mengubah dimensi poros sehingga memicu ketidakstabilan putaran motor.

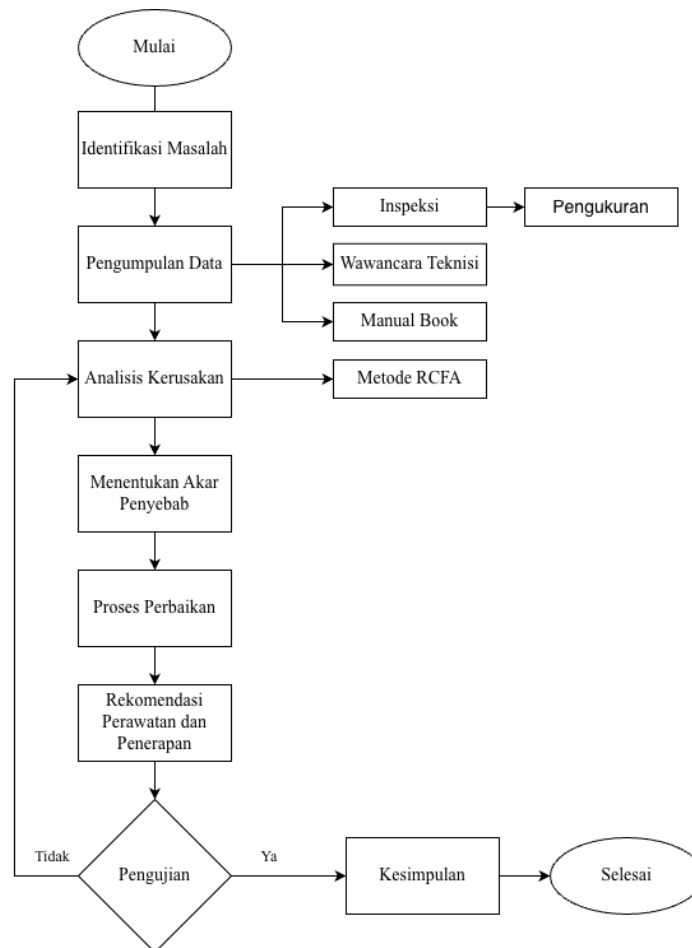
2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode 5 *Whys* untuk mengidentifikasi akar penyebab (*root cause*) terjadinya getaran berlebih pada motor listrik penggerak mesin bubut Geminis-GE 5-650 S. Metode 5 *Whys* merupakan teknik analisis akar penyebab yang dilakukan dengan mengajukan pertanyaan "mengapa" secara berulang dan sistematis hingga diperoleh penyebab utama suatu permasalahan, sehingga solusi yang dihasilkan tidak hanya berfokus pada gejala yang muncul tetapi juga pada akar penyebabnya (Saputra & Santoso, 2024). Metode ini dikenal sederhana namun efektif karena mampu mengidentifikasi hubungan sebab-akibat secara sistematis tanpa memerlukan analisis statistik yang kompleks (Serrat, 2017).

Secara umum tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, identifikasi permasalahan, analisis akar penyebab menggunakan metode 5 *Whys*, serta penyusunan rekomendasi perbaikan dan pemeliharaan. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Pengumpulan data dilakukan melalui inspeksi lapangan, wawancara dengan teknisi, dan studi manual book motor listrik. Inspeksi bertujuan mengidentifikasi kondisi fisik motor serta gejala awal berupa suara abnormal dan getaran berlebih. Wawancara dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai riwayat kerusakan, tindakan perbaikan yang pernah dilakukan, dan kendala yang sering terjadi selama pengoperasian. Sementara itu, studi *manual book* digunakan untuk memperoleh spesifikasi teknis motor, standar pengoperasian, serta prosedur pemeliharaan yang direkomendasikan oleh pabrikan.

