

Improvement Proses Curing untuk Mengurangi Downtime Mesin dan Pemborosan Energi dalam Mendukung Transformasi Energi Rendah Emisi

Putra Darmawan^{1*}, Choesnul Jaqin²

^{1,2} Magister Teknik Industri, Universitas Mercu Buana, Jakarta

*Email korespondensi penulis: darmawanputra506@gmail.com

Abstrak

Proses *curing* pada industri manufaktur ban merupakan tahap kritis dengan konsumsi energi tinggi yang berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon dan biaya produksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi penyebab utama *downtime* mesin *curing* dan mengembangkan strategi perbaikan berbasis *Total Productive Maintenance* (TPM) dan *Root Cause Failure Analysis* (RCFA). Data dikumpulkan dari 240 unit mesin *curing* selama periode Januari–Juni 2025, mencakup durasi *downtime* dan konsumsi energi dalam kondisi *idle*. Hasil analisis menunjukkan bahwa implementasi perbaikan seperti *autonomus maintenance*, pemasangan *andon system*, dan pelatihan operator mampu menurunkan *downtime* hingga 45% dalam tiga bulan. Dampaknya, konsumsi energi *idle* turun signifikan, menghasilkan penghematan energi sebesar ± 76 juta kWh listrik, ± 152 juta kg steam, dan ± 24 juta Nm³ nitrogen. Hal ini setara dengan pengurangan emisi sebesar ± 84.912 ton CO₂ dan efisiensi biaya mencapai Rp 181,8 miliar dalam tiga bulan operasional. Jika diekstrapolasi secara tahunan, penghematan ini berpotensi mencapai $\pm$ Rp 727 miliar atau sekitar 18% dari total biaya operasional tahunan proses *curing*. Penelitian ini memberikan bukti bahwa pendekatan TPM dan RCFA tidak hanya meningkatkan keandalan mesin, tetapi juga mendukung transformasi industri menuju energi rendah emisi.

Kata Kunci: *Curing, Downtime Mesin, Efisiensi Energi, Emisi Karbon, Total Productive Maintenance*

Abstract

The curing process in tire manufacturing is a critical stage with high energy consumption, significantly contributing to carbon emissions and production costs. This study aims to identify the root causes of curing machine downtime and develop improvement strategies based on Total Productive Maintenance (TPM) and Root Cause Failure Analysis (RCFA). Data were collected from 240 curing machines over the period of January to June 2025, covering downtime duration and energy consumption during idle conditions. The analysis revealed that improvement initiatives such as autonomous maintenance, the installation of an andon system, and operator training successfully reduced downtime by up to 45% within three months. As a result, idle energy consumption significantly decreased, yielding energy savings of approximately 76 million kWh of electricity, 152 million kg of steam, and 24 million Nm³ of nitrogen. This is equivalent to a reduction of approximately 84,912 tons of CO₂ emissions and cost savings of IDR 181.8 billion during the three-month operational period. When extrapolated annually, this savings could potentially reach IDR 727 billion, or approximately 18% of the total annual operational costs of the curing process. This study provides evidence that TPM and RCFA approaches not only enhance machine reliability but also support industrial transformation toward low-emission energy systems.

Keywords: *Curing, Carbon Emissions, Energy Efficiency, Machine Downtime, Total Productive Maintenance*

1. Pendahuluan

Perubahan iklim merupakan tantangan global utama yang dipicu oleh peningkatan emisi gas rumah kaca (GRK) akibat ketergantungan pada bahan bakar fosil. Sebagai respons, banyak negara mulai

beralih ke energi terbarukan seperti surya, angin, air, dan biomassa yang memiliki dampak emisi jauh lebih rendah. Transisi ini tidak hanya bertujuan mengurangi pemanasan global, tetapi juga menjaga keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan.

Secara regional, Asia memegang peranan penting dalam peta energi global. Dengan hampir separuh populasi dunia, kebijakan energi negara-negara di Asia sangat menentukan arah tren emisi global, konservasi energi, serta kualitas lingkungan. Pilihan energi di kawasan ini turut berdampak pada aspek sosial, kesehatan, dan ketenagakerjaan lintas generasi.

Indonesia, sebagai negara berkembang di Asia Tenggara, memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar mencapai 442,4 GW menurut Kementerian ESDM (2023). Namun, pemanfaatannya masih rendah. Sektor energi Indonesia masih didominasi oleh energi fosil, dengan kontribusi energi terbarukan baru sekitar 11% dari bauran energi nasional. Padahal, Indonesia memiliki kapasitas besar di bidang geotermal, hidro, bioenergi, hingga tenaga surya. Menurut IRENA (2022), capaian ini masih tertinggal dari rata-rata global sebesar 26,2% pada tahun 2025. Hal ini menunjukkan adanya gap yang cukup besar antara potensi dan realisasi pemanfaatan energi terbarukan.

Pemerintah Indonesia telah merespons melalui sejumlah kebijakan, seperti dokumen *Roadmap to Net Zero Emissions*, peta jalan EBTKE, dan dukungan investasi hijau. Namun, pencapaian target tersebut membutuhkan kontribusi nyata dari sektor industri sebagai salah satu penyumbang emisi GRK terbesar. Banyak perusahaan mulai menerapkan praktik bisnis berkelanjutan seperti efisiensi energi, konversi ke energi terbarukan, pengelolaan limbah, dan *offset* karbon sebagai bentuk tanggung jawab terhadap lingkungan dan reputasi bisnis.

