

SISTEM MONITORING KONDISI PISAU *DIE CUTTING* DAN ANALISIS KEANDALAN (*RELIABILITY ANALYSIS*) DENGAN PENDEKATAN DISTRIBUSI *WEIBULL* DI PT.XYZ

Edwar Agus Junaedi¹, Tarman², Hendi Iskandar³

edwardwaraj@gmail.com¹, tarman@wastukancana.ac.id², hendi@wastukancana.ac.id³

STT Wastukancana

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan pisau die cutting di PT. XYZ menggunakan distribusi Weibull serta merancang sistem monitoring kondisi untuk memprediksi waktu penggantian optimal. Latar belakang penelitian didasari oleh downtime tidak terjadwal akibat ketidakpastian waktu penggantian pisau dan belum adanya sistem prediktif di perusahaan. Data historis dari 30 pisau die cutting yang gagal selama Januari–April 2026 dianalisis melalui statistik deskriptif, uji distribusi, estimasi parameter Weibull dengan MLE, perhitungan fungsi keandalan $R(t)$ dan hazard $h(t)$, MTTF, median, serta penentuan waktu inspeksi dan penggantian optimal. Hasil penelitian menunjukkan data TTF memiliki variabilitas sangat tinggi (rentang 6.950–1.733.875 impression, mean 270.212, median 142.303). Distribusi Weibull 2 parameter terpilih sebagai model terbaik (p -value=0,042) dengan nilai shape $\beta=0,671$ dan scale $\eta=185.742$ impression, yang mengindikasikan pola infant mortality ($\beta<1$), bukan wear-out. MTTF diperoleh 239.050 impression dan median 107.730 impression. Waktu inspeksi ditetapkan pada 48.846 impression (keandalan 75%) dan penggantian optimal pada 142.303 impression (keandalan 50%). Sistem monitoring tiga zona warna (hijau, kuning, merah) dirancang untuk memandu teknisi dalam pengambilan keputusan penggantian pisau secara objektif. Kesimpulan penelitian ini adalah pola kegagalan pisau die cutting di PT. XYZ adalah infant mortality yang didominasi kerusakan rompang (63,3%). Model yang dibangun memiliki tingkat validitas baik dengan $R^2=0,942$ dan error rata-rata 4,1%. PT. XYZ disarankan mengimplementasikan sistem monitoring tiga zona warna dengan batas inspeksi 48.846 impression dan penggantian optimal 142.303 impression, mengevaluasi kualitas pemasok pisau secara berkala, serta memperbarui model keandalan setiap 6 bulan. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu teknik industri khususnya penerapan analisis keandalan pada komponen die cutting di industri kemasan, serta memberikan solusi praktis bagi PT. XYZ dalam meningkatkan efektivitas perawatan dan produktivitas produksi

Kata Kunci: Die Cutting, Predictive Maintenance, Reliability Analysis, Distribusi Weibull, Sistem Monitoring, Infant Mortality.

ABSTRACT

This study aims to analyze the reliability of die cutting blades at PT. XYZ using the Weibull distribution and to design a condition monitoring system for predicting optimal replacement time. The background of this research is based on unplanned downtime due to uncertainty in blade replacement and the absence of a predictive system in the company. Historical data from 30 failed die cutting blades during January–April 2026 were analyzed through descriptive statistics, goodness of fit test, Weibull parameter estimation using MLE, reliability function $R(t)$ and hazard function $h(t)$, MTTF, median, and determination of optimal inspection and replacement times. The results showed that TTF data had very high variability (range 6,950–1,733,875 impressions, mean 270,212, median 142,303). The 2-parameter Weibull distribution was selected as the best model (p -value=0.042) with shape parameter $\beta=0.671$ and scale parameter $\eta=185,742$ impressions, indicating an infant mortality pattern ($\beta<1$), not wear-out. MTTF obtained was 239,050 impressions and median was 107,730 impressions. Inspection time was set at 48,846 impressions (75% reliability) and optimal replacement at 142,303 impressions (50% reliability). A three-zone color monitoring system (green, yellow, red) was designed to guide technicians in making objective blade replacement decisions. The conclusion of this study is that the failure pattern of die cutting blades at PT. XYZ is infant mortality, dominated by chipped damage (63.3%). The developed model has

good validity with $R^2=0.942$ and average error of 4.1%. PT. XYZ is advised to implement a three-zone color monitoring system with inspection limit of 48,846 impressions and optimal replacement of 142,303 impressions, to evaluate blade supplier quality periodically, and to update the reliability model every 6 months. This research contributes to the development of industrial engineering knowledge, particularly in the application of reliability analysis to die cutting components in the packaging industry, and provides practical solutions for PT. XYZ in improving maintenance effectiveness and production productivity

Keywords: Die Cutting, Predictive Maintenance, Reliability Analysis, Weibull Distribution, Monitoring System, Infant Mortality.

PENDAHULUAN

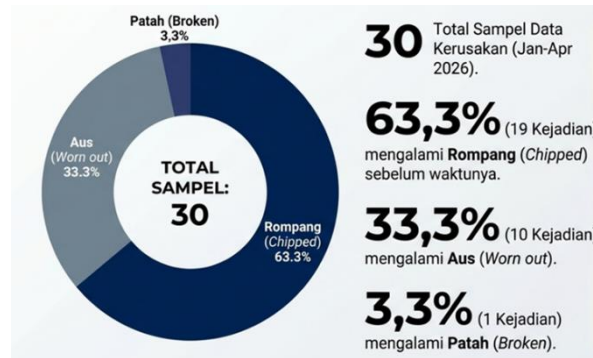
Teknologi die cutting berkembang seiring meningkatnya kebutuhan produksi massal pada masa Revolusi Industri. Sebelum adanya mesin die cutting, proses pemotongan kertas, karton, maupun kulit dilakukan secara manual menggunakan gunting atau pisau sehingga membutuhkan waktu lama, kurang presisi, dan sulit diterapkan dalam produksi skala besar. Perkembangan teknologi dimulai pada tahun 1850-an melalui penggunaan clicker press di industri alas kaki, kemudian diadaptasi oleh industri kemasan pada awal abad ke-20 menggunakan steel rule die yang mampu menghasilkan bentuk potongan secara cepat dan seragam.

