

## **Analisis Keandalan Mesin Menggunakan MTTR dan Downtime untuk Menentukan Mesin Kritis pada Lini Produksi PT X.** *(Machine Reliability Analysis Using MTTR and Downtime to Determine Critical Machines in PT X's Production Line)*

**Arief Syaefudin<sup>1)</sup>, Deri Teguh Santoso<sup>2)</sup>, Jojo Sumarjo<sup>3)</sup>, Ratna Dewi Anjani<sup>4)</sup>**

<sup>1-4)</sup>Teknik Mesin , Universitas Singaperbangsa Karawang

*E-mail:* <sup>1)</sup>[arefsyaefudin@gmail.com](mailto:arefsyaefudin@gmail.com), <sup>2)</sup>[deri.teguh@ft.unsika.ac.id](mailto:deri.teguh@ft.unsika.ac.id),  
<sup>3)</sup>[jojosumarjo@ft.unsika.ac.id](mailto:jojosumarjo@ft.unsika.ac.id) <sup>4)</sup>[ratna.anjani@ft.unsika.ac.id](mailto:ratna.anjani@ft.unsika.ac.id).

### **Abstrak**

Keandalan mesin sangat penting dalam menjaga kelancaran produksi, terutama pada industri make-to-order seperti PT X. Penelitian ini menganalisis efektivitas pemeliharaan mesin menggunakan Mean Time To Repair (MTTR) dan total downtime berdasarkan data kerusakan selama Februari 2022. Metode penelitian meliputi pengumpulan data kerusakan, perhitungan MTTR, dan identifikasi mesin kritis. Hasil menunjukkan terdapat 22 mesin yang mengalami gangguan, dengan downtime terbesar pada CNC Router 6.5 (1080 menit), Bending (870 menit), dan High Frequency HF1 (180 menit). Temuan ini mengindikasikan bahwa pemeliharaan masih bersifat reaktif dan menyebabkan tingginya kehilangan waktu produksi. Penelitian merekomendasikan penerapan preventive maintenance terjadwal dan peningkatan pencatatan histori kerusakan.

*Kata Kunci:* downtime, keandalan mesin, mesin kritis, MTTR, preventive maintenance.

### **Abstract**

*Machine reliability is crucial for ensuring production continuity, especially in make-to-order industries such as PT X. This study evaluates maintenance effectiveness by analyzing Mean Time To Repair (MTTR) and total downtime using failure data recorded in February 2022. The method includes failure data collection, MTTR calculation, and critical machine identification. Results show that 22 machines experienced failures, with the highest downtime found on CNC Router 6.5 (1080 minutes), Bending (870 minutes), and High Frequency HF1 (180 minutes). The findings indicate that maintenance practices remain reactive and contribute to significant production time losses. Scheduled preventive maintenance and improved failure documentation are recommended.*

**Keywords:** downtime, critical machines, machine reliability, MTTR, preventive maintenance.

## **1. PENDAHULUAN**

Industri produksi saat ini memiliki ketergantungan terhadap mesin yang signifikan untuk menjamin kelancaran alur kerja pembuatan. Ketahanan alat sangat krusial dalam industri yang berbasis pemesanan, karena satu kerusakan pada mesin bisa mengakibatkan gangguan dalam seluruh sistem produksi. Dalam keadaan ini,

pemeliharaan mesin memiliki peran penting untuk menjaga agar mesin tetap bisa digunakan dan mengurangi waktu tidak beroperasi, yang dapat menyebabkan kerugian waktu dan pengeluaran [1], [2].

PT X merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pembuatan furnitur, yang memiliki mesin produksi lebih dari 140 unit. Dari data Perusahaan mengungkapkan bahwa selama bulan Februari 2022, telah terjadi sejumlah kerusakan mesin yang menyebabkan downtime yang cukup lama. Dari kejadian tersebut, dipandang perlu untuk dilakukan analisis yang berlandaskan data yang ada. Tujuannya untuk menilai efektivitas kegiatan pemeliharaan serta mengenali mesin-mesin penting yang paling berpengaruh pada kinerja produksi.