Salah satu sektor yang berkontribusi terhadap emisi tinggi adalah industri manufaktur, khususnya proses energi-intensif seperti *curing* pada produksi ban. Proses *curing* merupakan tahap akhir yang membutuhkan konsumsi energi besar dalam bentuk uap, listrik, nitrogen, angin dan oli panas. Jika tidak dikelola secara efisien, proses ini tidak hanya meningkatkan biaya produksi, tetapi juga menyebabkan pemborosan energi dan emisi karbon yang tinggi.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menyoroti efisiensi energi dalam industri manufaktur. Misalnya, Musthopa et al. (2023) menggabungkan TPM dan RCM untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi listrik dan menurunkan gangguan operasional. Kandoi & Makwana (2023) menggunakan alat TQM untuk mengidentifikasi akar penyebab *downtime* mesin dan menyusun rencana peningkatan produktivitas. Sementara itu, Hastanto et al. (2024) menunjukkan pentingnya optimasi energi berbasis data untuk menurunkan konsumsi energi di sektor pembangkit. Namun, belum banyak studi yang secara spesifik menghubungkan efisiensi operasional mesin *curing* dengan dampaknya terhadap penghematan energi dan reduksi emisi karbon.

Penelitian ini hadir untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan fokus pada bagaimana pendekatan *Total Productive Maintenance* (TPM) dan *Root Cause Failure Analysis* (RCFA) dapat mengurangi *downtime* mesin dan pemborosan energi dalam proses *curing*. Kedua pendekatan ini dipilih karena kemampuannya dalam meningkatkan keandalan mesin, menyelesaikan akar masalah secara sistematis, serta melibatkan seluruh lini dalam menjaga kinerja operasional.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menawarkan solusi teknis terhadap permasalahan energi di tingkat perusahaan, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap upaya dekarbonisasi industri dan pencapaian target energi rendah emisi nasional secara menyeluruh.

2. Landasan Teori

Landasan teori memberikan dasar konseptual yang mengarahkan fokus penelitian ini berdasarkan kajian ilmiah terdahulu. Dalam konteks efisiensi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca di sektor manufaktur, berbagai studi telah mengeksplorasi pendekatan teknis dan manajerial untuk meningkatkan kinerja produksi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa integrasi *Total Productive Maintenance* (TPM) dan *Root Cause Failure Analysis* (RCFA) efektif dalam menurunkan *downtime* dan meningkatkan efisiensi. Namun, keterkaitan langsung antara peningkatan efisiensi tersebut dengan penghematan energi dan reduksi emisi karbon, khususnya pada proses *curing*, masih minim dibahas.

Oleh karena itu, kajian literatur ini disusun untuk memetakan posisi penelitian dan mengidentifikasi celah penelitian yang akan diisi.

Tabel 1. Kajian literatur

No	Penulis	Metodologi Penelitian	Temuan Penelitian	Objek Penelitian
1	Kheyrollahi et al., (2021) Iran	Penelitian ini menguji Eksperimen pada mesin satu silinder dengan variasi rasio kompresi dan rasio udara-bahan bakar menggunakan busi pra-bakar.	Efisiensi pembakaran meningkat, konsumsi bahan bakar spesifik menurun 4–11%, dan emisi HC, CO, NOx menurun hingga 16,3%.	Mesin satu silinder berbahan bakar gas alam dengan sistem pengapian pra-bakar.
2	Afiifah et al., (2021) Indonesia	Penelitian ini memodifikasi bioreaktor dengan isolasi air dan scrubber, fermentasi limbah organik kantin selama 20–28 hari,	Produksi metana tertinggi 65.111,04 cm ³ dan 5 atm, namun belum cukup untuk pembakaran.	Limbah organik dari kantin sebagai bahan baku biogas dalam bioreaktor.
3	Musthopa et al., (2023) Indonesia	Penelitian ini menggabungkan TPM, RCM, 4DX, analisis OEE, FMEA, dan metode 5S di sistem distribusi listrik.	SAIFI turun 33%, SAIDI 29%, ENS 32%, gangguan feeder 50%, dan OEE naik 0,027%.	Sistem distribusi listrik pelanggan industri.
4	Hutapea & Windarta (2023) Indonesia	Tinjauan pustaka sistem ORegen, fluida kerja siklopentana, dan komponen turbo expander.	Efisiensi sistem Oregen mencapai 51,5%, menghasilkan tambahan 8,9 MW tanpa konsumsi bahan bakar tambahan.	Sistem ORegen pada turbin gas GE (PGT25+ G4).
5	Dhairiyasamy (2023) India	Penelitian ini memproduksi biodiesel dari kedelai dan alga, pengujian pada mesin diesel konvensional dan LHR, analisis emisi dan peforma.	SBME20 memiliki efisiensi tertinggi dan emisi CO, HC paling rendah; emisi NOx naik 10–15%.	Campuran biodiesel (SBME20, ALME20, SBPO20) pada mesin diesel.
6	Ricky& Windarta (2020) Indonesia	Penelitian ini membandingkan Perbandingan data aktual dan perhitungan teoritis daya aktif-reaktif, metode segitiga daya, dan pemeriksaan alat ukur.	Nilai faktor daya aktual sesuai dengan perhitungan teoritis, menunjukkan keakuratan sistem dan pentingnya inspeksi alat ukur.	Sistem generator listrik dan faktor daya (cos phi).
7	Wang& Cheng (2023) Cina	Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental pada reaktor pirolisis, simulasi Aspen Plus, dan Life Cycle Assessment (LCA) sesuai standar ISO.	Suhu optimal 500–550°C; intensitas emisi GHG sistem cogeneration hanya 2,92–3,51 g CO ₂ /MJ.	Jerami padi sebagai bahan baku energi melalui pirolisis dan gasifikasi.
8	Nurrochim& Harmoko (2021) Indonesia	Penelitian ini menggunakan Simulasi desain DHE konfigurasi U-tube, analisis data dari lapangan panas bumi Dieng.	DHE mampu menghasilkan panas dan listrik dengan kapasitas 0,25–364 kW dan minim korosi.	Sumur panas bumi terbengkalai di lapangan Dieng menggunakan DHE.
9	Hastanto et al., (2024) Indonesia	Penelitian ini menggunakan analisis regresi multivariat, simulasi optimasi konsumsi energi menggunakan Excel, MATLAB, CUSUM, dan FMINCON.	Efisiensi energi meningkat signifikan melalui penambahan teknisi, optimalisasi waktu operasi, dan penggantian roller.	Sistem penanganan batubara di PLTU Jawa IV.

