

**REKOMENDASI PENJADWALAN PERAWATAN UNTUK  
MENGURANGI DOWNTIME PADA MESIN GLOSS CALENDAR II  
DENGAN METODE FMEA & MTBF**

**Nisa Isrofi<sup>1</sup>, Desita Nur Rachmaniar<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Teknik Logistik, Fakultas Teknologi Elektro dan Industri Cerdas, Institut Teknologi Telkom Surabaya  
Email: [nisa.isrofi@ittelkom-sby.ac.id](mailto:nisa.isrofi@ittelkom-sby.ac.id)<sup>1</sup>, [desitanurr@ittelkom-sby.ac.id](mailto:desitanurr@ittelkom-sby.ac.id)<sup>2</sup>

**ABSTRACT**

*PT ABC is a company that produces pulp and paper. The company works 24 hours and each machine is a continuous process. A reliable production system is important so that machines and other components can operate without being damaged during production. The problem is the damage that occurs at any time before the maintenance interval so it needs corrective maintenance. This research is limited to the gloss calendar II machine. To avoid corrective maintenance, optimal preventive maintenance actions are needed by determining maintenance intervals. This study aims to schedule preventive maintenance that minimizes downtime in the gloss calendar II using MTBF and FMEA. After analyzing the causes of failure, an assessment and ranking of each cause of failure are carried out according to the severity and frequency of occurrence. The methods used are Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) and Mean Time Between Failures (MTBF). FMEA is a structured analysis method to identify and analyze various failure modes that occur in components, while MTBF is a method to find maintenance intervals. The result of this paper is a proposal for an ideal preventive maintenance time interval to reduce downtime on a gloss calendar machine using the FMEA & MTBF method.*

**Keywords:** *FMEA, MTBF, pulp and paper industry, preventive maintenance*

**ABSTRAK**

*PT ABC merupakan perusahaan yang memproduksi pulp dan kertas. Perusahaan bekerja selama 24 jam dan tiap mesin saling berkesinambungan atau continuous process. Sistem produksi yang handal menjadi hal penting, sehingga mesin serta komponen lainnya dapat beroperasi tanpa mengalami kerusakan pada saat proses produksi berlangsung. Permasalahan yang sering dihadapi perusahaan adalah kerusakan yang terjadi sewaktu-waktu sebelum interval perawatan. Hal tersebut menyebabkan perlu dilakukannya corrective maintenance karena menyebabkan downtime. Paper ini dibatasi pada mesin gloss calendar II. Menghindari terjadinya corrective maintenance, maka diperlukan tindakan preventive maintenance yang optimal dengan menentukan interval perawatan. Paper ini bertujuan untuk membuat penjadwalan preventive maintenance agar meminimumkan downtime di mesin gloss calendar II dengan metode MTBF dan FMEA. Setelah dianalisis faktor penyebab kegagalan, dilakukan penilaian serta perenkingan pada setiap penyebab kegagalan berdasarkan tingkat keparahan dan frekuensi kejadiannya. Metode yang digunakan adalah Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) dan Mean Time Between Failure (MTBF). FMEA merupakan metode analisa terstruktur untuk mengidentifikasi dan menganalisis berbagai failure mode yang terjadi pada komponen, sedangkan MTBF merupakan metode untuk mencari interval perawatan. Hasil paper ini berupa usulan interval waktu preventive maintenance yang ideal untuk mengurangi downtime pada mesin gloss calendar menggunakan metode FMEA & MTBF.*

**Kata kunci:** *FMEA, MTBF, Industri pulp dan kertas, perawatan preventive*

**Pendahuluan**

Didorong oleh isu tentang *sustainability*, perusahaan secara global menghadapi tantangan untuk menciptakan manufaktur yang berkelanjutan [1]. PT. ABC adalah perusahaan yang memproduksi pulp dan kertas. Permintaan kertas yang cukup tinggi membuat perusahaan pulp dan kertas menjadi suatu industry dengan pertumbuhan yang menjanjikan [2]. Aktivitas manufaktur di perusahaan merupakan proses yang berkesinambungan atau berkelanjutan, sehingga dibutuhkan penunjang produksi yang handal. Sistem produksi yang handal memungkinkan mesin dan komponen lain bekerja tanpa mengalami kerusakan selama proses produksi berlangsung karena akan berdampak pada output produksi. Dalam proses manufaktur, mesin sangat penting karena *downtime* dapat menghambat bahkan menghentikan produksi [3]. Meskipun setiap peralatan dan

komponen memiliki masa pakai yang terbatas, perusahaan berupaya untuk memperpanjang masa pakainya dengan melakukan perawatan rutin. Perawatan merupakan serangkaian tindakan yang dilakukan untuk menjaga atau memperbaiki suatu objek (mesin) agar berfungsi dengan baik.

