KAMPUS AKADEMIK PUBLISING
Jurnal Sains Student Research (JSSR)
Vol.4, No.5 Oktober 2026
e-ISSN: 3025-9851, p-ISSN : 3025-986X, Hal 1355-1372
DOI : https://doi.org/10.61722/jssr.v4i5.12745

Pemodelan Matematis Konsumsi Daya *Belt Conveyor* menggunakan Matlab untuk Analisis dan Optimasi Energi

Ibnu Rosyid Ridwana [1], Trisma Jaya Saputra[2], Raka Mahendra Sulistiyo[3], Nurmala Dyah Fajarningrum[4], Arif Rahman Saleh[5]
Program Studi S1 Teknik Mesin, Universitas Tidar
Alamat: Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsan, Magelang Utara, Jawa Tengah 56116
*e-mail: ibnu.rosyid.ridwana@students.untidar.ac.id

Abstract. *Belt conveyor systems are material transport systems that require significant energy; therefore, mathematical models are needed to represent power requirements and energy consumption. This study aims to develop a mathematical model for belt conveyor power consumption based on the ISO 5048 standard and to evaluate its fit against actual data. The research involved modeling and simulation using MATLAB, testing inclination angles of 0°, 3°, 5°, 7°, 10°, 12°, and 15°, while maintaining a constant belt speed of 5 m/s and a conveying capacity of 900 tons/hour. Model parameters were estimated using the Least Square (LS) and Recursive Least Square (RLS) methods and compared with the Buckingham Pi approach. Evaluation was conducted using Goodness of Fit, Residual Error, Predicted vs. Actual analysis, Root Mean Square Error (RMSE), and the Coefficient of Determination (R^2). The results indicate that the model effectively represents the actual data. The RLS method yielded the best performance, with an RMSE of 0.8442 and an R^2 of 0.9561, compared to 0.9603 and 0.9432 for LS, and 0.9751 and 0.9415 for the Buckingham Pi approach. Energy consumption increased from 24.8743 kWh at 0° to 103.47 kWh at 15°. The findings demonstrate that the developed mathematical model aligns with the fundamental concepts of ISO 5048 and is suitable for analyzing the power requirements and energy consumption of belt conveyors under the tested conditions.*
Keywords: *belt conveyor, energy efficiency, buckingham pi, least square, recursive least square, ISO 5048*

Abstrak. *Belt conveyor* merupakan sistem transportasi material yang membutuhkan energi cukup besar sehingga diperlukan model matematis untuk merepresentasikan kebutuhan daya dan konsumsi energi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model matematis konsumsi daya *belt conveyor* berdasarkan konsep ISO 5048 serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap data aktual. Penelitian dilakukan melalui pemodelan dan simulasi menggunakan MATLAB dengan sudut inklinasi 0°, 3°, 5°, 7°, 10°, 12°, dan 15°, sedangkan kecepatan belt 5 m/s dan kapasitas angkut 900 ton/jam dipertahankan konstan. Parameter model diestimasi menggunakan metode *Least Square* (LS) dan *Recursive Least Square* (RLS) serta dibandingkan dengan pendekatan Buckingham Pi. Evaluasi dilakukan melalui *Goodness of Fit, Residual Error, Predicted vs Actual, Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Coefficient of Determination* (R^2). Hasil menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan data aktual dengan baik. RLS memberikan kinerja terbaik dengan RMSE 0,8442 dan R^2 0,9561, dibandingkan LS sebesar 0,9603 dan 0,9432 serta Buckingham Pi sebesar 0,9751 dan 0,9415. Konsumsi energi meningkat dari 24,8743 kWh pada 0° menjadi 103,47 kWh pada 15°. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model matematis yang dikembangkan sesuai dengan konsep dasar ISO 5048 dan dapat digunakan untuk menganalisis kebutuhan daya serta konsumsi energi *belt conveyor* pada kondisi yang diuji.
Kata kunci: *belt conveyor, energy efficiency, buckingham pi, least square, recursive least square, ISO 5048*

