

# Studi Potensi Penghematan Energi pada *Coal Handling System* PLTU Jawa IV Menggunakan Analisis Regresi Multivarian

Ari Hastanto<sup>1,2</sup>, Berkah Fajar T.K<sup>1,3</sup>, Jaka Windarta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Indonesia;

<sup>2</sup>PLTU Jawa IV, PT Bhumi Jebara Service, Jebara, Jawa Tengah, Indonesia;

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Mesin, Universitas Diponegoro, Indonesia;

Email : arihastanto11@gmail.com (A.H), fajarberkah10@gmail.com (B.F.T.K),  
jakawindarta@lecturer.undip.ac.id (J.W);

**Abstrak** : Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Jawa IV merupakan salah satu PLTU berdaya terbesar di Indonesia yang memiliki transportasi batubara dari *Jetty* menuju *Bunker* sepanjang lebih dari lima kilometer, dan dikelola *Coal Handling System* (CHS). *United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO) memberikan pedoman pengelolaan energi berdasarkan ISO 50001 di sektor industri. Pedoman ini menghasilkan keluaran pada pengguna energi terbesar CHS yang dijadikan obyek utama penghematan energi, yaitu sistem konveyor. Pengoperasian sistem konveyor CHS yang panjang dengan struktur naik turun, area luas, kondisi angin dan cuaca berubah-ubah, menyebabkan frekuensi intermiten meningkat, dan tonase berubah-ubah, yang berpengaruh pada fluktuasi konsumsi energi. Analisis regresi multivarian digunakan untuk menyelidiki variabel-variabel independen yang berpengaruh langsung terhadap konsumsi energi sistem konveyor, yaitu jumlah intermiten atau *start-stop* konveyor, durasi tonase, dan komposisi *roller*. Peningkatan performa pada variabel-variabel ini menghasilkan kesimpulan bahwa penambahan tiga teknisi terampil dapat meningkatkan kualitas *preventive maintenance* (PM) yang mengurangi *breakdown* fasilitas sebesar 80%, serta berpotensi menghemat energi hingga 33.184,26 kWh/bulan. Durasi tonase optimal per hari untuk meminimumkan konsumsi energi, namun tetap memenuhi kebutuhan batubara yang ditransportasikan sebesar 22.000 ton per hari adalah berturut-turut 0,30; 2,56; dan 13,30 jam pada tonase <1000, 1000-1200, dan 1200-1400 tph, berpotensi menghemat energi hingga 9.462,44 kWh/bulan. Sedangkan skenario penggantian *roller* berumur di atas dua tahun sebesar 2% dari total keseluruhan berpotensi menghemat energi hingga 16.997,44 kWh/bulan.

**Kata Kunci** : CHS, UNIDO, Sistem Konveyor, Analisis Regresi Multivarian, Intermiten, Durasi Tonase, *Roller*

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2024, Vol. 5, No. 2, pp 130 – 144

Received : 22 Juli 2024

Accepted : 24 Juli 2024

Published : 31 Juli 2024



**Copyright**: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

**Abstract** : Coal-Fired Power Plant (CFPP) Java IV is one of the largest CFPP in Indonesia, with coal transportation from jetty to bunker stretching over five kilometers, managed by Coal Handling System (CHS). The United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) provides energy management guidelines based on ISO 50001 in industrial sector. These guidelines focus on the main energy-consuming part of the CHS, conveyor system, as the primary target for energy savings. The operation of the extensive CHS conveyor system, with undulating structure, wide area, unstable wind and weather conditions, leads to the increasing of intermittent frequency and fluctuating tonnage, which affecting energy consumption. Multivariate regression analysis is used to investigate the independent variables directly impacting the conveyor system's energy consumption, specifically the number of intermittent or start-stop events, tonnage duration, and roller composition. Improvements in these variables conclude that adding three skilled technicians might enhance the quality of preventive maintenance (PM), reducing facility breakdowns by 80% and potentially saving up to 33,184.26 kWh/month. The optimal daily tonnage duration to minimize energy consumption while supplying the coal transportation demands of 22,000 tons per day is respectively 0.30; 2.56; and 13.30 hours for tonnages <1000, 1000-1200, and 1200-1400 tph, potentially saving up to 9,462.44 kWh/month. Meanwhile, replacing rollers over two years old by 2% of the total can potentially save up to 16,997.44 kWh/month.

**Keywords** : CHS, UNIDO, Conveyor System, Multivariate Regression Analysis, Intermittent, Tonnage Duration, Roller

---

## 1. Pendahuluan

Dalam beberapa dekade, sistem *belt conveyor* (BC) telah berperan sebagai alat transportasi utama pada pengelolaan batubara atau *Coal Handling System* (CHS). Saat ini sebagian besar BC dioperasikan dengan mode kecepatan tetap, meskipun proses produksinya tidak berjalan terus menerus, sehingga seringkali berada pada kondisi operasional tanpa beban atau setengah beban, yang berarti berada pada kondisi efisiensi rendah (Mu et al., 2020). Banyak penelitian dan penerapan teknologi penggerak kecepatan variabel atau *variable speed drive* (VSD) pada sistem BC, dimana kecepatan konveyor dapat diatur sesuai kebutuhan sehingga mampu menghemat konsumsi energi (Zeng et al., 2015). Selain menghemat energi, biaya perawatan menjadi lebih rendah dengan teknologi VSD. Namun fakta studi di lapangan menunjukkan mayoritas motor listrik di industri masih menggunakan sistem *Direct Online* (DOL) (Kucuk & Ajder, 2022), yang berarti daya disalurkan langsung tanpa soft starter, karena biaya investasinya jauh lebih rendah dibandingkan VSD. Oleh karena itu, diperlukan metode lain dalam hal efisiensi energi pada sistem yang sudah terpasang.

Asesmen pengelolaan energi pada CHS dapat menggunakan pedoman yang disediakan oleh United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). UNIDO merupakan organisasi yang mengawasi perkembangan industri berkelanjutan di dunia, yang telah meluncurkan program terkait Sistem Manajemen Energi (SME) berdasarkan ISO 50001 (Arthur, 2021). Tujuannya adalah untuk menyediakan kerangka kerja dan pedoman untuk mengevaluasi dan mengembangkan SME, sehingga membantu mengidentifikasi peluang penghematan energi, mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK), dan meningkatkan kinerja energi secara berkelanjutan. SME menggunakan konsep dasar *Plan, Do, Check, Action* (PDCA), yaitu sebuah model manajemen yang diperkenalkan oleh Walter Shewhart

(Donovan, 2014). Pada langkah perencanaan SME, terdapat beberapa kegiatan *Energy Review* (ER) untuk mengidentifikasi kinerja sistem energi dan memberikan peluang perbaikan. Program efisiensi energi ini juga merupakan salah satu poin penilaian dari Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (PROPER), dimana perusahaan yang dijadikan obyek pada penelitian ini memiliki target naik peringkat dari Proper Biru menjadi Proper Hijau pada tahun 2026.