No	Penulis	Metodologi Penelitian	Temuan Penelitian	Objek Penelitian
10	Prasetyo& Windarta (2022) Indonesia	Studi literatur dan analisis kebijakan terhadap aspek regulasi, infrastruktur, dan finansial CCS di Indonesia.	CCS berpotensi tinggi dalam mengurangi emisi, namun tantangan utama adalah regulasi dan kesadaran publik.	Penerapan teknologi Carbon Capture and Storage (CCS) di Indonesia.
11	Cataldo et al., (2023) Denmark	Metode penelitian ini menggunakan simulasi AspenPlus, pemodelan off-design turbin gas, dan analisis ekonomi berbasis IEAGHG serta arus kas diskonto.	Sistem Powdrogen berpotensi menghasilkan hidrogen dan listrik rendah emisi dengan kelayakan ekonomi yang menjanjikan.	Sistem pembangkit poligenerasi "Powdrogen" untuk produksi hidrogen dan tenaga listrik berbasis proses rendah karbon.
12	Schulz et al., (2020) Germany	Metode ini menggunakan model modular di Matlab Simulink untuk integrasi energi terbarukan dalam manufaktur, dengan strategi kontrol, validasi, dan analisis konverter serta penyimpanan energi.	Metode penelitian ini mengembangkan konsep dan simulasi integrasi energi terbarukan terdesentralisasi ke dalam sistem produksi untuk mendukung kemandirian energi.	Metode ini mengembangkan integrasi energi terbarukan terdesentralisasi dalam manufaktur guna mencapai kemandirian energi melalui pemilihan teknologi dan strategi operasional manajemen energi.
13	Kandoi& Makwana (2023)	Metode ini menggunakan alat TQM untuk menganalisis data downtime 24 jam terakhir secara manual dan otomatis, mengidentifikasi akar masalah, dan menyusun rencana tindakan perbaikan.	Penelitian ini menggunakan alat TQM untuk mengidentifikasi penyebab utama downtime mesin, seperti Setting, Loading/Unloading, dan Inspection Time, serta menyusun rencana perbaikan guna meningkatkan produktivitas.	Tujuan utama penelitian ini adalah menerapkan alat TQM untuk menganalisis akar penyebab downtime mesin guna merancang rencana tindakan yang meningkatkan efisiensi dan produktivitas secara berkelanjutan.
14	Huang et al., (2025) Cina	Metode ini mencakup optimasi bilevel operasi rendah karbon dengan model CEF dan metode Shapley untuk alokasi emisi, serta studi kasus IEEE 33-node menggunakan Python dan Gurobi.	Skema optimasi ini menurunkan emisi karbon 8,37% dan biaya total 4,53%, serta meratakan beban puncak-lembah melalui respons permintaan dan koordinasi agregator beban.	Metode ini mengembangkan optimasi bilevel untuk operasi rendah karbon di sistem energi terdistribusi dengan alokasi emisi berbasis teori CEF dan metode Shapley.
15	Verma et al., (2021) Indonesia	Metode ini mengintegrasikan Lean, Energy, dan Six Sigma dalam pengembangan VSM berbasis entropi untuk identifikasi pemborosan dan validasi pada industri manufaktur empat workstation.	Model LESSVSM mendorong manufaktur berkelanjutan dengan menekan rework dan reject di bawah 1%, serta meningkatkan proses, efisiensi biaya, dan penghematan energi.	Metode penelitian ini mengembangkan model LESSVSM yang mengintegrasikan Lean, Energy, dan Six Sigma untuk meminimalkan energi dan limbah guna mencapai manufaktur berkelanjutan.