Dalam bidang rekayasa keandalan, ukuran seperti *Mean Time to Repair* (MTTR) dan *Mean Time Between Failure* (MTBF) seringkali digunakan untuk menilai keandalan serta efektivitas mesin. Evaluasi MTTR dan MTBF yang dilakukan, dapat mendukung perusahaan dalam menyusun strategi perawatan preventif yang lebih efisien [3].

Pendekatan perawatan *preventif* dan *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) telah terbukti meningkatkan ketersediaan peralatan serta menurunkan jumlah kerusakan di berbagai sektor industry [4], [5]. Selain itu, kemajuan dalam teknologi Industri 4.0 dan perawatan yang bersifat prediktif telah memperkuat pemanfaatan data seperti MTTR, MTBF, sensor, dan analitik untuk mengambil keputusan dalam perawatan yang berbasis data [6].

Namun, penelitian mengenai MTTR serta analisis *downtime* dalam sektor furnitur di Indonesia masih terbatas, padahal produksi di industri ini sangat bergantung pada kinerja mesin yang konsisten [7], [8]. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi sangat penting untuk memberikan wawasan kuantitatif mengenai kondisi mesin di PT X.

Tujuan penelitian ini adalah (1) Menghitung MTTR mesin yang mengalami kerusakan selama Februari 2022. (2) Menganalisis total *downtime* dan pola kerusakan. (3) Mengidentifikasi mesin kritis berdasarkan kontribusi *downtime*. (4) Memberikan rekomendasi untuk meningkatkan strategi perawatan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metodologi kuantitatif dengan penekanan pada analisis informasi tentang kegagalan peralatan, lama *downtime*, serta penghitungan *Mean Time to Repair* (MTTR) sebagai landasan penilaian efektivitas pemeliharaan. Metodologi kuantitatif dipilih karena dapat memberikan gambaran yang objektif mengenai keandalan mesin melalui catatan data historis yang terkumpul selama masa penelitian, sesuai dengan rekomendasi dalam studi pemeliharaan modern di sektor manufaktur [9], [10]. Data yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari sistem pengajuan layanan, catatan para teknisi, serta ringkasan riwayat perbaikan di PT X selama 1 bulan. Informasi yang terkumpul meliputi tanggal terjadinya kegagalan, identitas mesin, kategori masalah, tindakan-tindakan yang diambil oleh teknisi, serta total *downtime* yang dihitung dalam menit.

Subjek dalam penelitian ini terdiri dari 22 mesin yang mengalami kerusakan selama waktu pengamatan, mewakili berbagai jenis peralatan seperti mesin CNC, mesin hidrolik, alat pemotong, mesin pres, mesin cetak, dan blower. Mesin-mesin ini dipilih karena memiliki dampak langsung pada proses produksi di lini perakitan utama. Dengan demikian, seluruh analisis diarahkan pada mesin-mesin yang mengalami kegagalan nyata, bukan pada semua mesin yang digunakan di perusahaan.

Data yang sudah terkumpul dianalisis dengan menghitung MTTR untuk setiap insiden kerusakan. MTTR dihitung dengan menggunakan rumus keandalan umum yaitu, total durasi perbaikan dibagi dengan jumlah kerusakan pada peralatan yang sama. Parameter ini berfungsi untuk menilai seberapa rumit dan sulitnya perbaikan di lapangan serta menjadi patokan untuk mengevaluasi kualitas respons pemeliharaan. Di samping itu, total *downtime* dihitung pada masing – masing mesin untuk menilai berapa banyak waktu produksi yang hilang akibat kerusakan [8][10][11].

Studi ini juga menyoroti mesin-mesin vital berdasarkan tiga parameter utama: total waktu berhenti yang paling tinggi, angka MTTR yang relatif besar, dan pengaruh langsung mesin terhadap proses produksi. Metode ini sejalan dengan pendekatan *Reliability-Centered Maintenance* (RCM), yang menekankan

pentingnya pemeliharaan sesuai dengan risiko dan pengaruh operasional [12], [13]. Dengan begitu, identifikasi mesin yang vital tidak hanya mempertimbangkan seberapa sering kerusakan terjadi, tetapi juga melihat seberapa besar gangguan tersebut berpengaruh terhadap proses produksi.