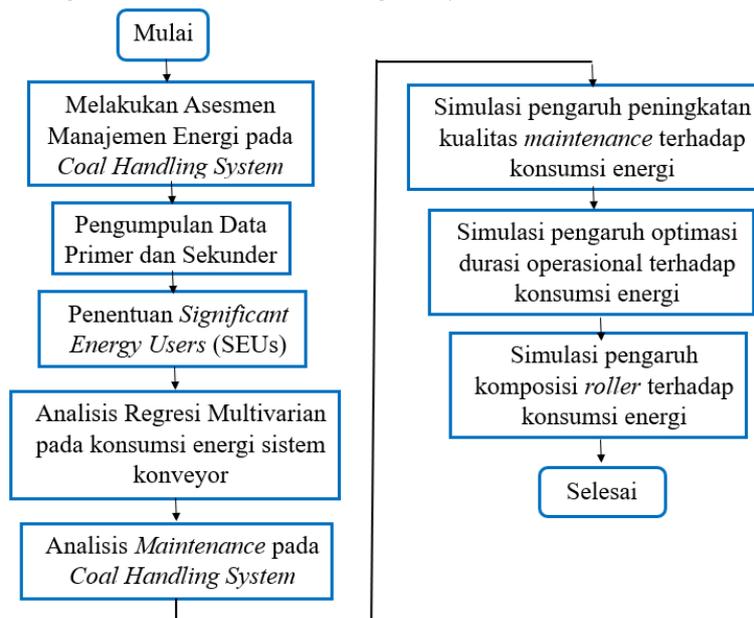
Sebagai salah satu pengguna energi terbesar, fasilitas BC-CHS berpotensi untuk dijadikan sasaran utama pada asesmen energi. Hal yang patut diperhatikan adalah variabel-variabel yang memiliki potensi berpengaruh signifikan pada konsumsi energi, seperti intermiten atau pengaturan tonase. BC juga memiliki beberapa komponen penyusun strukturnya yang berpengaruh pada konsumsi energi, seperti roller, dimana memiliki lifetime pendek dan perlu diganti secara rutin. Sebagai bagian utama sistem BC, roller mempunyai bantalan yang berputar sesuai fungsinya (Vasić et al., 2020). Bantalan tersebut akan terkena beban langsung yang ditimbulkan oleh pengangkutan batubara dan belt tension. Semakin lama umur *roller*, semakin besar friksi pada bantalan dan energi yang dibutuhkan untuk memutarinya

## 2. Metode

Penelitian potensi penghematan energi pada CHS dilakukan secara bertahap mulai dari *record* kinerja energi selama dua tahun menggunakan *tool* UNIDO dengan *output* sistem konveyor sebagai obyek tujuan efisiensi energi. Kemudian dilanjutkan dengan analisis regresi multivarian pada variabel-variabel independen yang berpengaruh pada pola konsumsi energi sistem konveyor, hingga upaya-upaya optimasi yang dapat dilakukan terhadap variabel-variabel tersebut dan bertujuan pada penghematan energi.

### 2.1. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian pada studi potensi penghematan energi CHS ditunjukkan pada Gambar 1 untuk menghasilkan target terarah dan sesuai dengan tujuan.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Dalam penelitian ini, perhitungan dilakukan dengan Ms. Excell dan MATLAB. Tahapan penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 1, dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengambilan data berdasarkan historikal pemakaian energi dan kerusakan peralatan yang terjadi di area CHS dari HMI, MAXIMO, dan logbook operasional dalam dua tahun terakhir.
2. Melakukan tahapan asesmen manajemen energi listrik dengan menggunakan panduan Sistem Manajemen Energi (SME) dari UNIDO dan menentukan *Significant Energi User* (SEU).
3. Melakukan analisis regresi multivarian pada variabel-variabel independen dan dependen untuk tiga bulan terakhir, dengan melihat grafik *Specific Energi Consumption* (SEC).
4. Melakukan analisis maintenance dan memberikan rekomendasi untuk meminimumkan fungsi energi.
5. Melakukan optimasi pada jam-jam operasional berdasarkan tonase dan memberikan rekomendasi untuk meminimumkan fungsi energi.
6. Memperhitungkan skenario perbaikan dengan melakukan penggantian bagian tertentu dari fasilitas dan menghitung potensi penghematan yang diperoleh.

## 2.2. Metode Penelitian

Identifikasi penghematan energi pada operasional CHS-PLTU menggunakan metode penelitian yang diperoleh dari data primer dan sekunder, diantaranya adalah:

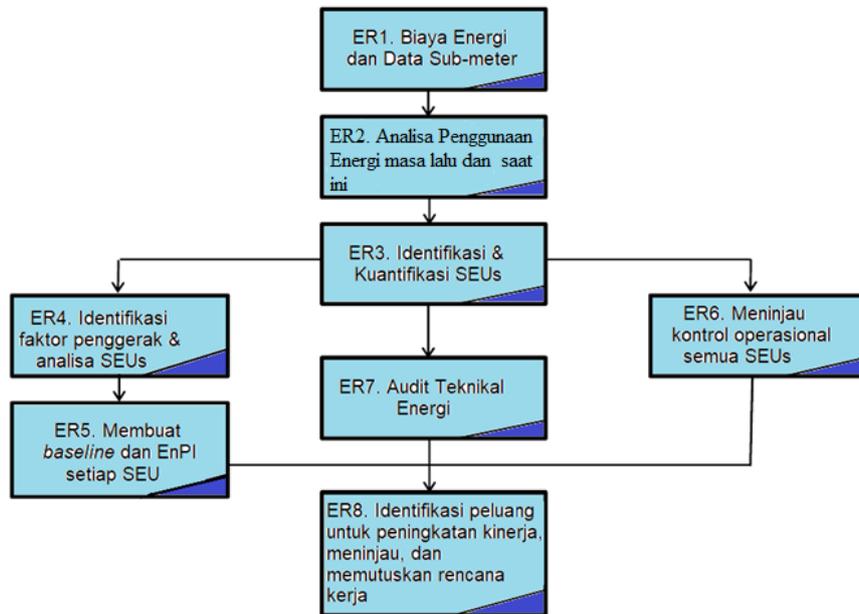
1. Studi Literatur  
Studi literatur diperlukan sebagai langkah awal membandingkan kondisi yang relevan dari beberapa riset sebelumnya dan kondisi ideal yang seharusnya, terhadap kondisi yang ada pada organisasi saat ini. Literatur ini termasuk data statistik yang diterbitkan oleh riset perusahaan, produk/vendor, buku, jurnal atau laporan ilmiah, hingga sumber informasi dari media massa
2. Observasi Lapangan  
Observasi langsung di lapangan untuk memperoleh data primer dari HMI, MAXIMO, dan logbook harian operasional. Data primer juga bisa dihitung dari pengamatan langsung, misalnya data pemakaian energi berdasarkan beban fasilitas (motor) dan data terbaca secara *real-time* pada metering *switchgear*.
3. Wawancara  
Metode ini digunakan untuk memperoleh informasi langsung dari subyek penelitian, yaitu tim operasional dan *maintenance* dengan tujuan memperkuat hasil penelitian.
4. Simulasi Potensi Penghematan Energi  
Simulasi yang dilakukan bertujuan untuk memperoleh hasil perhitungan matematis apabila suatu upaya dilakukan pada variabel independen, dan pengaruhnya terhadap konsumsi energi hingga keuntungan finansial yang dapat diperoleh.