Pada era globalisasi saat ini, industri pulp dan kertas memiliki persaingan yang cukup tinggi [4], sehingga perusahaan harus mempertahankan daya saing mereka. Peningkatan keunggulan kompetitif jangka panjang perusahaan serta kemampuan untuk tumbuh secara berkelanjutan. Beberapa perusahaan di seluruh dunia, termasuk pabrik pulp dan kertas tempat penelitian dilakukan, mengalami masalah kerusakan mesin [5]. Masalah-masalah ini mengakibatkan biaya kualitas produk yang lebih tinggi, biaya perbaikan yang lebih tinggi, hilangnya peluang produksi, dan semua permasalahan tersebut menyebabkan biaya produksi yang lebih tinggi.

Ada beberapa teknologi yang digunakan dalam proses pembuatan kertas, yaitu *pulping* mekanik, kimia, dan biologi, dengan metode *pulping* kraft kimia yang paling dominan [6]. Pabrik pulp dan kertas, termasuk PT ABC, menggunakan proses yang berkesinambungan atau berkelanjutan. Karena pabrik beroperasi selama 24 jam penuh, kerusakan apa pun akan menyebabkan produksi terhenti dan mengakibatkan kerugian finansial bagi perusahaan. Selain menentukan penyebab kerusakan, menghidupkan mesin membutuhkan waktu yang cukup lama. Utilitas harus dapat diandalkan untuk dapat mengelola kegiatan perawatan dan pemeriksaan kondisi peralatan. Namun, pengembangan strategi untuk membuat keputusan yang tepat dalam meningkatkan keandalan peralatan dan sistem yang efektif (seperti anggaran pemeliharaan) merupakan tantangan [7]. Rekayasa keandalan adalah teknologi prediksi, kontrol, pengukuran, pelaporan dan analisis fenomena kegagalan dan tingkat kegagalan. Teknologi ini memberikan informasi tentang kemungkinan komponen atau sistem bekerja dengan sukses selama interval waktu tertentu [8].

Mesin kertas dibagi menjadi lima subsistem untuk analisis kegagalan. Data dianalisis untuk tren dan uji korelasi serial untuk memvalidasi inferensi dari distribusi independen dan identik dari informasi kegagalan dan perbaikan sebelum setiap sub sistem. Keandalan dan pemeliharaan mesin kertas telah dievaluasi pada berbagai waktu yang berguna untuk menetapkan jadwal pemeliharaan preventif untuk meningkatkan ketersediaan mesin kertas [9]. Kerusakan yang terjadi sebelum interval perawatan memerlukan perbaikan dan penggantian atau perawatan korektif karena akan menyebabkan *downtime*, kemacetan, atau penghentian proses produksi. Oleh karena itu, perlu didukung dengan kegiatan perawatan mesin yang teratur dan terencana. Mesin *gloss calendar* merupakan salah satu yang sering mengalami kerusakan di PT ABC. Hal ini dapat mengakibatkan kerusakan dan peningkatan biaya perawatan. Dampak lainnya yang sangat berpengaruh adalah turunnya tingkat kehandalan mesin. Untuk menghindari hal tersebut, diperlukan tindakan perawatan preventif yang optimal berdasarkan interval perawatan.