Pada tahap inspeksi dilakukan pengukuran tingkat getaran menggunakan Vibroport 80. Pengukuran getaran dilakukan pada dua titik utama, yaitu bantalan sisi penggerak dan bantalan sisi tidak penggerak. Pada masing-masing titik dilakukan pengukuran pada arah horizontal dan vertikal. Evaluasi hasil pengukuran mengacu pada ISO 20816-1:2016. Pengambilan data dilakukan ketika motor beroperasi pada kondisi tunak dengan durasi sekitar 30 detik pada setiap titik dan arah pengukuran, kemudian nilai getaran dalam satuan *velocity* RMS (mm/s) digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kondisi motor dan mendukung proses identifikasi akar penyebab.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Setelah seluruh data terkumpul, dilakukan analisis menggunakan metode 5 *Whys*. Analisis diawali dengan menetapkan permasalahan utama, yaitu getaran berlebih pada motor listrik, kemudian dilakukan penelusuran penyebab secara bertahap melalui serangkaian pertanyaan "*mengapa*" hingga diperoleh akar penyebab yang paling mendasar. Setiap jawaban divalidasi menggunakan hasil inspeksi lapangan, pengukuran getaran, dokumentasi pembongkaran komponen, serta informasi dari teknisi. Akar penyebab yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan rekomendasi metode perbaikan, penyusunan prosedur standar perbaikan poros, inspeksi pasca-perbaikan, serta penguatan program pemeliharaan preventif untuk meminimalkan risiko terulangnya getaran berlebih pada motor listrik. Tahap akhir penelitian adalah penyusunan kesimpulan berdasarkan hasil identifikasi akar penyebab dan implikasi teknis yang diperoleh dari proses analisis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Identifikasi Masalah

Evaluasi kondisi awal motor bertujuan untuk mengidentifikasi masalah dilakukan dengan menggunakan tiga parameter dengan hasil seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kondisi Awal Motor

Parameter	Kondisi Awal
Suara motor	Berisik dan berdengung
Getaran housing	Terasa tinggi saat disentuh
Kondisi operasi	Motor tetap dapat beroperasi, namun menghasilkan getaran berlebih

Pada saat motor listrik mesin dioperasikan, teridentifikasi adanya fenomena awal berupa suara berisik dan dengungan yang berasal dari motor listrik. Suara tersebut terdengar lebih keras dibandingkan kondisi operasi normal dan semakin jelas ketika motor mencapai putaran kerja. Selain itu, secara visual dan melalui perabaan pada rumah motor, teramati adanya getaran yang lebih tinggi sehingga mengindikasikan terjadinya gangguan pada sistem mekanis motor. Suara berisik dan peningkatan getaran tersebut merupakan indikasi awal adanya gangguan pada sistem mekanis mesin berputar yang memerlukan investigasi lebih lanjut.

Selanjutnya dilakukan pengukuran getaran dengan hasil ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Getaran Motor

Waktu	Horizontal	Vertikal
15 Menit	24,5 mm/s	26 mm/s
30 Menit	7,58 mm/s	28,5 mm/s
45 Menit	36,1 mm/s	17,1 mm/s
60 Menit	16,5 mm/s	20 mm/s
Rata-rata	21,17 mm/s	22,9 mm/s

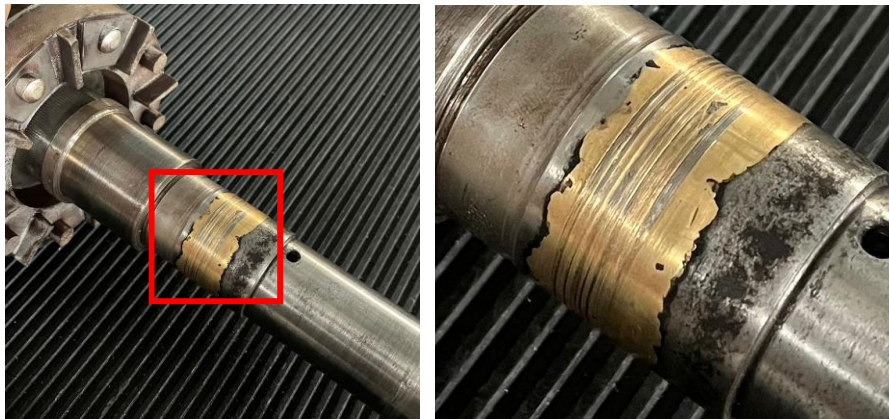
Hasil pengukuran getaran pada tabel di atas menunjukkan nilai rata-rata sebesar 21-22 mm/s, melebihi batas operasi yang direkomendasikan berdasarkan ISO 20816 untuk motor listrik pada kelas yang sebanding. Menurut ISO 20816-1 (2016), tingkat getaran merupakan parameter penting dalam mengevaluasi kondisi mesin berputar dan dapat digunakan sebagai indikator adanya degradasi komponen. Mobley (2021) juga menjelaskan bahwa peningkatan getaran yang disertai suara abnormal umumnya berkaitan dengan kerusakan bearing, ketidakseimbangan rotor, ketidaksejajaran poros, kelonggaran mekanis, maupun keausan poros.

