

Analisis Kinerja Energi pada Area Crushing di PT. X Menggunakan *Energy Performance Indicator* (EnPI) Berdasarkan ISO 50001:2018

Arifia Ekayuliana¹, Andi Ulfiana^{1*}, Carelita Maulidi Agnia¹, Asep Apriana¹, Ahmad Bustomi¹

*Email corresponding author: andi.ulfiana@mesin.pnj.ac.id

¹Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

Article history: Received: 2 Juli 2026 | Revised: 3 Agustus 2026 | Accepted: 7 Agustus 2026

Abstract. *Energy consumption in the mining industry is a key factor influencing operational costs and the sustainability of production processes. The crushing area represents a Significant Energy Use (SEU), accounting for over 50% of total operational energy consumption. This study analyzes the energy performance of the crushing area at PT. X using Energy Performance Indicators (EnPI) based on the ISO 50001:2018 framework. Data on electrical energy consumption and ore production from January to November 2025 were used to calculate the EnPI, establish the Energy Baseline (EnB), and analyze energy deviations. SEUs were identified through Pareto analysis based on installed power contribution. The results indicate an average EnPI of 7.886 kWh/tonne for the crushing area, with an established Energy Baseline of 7.87 kWh/tonne. Among 18 electric motors with a total power of 570.45 kW, four units were identified as SEUs—the Secondary Crusher Motor (150 kW), Warman Motor 1 (110 kW), Warman Motor 2 (110 kW), and Primary Crusher Motor (90 kW)—contributing a cumulative 80.63% of the load. Load factor analysis revealed that three of the four SEU units operated above nominal capacity (>100%). The largest positive deviations occurred in October (6.75%) and November (3.89%), findings that were corroborated by field observations. The identified potential energy savings amount to 26.427 kWh/year (1.03%), equivalent to IDR 31.712.400/year. Opportunities for energy efficiency lie primarily in operational improvements and enhanced equipment reliability rather than investments in new technology.*

Keywords – ISO 50001:2018; Energy Performance Indicator; EnPI; Significant Energy Use; Crushing Plant; Energy Efficiency.

Abstrak. *Konsumsi energi pada industri pertambangan merupakan salah satu faktor yang memengaruhi biaya operasional dan keberlanjutan proses produksi. Area crushing pada industri pertambangan merupakan Significant Energy Use (SEU) yang mengonsumsi lebih dari 50% total energi operasi. Penelitian ini menganalisis kinerja energi pada area crushing PT. X menggunakan Energy Performance Indicator (EnPI) berdasarkan kerangka ISO 50001:2018. Data konsumsi energi listrik dan produksi ore selama Januari–November 2025 digunakan untuk menghitung EnPI, menetapkan Energy Baseline (EnB), dan menganalisis deviasi energi. Identifikasi Significant Energy Use (SEU) dilakukan menggunakan analisis Pareto berdasarkan kontribusi daya terpasang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata EnPI area crushing sebesar 7,886 kWh/ton dengan Energy Baseline ditetapkan 7,87 kWh/ton. Dari 18 motor listrik dengan total daya 570,45 kW, empat peralatan ditetapkan sebagai SEU, yaitu Motor Secondary Crusher (150 kW), Motor Warman 1 (110 kW), Motor Warman 2 (110 kW), dan Motor Primary Crusher (90 kW) dengan kontribusi kumulatif 80,63%. Analisis load factor menunjukkan tiga dari empat peralatan SEU beroperasi di atas kapasitas nominal (>100%). Deviasi positif terbesar terjadi pada Oktober (6,75%) dan November (3,89%) yang dikonfirmasi oleh temuan observasi lapangan. Potensi penghematan energi teridentifikasi sebesar 26.427 kWh/tahun (1,03%) atau setara Rp31.712.400/tahun. Peluang efisiensi energi didominasi oleh perbaikan operasional dan peningkatan keandalan peralatan, bukan investasi teknologi baru.*

Kata Kunci - ISO 50001:2018; Energy Performance Indicator; EnPI; Significant Energy Use; Crushing Plant; Efisiensi Energi.

PENDAHULUAN

Upaya konservasi energi merupakan salah satu langkah strategis dalam mendukung keberlanjutan sumber daya energi nasional serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi pada berbagai sektor industri. Pemerintah Indonesia telah menetapkan Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi yang menekankan pentingnya pengelolaan energi secara sistematis melalui penerapan manajemen energi guna meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan mengurangi pemborosan energi [1]. Implementasi konservasi energi menjadi semakin penting seiring meningkatnya kebutuhan energi pada sektor industri yang merupakan salah satu konsumen energi terbesar di Indonesia.

Industri pertambangan dan pengolahan mineral termasuk sektor dengan intensitas energi yang tinggi karena sebagian besar proses produksinya menggunakan peralatan mekanis dan elektris berdaya besar yang beroperasi secara kontinu. Menurut Manouchehri et al. (2016), proses kominusi yang terdiri dari crushing dan grinding merupakan tahapan dengan konsumsi energi terbesar dalam industri pengolahan mineral sehingga memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi keseluruhan fasilitas pengolahan [2]. Penggunaan motor-motor listrik berdaya besar yang beroperasi secara kontinu mengakibatkan inefisiensi di area ini dapat meningkatkan biaya operasional dan jejak karbon perusahaan secara signifikan. Oleh karena itu, perusahaan pertambangan perlu melakukan evaluasi kinerja energi secara berkala untuk mengetahui tingkat efisiensi operasi serta mengidentifikasi peluang penghematan energi.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan dalam pengelolaan energi industri adalah penerapan Sistem Manajemen Energi berdasarkan ISO 50001:2018. Standar ini menyediakan kerangka kerja yang sistematis bagi organisasi untuk mengelola penggunaan energi melalui pendekatan perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*) sehingga mampu meningkatkan kinerja energi, mengurangi biaya operasional, dan mendukung keberlanjutan lingkungan. Dalam implementasinya, ISO 50001:2018 menekankan penggunaan *Energy Performance Indicator* (EnPI) dan *Energy Baseline* (EnB) sebagai alat untuk memantau, mengukur, dan mengevaluasi kinerja energi organisasi [3].