## 2.3. Program UNIDO Pada Sistem Manajemen Energi dan ISO 50001

*United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO), organisasi yang mengawasi perkembangan industri berkelanjutan di dunia, meluncurkan program terkait Sistem Manajemen Energi (SME) dan ISO 50001 untuk sektor industri (Arthur, 2021). Tujuan dari ISO 50001 ini adalah memberikan kerangka kerja dan *tools* untuk menilai dan mengembangkan sistem manajemen industri

yang efektif, sehingga membantu industri dalam mengidentifikasi peluang penghematan energi, mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK), dan meningkatkan kinerja energi secara terus-menerus.

Sistem Manajemen Energi (SME) menggunakan konsep dasar **Plan, Do, Check, Action** (PDCA), yaitu model manajemen yang diperkenalkan pertama kali oleh Walter Shewhart (Donovan, 2014). Pada tahapan perencanaan, terdapat delapan aktivitas *Energy Review* (ER) yang dilakukan untuk mengidentifikasi kinerja energi suatu sistem dan memberikan peluang perbaikannya, sesuai ditunjukkan pada diagram alir Gambar 2.



Gambar 2. Tahapan Perencanaan *Energy Review*

## 2.4. Perencanaan Energi

Perencanaan Energi menurut ISO 50001 dapat dilakukan dengan melakukan langkah-langkah mulai dari penentuan *baseline*, pembuatan model statistik, analisis regresi berganda dan CUSUM, dan mengontrol kinerja.

### 1. Menentukan *Baseline* dan Model Statistik

Baseline energi adalah titik awal atau referensi yang digunakan untuk mengukur dan membandingkan perubahan kinerja energi. Sedangkan membuat model statistik dalam perencanaan energi melibatkan beberapa langkah penting untuk memastikan bahwa analisis yang dilakukan akurat dan dapat diandalkan (Kannan & Boie, 2018). Untuk melakukan analisis regresi linear di Microsoft Excel, pertama kumpulkan data dengan minimal dua variabel independen dan satu variabel dependen. Buka aplikasi Excel dan buat worksheet baru. Masukkan data tersebut ke dalam worksheet dan buat tabel dengan tiga kolom untuk variabel-variabel tersebut. Beri judul setiap kolom untuk identifikasi. Akses menu analisis regresi linear di Excel melalui "Data Analysis" di menu "Data". Jika tidak muncul, aktifkan pada "Analysis ToolPak". Pilih "Regression" di kotak dialog "Data Analysis", masukkan rentang data variabel, centang opsi "Labels" jika kolom sudah berjudul, pilih "Output Range" untuk hasil, dan klik OK. Excel akan menampilkan persamaan *least square multivariat* dan koefisien dari masing-masing variabel independen untuk prediksi nilai variabel dependen.

## 2. Analisis *Cumulative Sum* (CUSUM)

Analisis CUSUM adalah metode statistik untuk mendeteksi perubahan kecil dalam proses secara kumulatif (Lin et al, 2023), dengan menghitung penjumlahan deviasi antara data aktual dan nilai referensi. Metode ini sensitif terhadap perubahan kecil, memungkinkan deteksi dini masalah. Langkah-langkah utama mencakup menentukan nilai referensi, menghitung deviasi, dan memplot nilai CUSUM. Keuntungan CUSUM meliputi sensitivitas tinggi, pemantauan *real-time*, dan aplikasi dalam kontrol proses industri serta penghematan energi.

## 3. Kontrol Kinerja

Setelah analisis CUSUM, langkah berikutnya adalah menghitung varians antara konsumsi aktual dan target (Montgomery, 2019). Nilai positif menunjukkan konsumsi di atas target, dan nilai negatif menunjukkan konsumsi di bawah target. Grafik kontrol merepresentasikan varians terhadap standar, dengan batas kontrol atas dan bawah yang mencerminkan varians yang dapat diterima. Grafik ini cocok untuk kontrol waktu nyata, dan diterapkan harian, mingguan, atau per batch.

## 2.5. Upaya Perbaikan untuk Memperbaiki Grafik Kontrol Kinerja

Simulasi dilakukan pada beberapa variabel independen yang berpengaruh terhadap variabel dependen, yang digunakan dalam analisis regresi, dengan tujuan memperbaiki nilai varians tetap berada dalam batas kendali atas dan bawah pada grafik kontrol kinerja.

### 1. Perbaikan *Maintenance*

Intermiten atau *start-stop* merupakan salah satu variabel independen yang berpengaruh terhadap konsumsi energi. Intermiten berkaitan dengan kualitas *maintenance* suatu fasilitas. Semakin baik kualitas *maintenance*, semakin sedikit jumlah *breakdown* yang terjadi, semakin sedikit pula konsumsi energi dari fasilitas tersebut (Harahap, 2021). Peningkatan kualitas *preventive maintenance* (PM) dapat meningkatkan reabilitas peralatan (Imam & Raza, 2013), yang berarti juga menurunkan nilai *breakdown* peralatan. Kualitas dalam bidang *service* dapat diketahui dari tingkat kepatuhan terhadap jadwal, waktu, durasi, tugas, sumber daya, dan pengisian laporan (Meier et al, 2019). Sehingga, peninjauan jumlah pekerja yang terampil merupakan salah satu cara meningkatkan kualitas PM. Hubungan antara jumlah PM yang dapat dilakukan dengan jumlah *manpower* yang ideal ditentukan sebagai berikut:

$$total\ PM = \frac{total\ manpower\ x\ total\ working\ time}{total\ mesin\ x\ durasi\ melakukan\ PM} \quad (1)$$

Kehandalan diukur dengan banyaknya kegagalan dalam kurun waktu tertentu.  $R(t)$  adalah fungsi kehandalan yang menyatakan probabilitas sistem berfungsi dengan baik hingga waktu tertentu ( $t$ ), sedangkan  $R_{PM}(t)$  fungsi kehandalan setelah dilakukan PM. Jika  $\lambda$  adalah tingkat kegagalan (*failure rate*) dari sistem, maka peningkatan kehandalan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{R_{PM}(t)}{R(t)} = e^{(\lambda - \lambda_{PM})t} \quad (2)$$

Dan pengurangan *breakdown* dinyatakan dalam Persamaan (3):

$$Pengurangan\ breakdown = \lambda_{PM} - \lambda \quad (3)$$

## 2. Optimasi Durasi Operasional

Persamaan yang dihasilkan dari analisis regresi multivarian dapat digunakan sebagai dasar untuk melakukan perubahan pola operasional yang menuju pada penghematan energi, dengan mempertimbangkan volume batubara yang ditransportasikan dan tingkat *fatigue* yang dialami operator. Persamaan ini dapat dioptimalkan menggunakan tool FMINCON di MATLAB, yang menyelesaikan masalah optimasi non-linear dengan berbagai kendala. FMINCON, singkatan dari "find minimum constrained," menggunakan algoritma seperti *interior-point*, *trust-region-reflective*, *sequential quadratic programming* (SQP), dan *active-set* untuk menemukan nilai minimum fungsi dengan batasan tertentu (MathWorks). Fungsi yang dimaksud adalah fungsi pada konsumsi energi yang diminimumkan dengan mengatur konfigurasi berbagai nilai variabel independen (Sela, 2020).