3.2 Analisis Akar Penyebab Menggunakan 5 Whys

Berdasarkan gejala awal dan pengujian getaran tersebut, dilakukan pemeriksaan lebih lanjut untuk mengidentifikasi sumber penyebab getaran melalui proses inspeksi visual, pembongkaran komponen, serta analisis akar penyebab menggunakan metode 5 Whys. Hasil wawancara dengan teknisi menunjukan bahwa sebelumnya pernah dilakukan pembongkaran, tindakan perbaikan yang pernah dilakukan berupa penggantian bantalan sebanyak dua kali. Namun, getaran berlebih masih tetap terjadi saat motor beroperasi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sumber permasalahan tidak berasal dari bantalan, melainkan dari kerusakan komponen lain pada sistem putar motor listrik.

Kondisi poros setelah pembongkaran ditunjukkan pada Gambar 2. Pada area hasil perbaikan terlihat adanya pengelupasan material serta keausan pada permukaan poros. Berdasarkan pengamatan visual, poros pada areaudukan bantalan tampak pernah diperbaiki menggunakan proses *brazing*, kemudian dilakukan pembubutan kembali untuk

mengembalikan dimensinya. Namun, lapisan hasil *brazing* tersebut telah mengalami keausan yang cukup parah dan tidak merata. Hasil pengukuran menunjukkan tingkat keausan yang tidak merata dengan aus yang paling besar sedalam 1.5 mm.



Gambar 2. Kondisi Poros

Berdasarkan temuan tersebut, dilakukan analisis menggunakan metode 5 *Whys* untuk mengidentifikasi akar penyebab utama terjadinya getaran berlebih seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisis 5 *Whys*

Pertanyaan	Jawaban
1. Mengapa motor listrik mengalami getaran berlebih?	Karena poros rotor mengalami eksentrisitas sehingga putaran rotor tidak presisi.
2. Mengapa poros rotor mengalami eksentrisitas?	Karena diameterudukan bantalan berkurang.
3. Mengapa diameterudukan bantalan bearing berkurang.	Karena dudukan bantalan pada poros rotor mengalami keausan.
4. Mengapa dudukan bantalan mengalami keausan?	Karena area tersebut merupakan hasil perbaikan sebelumnya yang mengalami penurunan ketahanan aus.
5. Mengapa hasil perbaikan memiliki ketahanan aus rendah?	Karena proses repair menggunakan <i>brazing</i> dengan material pengisi yang memiliki sifat mekanik lebih rendah dibanding material poros asli.
6. Mengapa dipilih metode <i>brazing</i> sebagai proses repair?	Karena tidak tersedia standar prosedur perbaikan yang mensyaratkan pemulihan dimensi dan sifat mekanik poros sesuai spesifikasi pabrikan, sehingga dipilih metode yang lebih sederhana.

Hasil analisis 5 *Whys* menunjukkan bahwa perbaikan yang dilakukan sebelumnya tidak mampu menghilangkan getaran karena akar permasalahan bukan sekedar terjadinya keausan dari dudukan bantalan, melainkan tidak adanya standar/prosedur perbaikan poros rotor sehingga dipilih metode perbaikan yang tidak sesuai dengan karakteristik komponen.

3.3 Pembahasan Akar Penyebab

Secara teknis, keausan yang ditunjukkan pada Gambar 2 tidak terjadi secara merata di sepanjang poros, melainkan terkonsentrasi pada area yang sebelumnya telah mengalami proses perbaikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa area hasil perbaikan memiliki ketahanan terhadap keausan yang lebih rendah dibandingkan bagian poros lainnya sehingga mengalami degradasi lebih cepat selama operasi. Berkurangnya dimensi pada kedudukan bantalan menyebabkan meningkatnya kelonggaran radial, yang selanjutnya mengubah karakteristik dinamis sistem rotor-bantalan dan meningkatkan eksentrisitas putaran rotor. Perubahan kondisi geometrik tersebut diketahui berpengaruh terhadap peningkatan amplitudo getaran pada mesin berputar, sebagaimana dilaporkan oleh Xu et al. (2021), Moorthi et al. (2024), dan Zhang et al. (2022). Namun demikian, hasil analisis 5 *Whys* pada penelitian ini menunjukkan bahwa akar penyebab getaran tidak semata-mata berasal dari keausan pada kedudukan bantalan, melainkan dari keputusan penggunaan metode perbaikan sebelumnya yang menghasilkan area perbaikan dengan ketahanan aus yang tidak memadai.