No	Penulis	Metodologi Penelitian	Temuan Penelitian	Objek Penelitian
16	Hiltunen& Syri (2021) Finlandia	Metode ini menggunakan simulasi EnergyPRO untuk memodelkan jaringan pemanas distrik, menganalisis sensitivitas harga panas limbah dan CO ₂ , serta mengevaluasi teknologi heat pump berdasarkan data historis.	Penghentian batu bara dan pemanfaatan panas limbah dari data center menurunkan emisi CO ₂ , menaikkan produksi karbon netral hingga 79,9%, dan menekan biaya produksi.	Penelitian ini bertujuan mensimulasikan dampak pengurangan emisi terhadap biaya dan emisi CO ₂ pada sistem pemanas distrik Espoo, serta mengevaluasi panas limbah data center untuk mencapai 85% produksi panas karbon netral.
17	Yang et al., (2021) Cina	Metode ini menggunakan simulasi Aspen Plus dengan metode CPA dan PSRK, analisis neraca massa dan energi, serta evaluasi energi, eksergi, dan sensitivitas untuk kinerja termodinamika.	Rasio SP3-reflux optimal 50% (energi) dan 40–43% (eksergi) menurunkan konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi eksergi dibanding proses Rectisol konvensional.	Metode ini mengusulkan dan menganalisis proses semi-lean Rectisol melalui simulasi dan analisis komparatif untuk mengurangi konsumsi energi serta mengidentifikasi peluang optimasi.
18	Saiteja& Kalluri (2025) Indonesia	Penelitian ini berhasil mengurangi downtime tak terencana 35%, mempercepat respons pemeliharaan 25%, meningkatkan kepuasan pelanggan 18%, dan menurunkan biaya perawatan 22% melalui integrasi model prediktif AI dengan sistem CRM.	Integrasi model prediktif berbasis AI dengan alur kerja CRM berhasil menurunkan downtime tak terencana sebesar 35%, mempercepat respons pemeliharaan 25%, meningkatkan kepuasan pelanggan 18%, dan mengurangi biaya perawatan 22%.	Metode penelitian ini mengembangkan dan mengintegrasikan sistem predictive maintenance berbasis AI dengan CRM untuk mengurangi downtime peralatan serta meningkatkan produktivitas dan kepuasan pelanggan pada industri manufaktur boiler.
19	Siddique., (2024) Indonesia	Metode penelitian ini menggunakan desain mixed-method dengan analisis statistik, wawancara semi-terstruktur, studi kasus, survei, triangulasi data, umpan balik ahli, dan analisis sensitivitas untuk memastikan validitas dan ketahanan hasil.	Studi ini menyoroti pentingnya inovasi, kolaborasi lintas disiplin, serta perubahan budaya dan organisasi dalam menerapkan manufaktur berkelanjutan melalui pendekatan teknologi dan perbaikan proses secara terpadu.	Penelitian ini mengeksplorasi strategi pengurangan limbah dan konsumsi energi dalam proses manufaktur serta mengidentifikasi manfaat dan tantangan dalam penerapan praktik manufaktur berkelanjutan.
20	Mawson & Hughes (2021) UK	Metode penelitian ini menggunakan simulasi IES-VE dan model random forest untuk menganalisis aliran energi termal serta mengoptimalkan jadwal manufaktur dan HVAC secara asinkron guna menurunkan lonjakan permintaan energi.	Optimasi asinkron jadwal manufaktur dan HVAC berhasil menurunkan permintaan energi puncak sebesar 15,1% tanpa mengorbankan produktivitas, dengan akurasi prediksi konsumsi energi mencapai 96,5%.	Metode ini mengoptimalkan jadwal HVAC dan produksi di fasilitas manufaktur menggunakan simulasi dan machine learning untuk mengurangi puncak permintaan energi tanpa mengurangi produktivitas dan kualitas.

3. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan metode studi kasus di salah satu industri manufaktur ban di Indonesia. Studi difokuskan pada proses *curing*, yang merupakan tahap akhir dengan konsumsi energi tinggi. Objek penelitian adalah 240 unit mesin *curing* yang beroperasi aktif selama periode Januari hingga Juni 2025.

Tujuan utama dari metode ini adalah untuk mengidentifikasi akar penyebab *downtime* mesin dan mengembangkan strategi perbaikan berbasis *Total Productive Maintenance* (TPM) dan *Root Cause Failure Analysis* (RCFA). Pendekatan TPM dipilih karena kemampuannya dalam meningkatkan keandalan operasional mesin secara menyeluruh melalui pelibatan seluruh elemen organisasi. Sementara itu, RCFA digunakan untuk menganalisis penyebab dasar dari gangguan mesin yang berulang secara sistematis.

Langkah-langkah perbaikan yang diterapkan mencakup:

- 1) *Autonomous maintenance*
- 2) Pemasangan sistem andon (*early warning system*)
- 3) Pelatihan operator berdasarkan SOP kerja standar
- 4) Penerapan *planned maintenance* (perawatan terjadwal)
- 5) *Kaizen/focus improvement* untuk pengurangan pemborosan.