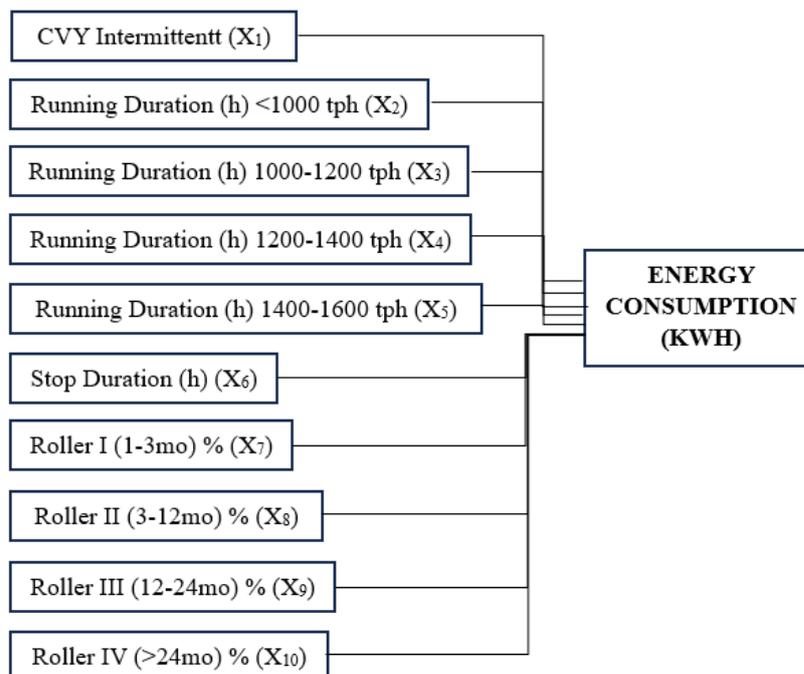
## 3. Penggantian *Roller*

*Roller* merupakan salah satu bagian sistem konveyor yang rutin dilakukan penggantian. Saat ini penggantian *roller* dilakukan ketika kondisi rusak saja, kecuali dalam periode perawatan tahunan (*outage*). Oleh karena itu terkadang kerusakan *roller* juga menyebabkan *breakdown* fasilitas. Selain peningkatan PM, penggantian *roller* yang terindikasi rusak juga dianjurkan. *Roller* baru dengan *bearing* baru mampu berputar lebih halus dan stabil, sehingga cukup mengurangi konsumsi energi, sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya bahwa semakin lama *bearing* beroperasi menghasilkan pola karakteristik keausan yang sama (Machado et al., 2019).

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Analisis Regresi Multivarian Sistem Konveyor

Berikut ini merupakan bagan yang menunjukkan sepuluh variabel independen yang berfungsi sebagai input:



Gambar 3. Variabel independen dan dependen pada perencanaan energi sistem konveyor

Data masukan diambil dari April hingga Juni 2024 di CHS PLTU Jawa IV Unit 5-6. April dianggap sebagai *baseline* sebelum *improvement* dimulai, dengan variabel intermiten dan tonase bervariasi, namun komposisi *roller* tetap. Analisis regresi multivarian digunakan untuk estimasi konsumsi energi dan dibandingkan dengan konsumsi aktual. *Baseline* konsumsi energi periode April adalah  $Y_1$ , persamaan saat periode pergantian roller adalah  $Y_2$  (data selama *outage* Bulan Mei), dan kondisi paska pergantian roller adalah  $Y_3$  (data Bulan Juni) dengan asumsi konsumsi energi seharusnya cenderung lebih turun dibandingkan sebelumnya. Varians dihitung sebagai selisih konsumsi energi aktual dengan estimasi, lalu dilakukan perhitungan CUSUM. Maka diperoleh persamaan konsumsi energi sebagai berikut:

$$Y_1 = 70683.72 + 41.35X_1 - 478.75X_2 - 296.73X_3 - 142.51X_4 - 2916.52X_6 \quad (4)$$

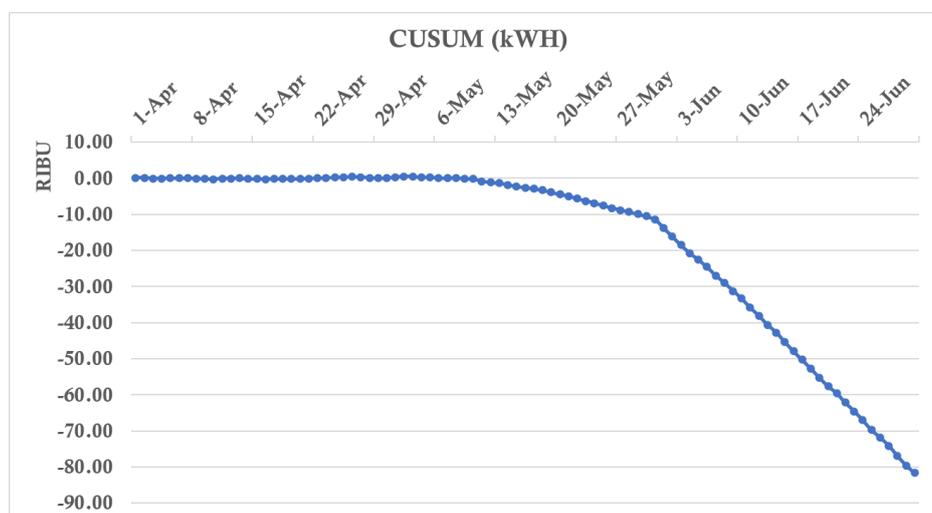
$$Y_2 = 61748.73 + 59.96X_1 - 336.29X_2 - 33.39X_3 + 143.59X_4 + 835.43X_5 - 2625.58X_6 - 38.96X_7 + 35.62X_{10} \quad (5)$$

$$Y_3 = 64944 + 59.11X_1 - 522.41X_2 - 347.73X_3 - 83.33X_4 - 2682.84X_6 \quad (6)$$

Persamaan-persamaan konsumsi energi di atas diperlukan untuk menghitung CUSUM dan batas kendali dari pola konsumsi energi, serta simulasi perbaikan dan peningkatan performa dapat diaplikasikan pada persamaan  $Y_2$  dan  $Y_3$ .