3.4 Implikasi terhadap Perbaikan dan Pemeliharaan

Hasil analisis menggunakan metode 5 *Whys* menunjukkan bahwa akar penyebab terjadinya getaran berlebih pada motor listrik mesin bubut Geminis-GE 5-650 S tidak hanya berkaitan dengan keausan pada kedudukan bantalan poros rotor, tetapi juga dipengaruhi oleh proses perbaikan sebelumnya yang menggunakan metode *brazing* tanpa didukung oleh prosedur standar perbaikan yang sesuai. Kondisi tersebut menyebabkan area hasil perbaikan memiliki ketahanan aus yang lebih rendah dibandingkan material poros asli, sehingga mempercepat terjadinya keausan, meningkatkan eksentrisitas poros, dan akhirnya memicu timbulnya getaran berlebih.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa penyelesaian permasalahan tidak cukup dilakukan melalui penggantian komponen yang mengalami kerusakan, tetapi juga memerlukan perbaikan pada aspek teknis dan sistem pemeliharaan agar kegagalan serupa tidak terulang. Sejalan dengan konsep tersebut, tindakan korektif tidak hanya berfokus pada perbaikan komponen yang mengalami kerusakan, tetapi juga mencakup penyempurnaan prosedur kerja, pengendalian kualitas proses perbaikan, serta penguatan program inspeksi dan pemeliharaan preventif untuk meningkatkan keandalan peralatan (Mobley, 2021).

Hasil identifikasi akar penyebab melalui metode 5 *Whys* tidak hanya digunakan untuk menjelaskan penyebab kegagalan, tetapi juga menjadi dasar dalam penyusunan tindakan korektif yang mampu mencegah terulangnya permasalahan. Efektivitas metode 5 *Whys* sangat bergantung pada kemampuan organisasi menerjemahkan akar penyebab menjadi perbaikan proses, penyempurnaan prosedur kerja, dan tindakan pencegahan yang berkelanjutan (Al-Rifai, 2025). Dalam konteks pemeliharaan mesin, hasil *Root Cause Analysis* (RCA) juga dapat dimanfaatkan sebagai dasar penyusunan strategi perbaikan, peningkatan kualitas aktivitas maintenance, dan pengembangan program pemeliharaan preventif (Rumambo & Susanto, 2025). Oleh karena itu, hasil analisis pada penelitian ini diimplementasikan dalam bentuk rekomendasi metode perbaikan, penyusunan SOP perbaikan poros, inspeksi pasca-perbaikan, serta penguatan program pemeliharaan preventif sebagaimana ditunjukkan Tabel 4.

Tabel 4. Rekomendasi Perbaikan dan Pemeliharaan

Aspek	Rekomendasi	Tujuan
Metode perbaikan	Gunakan <i>hard chrome plating, thermal spray, metal spray</i> , atau <i>shaft sleeving</i> sesuai tingkat kerusakan, kemudian lakukan <i>grinding</i> hingga mencapai dimensi standar.	Meningkatkan ketahanan aus dan mengembalikan dimensi poros sesuai spesifikasi.
SOP perbaikan poros	Susun SOP yang mencakup inspeksi awal, pelaksanaan perbaikan, pemeriksaan kualitas hasil perbaikan, dan pengujian akhir sebelum motor dioperasikan.	Menjamin konsistensi kualitas pekerjaan perbaikan.
Inspeksi pasca-perbaikan	Lakukan pengukuran diameter poros, <i>run-out, bearing fit, dynamic balancing</i> (jika diperlukan), serta <i>running test</i> dengan memantau getaran, suara, dan temperatur.	Memastikan hasil perbaikan memenuhi persyaratan teknis dan tidak menimbulkan sumber getaran baru.
Pemeliharaan preventif	Tambahkan inspeksi berkala terhadap getaran, temperatur, kondisi bantalan, dan histori pemeliharaan sebagai bagian dari <i>checklist PM</i> .	Mendeteksi dini potensi kerusakan sehingga dapat dicegah sebelum menyebabkan kegagalan.