Energy Performance Indicator (EnPI) merupakan ukuran kuantitatif yang digunakan untuk menilai perubahan kinerja energi suatu organisasi dari waktu ke waktu. Dalam industri pertambangan, indikator yang umum digunakan adalah *Specific Energy Consumption* (SEC), yaitu perbandingan antara konsumsi energi dan jumlah produksi yang dihasilkan. Mahandari et al. (2024) menyatakan bahwa SEC dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan antara penggunaan energi dan output produksi sehingga menjadi indikator yang efektif dalam mengevaluasi kinerja energi serta mengidentifikasi peluang peningkatan efisiensi energi [4].

Pada industri pengolahan mineral, area crushing merupakan salah satu tahapan awal proses kominusi yang berfungsi mereduksi ukuran material agar sesuai dengan kebutuhan proses selanjutnya. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa proses *comminution*, termasuk crushing dan grinding, dapat menyumbang lebih dari 50% konsumsi energi total pada kegiatan pengolahan mineral sehingga menjadi area prioritas dalam program peningkatan efisiensi energi [2], [9], [10]. Area ini menggunakan berbagai peralatan berdaya besar seperti crusher, pompa slurry, conveyor, dan motor listrik yang beroperasi secara terus-menerus sehingga berkontribusi signifikan terhadap total konsumsi energi fasilitas pengolahan. Selain itu, efisiensi energi pada sistem crushing dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti karakteristik material, tingkat pembebanan motor, kondisi operasi peralatan, serta efektivitas program pemeliharaan [5]. Oleh karena itu, evaluasi kinerja energi pada area crushing menjadi penting untuk mengetahui tingkat efisiensi penggunaan energi dan peluang peningkatan kinerja energi.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas penerapan sistem manajemen energi dan evaluasi kinerja energi pada sektor pertambangan maupun industri sejenis. Mahandari et al. (2024) mengevaluasi *Energy Performance Indicator* (EnPI) pada industri pertambangan emas di Indonesia menggunakan *Specific Energy Consumption* (SEC) sebagai indikator kinerja energi pada level fasilitas pertambangan [4]. Pada aspek implementasi manajemen energi, Matthee et al. (2024) menunjukkan bahwa integrasi Measurement and Verification (M&V) dengan perubahan operasional mampu meningkatkan efektivitas pengelolaan energi pada tambang bawah tanah, sedangkan Wardhana dan Damarwan (2023) mengidentifikasi potensi penghematan energi melalui audit energi pada industri di Indonesia [14], [16]. Di sisi lain, Subagiyo dan Anggoro (2025) mengevaluasi intensitas energi pada crusher plant batubara menggunakan pendekatan rasio energi terhadap produksi [17], sementara Manouchehri et al. (2016) menegaskan bahwa peningkatan efisiensi pada proses crushing memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan konsumsi energi proses pengolahan mineral secara keseluruhan [2]. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut belum mengintegrasikan identifikasi *Significant Energy Use* (SEU) berbasis Pareto, analisis *load factor* motor individual, perhitungan *Energy Performance Indicator* (EnPI) dan *Energy Baseline* (EnB), serta evaluasi kesesuaian penerapan ISO 50001:2018 secara komprehensif pada sub-sistem crushing.

Meskipun penelitian mengenai manajemen energi dan efisiensi energi pada industri pertambangan telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian masih dilakukan pada level fasilitas secara keseluruhan [4], berfokus pada parameter teknis peralatan crushing tanpa kerangka manajemen energi formal [15], atau menggunakan indikator rasio energi terhadap produksi tanpa identifikasi *Significant Energy Use* (SEU) dan analisis *load factor* [16], [17]. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan tahapan energy review ISO 50001:2018 secara menyeluruh, mulai dari identifikasi SEU berbasis Pareto, analisis *load factor* motor individual, perhitungan EnPI dan EnB, hingga evaluasi kesesuaian penerapan standar pada sub-sistem crushing di industri pertambangan mineral.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan pendekatan evaluasi kinerja energi yang menerapkan tahapan *energy review* ISO 50001:2018 secara sistematis pada area crushing. Pendekatan ini tidak hanya mengevaluasi kinerja energi melalui *Energy Performance Indicator* (EnPI) dan *Energy Baseline* (EnB), tetapi juga mengidentifikasi *Significant Energy Use* (SEU), mengevaluasi hubungan antara *load factor* peralatan dan deviasi konsumsi energi, serta memadukan hasil analisis kuantitatif dengan observasi lapangan untuk mengevaluasi penerapan ISO 50001:2018. Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini menghasilkan dasar yang lebih komprehensif

dalam mengidentifikasi sumber pemborosan energi serta merumuskan rekomendasi peningkatan kinerja energi pada area crushing di industri pengolahan mineral.