*Paper* ini berfokus pada proses pengambilan keputusan penggantian komponen sistem untuk mengurangi *downtime*. Aspek-aspek tersebut dapat dilihat dari berbagai perspektif, termasuk bahan baku, mesin, dan prosedur yang digunakan, serta staf perusahaan saat ini. Setelah memeriksa elemen-elemen yang berkontribusi terhadap kegagalan, langkah selanjutnya adalah mengevaluasi dan mengurutkan setiap penyebab kegagalan berdasarkan tingkat keparahan dan frekuensi kejadiannya. Dengan demikian, perusahaan dapat mencapai tindakan korektif yang efektif dan efisien. *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA) adalah alat yang dapat membantu aktivitas ini. FMEA adalah alat yang efektif untuk mengurangi atau mencegah kerusakan mesin. Metode ini mempertimbangkan potensi kegagalan, penyebab, dan efek kegagalan serta menunjukkan risiko dalam bentuk RPN (*Risk Priority Number*) yang ditentukan oleh *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). Setelah itu, mencari tindakan korektif atau preventif untuk mengatasi penyebab kegagalan tersebut, dan RPN akan dihitung ulang [10]. Aktivitas FMEA yang berhasil mampu untuk mengidentifikasi mode kegagalan potensial berdasarkan pengalaman masa lalu dengan produk atau proses serupa, sehingga memungkinkan untuk merancang kegagalan tersebut di luar sistem dengan upaya dan pengeluaran sumber daya yang minimal, sehingga mengurangi waktu dan biaya pengembangan [11]. FMEA adalah cara terstruktur untuk mengidentifikasi dan menganalisis berbagai jenis kegagalan (mode kegagalan) yang dapat terjadi pada komponen sistem. Modus kegagalan berupa tahapan untuk menemukan komponen yang sering mengalami kerusakan berupa cacat atau kondisi di luar batas spesifikasi yang ditentukan dan menganalisis dampak kritis terhadap komponen tersebut. Akibatnya, sumber utama kerusakan komponen dapat ditentukan. Sedangkan pendekatan MTBF (*Mean Time Between Failure*) digunakan untuk memperkirakan interval waktu perawatan yang optimal untuk membantu mengurangi waktu dan biaya perbaikan. Analisis perbaikan yang berkelanjutan, sistem produksi, dan desain sangat penting untuk analisis perbaikan berkelanjutan didalam perusahaan. MTBF digunakan untuk mengevaluasi kinerja dan metrik *throughput* secara analitis [12]. Keandalan sistem sangat penting karena terlibat dalam sebagian besar tahapan secara keseluruhan siklus hidup produk. Dengan demikian, studi tentang evaluasi keandalan sistem telah menarik lebih banyak lagi perhatian dalam beberapa dekade terakhir. Berdasarkan literatur yang ada, MTBF (*mean time between failures*) saat ini merupakan indeks yang paling sering digunakan untuk menunjukkan keandalan sistem [13]

Perawatan yang baik dapat dilihat melalui waktu henti yang minimal. Ini termasuk waktu henti terkait perawatan terjadwal dan tidak terjadwal. Tujuan perawatan preventif adalah untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dan menjadwalkan perawatan korektif sebelum kegagalan yang sebenarnya terjadi dengan menggunakan *Failure*

*Mode and Effect Analysis* (FMEA). Akan ada lebih sedikit waktu henti dan perawatan tidak terjadwal jika pemeliharaan preventif dilakukan dengan benar. Penting untuk mengukur kegagalan peralatan menggunakan FMEA untuk mengidentifikasi keandalan peralatan atau sistem. Metode ini berusaha untuk mengurangi perawatan korektif yang tidak perlu dengan berfokus hanya melakukan “pekerjaan yang tepat” pada “waktu yang tepat” [14] akan mengurangi kerusakan yang tidak direncanakan dan meningkatkan keandalan sistem manufaktur.

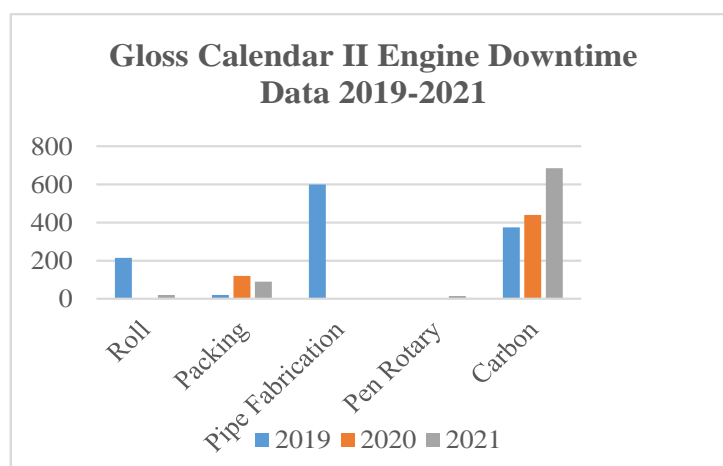
Studi lain sedang mengembangkan model untuk memilah limbah perawatan dengan menganalisis sumber limbah perawatan dan dampaknya. Metode yang digunakan adalah *waste priority number* (WPN) sebagai pengganti RPN pada FMEA. Kemudian menentukan kriteria yang digunakan untuk mempertimbangkan pemeliharaan dan tingkat kerusakan pada pemeliharaan yang telah dilakukan [15]. Metode FMEA digunakan untuk mengidentifikasi masalah-masalah krusial, kemudian perlu dibuat rekomendasi frekuensi perawatan untuk mengurangi perawatan korektif. Penelitian [12] memberikan rekomendasi perawatan preventif dengan menghitung estimasi MTBF dan MTTR. Estimasi yang andal digunakan untuk menunjukkan estimasi yang memiliki akurasi dan probabilitas yang diinginkan. Evaluasi dilakukan dari realisasi *up* dan *downtime* mesin yang dibutuhkan untuk mendapatkan estimasi MTBF dan MTTR.