Tahapan penelitian dilaksanakan secara terstruktur, diawali dengan pengumpulan informasi, penyusunan tabel waktu kerusakan, penghitungan MTTR, evaluasi peringkat mesin berdasarkan kontribusi waktu kerusakan, dan penafsiran hasil untuk menetapkan prioritas perawatan. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh analisis dilakukan selaras dengan data yang valid dan berbasis ilmiah. Melalui pendekatan ini, saran yang dihasilkan diharapkan menjadi fondasi untuk memperbaiki sistem pemeliharaan PT X dengan lebih fokus dan sesuai dengan standar perawatan industri moderen.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengevaluasi data kerusakan pada mesin yang tercatat selama 1 bulan di PT X. Sebanyak 22 mesin mengalami berbagai jenis masalah. Kerusakan tersebut termasuk kerusakan mekanik seperti komponen *joint* yang patah, *belt* yang terputus, dan kerusakan pada bearing. Selain itu, terdapat juga gangguan dalam sistem pneumatik, hidrolik, dan elektrik seperti kebocoran angin, dinamo yang tidak berfungsi, MCB yang terputus, serta *overload* pada panel kontrol. Sebagian besar mesin CNC juga menghadapi tantangan teknis, termasuk suara bising pada axis, kesalahan pada *spindle*, dan kerusakan *gearbox* yang mengakibatkan mesin tiba-tiba berhenti beroperasi. Pola kerusakan ini konsisten dengan hasil penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa mesin yang berbasis CNC dan hidrolik memiliki tingkat kerusakan yang lebih tinggi karena kompleksitas komponen di dalamnya dan kebutuhan untuk kalibrasi yang presisi [14], [15].

Berdasarkan data perhitungan, nilai MTTR diperoleh dari total waktu untuk memperbaiki setiap insiden kerusakan dibagi jumlah kejadian gangguan. Mesin yang menunjukkan angka MTTR tertinggi dalam penelitian ini adalah CNC *Router* 6.5, *Bending Machine*, dan mesin *High Frequency* HF1. Ketiga mesin tersebut memerlukan durasi penanganan yang lebih panjang dibandingkan dengan lainnya

karena proses perbaikannya lebih sulit, termasuk perlunya membongkar komponen yang kompleks, melakukan inspeksi menyeluruh terhadap sistem hidrolik atau *spindle*, serta ketergantungan pada komponen pengganti yang terkadang tidak tersedia. Hasil ini sejalan dengan literatur bahwa waktu untuk memulihkan mesin tidak hanya dipengaruhi oleh tingkat kerusakan, tetapi juga oleh keterampilan teknisi, ketersediaan suku cadang, serta keandalan sistem diagnostik mesin [16], [17].

Analisis total *doentime* menunjukkan pola yang signifikan, di mana *Router* CNC 6.5 mencatat *downtime* tertinggi yaitu 1080 menit, diikuti oleh Mesin Bending yang mengalami 870 menit dan HF1 yang mencapai 180 menit. Selain itu, *Router* CNC 3.0 dan *Boiler* OS masing-masing tercatat mengalami *downtime* sebesar 120 menit. Penelusuran penyebab *downtime* mengindikasikan bahwa sebagian besar kerusakan pada perangkat CNC disebabkan oleh masalah pada mekanisme sumbu, sistem pelumasan otomatis, serta gangguan pada *spindle*. Sementara itu, kerusakan pada Mesin Bending lebih banyak dipicu oleh masalah hidrolik yang menyebabkan gangguan tekanan, sehingga mesin tidak dapat dijalankan. Pola ini sejalan dengan penelitian lain yang menyatakan bahwa mesin presisi berbasis pemotongan dan mesin hidrolik adalah sumber utama *downtime* di bidang manufaktur karena tingginya interaksi antara komponen mekanik dan sistem kendali elektronik [18], [19].