Dalam ISO 50001:2018, *Energy Performance Indicator* (EnPI) digunakan sebagai ukuran kuantitatif untuk mengevaluasi kinerja energi organisasi, sedangkan *Energy Baseline* (EnB) berfungsi sebagai acuan pembandingan dalam mengidentifikasi peningkatan maupun penurunan kinerja energi dari waktu ke waktu. Penggunaan EnPI dan EnB yang tepat memungkinkan organisasi melakukan pemantauan berkelanjutan terhadap efektivitas program konservasi energi dan pengambilan keputusan berbasis data [6], [7].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja energi pada area crushing menggunakan *Energy Performance Indicator* (EnPI) berdasarkan ISO 50001:2018. Analisis dilakukan melalui identifikasi *Significant Energy Use* (SEU), perhitungan *Specific Energy Consumption* (SEC), serta evaluasi hubungan antara konsumsi energi dan tingkat produksi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai tingkat kinerja energi area crushing, mengidentifikasi peluang peningkatan efisiensi energi, serta menjadi dasar bagi perusahaan dalam menerapkan perbaikan berkelanjutan sesuai prinsip Sistem Manajemen Energi ISO 50001:2018.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan deskriptif-analitis untuk mengevaluasi kinerja energi pada area crushing berdasarkan ISO 50001:2018. Analisis dilakukan menggunakan data historis konsumsi energi listrik dan data produksi area crushing selama periode pengamatan. Data yang digunakan meliputi konsumsi energi listrik setiap peralatan, data tonase material yang diproses, jam operasi peralatan, serta data teknis peralatan yang termasuk dalam kategori pengguna energi signifikan (*Significant Energy Use/SEU*).

A. Pengumpulan dan Jenis Data yang Diambil

Objek penelitian ini adalah area crushing PT. X yang bergerak di bidang pertambangan dan pengolahan mineral. Penelitian menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung parameter kelistrikan peralatan menggunakan power meter, yang meliputi tegangan (V), arus (A), dan faktor daya (power factor), serta melalui observasi lapangan dan wawancara dengan operator crushing untuk memperoleh informasi mengenai kondisi operasional yang memengaruhi kinerja energi. Data sekunder berupa data historis konsumsi energi listrik, data produksi ore, jam operasi peralatan, serta spesifikasi teknis motor listrik yang diperoleh dari pencatatan operasional perusahaan selama periode Januari hingga November 2025.

B. Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan secara bertahap sesuai kerangka energy review ISO 50001:2018. Tahap pertama adalah validasi dan rekapitulasi data historis konsumsi energi listrik, produksi ore, serta data hasil pengukuran parameter kelistrikan untuk memastikan kelengkapan dan konsistensi data selama periode Januari–November 2025. Tahap kedua dilakukan identifikasi *Significant Energy Use* (SEU) menggunakan analisis Pareto berdasarkan kontribusi daya terpasang masing-masing peralatan. Selanjutnya dilakukan perhitungan daya aktual dan load factor motor listrik tiga fasa menggunakan data tegangan, arus, dan faktor daya hasil pengukuran lapangan. Tahap berikutnya adalah perhitungan *Energy Performance Indicator* (EnPI) bulanan dalam bentuk *Specific Energy Consumption* (SEC), yaitu rasio antara konsumsi energi listrik dan produksi ore. Berdasarkan nilai EnPI tersebut, ditetapkan *Energy Baseline* (EnB) menggunakan metode *weighted average* karena mampu merepresentasikan hubungan antara konsumsi energi dan volume produksi secara lebih proporsional pada kondisi produksi yang berfluktuasi. Selanjutnya dilakukan analisis deviasi konsumsi energi aktual terhadap EnB untuk mengidentifikasi periode yang menunjukkan penyimpangan kinerja energi. Untuk memperkuat interpretasi hasil, dilakukan analisis korelasi Pearson antara produksi ore, konsumsi energi aktual, dan EnPI guna mengevaluasi kekuatan serta arah hubungan antarvariabel. Tahap akhir berupa interpretasi hasil analisis melalui observasi lapangan dan wawancara dengan operator untuk mengidentifikasi penyebab deviasi energi serta menyusun rekomendasi peningkatan kinerja energi sesuai prinsip continuous improvement ISO 50001:2018.

C. Persamaan yang Digunakan

Persamaan-persamaan yang digunakan dalam analisis kinerja energi penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan kontribusi daya terpasang

$$\text{Kontribusi Daya}_i(\%) = \frac{P_i}{\sum P} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

Kontribusi Daya_i = kontribusi daya peralatan ke-i (%)

P_i = daya aktif peralatan ke-i (kW)

$\sum P$ = total daya aktif seluruh peralatan pada sistem crushing (kW)

2. Perhitungan daya aktual

$$P (kW) = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \quad (2)$$

P = daya aktual motor (kW)

V = tegangan operasi (Volt)

I = arus operasi (Ampere)

$\cos \varphi$ = faktor daya motor

3. Perhitungan Energi aktual

Energi aktual dihitung berdasarkan daya aktual rata-rata dan jam operasi:

$$E = P_{aktual} \times t \quad (3)$$

Keterangan:

E_{aktual} = energi aktual (kWh)

P_{aktual} = daya aktual rata-rata (kW)

t = waktu operasi (jam)

4. Perhitungan Energy Performance Indicator (EnPI)

$$EnPI = \frac{\text{Konsumsi Energi (kWh)}}{\text{Output Produksi ore (ton)}} \quad (4)$$