Penelitian kehandalan menggunakan MTBF dilakukan pada industri pulp dan kertas di PT Riau untuk mengetahui pengaruh kehandalan perawatan yang terdiri dari perawatan preventif dan perawatan korektif terhadap MTBF [16]. Hasil uji regresi parsial yang dilakukan mengungkapkan bahwa variabel perawatan preventif dan korektif memiliki dampak yang cukup besar terhadap variabel MTBF. Sementara itu, uji regresi simultan menunjukkan bahwa semua faktor independen yang diuji memiliki pengaruh yang besar terhadap variabel MTBF. Selain menggunakan MTBF, beberapa penelitian melakukan analisis *preventive maintenance* menggunakan metode MTBF dan MTTR [17]. Mesin beroperasi secara terus menerus sehingga menyebabkan turunnya tingkat kehandalan peralatan dan menyebabkan seringnya terjadi kerusakan dan *downtime* yang tinggi pada mesin. Untuk meminimalisir terjadinya kerusakan dan *downtime* maka diperlukan sistem penjadwalan perawatan yang baik untuk mencegah terjadinya kerusakan mesin. *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) adalah metode yang digunakan sebagai acuan untuk menetapkan jadwal perawatan yang efektif. Oleh karena itu, diperlukan tindakan *preventive maintenance* untuk meningkatkan kinerja perusahaan.

Penelitian yang dilakukan [18] berfokus pada optimalisasi keandalan sistem manufaktur dan peralatan dengan menerapkan pemeliharaan berbasis kondisi (CBM) yang mempertimbangkan metode prediksi kesehatan peralatan menggunakan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk mengurangi tingkat keparahan kegagalan, frekuensi kegagalan, dan meningkatkan keandalan sistem. Strategi perawatan berbasis kondisi yang dioptimalkan dengan FMEA

### Metode Penelitian

Diagram pareto digunakan untuk mengetahui komponen-komponen penting yang terjadi di PT. ABC didasarkan pada kriteria lamanya waktu henti yang terjadi pada mesin *gloss calendar II* akibat kerusakan sistem operasi dan fungsi mesin.



**Gambar 1.** Downtime Mesin gloss calendar II

Berdasarkan Gambar 1, komponen *carbon* yang ada pada mesin *gloss calendar II* memiliki waktu henti paling lama yaitu 1500 menit. Untuk mengatasi masalah tersebut, pemeriksaan menyeluruh harus dilakukan untuk



**Hasil dan Pembahasan**

Pengoperasian mesin *gloss calendar* II yang tidak benar juga dapat mengakibatkan kerusakan pada komponen *carbon steam*. Penggunaan yang tidak tepat juga dapat memperpendek umur komponen di dalamnya. Selain itu, kebocoran juga dapat terjadi karena pemasangan *carbon steam* yang miring. Kerusakan yang terjadi pada komponen *carbon steam* bisa diakibatkan dari kerusakan komponen lain yang bekerja secara berkesinambungan dengan komponen *carbon steam*. Oleh karena itu, selain pelatihan, sebaiknya dilakukan pemeriksaan berkala terhadap pengoperasian operator mesin. Selanjutnya harus dikembalikan kepada masing-masing bagaimana menciptakan budaya sukses di seluruh sistem produksi dengan mengikutsertakan semua pihak yang terlibat dalam operasi pemeliharaan yang produktif. Kerusakan tidak terbatas pada tindakan pemeliharaan mesin atau peralatan manufaktur dengan memperbaharui masa pakai dan mencegah kegagalan/kerusakan mesin di semua kegiatan, tetapi juga tindakan pemeliharaan sistem peralatan oleh semua pihak agar dapat bekerja dengan baik.