Rekomendasi ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pelaksanaan perbaikan maupun pemeliharaan motor listrik sehingga risiko terjadinya getaran berlebih akibat kerusakan yang sama dapat diminimalkan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi akar penyebab getaran berlebih pada motor listrik mesin bubut Geminis-GE 5-650 S menggunakan metode 5 *Whys*. Hasil analisis menunjukkan bahwa akar penyebab getaran bukan berasal dari bantalan, melainkan dari keausan pada areaudukan bantalan poros hasil perbaikan yang menyebabkan perubahan dimensi poros, peningkatan kelonggaran radial, dan eksentrisitas putaran rotor. Temuan ini menjelaskan kegagalan tindakan penggantian bantalan sebelumnya dalam menghilangkan getaran karena tidak menyentuh penyebab utama kerusakan.

Berdasarkan hasil tersebut, direkomendasikan penerapan metode perbaikan poros yang sesuai dengan persyaratan teknis, penyusunan SOP perbaikan poros, pelaksanaan inspeksi pasca-perbaikan yang mencakup pemeriksaan dimensi poros, *run-out*, dan kondisi pemasangan bantalan, serta penguatan program pemeliharaan preventif melalui pemantauan getaran dan inspeksi berkala. Dengan demikian, metode 5 *Whys* dapat digunakan sebagai pendekatan yang efektif untuk mengidentifikasi akar penyebab gangguan pada mesin berputar sekaligus menjadi dasar dalam penyusunan tindakan perbaikan dan pemeliharaan yang lebih tepat.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, dosen pembimbing, serta teknisi Laboratorium Mekanik yang telah memberikan dukungan, arahan, dan bantuan selama pelaksanaan penelitian hingga penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, A., & Karmiadi, D. (2021). Analisis getaran pengaruh variabel misalignment. *Teknobiz: Jurnal Ilmiah Program Studi Magister Teknik Mesin*, 11(2), 91–98.
- Al-Rifai, M. (2025). *Unlocking insights: evaluating 5Whys methodology for root cause analysis and employee problem-solving skills in 91 case studies*. *International Journal of Lean Six Sigma*, 16(5), 1276–1304. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-04-2024-0077>
- Ariyansah, R., & Yongkimandalan, N. (2023). Deteksi Kerusakan Bantalan Gelinding Pada Motor Listrik Dengan Analisa Sinyal Getaran. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(2), 152.
- Atmantawarna, H. P., Senen, S., & Darmanto, S. (2013). Perbaikan Pada Mesin Bubut dan Uji Unjuk Kerja Dengan Bahan Besi Pejal (Improvement in The Machine Tool And Test Performance With Solid Iron Material) (Doctoral Dissertation).
- International Organization for Standardization. (2016). *ISO 20816-1:2016 Mechanical vibration—Measurement and evaluation of machine vibration—Part 1: General guidelines*. ISO.
- Mobley, R. K. (2021). *Maintenance Engineering Handbook* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Moorthi, L. R., Inayat-Hussain, J. I., & Zakaria, A. A. (2024). Effect of bearing wear on linear and nonlinear responses of a rigid rotor supported by journal bearings. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 38(6), 2741–2747. <http://doi.org/10.1007/s12206-024-2204-4>
- Rumambo, F. N., & Susanto, N. (2025). Pengukuran Manajemen Kinerja pada Aktivitas Maintenance Pabrik dengan Menggunakan Metode Data Envelopment Analysis (DEA) dan Root Cause Analysis (RCA). *Industrial Engineering Online Journal*, 14(3).
- Saputra, F. A., & Santoso, D. T. (2024). Analysis of production defects using the 5 WHYS and RCA method at PT. X. *TRANSMISI*, 20(2), 52–59.
- Serrat, O. (2017). The Five Whys Technique. In *Knowledge Solutions: Tools, Methods, and Approaches to Drive Organizational Performance* (pp. 307–310). Springer.
- Xu, M., Han, Y., Sun, X., Shao, Y., Gu, F., & Ball, A. D. (2022). Vibration characteristics and condition monitoring of internal radial clearance within a ball bearing in a gear-shaft-bearing system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 165, Article 108280. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108280>
- Zhang et al. (2022). Restoring the stability of the rotor system by adjusting the radial clearance of the bearing. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40430-022-03548-1>