5. Penetapan Energy Baseline (EnB)

Energy Baseline ditetapkan menggunakan metode rata-rata tertimbang (weighted average):

$$EnB = \frac{\sum \text{Konsumsi Energi (kWh)}}{\sum \text{Produksi Ore (ton)}} \quad (5)$$

Energy Baseline (EnB) ditetapkan menggunakan metode *weighted average* karena mampu merepresentasikan hubungan antara konsumsi energi dan volume produksi secara lebih proporsional. Berbeda dengan simple arithmetic mean yang memberikan bobot yang sama pada setiap periode pengamatan tanpa mempertimbangkan perbedaan tingkat produksi, metode *weighted average* memberikan bobot sesuai besarnya output produksi pada masing-masing periode. Dengan demikian, nilai baseline yang dihasilkan lebih mencerminkan kondisi operasi aktual dan lebih sesuai digunakan sebagai acuan evaluasi kinerja energi pada sistem dengan fluktuasi produksi, sebagaimana direkomendasikan dalam ISO 50006:2023 mengenai *penetapan Energy Performance Indicator* (EnPI) dan *Energy Baseline* (EnB).

6. Analisis Deviasi Energi

Deviasi energi dihitung sebagai selisih antara konsumsi energi aktual dan konsumsi energi baseline:

$$\Delta E = E_{aktual} - E_{baseline} \quad (6)$$

Keterangan:

$\Delta E > 0$: konsumsi energi aktual lebih tinggi dari baseline (pemborosan energi)

$\Delta E < 0$: konsumsi energi aktual lebih rendah dari baseline (kinerja energi lebih baik)

$\Delta E = 0$: konsumsi energi aktual sesuai dengan baseline

7. Analisis Korelasi Pearson

Analisis korelasi Pearson digunakan untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antara produksi ore dengan konsumsi energi aktual serta antara produksi ore dengan *Energy Performance Indicator* (EnPI). Koefisien korelasi Pearson dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (7)$$

Keterangan:

r = koefisien korelasi Pearson

x = variabel bebas (produksi ore)

y = variabel terikat (konsumsi energi aktual atau EnPI)

n = jumlah data pengamatan

Nilai koefisien korelasi (r) berada pada rentang -1 hingga $+1$. Semakin mendekati ± 1 menunjukkan hubungan yang semakin kuat, sedangkan nilai yang mendekati 0 menunjukkan hubungan yang lemah. Signifikansi hubungan dievaluasi pada tingkat kepercayaan 95% ($p < 0,05$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

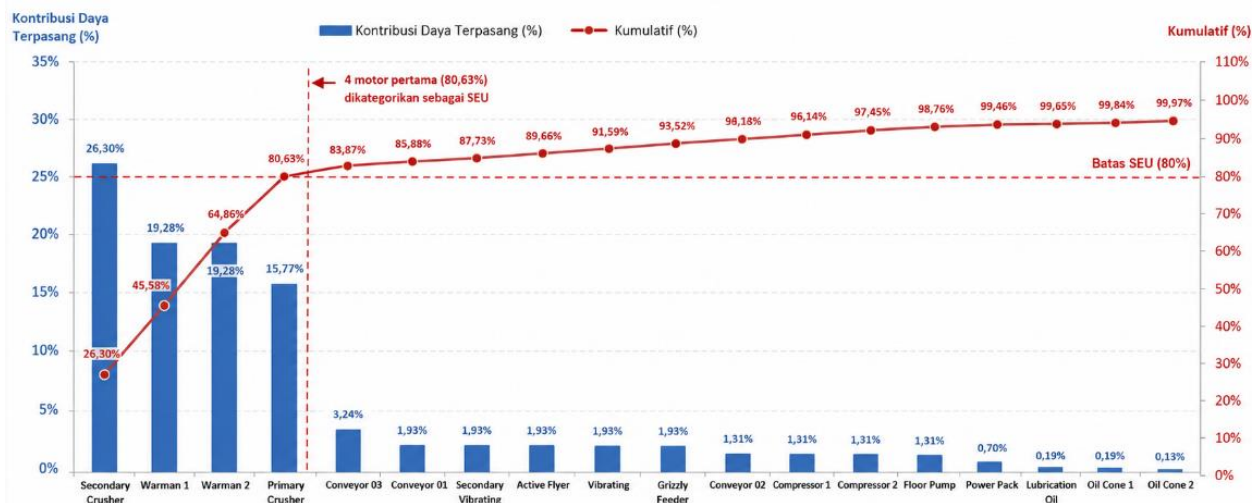
Pada penelitian ini, data yang digunakan merupakan hasil dari kegiatan pengukuran dan pengumpulan data operasional pada area crushing PT. X yang bergerak di bidang pertambangan dan pengolahan mineral. Pengambilan data lapangan dilakukan melalui pengukuran langsung parameter kelistrikan peralatan *Significant Energy Use* (SEU) menggunakan power meter, yang mencakup tegangan operasi (V), arus (A), dan faktor daya ($\cos \phi$). Selain itu, data historis konsumsi energi listrik area crushing diperoleh dari pencatatan meter harian yang direkap secara bulanan selama periode Januari hingga November 2025, sedangkan data produksi ore diperoleh dari rekap operasional harian area crushing pada periode yang sama. Rentang waktu tersebut dipilih karena merepresentasikan kondisi operasi normal area crushing sehingga data yang diperoleh memiliki validitas yang memadai untuk menggambarkan kinerja energi aktual. Selain pengukuran dan data historis, dilakukan pula observasi lapangan dan wawancara dengan operator crushing untuk memperoleh informasi kondisi operasional yang memengaruhi kinerja energi.