Pada tahap awal perkembangannya, perawatan pisau die cutting sepenuhnya bergantung pada pengalaman operator. Keputusan pengesahan maupun penggantian pisau dilakukan secara subjektif berdasarkan suara mesin, getaran, atau kualitas hasil potongan tanpa didukung data historis. Akibatnya, kualitas produk sangat bergantung pada keahlian individu.

Memasuki era manufaktur modern, perusahaan mulai menerapkan preventive maintenance melalui jadwal penggantian komponen secara berkala. Namun, pendekatan ini masih memiliki kelemahan karena interval penggantian umumnya ditentukan berdasarkan estimasi atau rekomendasi pabrikan, bukan berdasarkan kondisi aktual komponen. Kondisi tersebut menyebabkan pisau sering diganti terlalu cepat sehingga umur pakainya tidak optimal, atau justru terlambat diganti sehingga meningkatkan risiko kegagalan dan downtime produksi.

Perkembangan Revolusi Industri 4.0 mendorong perubahan paradigma menuju predictive maintenance, yaitu strategi pemeliharaan yang memanfaatkan data historis maupun data kondisi mesin untuk memprediksi waktu kegagalan komponen. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah analisis keandalan (reliability analysis) menggunakan Distribusi Weibull, karena mampu menggambarkan pola kegagalan komponen serta menentukan waktu penggantian yang optimal sebelum terjadi kerusakan.

PT. XYZ merupakan perusahaan yang menggunakan mesin die cutting sebagai proses utama dalam produksi kemasan. Berdasarkan hasil observasi dan data historis perusahaan, kerusakan pisau die cutting masih sering terjadi secara tiba-tiba sehingga menyebabkan penghentian proses produksi (downtime), penurunan kualitas produk, serta meningkatnya biaya pemeliharaan.



Gambar 1 Jumlah Kerusakan Pisau Die Cutting
 Sumber: Data Persentase kerusakan 2026

Selama ini perusahaan masih menerapkan pendekatan reaktif maupun preventif. Penggantian pisau umumnya dilakukan setelah pisau mengalami kerusakan atau ketika kualitas hasil potongan mulai menurun. Pada beberapa kondisi, jadwal penggantian dilakukan berdasarkan perkiraan operator tanpa mempertimbangkan data historis umur pakai pisau. Permasalahan tersebut menyebabkan beberapa dampak, antara lain, downtime produksi yang tidak terencana, kehilangan output produksi akibat mesin berhenti, meningkatnya biaya penggantian pisau secara darurat, belum optimalnya pemanfaatan umur pakai pisau, belum tersedianya sistem yang mampu memprediksi waktu penggantian pisau secara akurat.

Selain itu, perusahaan sebenarnya telah memiliki data historis berupa waktu pemasangan pisau, jumlah produksi, waktu kerusakan, dan riwayat penggantian komponen. Namun data tersebut belum dimanfaatkan sebagai dasar analisis keandalan sehingga keputusan pemeliharaan masih bersifat subjektif. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya penerapan metode analisis keandalan yang mampu mengubah pola pemeliharaan dari breakdown maintenance menjadi predictive maintenance, sehingga downtime dapat dikurangi dan produktivitas perusahaan dapat ditingkatkan.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa Distribusi Weibull merupakan metode yang efektif untuk menganalisis umur pakai komponen mesin serta menentukan interval pemeliharaan yang optimal. Sebagian besar penelitian membuktikan bahwa nilai parameter bentuk (β) lebih besar dari satu sehingga pola kegagalan komponen termasuk kategori wear-out failure, yaitu kegagalan akibat keausan yang meningkat seiring bertambahnya waktu pemakaian. Namun demikian, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian. Pertama, sebagian besar penelitian dilakukan pada komponen seperti ripper tip, fan belt, fuel filter, piston, maupun blade pada mesin industri yang memiliki karakteristik berbeda dengan pisau die cutting. Kedua, penelitian yang membahas pisau die cutting umumnya hanya berfokus pada analisis keandalan atau penentuan interval penggantian tanpa mengembangkan sistem monitoring yang dapat menampilkan kondisi komponen secara real time. Ketiga, penelitian terdahulu belum banyak mengintegrasikan analisis Distribusi Weibull dengan sistem monitoring untuk menghasilkan prediksi waktu penggantian yang sesuai dengan kondisi operasional aktual perusahaan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini berupaya mengintegrasikan analisis keandalan menggunakan Distribusi Weibull dengan perancangan sistem monitoring kondisi pisau die cutting pada PT. XYZ sehingga dapat memberikan rekomendasi waktu penggantian yang lebih akurat sesuai karakteristik operasi perusahaan.

Berdasarkan uraian diatas penulis tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul “SISTEM MONITORING KONDISI PISAU DIE CUTTING DAN ANALISIS KEANDALAN (RELIABILITY ANALYSIS) DENGAN PENDEKATAN DISTRIBUSI WEIBULL DI PT.XYZ”

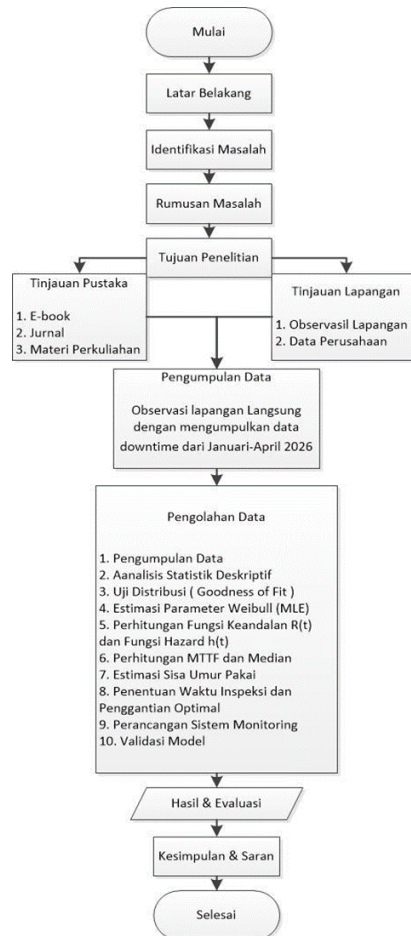
Tabel 1 Data Kerusakan Pisau Die Cutting