Dengan memperhatikan total *downtime* dan nilai MTTR, penentuan mesin penting dilakukan dengan mengutamakan mesin yang menyumbang *downtime* paling signifikan sebagai fokus utama pemeliharaan. CNC *Router* 6.5, Mesin Bending, dan HF1 dianggap sebagai mesin penting karena *downtime* yang tinggi serta berdampak langsung pada penurunan hasil produksi. Ketiga mesin ini memiliki peran penting sebagai mesin utama dalam proses pemotongan, pembentukan, dan pemanasan material sehingga gangguan pada mesin-mesin ini dapat menghambat arus produksi di berbagai lini secara bersamaan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip RCM yang menegaskan bahwa mesin penting harus menjadi prioritas utama dalam penyusunan jadwal pemeliharaan preventif karena pengaruhnya yang besar terhadap produktivitas sistem [18], [20].

Pembahasan lebih mendalam mengungkap bahwa metode perawatan yang diterapkan oleh perusahaan umumnya bersifat responsif, yaitu melakukan perbaikan mesin setelah terjadi kerusakan. Metode ini sering ditemui di sektor industri menengah di Indonesia yang belum memiliki sistem pemeliharaan pencegahan atau prediksi yang baik, disebabkan oleh keterbatasan staf, alat pemantauan, dan catatan sejarah kerusakan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pendekatan pemeliharaan reaktif berkontribusi terhadap meningkatnya waktu henti serta biaya perawatan yang lebih tinggi, karena proses perbaikan bersifat darurat sering memakan waktu lebih lama daripada perawatan yang telah dijadwalkan [21]. Di sisi lain, beberapa referensi menunjukkan bahwa penerapan pemeliharaan preventif yang teratur dapat mengurangi *downtime* sebesar 30–40% dan memperpanjang masa pakai mesin [22], [23].

Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa PT X perlu merestrukturisasi strategi perawatan mesin menuju metode yang lebih proaktif dengan fokus pada pemeliharaan yang bersifat pencegahan dan memanfaatkan data MTTR serta *downtime* sebagai landasan dalam pengambilan keputusan. Selain itu, penerapan sistem pencatatan yang berbasis digital, peningkatan kemampuan teknisi dalam menangani mesin CNC dan hidrolik, serta ketersediaan suku cadang dapat mempercepat proses pemulihan mesin dan meningkatkan efisiensi perawatan secara keseluruhan. Penelitian ini menyajikan gambaran menyeluruh mengenai tingkat keandalan mesin di PT X dan dapat dijadikan panduan untuk merencanakan program pemeliharaan preventif yang lebih sistematis dan terukur [24], [25].

## 4. PENUTUP

### a. Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja keandalan mesin pada salah satu lini produksi PT X melalui analisis data *downtime* dan perhitungan *Mean Time To Repair* (MTTR). Berdasarkan hasil pengolahan data kerusakan selama periode penelitian, ditemukan bahwa gangguan mesin cenderung terfokus pada beberapa unit tertentu yang memberikan kontribusi signifikan terhadap total waktu henti produksi. Mesin CNC *Router* 6.5 tercatat sebagai mesin dengan *downtime* tertinggi,

yaitu mencapai 1080 menit, diikuti mesin Bending dengan total 870 menit, serta mesin *High Frequency* HF1 yang mengalami downtime 180 menit. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa pola pemeliharaan yang diterapkan perusahaan masih bersifat reaktif dan belum sepenuhnya mengadopsi prinsip *preventive maintenance*. Kondisi ini berpengaruh pada stabilitas kinerja lini produksi, mengingat industri berbasis *make-to-order* sangat sensitif terhadap keterlambatan satu proses yang berpotensi menimbulkan efek domino pada keseluruhan rantai produksi. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa perusahaan perlu meningkatkan efektivitas sistem perawatannya melalui pemanfaatan data downtime dan MTTR sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih terukur dan proaktif.