A. Identifikasi *Significant Energy Use* (SEU)

Berdasarkan analisis Pareto dari 18 unit motor listrik di area crushing dengan total daya terpasang 570,45 kW, ditetapkan 4 peralatan sebagai SEU yang secara kumulatif menyumbang 80,63% dari total daya terpasang, seperti disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Significant Energy Use (SEU) Area Crushing

Nama Peralatan (SEU)	Daya Terpasang (kW)	Kontribusi (%)	Kumulatif (%)
Motor Secondary Crusher (Cone)	150,00	26,30%	26,30%
Motor Warman 1 (Pompa Slurry)	110,00	19,28%	45,58%
Motor Warman 2 (Pompa Slurry)	110,00	19,28%	64,86%
Motor Primary Crusher (Jaw)	90,00	15,77%	80,63%
Total SEU	460,00	80,63%	80,63%



Gambar 1. Diagram Pareto Kontribusi Daya Terpasang Peralatan Area Crushing

B. Analisis Daya Aktual dan Load Factor Peralatan SEU

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan, perhitungan daya aktual dilakukan persamaan 2. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Daya Aktual dan Load Factor Peralatan SEU

Peralatan	V (V)	I (A)	cos ϕ	P Aktual (kW)	P Rated (kW)	Load Factor (%)
Motor Secondary Crusher	380	268,13	0,85	150,06	150	100,04%
Motor Warman 1	380	200,00	0,84	110,61	110	100,55%
Motor Warman 2	380	200,00	0,84	110,61	110	100,55%
Motor Primary Crusher	380	160,00	0,85	89,51	90	99,46%

Nilai *load factor* yang melebihi 100% pada tiga peralatan SEU mengindikasikan kondisi overload berkelanjutan yang berpotensi meningkatkan rugi-rugi daya, mempercepat degradasi isolasi motor, meningkatkan temperatur operasi, serta menurunkan keandalan peralatan dalam jangka panjang. Kondisi tersebut juga dapat menyebabkan penurunan efisiensi energi dan peningkatan biaya operasional apabila tidak dikendalikan melalui program pemeliharaan dan pengelolaan beban yang memadai [12]. Hasil ini konsisten dengan Bonato dan Schneider (2022), yang menyatakan bahwa motor yang beroperasi secara kontinu di atas kapasitas nominal mengalami peningkatan rugi-rugi tembaga (*copper losses*), kenaikan temperatur lilitan, dan percepatan degradasi isolasi sehingga efisiensi motor menurun [12]. Dengan demikian, nilai *load factor* pada tiga peralatan SEU menunjukkan bahwa pemborosan energi pada area crushing tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya konsumsi energi, tetapi juga oleh kondisi pembebanan motor yang mendekati bahkan melebihi kapasitas nominal.

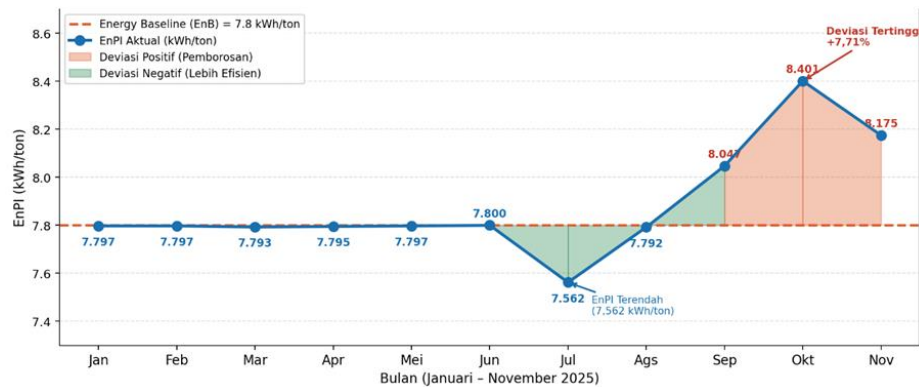
C. Perhitungan Energy Performance Indicator (EnPI)

EnPI dihitung dengan membagi total konsumsi energi listrik terhadap produksi ore pada periode yang sama. Tabel 3 menyajikan hasil perhitungan EnPI bulanan area crushing selama periode Januari–November 2025.

Tabel 3. Hasil Perhitungan EnPI Bulanan Area Crushing

Bulan	Konsumsi Energi (kWh)	Produksi Ore (ton)	EnPI (kWh/ton)
Januari	220.720	28.308	7,797
Februari	208.800	26.779	7,797
Maret	271.680	34.860	7,793
April	228.920	29.366	7,795
Mei	223.160	28.660	7,797
Juni	261.840	33.566	7,800
Juli	250.920	33.180	7,562
Agustus	249.520	32.020	7,792
September	206.720	25.687	8,047
Oktober	219.760	26.157	8,401
November	212.840	26.033	8,175
Rata-rata	232.261,81	29.510,54	7,886

Fluktuasi nilai EnPI menunjukkan bahwa konsumsi energi tidak selalu berbanding lurus dengan tingkat produksi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa selain volume produksi, kinerja energi juga dipengaruhi oleh faktor operasional, seperti tingkat pembebanan motor, kondisi peralatan, dan pola operasi. Temuan ini sejalan dengan Mahandari et al. (2024), yang menyatakan bahwa EnPI tidak hanya merefleksikan besarnya konsumsi energi, tetapi juga efisiensi pemanfaatan energi terhadap output produksi [4]. Selain itu, ISO 50006:2023 menekankan bahwa perubahan nilai EnPI perlu dianalisis bersama variabel relevan agar penyebab perubahan kinerja energi dapat diidentifikasi secara tepat [7]. Pada penelitian ini, peningkatan EnPI pada bulan September hingga November berkorelasi dengan meningkatnya deviasi energi terhadap baseline dan didukung oleh hasil observasi lapangan berupa gangguan operasional pada beberapa peralatan SEU.