**Tabel 1.** FMEA komponen *carbon steam*

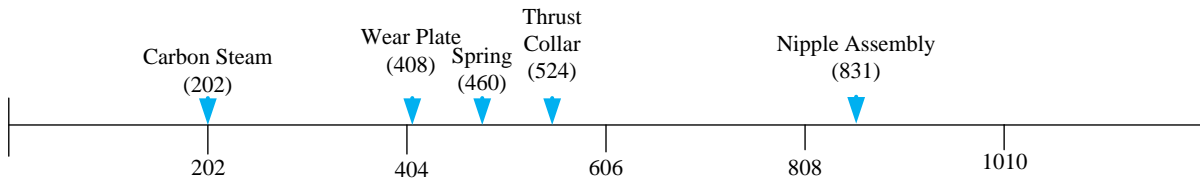
<i>Part</i>	<i>Function</i>	<i>Failure Mode</i>	<i>Failure causes</i>	<i>Failure Effect</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	<i>RPN</i>
1 <i>Carbon Steam</i>	1 Mencegah terjadinya kebocoran pada 2 sisi dimana 1 diam ( <i>steam</i> ) dan satu sisi bergerak roll	1 <i>Carbon Steam</i> pecah	1 Kualitas material yang kurang bagus	Kualitas kertas, kertas putus dan keamanan personil yang berpengaruh pada produksi (kelancaran produksi) atau <i>down time</i>	9	4	5	180
			2 <i>Lifetime</i>					
			3 Pemasangan miring					
			4 Pressure tekanan balik					
			5 Pertemuan besi dan carbon					
			6 Kesalahan operasional					
2 <i>Spring</i>	1 Merapatkan <i>carbon steam</i> untuk mencegah kebocoran	1 <i>Spring</i> rusak	1 Putus		7	2	7	98
			2 Lembek					
			3 Lifetime					
3 <i>Nipple Assembly</i>	1 Memberikan tekanan <i>carbon steam</i> agar tidak bocor	1 <i>Nipple assembly</i> rusak	1 Aus		7	2	7	98
			2 Kualitas material yang kurang bagus					
4 <i>Thrust Collar</i>	1 Titik singgung pada sisi miring <i>carbon steam</i> terhadap <i>carbon steam</i> untuk menjaga agar tidak bocor saat berputar	1 <i>Thrust collar</i> rusak	1 Aus		7	2	7	98
			2 Kualitas material yang kurang bagus					
5 <i>Wear Plate</i>	1 Titik singgung <i>carbon steam</i> terhadap <i>carbon steam</i> untuk menjaga agar tidak bocor saat berputar	1 <i>Wear Plate</i> rusak	1 Aus		7	2	7	98
			2 Kualitas material yang kurang bagus					

Berdasarkan tabel di atas, kerusakan *carbon steam* bisa diakibatkan dari kerusakan komponen lain yang bekesinambungan dengan kerja komponen *carbon steam*. Nilai RPN untuk masing-masing jenis kegagalan ini dapat dihitung ketika nilai tingkat keparahan, kejadian, dan deteksi telah ditentukan. Berdasarkan nilai RPN terbesar, tabel di bawah ini menunjukkan urutan mode kegagalan. Tindakan korektif merupakan prioritas untuk mode kegagalan dengan nilai RPN terbesar.