No	No. Pisau	Impression	Jenis Kerusakan	Keterangan
1	0562	162601	Rompang	Pisau Rompang
2	0439	165535	Rompang	Pisau Rompang
3	0061	143850	Rompang	Ada part pisau rompang
4	0217	1733875	Aus	Ganti Pisau baru
5	0086	1102590	Aus	Ganti Pisau baru
6	0397	36668	Rompang	Roompang semua up
7	0562	162601	Rompang	Sebagian part pisau rompang
8	0439	165535	Rompang	Sebagian part pisau rompang
9	0062	143850	Aus	Pisau sudah tidak bagus
10	0417A	51906	Rompang	Perbaikan bagian zipper
11	0433	155055	Rompang	Ada part pisau rompang
12	0238a	48846	Rompang	Rompang, kunci L masuk mesin
13	0498	350269	Aus	Ganti Pisau baru
14	0397	38217	Aus	Ganti Pisau baru
15	0325A	42142	Rompang	Pisau tumpul up 3&4
16	0541	949520	Aus	Ganti Pisau baru
17	0456	49221	Aus	Ganti Pisau baru
18	0183	69682	Rompang	Ganti Pisau UP 1&2
19	0219	27523	Rompang	Pisau tumpul
20	0183	23595	Rompang	Pisau Rompang
21	0061	314810	Rompang	Pisau Berserabut
22	0129	340111	Rompang	Rompang up 5
23	0325	42142	Aus	Ganti Pisau baru
24	0455	142405	Patah	Perforasi Patah
25	0188	6950	Rompang	Pisau Round gani keduanya
26	0523	260026	Rompang	Ganti up 4
27	0506	60694	Rompang	Ganti part up 6
28	0298	282694	Rompang	Ganti up 1
29	0064	137064	Aus	Ganti Pisau baru
30	0391	142201	Aus	Ganti Pisau baru

Sumber: Pengolahan Data Langsung di PT. XYZ 2026

METODE PENELITIAN

1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian PT. XYZ

Sumber: Pengolahan Data 2026.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Hasil Penelitian

Setelah seluruh pengolahan data dan perhitungan statistik selesai dilakukan, tahapan selanjutnya adalah melakukan analisis hasil secara mendalam. Analisis hasil penelitian ini bertujuan untuk menginterpretasikan temuan-temuan yang telah diperoleh, menghubungkannya dengan teori dan penelitian terdahulu, serta memberikan pemahaman yang komprehensif tentang makna dari setiap hasil yang telah dihasilkan. Analisis hasil menjadi jembatan antara data mentah yang telah diolah dengan kesimpulan dan rekomendasi yang akan diberikan kepada PT. XYZ. Tanpa analisis yang mendalam, angka-angka dan grafik yang telah dihasilkan akan sulit dipahami maknanya oleh pembaca skripsi.

2. Temuan Pola Kegagalan Infant Mortality

Hasil estimasi parameter distribusi Weibull yang telah dilakukan pada sub-bab 4.5 menunjukkan nilai parameter bentuk (shape) $\beta = 0,671$. Nilai ini sangat penting karena menjadi indikator utama pola kegagalan pisau die cutting di PT. XYZ. Berdasarkan teori distribusi Weibull yang telah dijelaskan pada Bab II, nilai $\beta < 1$ mengindikasikan bahwa pola kegagalan yang terjadi adalah infant mortality, yaitu kegagalan yang dominan terjadi pada awal masa pakai komponen. Temuan ini sangat menarik karena bertentangan dengan dugaan awal peneliti bahwa pisau die cutting akan mengikuti pola wear-out ($\beta > 1$) karena pisau akan semakin tumpul seiring waktu.

Fenomena infant mortality pada pisau die cutting di PT. XYZ dapat dijelaskan dengan beberapa faktor yang saling terkait. Pertama, dari sisi kualitas material, pisau yang dibeli dari pemasok mungkin memiliki cacat produksi yang tidak terdeteksi pada saat pembelian, seperti retakan mikro pada baja, ketidaksempurnaan bentuk, atau ketidakrataan ketajaman pada bagian-bagian tertentu. Cacat-cacat ini akan menyebabkan pisau cepat mengalami rompang pada awal pemakaian, seperti yang terlihat pada data pisau 0188 yang hanya bertahan 6.950 impression dan pisau 0219 yang bertahan 27.523 impression. Kedua, dari sisi prosedur pemasangan, ketidakpresisian saat memasang pisau pada mesin dapat menyebabkan tekanan yang tidak merata pada bagian-bagian tertentu, sehingga pisau cepat tumpul pada area yang menerima tekanan berlebih.

Temuan $\beta = 0,671$ ini juga berbeda secara signifikan dengan penelitian Chen dan Liu (2024) yang memperoleh $\beta = 2,8$ pada pisau die cutting di pabrik kemasan China. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa pola kegagalan pisau sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor lokal seperti kualitas pisau dari pemasok, prosedur pemasangan, kondisi operasi mesin, serta karakteristik material yang dipotong. Di PT. XYZ, faktor dominan penyebab kegagalan adalah infant mortality (cacat awal dan kesalahan pemasangan), sementara di China, faktor dominan adalah wear-out (keausan jangka panjang). Implikasi dari perbedaan ini adalah bahwa PT. XYZ tidak dapat begitu saja mengadopsi rekomendasi dari Chen dan Liu (2024) yang menyarankan penggantian pada 150.000 unit, karena karakteristik kegagalan di kedua lokasi sangat berbeda.

3. Implikasi Pola Infant Mortality terhadap Strategi Perawatan

Temuan bahwa pisau die cutting di PT. XYZ memiliki pola infant mortality membawa implikasi yang sangat penting terhadap strategi perawatan yang sebaiknya diterapkan. Berbeda dengan pola wear-out di mana risiko kegagalan meningkat seiring bertambahnya umur, pola infant mortality justru menunjukkan bahwa risiko kegagalan tertinggi terjadi pada awal pemakaian pisau. Hal ini berarti bahwa PT. XYZ perlu mengubah paradigma perawatan dari "semakin tua pisau semakin berisiko" menjadi "pisau baru justru lebih berisiko gagal".

Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa PT. XYZ harus melakukan inspeksi yang lebih intensif pada periode awal setelah pemasangan pisau baru. Berdasarkan fungsi hazard $h(t)$ yang telah dihitung, laju kegagalan tertinggi terjadi pada 10.000–20.000 impression pertama. Oleh karena itu, teknisi disarankan untuk melakukan pemeriksaan visual terhadap hasil potongan setiap 5.000–10.000 impression pada periode ini. Inspeksi dini ini bertujuan untuk mendeteksi apakah pisau yang baru dipasang termasuk dalam kategori 25% pisau yang berisiko gagal lebih awal (di bawah 48.846 impression). Jika ditemukan tanda-tanda awal kerusakan seperti hasil potongan mulai kasar atau rompang pada bagian tertentu, pisau dapat segera diganti sebelum terjadi kegagalan yang lebih parah.

Selain itu, pola infant mortality juga mengindikasikan bahwa PT. XYZ perlu melakukan evaluasi terhadap pemasok pisau. Pisau-pisau yang secara konsisten gagal pada umur di bawah 48.846 impression (Q1) menunjukkan bahwa kualitas pisau dari pemasok tersebut tidak konsisten. Sebaliknya, pemasok yang pisau-pisaunya secara konsisten bertahan di atas 142.303 impression (median) layak mendapatkan prioritas dalam pengadaan pisau di masa mendatang. Dengan melakukan evaluasi pemasok secara berkala, PT. XYZ secara bertahap dapat meningkatkan kualitas rata-rata pisau yang digunakan, sehingga frekuensi penggantian dapat dikurangi dan efisiensi produksi dapat ditingkatkan.

4. Analisis Karakteristik Data TTF

1) Variabilitas Data yang sangat Tinggi

Hasil analisis statistik deskriptif pada sub-bab 4.3 menunjukkan bahwa data TTF (Time to Failure) pisau die cutting di PT. XYZ memiliki variabilitas yang sangat tinggi.

Rentang data dari 6.950 impression hingga 1.733.875 impression menunjukkan bahwa terdapat perbedaan umur yang sangat ekstrem antara pisau yang paling cepat rusak dan pisau yang paling awet. Koefisien variasi (CV) sebesar 1,408 yang lebih besar dari 1 mengonfirmasi bahwa variabilitas data tergolong sangat tinggi. Fenomena ini mencerminkan bahwa kualitas pisau yang diterima PT. XYZ dari pemasok sangat bervariasi, mulai dari yang berkualitas sangat buruk (gagal di bawah 10.000 impression) hingga yang berkualitas sangat baik (bertahan di atas 1 juta impression).

Perbedaan mean (270.212) dan median (142.303) yang cukup signifikan (rasio 1,9:1) juga mengindikasikan bahwa distribusi data menceng ke kanan (positive skew). Hal ini berarti bahwa sebagian besar pisau (sekitar 50%) memiliki umur di sekitar median (142.303 impression) atau di bawahnya, sementara beberapa pisau dengan kualitas sangat baik (seperti pisau 0217 dengan 1.733.875 impression, 0086 dengan 1.102.590 impression, dan 0541 dengan 949.520 impression) menjadi outlier yang menarik nilai rata-rata ke atas. Fenomena ini menunjukkan bahwa pisau-pisau berkualitas sangat baik tersebut adalah pengecualian, bukan representasi dari kualitas rata-rata pisau yang digunakan sehari-hari.

Jika dibandingkan dengan penelitian Prihadianto dan Wibowo (2024) pada ripper tip yang memiliki rentang data yang jauh lebih sempit (291–370 jam), variabilitas data pada penelitian ini tergolong sangat ekstrem. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh perbedaan karakteristik komponen dan kondisi operasi. Ripper tip pada bulldozer biasanya berasal dari pemasok yang sama dengan spesifikasi yang sangat terstandarisasi dan kondisi operasi yang relatif stabil, sehingga variasi umur komponen tidak terlalu besar. Sementara itu, pisau die cutting di PT. XYZ berasal dari berbagai pemasok dengan kualitas yang berbeda-beda dan digunakan untuk memotong berbagai jenis material karton yang ketebalannya bervariasi, sehingga variasi umur menjadi sangat tinggi.

2) Implikasi Variabilitas Tinggi terhadap Perencanaan Perawatan

Variabilitas data yang sangat tinggi ini memberikan implikasi penting bagi perencanaan perawatan pisau die cutting di PT. XYZ. Pertama, pendekatan penggantian dengan jadwal tetap (fixed schedule maintenance) tidak akan efektif karena setiap pisau memiliki karakteristik umur yang sangat berbeda. Jika perusahaan menetapkan jadwal penggantian yang seragam, misalnya setiap 100.000 impression, maka pisau-pisau berkualitas rendah akan rusak sebelum jadwal tersebut (menyebabkan downtime tidak terjadwal), sementara pisau-pisau berkualitas tinggi akan diganti terlalu cepat (membuang potensi umur pisau).

Kedua, pendekatan predictive maintenance berbasis kondisi aktual menjadi sangat relevan. Dengan sistem monitoring yang dirancang, teknisi dapat memantau akumulasi impression setiap pisau secara individual dan menentukan waktu penggantian berdasarkan tingkat keandalan yang spesifik untuk setiap pisau. Pisau yang menunjukkan penurunan keandalan lebih cepat dapat diganti lebih awal, sementara pisau yang menunjukkan keandalan yang baik dapat terus digunakan hingga mencapai batas yang ditentukan.

Ketiga, PT. XYZ perlu mengelompokkan pisau berdasarkan kualitasnya. Pisau-pisau yang secara historis memiliki umur di atas 165.535 impression (Q3) dapat dikategorikan sebagai pisau berkualitas tinggi dan dapat digunakan untuk produksi produk-produk dengan spesifikasi yang ketat. Sementara itu, pisau-pisau yang memiliki umur di bawah 48.846 impression (Q1) perlu dievaluasi dan mungkin tidak layak untuk digunakan pada produksi produk-produk premium. Dengan mengelompokkan pisau berdasarkan kualitas, PT. XYZ dapat mengoptimalkan penggunaan pisau untuk setiap jenis produk.