Gambar 2. Tren EnPI aktual area crushing vs *Energy Baseline* Periode Januari-November 2025

D. Penetapan *Energy Baseline* (EnB)

Energy Baseline ditetapkan menggunakan metode rata-rata tertimbang (weighted average) untuk mempertimbangkan variasi volume produksi setiap bulan:

$$EnB = \frac{2.554.880 \text{ kWh}}{324.616 \text{ ton}}$$

$$EnB = 7,870 \text{ kWh/ton}$$

Nilai EnB sebesar 7,87 kWh/ton menunjukkan bahwa untuk menghasilkan satu ton material yang diproses pada area crushing membutuhkan energi listrik rata-rata sebesar 7,8 kWh. Nilai ini menjadi acuan evaluasi kinerja energi pada setiap periode pengamatan.

E. Analisis Deviasi terhadap *Energy Baseline*

Analisis deviasi dilakukan dengan membandingkan konsumsi energi aktual terhadap konsumsi energi baseline. Hasil analisis deviasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis Gap/Deviasi Energi terhadap *Energy Baseline*

Bulan	E Aktual (kWh)	E Baseline (kWh)	Deviasi (kWh)	Deviasi (%)
Januari	220.720	222.784,0	-2.064	-0,93%
Februari	208.800	210.750,7	-1.951	-0,93%
Maret	271.680	274.348,2	-2.668	-0,97%
April	228.920	231.110,4	-2.190	-0,95%
Mei	223.160	225.554,2	-2.394	-1,06%
Juni	261.840	264.164,4	-2.324	-0,88%
Juli	250.920	261.126,6	-10.207	-3,91%
Agustus	249.520	251.997,4	-2.477	-0,98%
September	206.720	202.156,7	+4.563	+2,26%
Oktober	219.760	205.855,6	+13.904	+6,75%
November	212.840	204.879,7	+7.960	+3,89%

Deviasi positif terbesar terjadi pada bulan Oktober (6,75%) dan November (3,89%), sedangkan deviasi negatif terbesar pada bulan Juli (-3,91%). Deviasi positif mengindikasikan konsumsi energi melebihi kondisi baseline, sementara deviasi negatif menunjukkan kinerja energi yang lebih baik dari baseline.

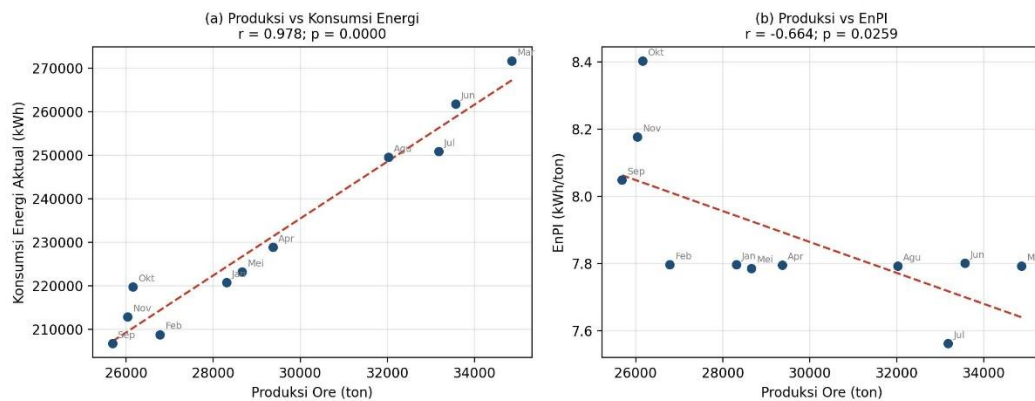
F. Analisis Korelasi Pearson

Selain analisis deskriptif, penelitian ini juga menggunakan analisis korelasi Pearson untuk mengidentifikasi hubungan antara konsumsi energi listrik dan produksi ore selama periode Januari–November 2025. Analisis korelasi Pearson dipilih karena kedua variabel merupakan data numerik kontinu dan bertujuan untuk mengukur kekuatan serta arah hubungan linear antarvariabel. Nilai koefisien korelasi (r) berada pada rentang -1 hingga +1, di mana nilai positif

menunjukkan hubungan searah, sedangkan nilai negatif menunjukkan hubungan berlawanan. Signifikansi hubungan dievaluasi pada tingkat kepercayaan 95% ($p < 0,05$). Hasil pengujian disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Korelasi Pearson antar Variabel Kinerja Energi

Pasangan Variabel	r	r ²	p-value	n	Kekuatan Hubungan
Produksi ore vs Konsumsi energi aktual	0,978	0,956	<0,001	11	Sangat kuat, positif, signifikan
Produksi ore vs EnPI	-0,664	0,441	0,026	11	Kuat, negatif, signifikan ($\alpha = 0,05$)



Gambar 3. Diagram Sebar Produksi Ore vs Konsumsi Energi Aktual (a) dan vs EnPI (b)

Hasil analisis menunjukkan bahwa produksi ore dan konsumsi energi aktual memiliki hubungan positif yang sangat kuat ($r = 0,978$; $p < 0,001$), yang mengindikasikan bahwa peningkatan produksi diikuti oleh peningkatan konsumsi energi secara proporsional. Hubungan ini mendukung penggunaan EnPI berbasis rasio energi-produksi serta metode weighted average dalam penetapan Energy Baseline (EnB) karena mampu merepresentasikan kondisi operasi aktual [4].