Setiap tahap dirancang untuk secara langsung menurunkan *unplanned downtime*, mengoptimalkan konsumsi energi saat *idle*, dan menurunkan emisi karbon yang dihasilkan selama proses *curing* berlangsung.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Pengumpulan Data

Data *downtime* dikumpulkan selama periode tiga bulan (Januari–Maret 2025) dari total 240 unit mesin *curing*. Rincian durasi *downtime* dan rata-rata waktu henti harian dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. *Downtime* mesin *curing* selama 3 bulan (Januari-Maret 2025)

No	Bulan	<i>Downtime</i> per (menit)	<i>Downtime</i> per (jam)	Rata-rata per hari
1	Januari	1.027.000	17.116,7 jam	570,6 jam/hari
2	Februari	1.081.000	18.016,7 jam	600,6 jam/hari
3	Maret	1.233.988	20.566,5 jam	685,6 jam/hari

Sumber: Data diolah (2025)

Tabel 1 menunjukkan rekapitulasi *unplanned downtime* mesin *curing* selama tiga bulan pertama tahun 2025. Data ini menjadi dasar dalam menghitung estimasi konsumsi energi yang terbuang akibat waktu *idle*. Selanjutnya, dilakukan pencatatan parameter konsumsi energi pada saat mesin dalam kondisi *idle* (tidak memproduksi tetapi tetap menyala). Hasil pengukuran dan standar acuan ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Parameter konsumsi energi mesin curing saat idle*

No	Jenis Energi	Konsumsi per jam	Satuan	Sumber
1	Listrik	15	kWh	Standar Pabrik Ban
2	Steam (Uap)	30	Kg	Pengukuran Aktual
3	Nitrogen	5	Nm ³	Standar penggunaan valve nitrogen
4	Oli Hidrolik	1	Liter	Sirkulasi minimum sistem hidrolik
5	Angin tekan	8	Nm ³	tekanan sistem pneumatik saat idle

Sumber: Data diolah (2025)

Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2, konsumsi energi per jam mencakup penggunaan listrik, steam, nitrogen, oli hidrolik, dan angin tekan yang tetap aktif selama mesin idle. Data ini dikalibrasi dengan sumber internal dan acuan teknis industri ban. Berdasarkan data *downtime* dan konsumsi energi per jam, dihitung estimasi total konsumsi energi yang terbuang untuk masing-masing bulan. Ringkasan estimasi ini disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Estimasi konsumsi energi saat *downtime*

Bulan	Total jam <i>Downtime</i>	Listrik (kWh)	Steam (kg)	Nitrogen Nm ³	Oli Hidrolik	Angin tekan Nm ³
Januari	17.116,7	61.620.120	123.240.240	20.540.040	4.108.008	32.864.064
Februari	18.016,7	64.860.120	129.720.240	21.636.720	4.327.344	34.618.752
Maret	20.566,5	74.039.400	148.078.800	24.679.800	4.935.960	39.487.650

Sumber: Data diolah (2025)

Tabel 3 menyajikan hasil kalkulasi konsumsi energi akibat *downtime* mesin *curing*, dihitung dari total jam *downtime* dikalikan dengan konsumsi energi per jam per unit mesin dan jumlah mesin. Estimasi ini memberikan gambaran nyata mengenai potensi pemborosan energi.

Rumus per komponen energi :

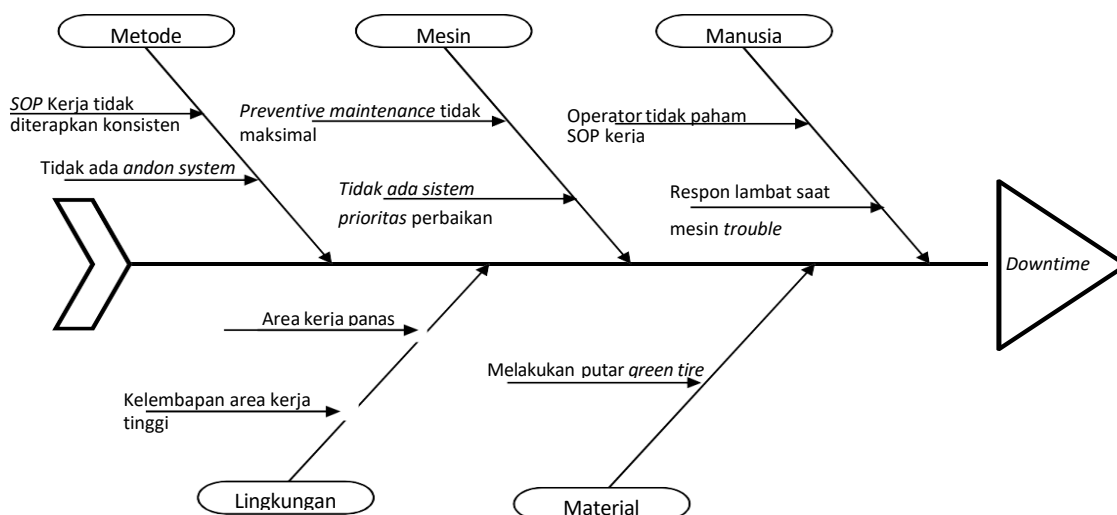
Total konsumsi energi = konsumsi per jam x jumlah mesin x total jam *downtime*

15 Wh x 240 mesin x 17.116,7 jam = 61.620.120 kWh

4.2 Root Cause Analysis

Besarnya durasi *downtime* mesin *curing* setiap bulan menunjukkan potensi pemborosan energi yang signifikan. Tanpa intervensi sistematis, kondisi ini akan terus berkontribusi pada tingginya konsumsi energi dan emisi karbon. Oleh karena itu, diperlukan analisis akar penyebab (*root cause analysis*) untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan yang menyebabkan *downtime*.