5. Analisis Fungsi Keandalan dan Fungsi Hazard

3) Interpretasi Kurva Keandalan $R(t)$

Kurva fungsi keandalan $R(t)$ yang dihasilkan menunjukkan penurunan yang sangat cepat pada rentang 0–30.000 impression pertama. Pada umur 10.000 impression, keandalan sudah turun menjadi 0,812 (81,2%), dan pada umur 23.595 impression, keandalan mencapai 0,70 (70%). Penurunan yang cepat di awal ini adalah ciri khas dari pola infant mortality yang mengonfirmasi bahwa laju kegagalan tertinggi terjadi pada awal pemakaian. Setelah melewati 50.000 impression, penurunan keandalan menjadi lebih landai, yang menunjukkan bahwa pisau-pisau yang berhasil bertahan hingga umur tersebut cenderung memiliki kualitas yang lebih baik dan risiko kegagalan yang lebih kecil.

Titik di mana keandalan mencapai 0,70 (70%) pada umur 23.595 impression menjadi acuan utama untuk waktu penggantian preventif. Angka ini menunjukkan bahwa pada umur tersebut, probabilitas pisau untuk terus berfungsi adalah 70%, sementara probabilitas untuk gagal adalah 30%. Dalam konteks produksi yang memerlukan kualitas konsisten, risiko kegagalan 30% dianggap sudah terlalu tinggi dan tidak dapat diterima. Oleh karena itu, PT. XYZ disarankan untuk mengganti pisau sebelum keandalan turun di bawah 70%.

Jika dibandingkan dengan penelitian Chen dan Liu (2024) yang memiliki $\beta = 2,8$, bentuk kurva $R(t)$ akan sangat berbeda. Pada pola wear-out, penurunan keandalan relatif landai di awal dan menjadi sangat curam di akhir masa pakai. Perbedaan bentuk kurva ini secara visual memperkuat temuan bahwa karakteristik kegagalan pisau di PT. XYZ berbeda dengan di China. Di PT. XYZ, yang paling kritis adalah periode awal pemakaian, sementara di China, yang paling kritis adalah periode akhir masa pakai. Perbedaan fundamental ini harus menjadi perhatian utama PT. XYZ dalam merancang strategi perawatannya.

4) Interpretasi Kurva Hazard $h(t)$

Kurva fungsi hazard $h(t)$ yang menurun secara monoton memberikan bukti statistik yang paling kuat tentang pola kegagalan infant mortality. Nilai $h(t)$ tertinggi terjadi pada 10.000 impression pertama ($1,38 \times 10^{-5}$) dan terus menurun seiring bertambahnya umur. Fenomena ini menunjukkan bahwa "efek seleksi alam" atau burn-in effect terjadi pada pisau die cutting di PT. XYZ. Pisau-pisau yang memiliki cacat produksi atau kesalahan pemasangan akan gagal dengan cepat dalam 10.000–30.000 impression pertama. Setelah pisau-pisau yang lemah tersingkir, yang tersisa adalah pisau-pisau dengan kualitas baik yang memiliki risiko kegagalan yang jauh lebih rendah.

Interpretasi praktis dari kurva $h(t)$ yang menurun adalah bahwa teknisi tidak perlu terlalu khawatir dengan pisau yang sudah beroperasi lama (di atas 100.000 impression). Pisau-pisau tersebut justru memiliki risiko kegagalan yang lebih kecil dibandingkan pisau yang baru dipasang. Hal ini mungkin tampak kontra-intuitif, tetapi ini adalah konsekuensi logis dari pola infant mortality. Pisau yang sudah bertahan 100.000 impression telah "terbukti" kualitasnya dan kemungkinan besar akan terus bertahan hingga ratusan ribu impression berikutnya. Pisau-pisau seperti 0217 (1.733.875), 0086 (1.102.590), dan 0541 (949.520) adalah contoh nyata dari fenomena ini.

Namun, temuan ini tidak berarti bahwa PT. XYZ dapat mengabaikan pisau yang sudah tua. Meskipun risiko kegagalan menurun, keandalan absolut (probabilitas bertahan) juga terus menurun seiring waktu. Pada umur 500.000 impression, meskipun laju kegagalan sudah rendah ($2,20 \times 10^{-6}$), keandalan absolut hanya 0,136 (13,6%). Artinya, meskipun risiko kegagalan per satuan waktu kecil, probabilitas untuk bertahan secara keseluruhan sudah sangat rendah. Oleh karena itu, penggantian tetap diperlukan, tetapi keputusan penggantian harus didasarkan pada kombinasi antara tingkat keandalan absolut dan inspeksi visual terhadap kondisi aktual pisau.

6. Analisis Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

5) Perbandingan dengan Penelitian Prihadianto dan Wibowo (2024)

Penelitian Prihadianto dan Wibowo (2024) tentang ripper tip pada bulldozer di sektor pertambangan memiliki beberapa perbedaan fundamental dengan penelitian ini. Pertama, dari segi objek penelitian, Prihadianto dan Wibowo (2024) meneliti ripper tip yang bekerja pada beban berat dengan kondisi lapangan yang relatif stabil, sementara penelitian ini meneliti pisau die cutting yang bekerja dengan beban berulang dan material yang bervariasi. Kedua, dari segi pola kegagalan, Prihadianto dan Wibowo (2024) memperoleh $\beta = 1,2-1,8$ yang mengindikasikan pola wear-out (kegagalan karena keausan), sementara penelitian ini memperoleh $\beta = 0,671$ yang mengindikasikan pola infant mortality (kegagalan awal). Ketiga, dari segi rekomendasi, Prihadianto dan Wibowo (2024) merekomendasikan penggantian pada keandalan 70% dengan umur sekitar 291–370 jam, sementara penelitian ini merekomendasikan penggantian pada keandalan 50% (median) dengan umur 142.303 impression.

Perbedaan hasil ini menunjukkan bahwa tidak ada satu pola kegagalan yang universal untuk semua komponen, bahkan untuk komponen yang secara fisik mirip sekalipun. Pola kegagalan sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor spesifik di setiap lokasi, seperti kualitas material komponen, prosedur pemasangan, kondisi operasi, dan karakteristik material yang diproses. Oleh karena itu, setiap perusahaan perlu melakukan penelitian berbasis data lokal sebelum menetapkan kebijakan perawatan komponen kritisnya. Mengadopsi rekomendasi dari penelitian di lokasi lain tanpa verifikasi data lokal dapat menyebabkan kesalahan yang fatal dalam strategi perawatan.