**Tabel 2.** RPN

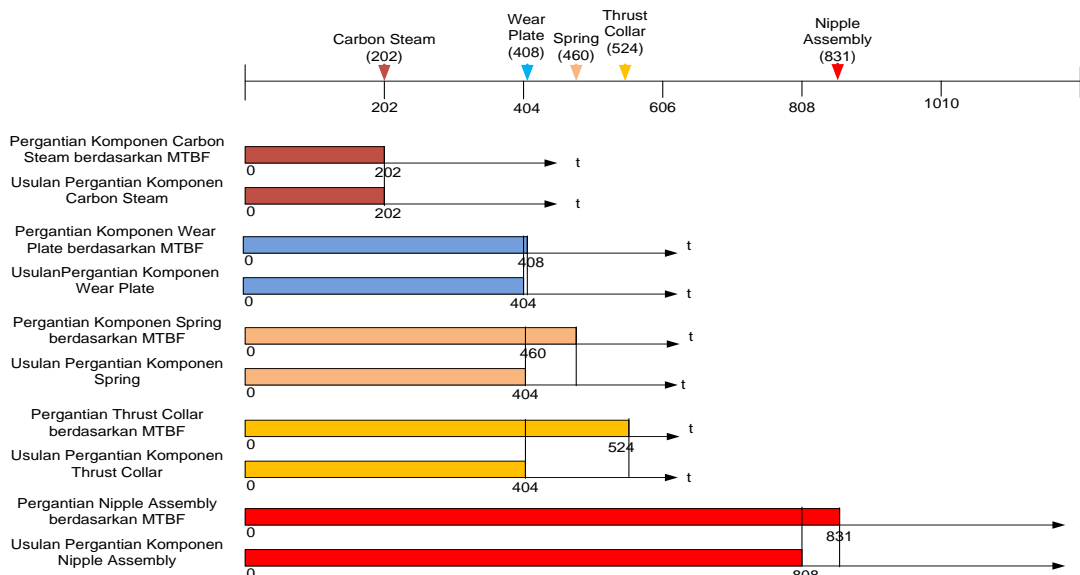
RANK	FAILURE MODE	RPN
1	<i>Carbon steam</i> pecah	180
2	<i>Spring</i> rusak	98
3	<i>Nipple assembly</i> rusak	98
4	<i>Thrust collar</i> rusak	98
5	<i>Wear plate</i> rusak	98

*Mean Time Between Failure* (MTBF) dari komponen *carbon steam*, *spring*, *thrust collar*, *nipple assembly*, dan *wear plate* dihitung dengan melihat jumlah penggantian yang terjadi baik secara periodik maupun akibat kerusakan dari tahun 2019 hingga 2021. Gambar 4 merupakan usulan rentang perbaikan berdasarkan perhitungan MTBF dari Tabel 2.



**Gambar 4.** Usulan rentang perbaikan berdasarkan perhitungan MTBF

Penjadwalan MTBF untuk sambungan putar dari mesin *gloss calender* II telah dijadwalkan seperti yang ditunjukkan pada gambar di atas. Komponen *carbon steam* memiliki jadwal tercepat yaitu 202 hari. Akibatnya, komponen sambungan putar lainnya (*spring*, *nipple assembly*, *thrust collar*, and *worn plate*) direncanakan akan diganti dalam kelipatan 202 hari. Hal ini dilakukan karena sambungan putar dapat dibongkar selama jeda produksi. Jadwal yang meminimalkan waktu henti mesin harus dirancang. Gambar 5 menunjukkan perbandingan interval penggantian komponen menggunakan teknik MTBF yang diusulkan dibandingkan dengan Gambar 4 yang menunjukkan penggantian tiap komponen.



**Gambar 5.** Perbandingan interval penggantian komponen dengan metode MTBF dengan usulan

Berdasarkan ilustrasi di atas, berikut adalah tabel jadwal penggantian komponen pada rotary joint. Tabel berikut digunakan untuk mempermudah melakukan perawatan preventif dan sekaligus mengurangi perawatan korektif.

**Tabel 3.** Jadwal pergantian komponen

Replacement interval (days)	Part replacement
202	<i>Carbon steam</i>
404	<i>Carbon steam, wear plate, spring, thrust collar</i>
606	<i>Carbon steam</i>
808	<i>Carbon steam, wear plate, spring, nipple assembly</i>
1010	<i>Carbon steam, thrust collar</i>
1212	<i>Carbon steam, wear plate, spring,</i>
1414	<i>Carbon steam, thrust collar</i>
1616	<i>Carbon steam, nipple assembly, wear plate</i>
1818	<i>Carbon steam, spring</i>
etc	

Analisis dilakukan berdasarkan urutan nilai RPN tertinggi. Berdasarkan hasil perhitungan nilai RPN, komponen *carbon steam* menempati nilai RPN tertinggi berdasarkan mode kegagalan. Komponen *carbon steam* mengalami kerusakan karena *lifetime* komponen, kualitas komponen yang buruk, pemasangan yang tidak tepat, dan kesalahan operasional. Saran perbaikan yang dapat diberikan untuk mengatasi masalah ini adalah:

- a. Kualitas bahan yang kurang bagus  
Perusahaan harus menentukan standar pembelian komponen *carbon steam* dan memeriksanya kembali saat barang tiba.
- b. *Lifetime* komponen *carbon steam*  
Pemeliharaan terencana diperlukan untuk memperpanjang umur *carbon steam*. Perawatan tetap harus dilakukan walaupun kondisi material masih bagus. Pertimbangan perawatan dengan melihat tahun pembuatan komponen dan kondisi komponen berapa lama (jam berjalan) telah digunakan dan berapa lama akan dipertahankan untuk beroperasi dengan membuat jadwal penggantian yang memberikan informasi kapan komponen perlu diganti. Perusahaan harus menyiapkan suku cadang sehingga, jika terjadi kerusakan dapat segera diperbaiki dan mencegah terganggunya operasional.
- c. Instalasi yang miring  
Pemasangan miring dapat diatasi dengan melakukan pelatihan dan penilaian untuk memastikan operator menguasai keterampilan tersebut dan mengikuti SOP. Tiga komponen penting harus dimasukkan dalam standar kerja: waktu siklus, urutan kerja, dan jumlah pekerjaan yang sedang berjalan. Standar tempat kerja harus dikembangkan agar dapat diikuti oleh semua orang. Lembar kerja umum biasanya dipasang di setiap stasiun kerja sehingga semua orang dapat mengikuti instruksinya. *Jig and fixture* juga dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan pemasangan miring.
- d. Kesalahan operasional  
Pedoman pengoperasian alat merupakan hal penting, serta peningkatan pengetahuan dan kesadaran akan gejala awal kerusakan. Operator akan mendapatkan pelatihan dasar-dasar mesin, pengoperasian alat, sistem keselamatan alat, dan perawatan dasar alat, serta penilaian untuk memastikan bahwa mereka telah menguasai kemampuan tersebut. Operator harus mengetahui pemeriksaan mesin yang harus dilakukan dan kriteria yang harus dipenuhi. Mereka juga harus secara akurat dapat menghidupkan dan mematikan mesin.
- e. Terjadinya tekanan balik  
*Backpressure* terjadi karena kesalahan operasional operator dalam menjalankan mesin *gloss calendar II*.

Rekomendasi lain yang dapat diberikan kepada perusahaan adalah lebih baik melakukan pengecekan terhadap karbon *carbon steam*, termasuk semua komponen yang ada di dalamnya daripada hanya melakukan perbaikan ketika telah terjadi masalah. Jika diperlukan untuk mengganti komponen *carbon steam* setelah memeriksa kondisinya, itu harus dilakukan sesegera mungkin. Perawatan yang dilakukan perusahaan saat ini berusaha untuk memastikan bahwa alat yang digunakan berfungsi dengan baik untuk menghindari kegagalan selama proses manufaktur. Membersihkan dan memeriksa adalah dua tugas penting.

### Simpulan

Rekomendasi yang dihasilkan diharapkan dapat mencegah kegagalan dan meningkatkan produktivitas dengan mengganti komponen sebelum rusak, meskipun biaya penggantian komponen akan lebih tinggi karena komponen yang rusak telah diganti terlebih dahulu. Rencana penggantian komponen potensial dapat dikembangkan berdasarkan analisis dengan komponen *carbon steam* diganti setiap 202 hari, komponen *worn plate, spring, and thrus collar* diganti setiap 404 hari, dan *nipple assembly* diganti setiap 808 hari. Perawatan mesin atau peralatan pabrik dengan memperpanjang umur pakai dan mencegah kegagalan/kerusakan mesin di semua kegiatan, serta memelihara sistem peralatan agar proses produksi dapat diselesaikan sesuai rencana.

Peralatan atau mesin yang jarang rusak tetapi biaya perawatannya signifikan dan inspeksi yang dilakukan terlalu sering akan mengurangi waktu perawatan dan perbaikan. Risiko kerusakan tinggi pada periode awal-pertengahan seolah-olah tidak memakan banyak biaya, tetapi setelah "perbaikan kerusakan", biaya akan terus meningkat, jauh melebihi apa yang harus diperbaiki atau dipertahankan, sehingga memerlukan penjadwalan untuk penggantian komponen juga sebagai keseluruhan efektivitas sistem produksi melalui partisipasi dan kegiatan pemeliharaan produktif.

Penelitian lebih lanjut dapat melihat MTTR sebagai kemungkinan pengganti MTBF dan strategi pemeliharaan preventif yang direkomendasikan. Selain itu, perusahaan mulai menggunakan Condition-Based Maintenance (CBM) sebagai hasil dari terobosan teknologi baru-baru ini. Akibatnya, untuk menerapkan CBM, diperlukan pemeriksaan menyeluruh terhadap seluruh perusahaan untuk menentukan mesin mana yang vital dan harus dipasang. Untuk semua mesin yang signifikan, metode yang dapat digunakan untuk pemilihannya adalah FMEA, dan dapat ditentukan alat mana yang digunakan untuk kasus yang sering terjadi.