Untuk mengidentifikasi akar penyebab *downtime* mesin, digunakan pendekatan Fishbone Diagram yang mengelompokkan faktor-faktor penyebab ke dalam enam kategori utama, yaitu: mesin, metode, manusia, material, lingkungan, dan pengukuran.



Gambar 1. Root Cause Analysis

Gambar 1. menunjukkan diagram tulang ikan (fishbone diagram) yang mengilustrasikan faktor-faktor utama penyebab *downtime* mesin *curing*. Diagram ini mempermudah visualisasi hubungan antara masalah inti dan berbagai penyebabnya.

4.3 Implementasi Perbaikan *Total Productive Maintenance*

Setelah penyebab utama diidentifikasi, sejumlah *tools* perbaikan diterapkan, termasuk *Autonomous Maintenance*, pemasangan *Andon System*, serta penerapan *Kaizen/Focus Improvement*, *Planned Maintenance* dan didukung oleh dokumentasi sistematis dan pelatihan operator.

Tabel 4. Matriks Permasalahan dan Solusi

Permasalahan Utama	Akar Masalah	Tindakan Perbaikan	Dampak
<i>Downtime</i> tinggi akibat kelambatan respons	Tidak ada sistem peringatan	Instalasi <i>Andon System</i>	Respons cepat terhadap kerusakan
Operator kurang paham prosedur	Minim pelatihan SOP	Pelatihan dan Audit SOP	Penurunan kesalahan manusia
Kebocoran energi saat <i>idle</i>	<i>Valve</i> tidak efisien	Penggantian <i>valve</i>	Penurunan konsumsi <i>steam</i>
Jadwal perawatan tidak konsisten	Kurangnya PM terjadwal	<i>Planned Maintenance</i> (<i>Checksheet</i>)	Penurunan <i>downtime</i> terjadwal

Sumber: Data diolah (2025)

1) *Autonomus maintenance*

Operator lini pertama dilibatkan secara aktif dalam perawatan dasar mesin, seperti pembersihan, pelumasan, dan pemeriksaan visual. Hal ini dilakukan untuk mencegah kerusakan ringan menjadi lebih parah dan mempercepat deteksi gangguan dini. Operator juga dibekali *checklist* harian dan pelatihan ringan terkait fungsi-fungsi dasar mesin *curing*.

2) Pemasangan Sistem Andon (*Early Warning System*)

Sistem peringatan visual dan alarm dipasang di setiap area *curing* untuk memberikan sinyal segera jika terjadi anomali atau gangguan mesin. Sistem ini mempercepat respons teknisi pemeliharaan dan meminimalkan waktu tunggu sebelum penanganan dimulai. Andon juga terhubung dengan *dashboard monitoring* yang dapat diakses supervisor secara *real-time*.

3) *Kaizen/Focus Improvement*

Tim lintas fungsi dibentuk untuk menjalankan pendekatan Kaizen, yaitu perbaikan bertahap berbasis data lapangan. Salah satu contoh implementasinya adalah penggantian *valve* yang mengalami kebocoran energi uap, yang sebelumnya menyebabkan pemborosan signifikan pada *steam supply* selama *idle*. Selain itu, pemborosan dalam aliran nitrogen dan waktu *setup* juga dianalisis dan diminimalkan.

4) *Planned Maintenance* (Perawatan Terjadwal)

Perusahaan mengembangkan sistem perawatan terencana berbasis waktu dan pemakaian mesin. Aktivitas ini dilengkapi dengan formulir *checksheet preventive maintenance* yang harus diisi oleh teknisi pemeliharaan secara berkala. Komponen kritis seperti *seal*, *valve*, dan aktuator pneumatik diperiksa dan diganti sebelum melewati batas usia pakainya.

5) Pelatihan dan Audit SOP Operator

Pelatihan ulang dilaksanakan bagi seluruh operator *curing* untuk menyamakan pemahaman tentang prosedur operasi standar (SOP) yang berlaku. Evaluasi efektivitas pelatihan dilakukan melalui audit menggunakan Tabel Standar Kerja Kombinasi (TSKK) dan matriks audit kepatuhan SOP. Operator yang tidak sesuai standar diberikan bimbingan korektif.

6) Penguatan Dokumen SOP dan Instruksi Kerja Lapangan (IKL)

SOP dan IKL untuk setiap jenis mesin *curing* disusun ulang dalam format yang lebih sederhana dan mudah dipahami operator. Dokumen tersebut dipasang di area kerja masing-masing dan diperbarui secara berkala mengikuti perbaikan sistem atau hasil *continuous improvement*.

Langkah-langkah di atas diimplementasikan secara terintegrasi dan bertahap dalam periode tiga bulan. Setiap tindakan perbaikan tidak hanya ditujukan untuk menurunkan *downtime*, tetapi juga diarahkan pada pencapaian efisiensi energi dan penurunan emisi karbon secara langsung. Pemantauan dilakukan menggunakan indikator performa utama (KPI) seperti jam *downtime*, jumlah gangguan berulang, serta konsumsi energi *idle* harian.

4.4 Evaluasi

Setelah implementasi perbaikan berbasis *Root Cause Failure Analysis* dan *Total Productive Maintenance* (TPM), dilakukan evaluasi terhadap hasil pengurangan *downtime* dan efisiensi konsumsi energi.