### 3.2. Analisis CUSUM dan Batas Kendali

Gambar 4 menunjukkan grafik CUSUM, dimana nilai negatif menunjukkan adanya potensi penghematan energi, yang secara keseluruhan, total sekitar 300.000 kWh akan disimpan, dibandingkan dengan apa yang akan dikonsumsi jika kinerja dasar berlanjut untuk semua periode.



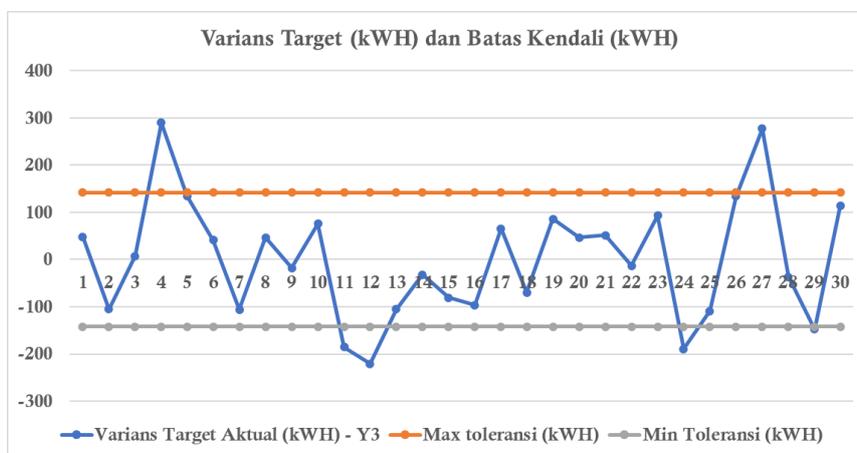
Gambar 4. Grafik CUSUM konsumsi energi pada CHS

Perbandingan  $Y_1$  dan  $Y_3$  memberikan informasi seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Kebutuhan energi dasar mengalami penurunan sebesar 8,05%. Jumlah *start-stop* konveyor, atau indikasi *breakdown* mengalami kenaikan sebesar 30,05%, yang berarti perlu dilakukan upaya pengendalian. Sedangkan durasi pengoperasian konveyor pada beberapa variasi tonase cenderung mengalami penurunan, namun sulit untuk dapat dipastikan, dikarenakan perbedaan keahlian operator dalam mengatur *flow* tonase.

Tabel 1. Perbandingan periode kinerja April (*baseline*) dengan Juni

Parameter	Variabel	Y <sub>1</sub>	Y <sub>3</sub>	Perbedaan (%)
Kebutuhan energi dasar (intercept)	-	70,683.72	64,994.99	8.05%
CVY Intermittent	X1	41.35	59.11	30.05%
Running Duration (h) <1000 tph	X2	-478.75	-522.41	9.12%
Running Duration (h) 1000-1200 tph	X3	-296.73	-347.73	17.19%
Running Duration (h) 1200-1400 tph	X4	-142.51	-83.33	71.01%
Stop Duration (h)	X6	-2,916.52	-2,682.85	8.71%

Bulan Juni yang dianggap memiliki *trend* terbaik dengan CUSUM paling negatif, menunjukkan konsumsi energi setiap harinya lebih rendah dibandingkan dengan *baseline*, hingga diperoleh varians, serta batas kendali atas dan bawahnya seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Varians target dan batas kendali

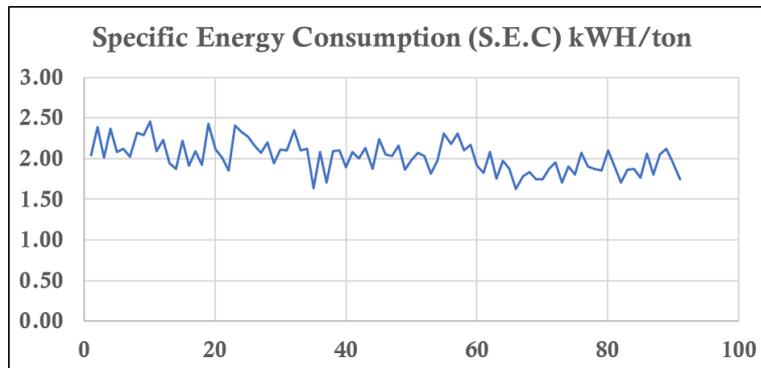
Titik-titik yang berada di luar batas atas dan batas bawah yang ditentukan, mengindikasikan masih perlunya dilakukan tindakan-tindakan efisiensi energi. Upaya-upaya yang dapat dilakukan dalam meminimumkan fungsi dari persamaan 2 dan 3 dalam koridor batasan tertentu sesuai kebutuhan operasional, keamanan, dan kesehatan karyawan meliputi:

1. Mengurangi tingkat intermiten (*start-stop*) pengoperasian konveyor
2. Mengatur tonase seefektif mungkin untuk meminimalkan konsumsi energi, namun tetap memenuhi kebutuhan operasional.
3. Melakukan *improvement* yang benar-benar bisa dilakukan, contohnya pada penggantian *roller*.

### 3.3. Specific Energy Consumption (SEC)

SEC diperhitungkan untuk mengetahui rasio penggunaan energi harian dibandingkan dengan banyaknya tonase batubara yang dikirimkan oleh sistem konveyor. Setiap harinya, CHS rata-rata mengirimkan batubara sebanyak 22.000 ton untuk digunakan dalam proses pembakaran *boiler*. SEC selama Bulan April hingga Juni 2024 ditunjukkan pada Gambar 6, dimana rata-rata SEC pada *baseline* (April) adalah 2,14, kemudian menurun pada periode *outage* (Mei) menjadi 2,04. *Trend* SEC terus menurun hingga di angka rata-rata 1.94 pada Bulan Juni, yaitu mulai hari ke-60. Namun demikian,

pasokan batu bara masih tetap terpenuhi pada angka 22.000 ton per hari. Hal ini mengindikasikan pergantian *roller* merupakan salah satu variabel independen yang berpengaruh pada profil konsumsi energi.