### b. Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, perusahaan sebaiknya menjalankan program pemeliharaan *preventif* yang lebih terencana, terutama pada mesin-mesin dengan potensi risiko tinggi, seperti CNC Router, mesin Bending, dan unit *High Frequency*. Proses pencatatan kerusakan juga perlu ditingkatkan dengan cara menerapkan pemeriksaan rutin menggunakan *checklist* serta standar dokumentasi yang seragam agar data historis bisa dimanfaatkan dengan maksimal. Selain itu, perusahaan disarankan untuk menyusun pelatihan bagi teknisi guna memperkuat kemampuan diagnostik serta pemahaman mengenai komponen penting, khususnya pada mesin CNC dan hidrolik yang cenderung mengalami masalah berulang. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar analisis MTBF, OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), dan pendekatan *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) dilakukan secara lebih menyeluruh, sehingga gambaran mengenai keandalan mesin bisa didapatkan dengan lebih lengkap. Penelitian yang akan datang juga dapat mempertimbangkan penggunaan sensor monitoring kondisi dan analisis prediktif untuk mencegah kerusakan sebelum itu terjadi, sejalan dengan perkembangan Industri 4.0.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Y. Salawu *et al.*, "Impact of Maintenance on Machine Reliability : A Review," in *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 430, pp. 1–12.
  - [2] S. F. Rahmananto and P. H. Tjahjanti, "Maintaining Printing Machines at a Textile Company Pemeliharaan Mesin Cetak di Perusahaan Tekstil," in *Procedia of Engineering and Life Science*, 2024, vol. 7, pp. 132–137.
  - [3] J. O. Aji, "Improving Facility Operations : A Quantitative Evaluation of MTBF , MTTR , and SLA Targets," *Eur. J. Innov. Stud. Sustain.*, vol. 1, no. 3, 2025.
  - [4] A. Breznick, M. Kohutiar, M. Krbat, M. Eckert, and P. Mikuš, "Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties," *Systems*, vol. 11, no. 556, 2023, doi: <https://www.mdpi.com/2079-8954/11/12/556>.
  - [5] M. Zieja, N. Grzesik, J. Tomaszewska, and G. Kozłowski, "applied sciences Implementation of the Mean Time to Failure Indicator in the Control of the Logistical Support of the Operation Process," *Appl. Sci.*, vol. 13, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13074608>.
  - [6] L. Pincioli, P. Baraldi, and E. Zio, "Maintenance optimization in industry 4 . 0," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 234, 2023, doi: 10.1016/j.ress.2023.109204.
  - [7] D. Apriatno, "USULAN PENERAPAN TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (TPM) GUNA MENINGKATKAN KINERJA MESIN ELEKTROPLATING DI PERUSAHAAN FURNITUR TANGERANG," *J. OE*, vol. 7, no. 3, pp. 271–288, 2015.
  - [8] P. Ka'zmierczak, K. Zywicki, and P. Rewers, "The Impact of Downtime on the Stability of the Production Schedule," *Appl. Sci.*, vol. 15, 2025.
  - [9] P. Moemenishahraki, "Reliability and Maintenance Performance Analysis of a 1600 - ton Press Machine Using MTBF , MTTR , KPI , and Downtime Indicators," *Ind. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 36–41, 2025.
  - [10] S. Alfionita and F. I. Alifin, "Preventive Maintenance Analysis Based on Mean Time Between Failure ( MTBF ) and Mean Time to Repair ( MTTR )," *Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol.*, vol. 15, no. 2, 2023, doi: 10.28989/angkasa.v15i2.1833.
  - [11] L. Marbun and A. Indra, "Analisis Preventive Maintenance Pada Generator Set ( Genset ) Dengan Metode Mean Time Between Failure ( Mtbf ) Dan Mean Time To Repair," *J. Inovtek Seri Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 39–47, 2025.
  - [12] I. S. Lopes, M. C. Figueiredo, and V. Sá, "Criticality evaluation to support maintenance management of manufacturing systems," *Int. J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 11, no. 1, pp. 3–18, 2020.
  - [13] N. R. Wicaksono and S. D. N. Rosady, "Penerapan Metode Reliability Centered Maintenance ( RCM ) untuk Menentukan Strategi Perawatan Mesin
- 
- Analisis Keandalan Mesin Menggunakan MTTR dan Downtime untuk Menentukan Mesin Kritis pada Lini Produksi PT X. (Arief Syaefudin, Deri Teguh Santoso, Jojo Sumarjo, Ratna Dewi Anjani)**