Tabel 5. Konsumsi energi setelah *improvement*

Bulan	Total jam <i>downtime</i>	Penurunan <i>downtime</i>
April	9.414,2	45%
Mei	11.170,3	38%
Juni	13.985,2	32%

Sumber: Data diolah (2025)

Tabel 4 menunjukkan penurunan total jam *downtime* mesin *curing* selama tiga bulan setelah perbaikan. Penurunan ini merupakan dampak langsung dari penerapan perbaikan teknis dan manajerial seperti *autonomus maintenance*, standardisasi SOP operator, serta sistem andon.

Untuk mengetahui dampak terhadap energi yang terpakai saat *idle*, dilakukan perhitungan konsumsi energi berdasarkan jam *downtime* bulanan. Hasil estimasi konsumsi sebelum dan sesudah perbaikan disajikan dalam Tabel 5. Tabel ini menampilkan besarnya penghematan energi dari masing-masing komponen utama, yaitu listrik, uap (steam), dan nitrogen.

Tabel 6. Estimasi konsumsi energi saat *downtime*

Bulan	Energi	Konsumsi Sebelum	Konsumsi Sesudah	Penghematan Energi
April	Listrik (kWh)	61.620.120	33.891.300	27.728.820
	Steam (kg)	123.240.240	67.782.600	55.457.640
	Nitrogen (Nm ³)	20.540.040	11.778.600	8.761.440
Mei	Listrik (kWh)	64.860.120	40.213.770	24.646.350
	Steam (kg)	129.720.240	80.427.540	49.292.700
	Nitrogen (Nm ³)	21.636.720	13.898.340	7.738.380
Juni	Listrik (kWh)	74.039.400	50.346.000	23.693.400
	Steam (kg)	148.078.800	100.692.000	47.386.800
	Nitrogen (Nm ³)	24.679.800	16.453.200	8.226.600

Sumber: Data diolah (2025)

Dampak penghematan energi tersebut terhadap penurunan emisi karbon juga dihitung dan dirangkum dalam Tabel 6. Konversi dilakukan menggunakan faktor emisi standar per satuan energi untuk masing-masing jenis energi. Hasilnya menunjukkan bahwa penurunan *downtime* tidak hanya berdampak terhadap efisiensi biaya, tetapi juga signifikan dalam menurunkan total emisi CO₂ yang dihasilkan proses *curing*.

Tabel 7. Estimasi Reduksi Emisi CO₂ (kg)

Bulan	Energi	Penghematan Energi	Faktor Emisi	Emisi CO ₂ yang Dihindari
April	Listrik	27.728.820 kWh	0,9 kg/kWh	24.955.938 kg
	Steam	55.457.640 kg	0,1 kg/kg	5.545.764 kg
	Nitrogen	8.761.440 Nm ³	0,05 kg/Nm ³	438.072 kg
	Total			30.939.774 kg (30.940 ton)
Mei	Listrik	24.646.350 kWh	0,9 kg/kWh	22.181.715 kg
	Steam	49.292.700 kg	0,1 kg/kg	4.929.270 kg
	Nitrogen	7.738.380 Nm ³	0,05 kg/Nm ³	386.919 kg
	Total			27.497.904 kg (27.498 ton)
Juni	Listrik	23.693.400 kWh	0,9 kg/kWh	21.324.060 kg
	Steam	47.386.800 kg	0,1 kg/kg	4.738.680 kg
	Nitrogen	8.226.600 Nm ³	0,05 kg/Nm ³	411.330 kg
	Total			26.474.070 kg (26.474 ton)

Sumber: Data diolah (2025)

Pengurangan *downtime* sebesar 45% hingga 32% pada periode April hingga Juni menghasilkan total penghematan emisi hingga lebih dari 84.911 ton CO₂ dalam waktu tiga bulan. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan teknis seperti TPM dan analisis akar masalah dapat memberikan kontribusi nyata terhadap dekarbonisasi proses industri.

Tabel 8. Estimasi Reduksi Emisi CO₂ (kg)

Bulan	Energi	Penghematan Energi	Tarif Satuan	Penghematan Biaya
April	Listrik	27.728.820 kWh	Rp 1.500 / kWh	Rp 41.593.230.000
	Steam	55.457.640 kg	Rp 250 / kg	Rp 13.864.410.000
	Nitrogen	8.761.440 Nm ³	Rp 1.200 / Nm ³	Rp 10.513.728.000
	Total			Rp 65.971.368.000
Mei	Listrik	24.646.350 kWh	Rp 1.500 / kWh	Rp 36.969.525.000
	Steam	49.292.700 kg	Rp 250 / kg	Rp 12.323.175.000
	Nitrogen	7.738.380 Nm ³	Rp 1.200 / Nm ³	Rp 9.286.056.000
	Total			Rp 58.578.756.000
Juni	Listrik	23.693.400 kWh	Rp 1.500 / kWh	Rp 35.540.100.000
	Steam	47.386.800 kg	Rp 250 / kg	Rp 11.846.700.000
	Nitrogen	8.226.600 Nm ³	Rp 1.200 / Nm ³	Rp 9.871.920.000
	Total			Rp 57.258.720.000

Sumber: Data diolah (2025)

Selama periode April–Juni, implementasi efisiensi *curing* menghasilkan total penghematan biaya energi sebesar Rp 181.808.844.000 (Seratus delapan puluh satu miliar delapan ratus delapan juta rupiah). Penghematan ini diperoleh dari optimalisasi *downtime* mesin *curing* yang berdampak langsung pada berkurangnya konsumsi listrik, uap, dan nitrogen selama proses *idle*.