Gambar 5. Grafik SEC periode April - Juni

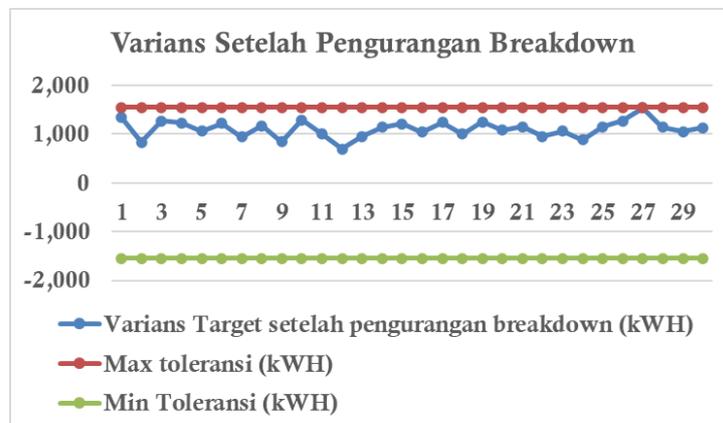
### 3.4. Pengaruh Penurunan *Breakdown* Pada Konsumsi Energi

Saat ini jumlah teknisi yang melakukan pekerjaan *preventive maintenance* (PM) hanya 5 orang. Dengan jumlah total PM sebanyak 65 PM per bulan untuk 20 fasilitas konveyor. Jam kerja efektif per hari adalah 7 jam selama 25 hari kerja, dan durasi 1 jam setiap PM-nya. Maka dengan Persamaan (1) dibutuhkan penambahan *manpower* sebanyak 3 orang.

Perbandingan PM dan CM pada CHS-PLTU Jawa IV dalam kurun waktu satu tahun terakhir adalah 7:5. Sedangkan menurut standar *world class maintenance* (WCM) adalah sebesar 6:1 (Siswanto, 2018). Jika penambahan *manpower* dilakukan, kualitas PM merujuk pada perbandingan WCM dan dijaga konsisten, maka kehandalan sistem juga akan meningkat secara eksponensial. Presentasi pengurangan *breakdown* dihitung berdasarkan tingkat *failure rate*-nya sebagai berikut:

$$\frac{\lambda - \lambda_{PM}}{\lambda} \times 100\% = \frac{\frac{5}{7} - \frac{1}{7}}{\frac{5}{7}} \times 100\% = 80\%$$

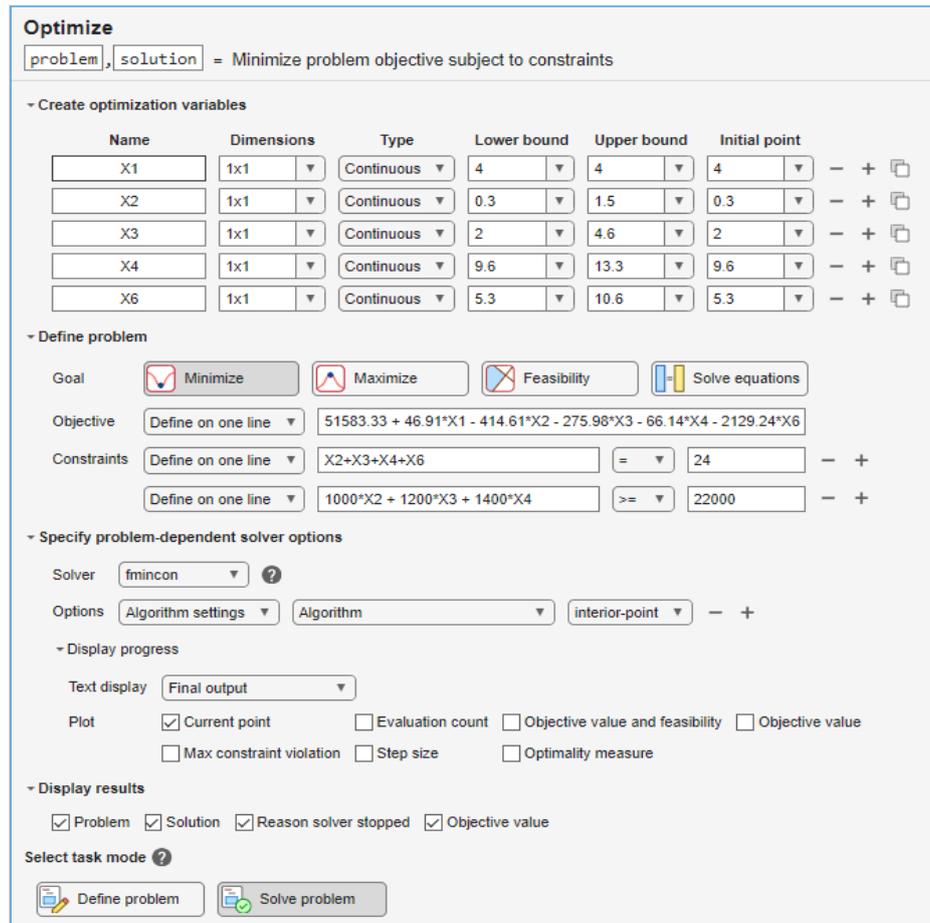
Apabila presentasi penurunan *breakdown* ini diaplikasikan ke variabel  $X_1$  pada target konsumsi energi persamaan  $Y_3$ , maka diperoleh perbaikan varians dalam batas kendali yang baru, seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Dengan memperhatikan penurunan *breakdown* dan asumsi variabel lain konstan, diperoleh potensi penghematan (sebagai penjumlahan dari semua varians) sebesar 33.184,26 kWh per bulan dan *trend* nilai varians berada dalam batas kendali atas dan bawah.



Gambar 6. Varians dan batas kendali setelah penurunan *breakdown*

### 3.5. Pengaruh Optimasi Durasi Operasional Konveyor

Persamaan  $Y_3$  menunjukkan bahwa variasi tonase berpengaruh pada naik-turunnya konsumsi energi dari pengoperasian konveyor. Optimasi fungsi tujuan adalah meminimalkan nilai  $Y_3$ , dengan menentukan kombinasi nilai  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ , dan  $X_6$ , namun mempertahankan batasan tertentu masing-masing nilai variabel  $X$  sesuai data historikal, serta menjaga pasokan batubara harian sebesar 22.000 ton. Berikut ini merupakan *output* dari optimasi variabel independen dengan *Optimtool* dari MATLAB menggunakan *Fmincon*.

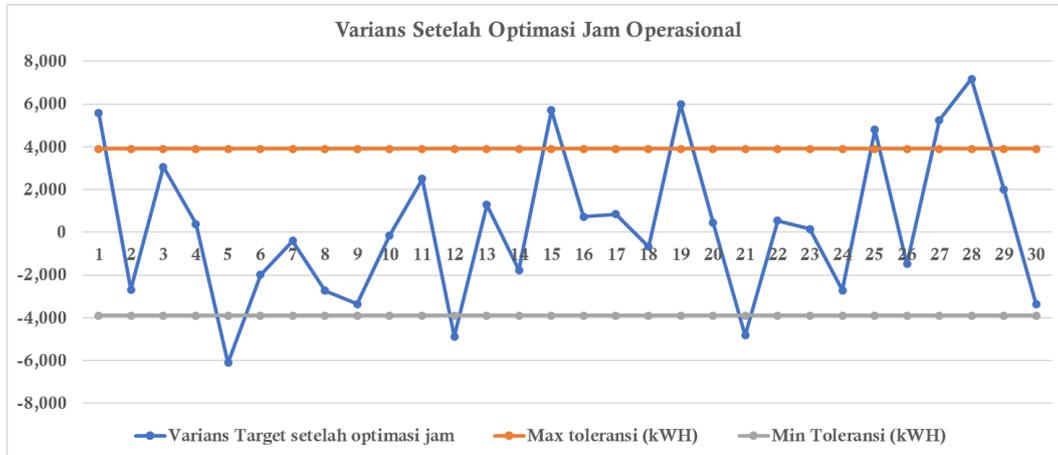


Gambar 7. Input data dan *Solve problem* optimasi dengan *fmincon*

```
<stopping criteria details>
solution = struct with fields:
    X1: 4
    X2: 0.3000
    X3: 2.5667
    X4: 13.3000
    X6: 7.8333
reasonSolverStopped =
    OptimalSolution
objectiveValue = 3.3380e+04
```