### Daftar Pustaka

- [1] M. Garetti and M. Taisch, "Production Planning & Control : The Management of Operations Sustainable manufacturing : trends and research challenges," *Taylor Fr.*, no. June 2013, pp. 37–41, 2012.
- [2] S. Arita, D. Kristianti, and L. N. Komariah, "Effectiveness of biomass-based fly ash in pulp and paper liquid waste treatment," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 41, no. May, pp. 79–84, 2022, doi: 10.1016/j.sajce.2022.05.004.
- [3] F. Nurprihatin, M. Angely, and H. Tannady, "JARIE\_Volume 6\_Issue 3\_Pages 184-199," vol. 6, no. 3, pp. 184–199, 2019, doi: 10.22105/jarie.2019.199037.1104.
- [4] A. Toppinen, S. Pätäri, A. Tuppurä, and A. Jantunen, "The European pulp and paper industry in transition to a bio-economy: A Delphi study," *Futures*, vol. 88, pp. 1–14, 2017, doi: 10.1016/j.futures.2017.02.002.
- [5] Y. S. P. Chiu, K. K. Chen, and C. K. Ting, "Replenishment run time problem with machine breakdown and failure in rework," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 1, pp. 1291–1297, 2012, doi: 10.1016/j.eswa.2011.08.005.
- [6] K. F. Rullifank, M. E. Roefinal, M. Kostanti, L. Sartika, and Evelyn, "Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 845, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/845/1/012005.
- [7] H. Ge, "Maintenance optimization for substations with aging equipment," *Electr. Eng. Theses Diss.*, p. 7, 2010.
- [8] A. Shrivastava, "A Preliminary study on reliability engineering and its evaluation," no. January, pp. 3–6, 2013.
- [9] S. V. S. Rajaprasad, "Investigation of reliability, maintainability and availability of a paper machine in an integrated pulp and paper mill," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 43–56, 2018, doi: 10.4314/ijest.v10i3.5.
- [10] S. Wannawiset and S. Tangjitsitcharoen, "Paper Machine Breakdown Reduction by FMEA and Preventive Maintenance Improvement: A Case Study," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 530, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/530/1/012051.
- [11] K. D. Sharma and S. Srivastava, "Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Implementation: A Literature Review," *Copyp. J. Adv. Res. Aeronaut. Sp. Sci. J Adv Res Aero SpaceSci*, vol. 5, no. 2, pp. 2454–8669, 2018.
- [12] P. Alavian, Y. Eun, K. Liu, S. M. Meerkov, and L. Zhang, "The ( $\alpha$ ,  $\beta$ )-precise estimates of MTBF and MTTR: Definitions, calculations, and induced effect on machine efficiency evaluation," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 1004–1009, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.326.
- [13] P. Wang, J. Fan, and Z. Li, "Study on Mean Time between Failures Prediction Algorithms Based on Weibull Distribution," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 440, no. 2, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/440/2/022083.
- [14] G. Mukondeleli Kanakana, "An integrated systems approach to engineering education throughput improvement using Lean Six Sigma," no. November, 2012.
- [15] A. Sutrisno, I. Gunawan, and S. Tangkuman, "Modified Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Model for Accessing the Risk of Maintenance Waste," *Procedia Manuf.*, vol. 4, no. Iess, pp. 23–29, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.11.010.
- [16] I. N. Daulay, S. S. Nurutami, and D. D. Daniel, "Analisis Maintenance Reliability Terhadap Mtbef (Mean Time Between Failures) Fasilitas Pada Industri Pulp & Paper," *J. Ekon.*, vol. 21, no. 4, pp. 1–18, 2013.



- [17] N. F. Fatma, H. Ponda, and R. A. Kuswara, "Analisis Preventive Maintenance Dengan Metode Menghitung Mean Time Between Failure (Mtbf) Dan Mean Time To Repair (Mtr) (Studi Kasus Pt. Gajah Tunggal Tbk)," *Heuristic*, vol. 17, no. 2, pp. 87–94, 2020, doi: 10.30996/heuristic.v17i2.4648.
- [18] M. D. Ramere and O. T. Laseinde, "Optimization of condition-based maintenance strategy prediction for aging automotive industrial equipment using FMEA," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 180, pp. 229–238, 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.01.160.