Selain itu, produksi ore memiliki korelasi negatif yang signifikan terhadap EnPI ($r = -0,664$; $p = 0,026$), yang menunjukkan bahwa peningkatan produksi cenderung menghasilkan nilai EnPI yang lebih rendah atau lebih efisien. Kondisi ini terlihat pada bulan September–November yang memiliki produksi terendah, namun menunjukkan nilai EnPI dan deviasi terhadap EnB tertinggi. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan EnPI pada periode tersebut dipengaruhi tidak hanya oleh faktor operasional, tetapi juga oleh penurunan utilisasi kapasitas produksi.

G. Hasil Observasi Lapangan

Observasi lapangan dilakukan untuk memverifikasi penyebab deviasi energi. Temuan utama disajikan pada tabel 6 berikut.

Tabel 6. Temuan Observasi Lapangan Area Crushing

Temuan Lapangan	Dampak terhadap Kinerja Energi	Peluang Efisiensi
Genangan air pada area primary crusher	Menyebabkan idle time peralatan dan penurunan produktivitas	Perbaikan sistem drainase
Penyumbatan sistem oil lubrication	Meningkatkan gesekan mekanis dan risiko downtime	Preventive maintenance berkala
Kebocoran pompa slurry	Menurunkan efisiensi pemompaan, konsumsi energi meningkat	Perbaikan/penggantian komponen pompa
Penumpukan material pada transfer chute	Menyebabkan ketidakstabilan aliran dan idle time	Pembersihan chute secara rutin
Panel listrik kotor dan berdebu	Risiko gangguan sistem dan peningkatan temperatur komponen	Program housekeeping dan inspeksi rutin
Motor area screening tertutup debu ore	Menghambat pelepasan panas, efisiensi motor menurun	Pembersihan dan inspeksi sistem pendinginan motor

H. Estimasi Potensi Penghematan Energi

Potensi penghematan energi dihitung berdasarkan total deviasi positif pada bulan-bulan yang menunjukkan pemborosan energi signifikan (September, Oktober, dan November). Estimasi hasil penghematan disajikan pada tabel 7 berikut.

Tabel 7. Estimasi Potensi Penghematan Energi dan Biaya

Parameter	Nilai
Konsumsi energi tahunan aktual	2.554.880 kWh
Total deviasi positif signifikan (Sep–Nov)	26.427 kWh
Persentase penghematan terhadap total konsumsi	1,03%
Tarif listrik PT. X	Rp1.200/kWh
Potensi penghematan biaya	Rp31.712.400/tahun

Potensi penghematan sebesar 26.427 kWh/tahun (1,03%) dapat diperoleh melalui penerapan rekomendasi efisiensi energi yang teridentifikasi. Hasil ini sejalan dengan temuan Manouchehri et al. (2016) bahwa peningkatan efisiensi pada tahap crushing dapat memberikan dampak signifikan terhadap pengurangan konsumsi energi proses pengolahan mineral secara keseluruhan [2]. Potensi penghematan yang teridentifikasi menunjukkan bahwa perbaikan pada aspek operasional dan pemeliharaan peralatan dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap penurunan konsumsi energi. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan efisiensi pada tahap crushing dan comminution dapat menghasilkan pengurangan konsumsi energi secara signifikan pada keseluruhan proses pengolahan mineral [2], [9], [10].

I. Analisis Kesenjangan Penerapan ISO 50001:2018

Gap analysis dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian penerapan sistem manajemen energi terhadap persyaratan ISO 50001:2018. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar persyaratan telah diterapkan pada tingkat organisasi, namun masih terdapat kesenjangan pada aspek: (1) Energy Review dan dokumentasi variabel operasional yang memengaruhi konsumsi energi, (2) pemantauan dan analisis tren EnPI secara konsisten, (3) kesadaran (*awareness*) personel terkait efisiensi energi, serta (4) evaluasi kinerja energi dan audit internal yang belum dilaksanakan secara rutin. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan kinerja energi tidak hanya ditentukan oleh efisiensi teknis peralatan, tetapi juga oleh konsistensi penerapan elemen sistem manajemen energi sesuai ISO 50001:2018.

Kesenjangan-kesenjangan tersebut berkontribusi terhadap terjadinya deviasi positif pada periode Oktober–November yang tidak terdeteksi secara dini. Penguatan implementasi ISO 50001:2018 terutama pada aspek pengendalian operasional, pemantauan EnPI secara berkala, peningkatan kompetensi personel, serta pelaksanaan audit internal energi menjadi rekomendasi utama penelitian ini. Implementasi yang konsisten terhadap persyaratan ISO 50001 terbukti mampu meningkatkan kinerja energi organisasi melalui pendekatan perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*) dan pengambilan keputusan berbasis data [6], [11].