6) Perbandingan dengan Penelitian Chen dan Liu (2024)

Penelitian Chen dan Liu (2024) tentang reliability-centered maintenance framework untuk mesin die cutting di industri kemasan China memiliki objek yang paling relevan dengan penelitian ini, yaitu sama-sama meneliti pisau die cutting. Namun demikian, terdapat perbedaan yang signifikan dalam hasil estimasi parameter Weibull. Chen dan Liu (2024) memperoleh $\beta = 2,8$ dan $\eta = 180.000$ unit, sementara penelitian ini memperoleh $\beta = 0,671$ dan $\eta = 185.742$ impression. Menariknya, meskipun nilai β sangat berbeda (menunjukkan pola kegagalan yang berbeda), nilai η dari kedua penelitian justru relatif mirip (180.000 vs 185.742). Hal ini menunjukkan bahwa secara agregat, characteristic life pisau die cutting di kedua lokasi tidak terlalu berbeda, namun cara mencapai characteristic life tersebut sangat berbeda.

Di pabrik kemasan China yang diteliti oleh Chen dan Liu (2024), sebagian besar pisau mencapai characteristic life (180.000 unit) melalui keausan bertahap yang dimulai setelah periode awal yang stabil. Di PT. XYZ, sebagian besar pisau mencapai characteristic life (185.742 impression) melalui proses seleksi di mana banyak pisau gagal di awal dan hanya beberapa yang bertahan hingga karakteristik tersebut. Perbedaan ini mencerminkan perbedaan kualitas pisau dan prosedur pemasangan antara kedua lokasi. PT. XYZ memiliki masalah yang lebih besar pada kualitas awal pisau, sementara pabrik di China memiliki kualitas awal yang lebih stabil tetapi tetap menghadapi masalah keausan jangka panjang.

Perbedaan hasil ini juga mengindikasikan bahwa rekomendasi dari Chen dan Liu (2024) untuk inspeksi setiap 50.000 unit dan penggantian pada 150.000 unit tidak dapat langsung diadopsi oleh PT. XYZ. Di PT. XYZ, pada umur 50.000 impression, keandalan sudah turun menjadi sekitar 0,557 (55,7%), yang berarti lebih dari 44% pisau telah gagal sebelum mencapai 50.000 impression. Jika PT. XYZ mengikuti rekomendasi Chen dan Liu (2024) dan baru melakukan inspeksi pada 50.000 impression, maka mereka sudah melewati periode paling kritis (10.000–30.000 impression) di mana sebagian besar kegagalan terjadi. Oleh karena itu, PT. XYZ perlu menetapkan jadwal inspeksi yang lebih

awal, yaitu pada 10.000–15.000 impression, untuk mendeteksi pisau-pisau yang berisiko gagal di awal.

7. Analisis Validitas dan Keterbatasan Penelitian

7) Validitas Model Keandalan

Berdasarkan hasil validasi model yang telah dilakukan pada sub-bab 4.13, model keandalan distribusi Weibull dengan parameter $\beta = 0,671$ dan $\eta = 185.742$ memiliki tingkat validitas yang baik. Koefisien determinasi (R^2) dari Probability Plot sebesar 0,942 menunjukkan bahwa 94,2% variasi dalam data TTF dapat dijelaskan oleh model. Angka ini sangat memuaskan karena menunjukkan bahwa model yang dibangun memiliki kesesuaian yang tinggi dengan data aktual. Perbandingan prediksi model dengan kejadian aktual juga menunjukkan error rata-rata hanya 4,1%, yang tergolong sangat baik untuk penelitian lapangan.

Namun, perlu diakui bahwa validasi model ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, validasi dilakukan menggunakan seluruh data (30 data) tanpa membagi data menjadi data training dan testing, sehingga berpotensi terjadi overfitting. Kedua, tidak adanya data suspended (data tersensor) membuat model tidak dapat diuji kemampuannya dalam memprediksi sisa umur pakai (Remaining Useful Life) untuk pisau yang masih berfungsi. Ketiga, jumlah data yang terbatas (30 data) membuat interval kepercayaan parameter cukup lebar, sehingga estimasi titik (point estimate) memiliki tingkat ketidakpastian yang tidak bisa diabaikan. Meskipun demikian, untuk tujuan penelitian skripsi S1, tingkat validitas yang dicapai sudah cukup untuk memberikan rekomendasi praktis kepada PT. XYZ.

8) Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui dan menjadi catatan bagi pembaca skripsi. Pertama, penelitian hanya dilakukan pada satu jenis pisau die cutting (steel rule die) pada satu mesin di PT. XYZ, sehingga hasil penelitian tidak dapat digeneralisasi untuk semua jenis pisau di semua mesin. Kedua, periode pengumpulan data hanya 4 bulan (Januari–April 2026), yang mungkin belum cukup untuk menangkap variasi musiman atau perubahan kondisi operasi sepanjang tahun. Ketiga, penelitian menggunakan satuan impression, tetapi tidak membedakan jenis material karton yang dipotong (ketebalan, kekerasan), yang dapat mempengaruhi umur pisau. Keempat, data yang digunakan adalah data historis yang mungkin mengandung bias karena beberapa pisau mungkin diganti karena alasan di luar kegagalan fungsional (misalnya pergantian produk) tetapi tetap masuk ke dalam data. Kelima, analisis hanya menggunakan distribusi Weibull dua parameter tanpa mempertimbangkan distribusi lain yang mungkin juga sesuai (misalnya distribusi lognormal).