Gambar 8. Hasil optimasi dengan *fmincon toolbox*

Apabila variabel-variabel di atas dimasukkan pada persamaan target konsumsi energi ( $Y_3$ ), maka diperoleh perubahan varians dalam batas kendali yang baru, seperti ditunjukkan pada Gambar 9, dengan total penghematan sebesar 9.462,44 kWh.



Gambar 9. Varians dan batas kendali setelah optimasi durasi tonase

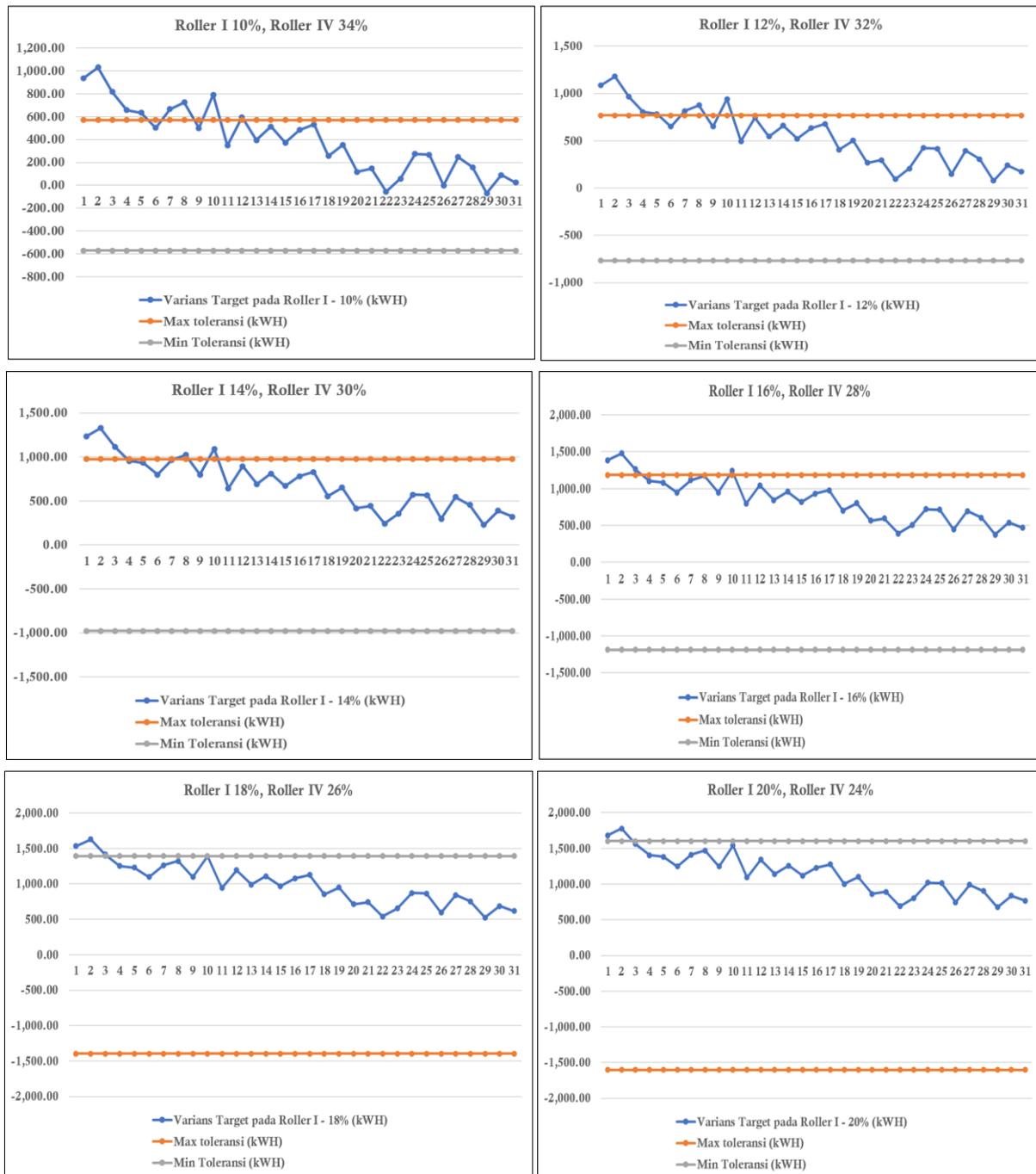
Dari gambar di atas nampak bahwa penggunaan energi di beberapa hari tertentu masih berada di luar batas kendali yang ditentukan. Hal ini dikarenakan permintaan batubara harian yang berubah-ubah tergantung kebutuhan unit utama, sehingga operator menyesuaikan permintaan. Grafik di atas juga menunjukkan bahwa optimasi durasi pengoperasian tidak terlalu signifikan terhadap perubahan konsumsi energi, namun masih cukup baik untuk dijadikan acuan bagi operator karena tidak memerlukan investasi dan memiliki potensi menghemat energi sebesar 9.462,44 kWh.

### 3.6. Pengaruh *Improvement Roller*

Pergantian *roller* merupakan kegiatan rutin *maintenance* yang dilakukan dalam kondisi rusak, sesuai dengan *Working Instruction* (WI) saat ini. Sehingga ada kemungkinan bahwa pergantian *roller* dilakukan ketika aktivitas operasional sedang berlangsung (*breakdown maintenance*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Komposisi usia *roller* yang bervariasi menjadi variabel independen yang mempengaruhi konsumsi energi. Berdasarkan Persamaan  $Y_2$ , komposisi *roller* berpengaruh pada konsumsi energi. Dengan melakukan perhitungan dan observasi pada peningkatan presentase jumlah *roller* yang baru (Roller I) dan pengurangan *roller* berumur di atas dua tahun (Roller IV), dengan asumsi variabel lain konstan, maka diperoleh grafik varians target dan batas kendali seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Aktivitas penggantian *roller*



Gambar 12. Varians dan batas kendali pada beberapa variasi komposisi roller

Gambar 12 menunjukkan titik varians di luar batas kendali pada hari-hari awal, namun terus menurun dalam batas kendali hingga hari terakhir. Pada variasi pertama dengan Roller I 10% - Roller IV 34% hingga variasi terakhir pada Roller I 20% - Roller IV 24%, nampak kecenderungan bahwa varians semakin turun dan masuk ke dalam batas kendali. Hal ini menunjukkan bahwa semakin meningkat jumlah roller baru dan semakin berkurang jumlah roller berusia di atas dua tahun, maka kendali konsumsi energi semakin baik.