- Pencacah Sampah Organik," *J. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 4, pp. 1–15, 2024.
- [14] A. P. Maysarah, F. T. D. Atmaji, and J. Alhilman, "PERANCANGAN SIMULASI MONITORING JARAK JAUH DENGAN SENSOR GETARAN UNTUK MEMPREDIKSI KERUSAKAN MESIN CNC MILLING A PADA DESIGN OF DISTANCE MONITORING SIMULATION WITH VIBRATION SENSOR TO PREDICT THE DAMAGE OF CNC MILLING A MACHINES IN," in *e-Proceeding of Engineering*, 2019, vol. 6, no. 2, pp. 7130–7136.
- [15] H. Tian *et al.*, "OPEN A novel FMECA method for CNC machine tools based on D-GRA and data envelopment analysis," *Sci. Rep.*, vol. 14, pp. 1–21, 2024.
- [16] S. V. I. Pratiwi and H. Murnawan, "Analisa Perbaikan Mesin Cutting Guna Mengurangi Frekuensi Kerusakan dan Jam Perbaikan Mesin," *JUTIN J. Tek. Ind. Terintegrasi*, vol. 7, no. 2, pp. 1083–1092, 2024, doi: 10.31004/jutin.v7i2.27800.
- [17] F. J. Á. García and D. R. Salgado, "Analysis of the Influence of Component Type and Operating Condition on the Selection of Preventive Maintenance Strategy in Multistage Industrial Machines : A Case Study," *Machines*, vol. 10, 2022.
- [18] A. Setiawan, H. Windyatri, and Suhendra, "PENERAPAN PREVENTIVE MAINTENANCE MENGGUNAKAN METODE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE ( RCM ) UNTUK," *J. DESIMINASI Teknol.*, vol. 12, no. 2, pp. 89–94, 2024.
- [19] S. Li *et al.*, "Failure Analysis for Hydraulic System of Heavy-Duty Machine Tool with Incomplete Failure Data," *Appl. Sci.*, vol. 11, 2021.
- [20] M. Gopalakrishnan, M. Subramaniyan, and A. Skoogh, "Data-driven machine criticality assessment – maintenance decision support for increased productivity," *Prod. Plan. Control*, vol. 33, no. 1, pp. 1–19, 2022, doi: 10.1080/09537287.2020.1817601.
- [21] N. Ahmadi and N. Y. Hidayah, "Analisis Pemeliharaan Mesin Blowmould Dengan Metode RCM Di PT . CCAI," *J. Optimasi Sist. Ind.*, vol. 16, no. 2, pp. 167–176, 2017.
- [22] S. Muhiu, "Reliability-Based Preventive Maintenance Scheduling of a Multi-unit Injection Molding System : A Case Study," *Int. J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 16, no. 1, pp. 24–39, 2025.
- [23] F. S. Al-duais, A. A. Mohamed, T. M. Jawa, and N. Sayed-ahmed, "Optimal Periods of Conducting Preventive Maintenance to Reduce Expected Downtime and Its Impact on Improving Reliability," *Hindawi*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/7105526.
- [24] S. D. SIREGAR, "IMPLEMENTATION OF MAINTENANCE STRATEGY AND ASSET HEALTH MONITORING ON UNDERGROUND GBC Business Administration Program ) INSTITUT

TEKNOLOGI BANDUNG JULY 2023 ABSTRACT IMPLEMENTATION OF MAINTENANCE STRATEGY AND ASSET HEALTH MONITORING ON UNDERGROUND GBC Sah,” INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG, 2023.

- [25] N. Chambi *et al.*, “Predictive Maintenance in Underground Mining Equipment Using Artificial Intelligence,” *Eng*, vol. 6, no. 261, pp. 1–22, 2025.