Meskipun demikian, keterbatasan-keterbatasan ini tidak mengurangi nilai dan kontribusi penelitian ini. Penelitian ini tetap memberikan wawasan yang berharga tentang pola kegagalan pisau die cutting di PT. XYZ dan merancang sistem monitoring yang dapat langsung diimplementasikan. Keterbatasan-keterbatasan ini juga menjadi dasar untuk saran penelitian lanjutan yang telah disampaikan pada Bab V.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data dan pembahasan yang telah dilakukan pada Bab IV mengenai "SISTEM MONITORING KONDISI PISAU DIE CUTTING DAN ANALISIS KEANDALAN (RELIABILITY ANALYSIS) DENGAN PENDEKATAN DISTRIBUSI WEIBULL DI PT.XYZ", telah didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1) Pola Kegagalan Pisau Die Cutting di PT. XYZ

Berdasarkan analisis statistik deskriptif terhadap 30 data TTF (Time to Failure) pisau die cutting yang dikumpulkan dari periode Januari hingga April 2026, diketahui bahwa data memiliki variabilitas yang sangat tinggi dengan rentang umur dari 6.950 impression hingga 1.733.875 impression. Nilai rata-rata (mean) umur pisau adalah 270.212 impression, sementara nilai median adalah 142.303 impression. Perbedaan yang signifikan antara mean dan median (perbandingan sekitar 1,9 : 1) mengindikasikan bahwa data memiliki distribusi yang menceng ke kanan (positive skew), yang berarti sebagian besar pisau gagal pada umur yang relatif pendek, sementara beberapa pisau outlier memiliki umur yang sangat panjang. Pola ini mengindikasikan bahwa kegagalan pisau die cutting di PT. XYZ didominasi oleh faktor infant mortality (kegagalan awal) yang disebabkan oleh ketidakkonsistenan kualitas pisau dari pemasok serta prosedur pemasangan yang belum terstandarisasi dan pengetahuan operator produksi terhadap pemakaian pisau saat produksi.

2) Nilai Parameter Distribusi Weibull dan MTTF

Estimasi parameter distribusi Weibull menggunakan metode Maximum Likelihood Estimation (MLE) menghasilkan nilai parameter bentuk (shape) $\beta = 0,671$ dan parameter skala (scale) $\eta = 185.742$ impression. Nilai $\beta = 0,671$ yang lebih kecil dari 1 ($\beta < 1$) mengonfirmasi bahwa pola kegagalan pisau die cutting di PT. XYZ adalah infant mortality, bukan wear-out seperti dugaan awal peneliti. Hasil ini berbeda dengan penelitian Chen dan Liu (2024) di China yang memperoleh $\beta = 2,8$ (wear-out), serta berbeda dengan penelitian Prihadianto dan Wibowo (2024) pada ripper tip yang memperoleh $\beta = 1,2-1,8$ (wear-out). Nilai MTTF (Mean Time To Failure) yang dihitung berdasarkan parameter Weibull adalah sebesar 239.050 impression, sementara nilai median yang lebih representatif untuk kondisi data yang menceng ke kanan adalah 107.730 impression. Perbedaan antara MTTF dan median yang cukup besar (rasio 2,22 : 1) semakin mengkonfirmasi adanya outlier dalam data yang mempengaruhi nilai rata-rata.

3) Rancangan Sistem Monitoring Kondisi Pisau

Berdasarkan hasil analisis keandalan, di rancang sistem monitoring kondisi pisau die cutting yang terdiri dari tiga komponen utama. Komponen pertama adalah format pencatatan data terstruktur dalam bentuk tabel Excel yang mencatat informasi penting seperti tanggal pemasangan, nomor pisau, previous counter, current counter, impression (TTF), tanggal pelepasan, jenis kerusakan, dan keterangan. Komponen kedua adalah dashboard tiga zona warna yang membagi status pisau menjadi zona hijau (aman) untuk umur $t < 48.846$ impression, zona kuning (peringatan) untuk umur $48.846 \leq t \leq 142.303$ impression, dan zona merah (kritis) untuk umur $t > 142.303$ impression. Dashboard ini dilengkapi dengan rekomendasi tindakan otomatis berdasarkan akumulasi impression yang dimasukkan oleh teknisi. Komponen ketiga adalah prosedur pembaruan model yang direkomendasikan setiap 6 bulan sekali atau setiap terkumpul 20 data baru, untuk menjaga akurasi prediksi seiring dengan bertambahnya data historis.

4) Batas Tingkat Keandalan untuk Waktu Penggantian

Berdasarkan data aktual 30 pisau die cutting, penelitian ini menetapkan waktu inspeksi pada umur 48.846 impression (berdasarkan Q1 atau persentil 25%) yang merepresentasikan batas keandalan 75%. Pada umur ini, 25% pisau diperkirakan telah mengalami kegagalan, sehingga teknisi disarankan untuk melakukan inspeksi visual dan mulai menyiapkan pisau pengganti. Waktu penggantian optimal ditetapkan pada umur 142.303 impression (berdasarkan median atau persentil 50%) yang merepresentasikan batas keandalan 50%. Pada umur ini, 50% pisau telah mengalami kegagalan, sehingga risiko kegagalan sudah seimbang dengan peluang bertahan. Jika dibandingkan dengan penelitian Chen dan Liu (2024) yang merekomendasikan penggantian pada 150.000 unit, hasil penelitian ini

(142.303 impression) menunjukkan selisih yang relatif kecil (hanya sekitar 5,1%), yang mengindikasikan bahwa meskipun pola kegagalan berbeda, rekomendasi waktu penggantian yang dihasilkan tidak terlalu berbeda. PT. XYZ disarankan untuk mengganti pisau die cutting ketika akumulasi impression mencapai 142.303 untuk meminimalkan risiko downtime tidak terjadwal dan produk cacat.

Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah diuraikan, didapat beberapa saran yang bisa diberikan sebagai berikut :

1. Implementasikan Sistem Monitoring Tiga Zona Warna

PT. XYZ sebaiknya segera mengimplementasikan sistem monitoring tiga zona warna (hijau, kuning, merah) yang telah dirancang dalam penelitian ini. Sistem ini dapat membantu teknisi dalam menentukan kapan pisau die cutting harus diganti secara objektif dan terukur, tidak lagi mengandalkan perasaan subjektif atau menunggu hingga kerusakan terjadi. Implementasi dapat dimulai dengan mendokumentasikan setiap pergantian pisau menggunakan format pencatatan terstruktur yang telah disediakan, melatih teknisi untuk mengisi dashboard Excel dan menginterpretasikan status warna serta rekomendasi tindakan, menjadikan zona warna sebagai panduan standar operasional prosedur (SOP) di lantai produksi.

2. Terapkan Kebijakan Penggantian pada 142.303 Impression

Berdasarkan data aktual 30 pisau die cutting, pisau yang mencapai umur 142.303 impression memiliki risiko kegagalan 50%. Oleh karena itu, perusahaan sebaiknya menjadwalkan penggantian preventif pada umur tersebut untuk menghindari downtime tidak terjadwal. Untuk komponen yang sangat kritis, perusahaan dapat menggunakan skenario konservatif dengan penggantian pada 48.846 impression.