Selanjutnya adalah melakukan studi kelayakan penggantian *roller* dengan metode *simple payback period*. *Working Instruction* (WI) saat ini menyebutkan bahwa penggantian *roller* dilakukan ketika rusak saja (*breakdown maintenance*). Setiap penggantian *roller* sebesar 2%, dengan persamaan regresi  $Y_2$ , diperoleh penghematan energi 16,997.44 kWh/bulan. Pada penelitian ini, perhitungan yang jika diaplikasikan, tidak menggunakan *budget maintenance*, melainkan *budget* investasi. Selain investasi pembelian *roller*, diperlukan biaya pekerja harian lepas dan lainnya seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan *Simple Payback Period* Investasi Penggantian *Roller*

Total Keseluruhan Roller di CHS	9,904
Penggantian Roller Baru	2%
Total Penghematan Energi/Bulan (kWh)	16,997.44
<b>Total Pendapatan dari Penghematan Energi/Bulan</b>	<b>Rp16,942,025.36</b>
Biaya Manpower/hour daywork	Rp14,168
Total Manpowers tambahan (orang)	10
Target Pekerjaan (hari)	20
Total Manhours (8 jam per hari)	1,600
<b>Total Biaya Manpower</b>	<b>Rp22,668,800</b>
Harga Carrier Roller (Ref.PO PT Rollent Indonesia)	Rp591,000
<b>Investasi yang dibutuhkan</b>	<b>Rp117,018,000.00</b>
<b>Total Manpower + Investasi</b>	<b>Rp139,686,800.00</b>

Dengan skenario investasi penggantian *roller* baru sebanyak 2% dan investasi total Rp139.686.800,00, maka diperkirakan pengembalian biaya investasi pada bulan ke-9. Namun, perlu diperhatikan seiring berjalannya waktu, *roller* lain yang tidak digantikan sebelumnya, akan mengalami penuaan. Sehingga investasi dalam penelitian ini dapat dipertimbangkan, namun kurang urgensi secara ekonomi. Atau dengan kata lain, tetap dilakukan hanya pada saat *maintenance* tahunan saja.

#### 4. Kesimpulan

Upaya perbaikan pada variabel-variabel yang mempengaruhi konsumsi energi sistem konveyor menghasilkan beberapa kesimpulan. Pertama, hasil analisis *maintenance* merekomendasikan penambahan 3 karyawan terampil untuk meningkatkan kualitas *preventive maintenance* (PM). Tindakan ini bila dilakukan dengan benar mampu mengurangi *breakdown* hingga 80%, dan menghemat energi hingga 33.184,26 kWh per bulan. Kedua, optimasi durasi pengoperasian menghasilkan variabel independen dari tonase berturut-turut <1000 tph, 1000-1200 tph, dan 1200-1400 tph selama 0,3; 2,5667; dan 13,3 jam per hari dan dapat dijadikan sebagai acuan pengoperasian, berpotensi menghemat energi 9.462,44 kWh per bulan. Ketiga, simulasi penggantian 2% atau 198 roller baru berpotensi menghemat energi sebesar 16.997,44 kWh per bulan. Dimana dengan investasi total Rp139.686.800,00, maka *payback* diperoleh pada bulan ke-9, sehingga skenario ini sebaiknya tetap dilakukan saat pemeliharaan tahunan.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Divisi Pemeliharaan dan Operasi *Coal Handling System* PLTU Jawa IV, yang telah memberikan akses data untuk penelitian ini. Tanpa dukungan mereka, penelitian ini tidak akan dapat dilakukan.

## Daftar Pustaka

- Arthur, C. (2021, November 9). What is an energy management system? United Nations Industrial Development Organization. <https://www.unido.org/stories/what-energy-management-system>
- Donovan, M. (2014, September 17). PDCA is the Breath of Lean. Lean Enterprise Institute. <https://www.lean.org/the-lean-post/articles/pdca-is-the-breath-of-lean/>
- Harahap. (2021). Analisis Peningkatan Produktivitas Kerja Mesin Dengan Menggunakan Metode Total Productive Maintenance (TPM) di PT Casa Woodworking Industry. (n.d.).
- Imam, S. F., Raza, J., & Ratnayake, R. M. C. (2014). World Class Maintenance (WCM): Measurable indicators creating opportunities for the Norwegian Oil and Gas industry. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 1479–1483. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2013.6962656>
- Kannan, R., & Boie, W. (2018). Energy management practices in SME—case study of a bakery in Germany. Energy Conversion and Management, 44(6), 945–959. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00079-1)
- Kucuk, S., & Ajder, A. (2022). Analytical voltage drop calculations during direct on line motor starting: Solutions for industrial plants. Ain Shams Engineering Journal, 13(4), 101671. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101671>
- Lin, P., Zheng, F., Shin, M., & Liu, X. (2023, July 17). CUSUM learning curves: what they can and can't tell us.
- Machado, T. H., Alves, D. S., & Cavalca, K. L. (2019). Investigation about journal bearing wear effect on rotating system dynamic response in time domain. Tribology International, 129, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.004>
- Meier, H., Lagemann, H., Morlock, F., & Rathmann, C. (2019). Key performance indicators for assessing the planning and delivery of industrial services. Procedia CIRP, 11, 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.056>
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. (2019). Introduction to Linear Regression Analysis: Fifth Edition. John Wiley & Sons.
- Mu, Y., Yao, T., Jia, H., Yu, X., Zhao, B., Zhang, X., Ni, C., & Du, L. (2020). Optimal scheduling method for belt conveyor system in coal mine considering silo virtual energy storage. Applied Energy, 275, 115368. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115368>
- Sela, L. (2020). *Lecture Notes: Nonlinear Optimization and Matlab Optimization Toolbox Example*. Diambil 11 Juni 2024 [https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1092&context=ecstatic\\_all](https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1092&context=ecstatic_all)
- Siswanto, B. (2018). Peningkatan Efektifitas Pelaksanaan *Preventive Maintenance* Dengan Pendekatan Metode *House of Risk* (HOR). Institut Teknologi Sepuluh November.
- Vasić, M., Stojanović, B., & Blagojević, M. (2020). Failure analysis of idler roller bearings in belt conveyors. Engineering Failure Analysis, 117, 104898. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104898>
- Zeng, F., Wu, Q., Chu, X., & Yue, Z. (2015). Measurement of bulk material flow based on laser scanning technology for the energy efficiency improvement of belt conveyors. Measurement, 75, 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.05.041>