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan kerangka *energy review* berdasarkan ISO 50001:2018 mampu mengevaluasi kinerja energi pada area crushing PT. X secara sistematis melalui identifikasi *Significant Energy Use* (SEU), analisis *load factor*, penetapan *Energy Performance Indicator* (EnPI) dan *Energy Baseline* (EnB), serta analisis deviasi konsumsi energi. Hasil penelitian mengidentifikasi deviasi positif pada periode September–November 2025 yang dipengaruhi oleh penurunan utilisasi kapasitas produksi dan gangguan operasional. Analisis korelasi Pearson memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan hubungan positif yang sangat kuat antara produksi ore dan konsumsi energi aktual ($r = 0,978$; $p < 0,001$), serta hubungan negatif yang signifikan antara produksi ore dan EnPI ($r = -0,664$; $p = 0,026$).

Hasil gap analysis menunjukkan bahwa penguatan implementasi ISO 50001:2018 perlu difokuskan pada energy review, pemantauan EnPI, pengendalian operasional, dan peningkatan kompetensi personel. Penerapan rekomendasi yang diusulkan berpotensi menurunkan konsumsi energi sebesar 26.427 kWh/tahun atau sekitar 1,03% dari konsumsi energi tahunan, sehingga dapat mendukung peningkatan kinerja energi dan penerapan manajemen energi yang lebih efektif pada fasilitas pengolahan mineral.

REFERENSI

- [1] D. Ebtke, “Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (2024). Laporan Kinerja Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi Tahun 2023. Jakarta: Direktorat Jenderal EBTKE, Kementerian ESDM.” 2025.
- [2] H. R. Manouchehri, A. Christoffersson, S. Mining, and R. Technology, “Energy Efficiency in Comminution: Getting More from the Crushing Stage. IMPC 2016 Proceedings.” 2016.
- [3] S. N. Badan Standarisasi Nasional, “SNI ISO 50001:2018 Sistem manajemen energi—Persyaratan dan panduan penggunaan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.” 2019.
- [4] C. P. Mahandari, M. Yamin, S. Palaloi, and M. S. Hasan, “Energy Performance Indicator of a Gold Mining Industry in Indonesia,” 2024.
- [5] M. Vasilyeva, E. Kuznetsova, and A. Petrov, “Modeling and Improving the Efficiency of Crushing Equipment,” 2023.
- [6] International Organization for Standardization (ISO), ISO 50001:2018 Energy Management Systems—Requirements with Guidance for Use. Geneva: ISO, 2018.
- [7] International Organization for Standardization (ISO), ISO 50006:2023 Energy Performance Indicators (EnPIs) and Energy Baselines (EnBs) for Energy Management Systems. Geneva: ISO, 2023.
- [8] A. Hasanbeigi, L. Price, and E. Lin, “Emerging Energy-Efficiency and CO2 Emission-Reduction Technologies for Mining Industry,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 286, 2021.
- [9] A. Jankovic and W. Valery, “Mine-to-Mill Optimization and Energy Efficiency in Comminution Circuits,” *Minerals Engineering*, vol. 169, 2021.
- [10] M. Ballantyne, A. Powell, and M. Tiang, “Energy Consumption in Mining Comminution Processes and Opportunities for Improvement,” *Minerals*, vol. 12, no. 3, 2022.
- [11] M. H. Fathallah, A. Elgammal, and M. El-Sayed, “Assessment of Energy Management System Implementation Based on ISO 50001 in Heavy Industry,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 456–468, 2023.
- [12] M. Bonato and J. Schneider, “Motor Load Factor and Electrical Energy Efficiency in Industrial Applications,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 4, pp. 4871–4880, 2022.
- [13] A. N. S. Pratama, H. Purwanto, and R. Setiawan, “Implementation of Energy Performance Indicators in Indonesian Mining Industry,” *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 14, no. 2, pp. 112–120, 2024.
- [14] F. J. L. Matthee, J. Pascoe, J. H. van Laar, and J. H. Marais, “Improving Energy Management in Deep-Level Mines by Integrating Advanced M&V with Operational Changes,” *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 41, no. 1, pp. 99–109, 2024, doi: 10.1007/s42461-023-00888-x.
- [15] D. D. APRILIYANTO, “Evaluasi Kinerja Unit Crushing Plant Batu Andesit Pada PT. Eka Praya Jaya Kabupaten Lombok Timur,” 2020.
- [16] A. S. J. Wardhana and E. S. Damarwan, “Identification of Energy Saving Potential Through Energy Audit at PT. ABC,” *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 7, no. 1, pp. 63–74, 2023, doi: 10.21831/jee.v7i1.61657.
- [17] F. Mulyani, H. Suyono, and N. Hasanah, “Audit dan Rancangan Implementasi Sistem Manajemen Energi berbasis ISO 50001 di Universitas Brawijaya Malang,” vol. 12, no. 2, pp. 78–84, 2018.
- [18] J. Humaniora, A. Produktivitas, and C. Pada, “BATUBARA UNTUK MENCAPAI TARGET PRODUKSI BULANAN DI PT JAKSA LAKSA UTAMA SITE,” vol. 2, no. 3, 2025.
- [19] P. Studi *et al.*, “Analisis Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Penggerak Vacuum Di PT. Pindo Deli Perawang,” 2022. doi: 10.31849/sainetin.v6i2.9734.
- [20] P. Schober, C. Boer, and L. A. Schwarte, “Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation,” *Anesthesia & Analgesia*, vol. 126, no. 5, pp. 1763–1768, 2018, doi: 10.1213/ANE.0000000000002864.