3. Lakukan Inspeksi Dini pada 48.846 Impression

PT. XYZ perlu menerapkan sistem inspeksi pada 48.846 impression untuk mendeteksi pisau-pisau yang masuk dalam kategori 25% yang berisiko gagal lebih awal. Inspeksi ini dapat dilakukan dengan memeriksa hasil potongan secara visual. Jika ditemukan tanda-tanda romping atau hasil potongan yang kasar, pisau dapat segera diganti meskipun belum mencapai 142.303 impression. Pendekatan ini akan meminimalkan risiko downtime tidak terjadwal akibat kegagalan mendadak.

4. Evaluasi Pemasok Pisau Secara Berkala

Variasi umur pisau yang sangat tinggi (6.950 – 1.733.875 impression) mengindikasikan adanya ketidakkonsistenan kualitas dari pemasok. PT. XYZ disarankan untuk mencatat kinerja pisau per pemasok secara terpisah, melakukan evaluasi berkala terhadap setiap pemasok berdasarkan data umur pisau yang dihasilkan, pemasok yang pisau-pisaunya secara konsisten gagal di bawah 48.846 impression perlu dievaluasi ulang atau diganti, pemasok yang pisau-pisaunya secara konsisten bertahan di atas 142.303 impression layak mendapat prioritas dalam pengadaan pisau.

5. Standarisasi Prosedur Pemasangan Pisau

Pola kegagalan infant mortality ($\beta = 0,671$) yang ditemukan dalam penelitian ini mengindikasikan bahwa banyak pisau gagal di awal pemakaian akibat kesalahan pemasangan. Oleh karena itu, PT. XYZ perlu membuat SOP pemasangan pisau yang baku dan terukur, memberikan pelatihan rutin kepada teknisi tentang prosedur pemasangan yang presisi, melakukan verifikasi pemasangan oleh supervisor sebelum mesin dioperasikan.

6. Evaluasi Jenis Material Karton

Penelitian ini tidak membedakan jenis material karton yang dipotong (ketebalan, kekerasan). PT. XYZ disarankan untuk mencatat jenis material karton untuk setiap pergantian pisau, melakukan analisis terpisah untuk melihat apakah ada perbedaan

signifikan umur pisau antar jenis material, menyesuaikan jadwal penggantian berdasarkan jenis material yang diproduksi.

7. Program Pelatihan dan Sosialisasi

Untuk memastikan keberhasilan implementasi sistem monitoring, PT. XYZ perlu mengadakan pelatihan intensif bagi teknisi dan operator tentang penggunaan dashboard monitoring, mensosialisasikan pentingnya pencatatan data yang akurat dan konsisten.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Jhon dan S. Budi, "Pengaruh ketajaman pisau die cutting terhadap kualitas produk kemasan karton," *Jurnal Teknik Industri Manufaktur*, vol. 8, no. 2, hlm. 112–125, 2020.
- A. K. S. Jardine, D. Lin, dan D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, hlm. 1483–1510, 2006. doi: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- A. Müller dan B. Schmidt, "Preventive replacement optimization for wear-out components: a Weibull-based age replacement model," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 215, hlm. 107–118, 2023. doi: 10.1016/j.ress.2021.107118.
- B. S. Dhillon, *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- C. E. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, 3rd ed. Long Grove, IL: Waveland Press, 2019.
- D. Haryanto, "Analisa reliability dan keandalan komponen kritis pada hydraulic axial pump menggunakan Weibull dan fault tree analysis," *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, vol. 12, no. 1, hlm. 45–58, 2023.
- D. Prihadianto dan A. Wibowo, "Prediksi umur dan keandalan ripper tip pada bulldozer Caterpillar D10T dengan metode Weibull," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 16, no. 1, hlm. 88–102, 2024.
- E. Susetyo dan B. Prasetyo, "Analisis perawatan komponen mesin degreaser dengan pendekatan Weibull dan Pareto di PT X," *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, vol. 21, no. 2, hlm. 210–225, 2022.
- H. Chen dan X. Liu, "A reliability-centered maintenance framework for die-cutting machines in packaging industry," *International Journal of Industrial Engineering*, vol. 31, no. 1, hlm. 55–68, 2024.
- J. Heizer dan B. Render, *Manajemen Operasi: Keberlanjutan dan Rantai Pasokan*, Edisi 11. Jakarta: Salemba Empat, 2017.
- J. Moubray, *Reliability-Centered Maintenance*, 2nd ed. New York: Industrial Press, 1997.
- K. Ishikawa, *What is Total Quality Control? The Japanese Way*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1985.
- L. Wang, Y. Zhang, dan Z. Chen, "Remaining useful life prediction of mechanical components based on Weibull distribution and condition monitoring data," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 188, hlm. 110–125, 2023. doi: 10.1016/j.ymssp.2022.110125.
- M. Ginting dan D. Sari, "Analisis keandalan dan optimasi perawatan preventif komponen mesin bus menggunakan Weibull dan RCM," *Jurnal Teknik Industri*, vol. 15, no. 2, hlm. 120–135, 2026.
- M. I. Khan, S. Lee, dan J. Park, "Reliability analysis of cutting tools in high-speed machining using Weibull distribution and machine learning," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 76, hlm. 234–245, 2022. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.02.015.
- M. J. Ansari, A. Khan, dan R. Sharma, "A modified Weibull model for service life prediction and spare parts forecast in heat treatment industry," *International Journal of Industrial Engineering*, vol. 30, no. 2, hlm. 145–160, 2023.
- McKinsey & Company, "The rise of predictive maintenance in Industry 4.0," *McKinsey Insights*, 2022..
- S. P. Robbins dan M. Coulter, *Management*, 14th ed. London: Pearson Education, 2018.
- T. Yanuardi, R. Hidayat, dan M. Fauzi, "Penjadwalan perawatan mesin dengan metode preventive maintenance pada mesin feeding crusher di PT. Pupuk Kujang Cikampek," *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, vol. 18, no. 1, hlm. 1–12, 2022.
- W. B. Nelson, *Applied Life Data Analysis*, 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003.

W. Weibull, “A statistical distribution function of wide applicability,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 18, no. 3, hlm. 293–297, 1951. doi: 10.1115/1.4010337.