Temuan ini sejalan dengan Musthopa et al. (2023) yang melaporkan bahwa implementasi TPM dan metode evaluasi performa mesin dapat menurunkan gangguan operasional hingga 50%. Selain itu, Kandoi & Makwana (2023) juga membuktikan bahwa analisis *downtime* secara menyeluruh berdampak langsung terhadap peningkatan efisiensi operasional dan penurunan biaya energi.

5. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan metode *Root Cause Failure Analysis* dan perbaikan berbasis *Total Productive Maintenance* (TPM) pada proses *curing* berhasil menurunkan *unplanned downtime* secara signifikan. Pengurangan waktu idle berdampak langsung pada efisiensi konsumsi energi, dengan total penghematan biaya sebesar ±Rp 181,8 miliar dan penurunan emisi karbon sebesar ±84.912 ton CO₂ selama tiga bulan.

Keterbatasan penelitian ini terletak pada cakupan data yang terbatas hanya pada periode enam bulan dan belum mengintegrasikan faktor lingkungan eksternal seperti suhu kerja dan keausan komponen. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas periode observasi, memasukkan variabel lingkungan, serta mengevaluasi potensi integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam sistem pemeliharaan prediktif secara *real-time* dengan SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

Untuk mempertahankan efisiensi tersebut, perusahaan perlu menerapkan *monitoring real-time*, meningkatkan pelatihan operator, serta mengintegrasikan sistem perawatan prediktif guna mendukung transformasi energi rendah emisi secara berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Afiifah D, Hadi S, Kurniawan T. 2021. Optimasi produksi biogas dari limbah organik kantin menggunakan sistem fermentasi. *Jurnal Energi Terbarukan Indonesia*. 6(2): 45–52.
- Cataldo S, Nørregaard J, Simonsen C. 2023. Off-design analysis and techno-economic evaluation of a low-emission Powdrogen plant. *Energy Conversion and Management*. 287: 116941.
- Dhairiyasamy K. 2023. Comparative emission performance of SBME20 and ALME20 biodiesel on LHR engines. *Renewable Energy Journal*. 159(4): 307–317.
- Hastanto A, Sutopo W, Darmanto Y. 2024. Energy optimization in coal handling systems using MATLAB-CUSUM. *Jurnal Energi dan Manufaktur*. 12(1): 25–36.
- Hiltunen E, Syri S. 2021. Simulation of district heating systems using waste heat from data centers. *Applied Thermal Engineering*. 192: 116982.
- Huang Y, Zhang X, Li W. 2025. Bilevel optimization for low-carbon operations with Shapley-based emission allocation. *International Journal of Energy Research*. 49(1): 89–105.
- Hutapea R, Windarta A. 2023. Review sistem ORegen dalam pembangkit tenaga gas. *Jurnal Teknologi Energi*. 5(2): 70–78.
- Kandoi S, Makwana R. 2023. Application of TQM tools to reduce machine downtime in manufacturing. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 40(3): 456–471.
- Kheyrollahi R, Jalilvand A, Moradi S. 2021. Improving natural gas engine efficiency with pre-chamber ignition. *Energy Conversion and Management*. 238: 114167.
- Mawson T, Hughes M. 2021. Synchronizing HVAC and manufacturing for energy peak reduction using IES-VE. *Journal of Building Performance Simulation*. 14(3): 356–371.
- Musthopa MA, Dzulkarnaen A, Rosyid M. 2023. Implementation of TPM and RCM in electrical distribution systems. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*. 10(1): 42–51.
- Nurrochim A, Harmoko A. 2021. Pemanfaatan abandoned geothermal well dengan Direct Heat Exchanger. *Jurnal Energi Panas Bumi*. 7(1): 23–32.
- Prasetyo T, Windarta A. 2022. Strategi CCS dalam transisi energi Indonesia. *Jurnal Kebijakan Energi Nasional*. 3(2): 91–101.
- Ricky M, Windarta A. 2020. Analisis keakuratan pengukuran daya aktif dan reaktif. *Jurnal Teknik Elektro Indonesia*. 8(2): 55–63.
- Saiteja G, Kalluri R. 2025. AI-predictive maintenance integration with CRM to reduce downtime. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 121(3): 1123–1136.

- Schulz M, Braun M, Köhler M. 2020. Integrating renewable energy into manufacturing systems: A modular simulation approach. *Renewable Energy*. 156: 1303–1315.
- Siddique R. 2024. Sustainable manufacturing strategies through process innovation. *Journal of Cleaner Production*. 383: 135439.
- Verma A, Setiawan B, Kurniawan D. 2021. LESSVSM model for sustainable manufacturing. *Procedia CIRP*. 98: 274–279.
- Wang H, Cheng Y. 2023. Rice straw pyrolysis and gasification for low-emission energy. *Journal of Cleaner Energy*. 112(3): 215–224.
- Yang H, Lin Y, Zhao F. 2021. Thermodynamic analysis of semi-lean Rectisol for CO₂ capture. *Chemical Engineering Journal*. 405: 126699.