1. PENDAHULUAN

Belt conveyor merupakan salah satu sistem mekanis yang banyak digunakan untuk mengangkut material dari satu lokasi ke lokasi lainnya secara kontinu, terutama pada sistem transportasi material curah (Abdillah et al., 2023). Pengoperasian secara kontinu menyebabkan *belt conveyor* membutuhkan energi listrik selama proses pengangkutan berlangsung (Pratama et al., 2023). Apabila kondisi operasi tidak disesuaikan dengan kebutuhan proses, penggunaan energi dapat menjadi kurang efisien, terutama ketika

Naskah Masuk:01 September 2026; Revisi: 02 September 2026; Diterima: 03 September 2026; Terbit: 19 September 2026

conveyor tetap beroperasi pada kondisi beban yang berkurang atau ketika proses produksi tidak berlangsung secara optimal (Swarananda & Suryawan, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan konsumsi energi pada *belt conveyor* perlu diperhatikan sebagai bagian dari upaya peningkatan efisiensi energi pada sistem industri. Pentingnya efisiensi energi pada *belt conveyor* ini tidak hanya berdampak pada pengurangan penggunaan listrik, tetapi juga secara langsung memengaruhi biaya operasional sebuah perusahaan (Zhang & Xia, 2010).

Peningkatan kebutuhan efisiensi energi juga tidak terlepas dari tingginya konsumsi energi listrik pada sektor industri. Data yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa penjualan energi listrik nasional pada tahun 2024 mencapai 303,4 TWh, meningkat sebesar 5,1% dibandingkan tahun 2023 yang mencapai 288,4 TWh. Sektor industri menjadi salah satu konsumen listrik terbesar dengan konsumsi sebesar 92,2 TWh. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peralatan industri yang beroperasi secara kontinu, termasuk *belt conveyor* pada industri pertambangan dan sistem *material handling*, memiliki peran dalam penggunaan energi listrik sehingga diperlukan pengelolaan energi yang lebih efisien (KESDM, 2024). Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mendukung pengelolaan tersebut adalah pemodelan matematis yang mampu menggambarkan hubungan antara kondisi operasi *belt conveyor* dengan kebutuhan daya dan konsumsi energinya.

Pemodelan kebutuhan energi pada *belt conveyor* dapat dikembangkan berdasarkan standar dan metode perhitungan yang telah digunakan dalam perancangan sistem *conveyor*. Salah satu acuan yang relevan adalah ISO 5048 yang menjelaskan perhitungan gaya tarik dan kebutuhan tenaga operasional pada *belt conveyor* dengan mempertimbangkan berbagai tahanan yang bekerja pada sistem. Total tahanan tersebut meliputi *main resistance*, *secondary resistance*, dan *special resistance*, yang dipengaruhi oleh karakteristik sistem dan kondisi operasional seperti kecepatan belt, kapasitas material, serta kemiringan lintasan. Kebutuhan daya selanjutnya berkaitan dengan total gaya yang menghambat pergerakan sistem dan kecepatan belt yang digunakan (ISO, 1989). Penggunaan model matematis berdasarkan konsep tersebut memungkinkan kebutuhan daya dianalisis secara sistematis melalui simulasi sehingga perubahan parameter operasi dapat dievaluasi tanpa harus melakukan pengujian langsung pada sistem *conveyor*.

Penelitian mengenai konsumsi energi dan efisiensi *belt conveyor* telah dilakukan dengan berbagai pendekatan. Strategi pengendalian hemat energi pada *belt conveyor* dikembangkan dengan mengatur kecepatan belt yang dapat berubah berdasarkan laju aliran material (Ji et al., 2020). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa hubungan antara kecepatan belt dan laju aliran material dapat dimanfaatkan untuk mengurangi konsumsi energi sistem (Ji et al., 2020). Strategi pengaturan kecepatan belt berbasis laju aliran material dikembangkan dengan menunjukkan bahwa pengaturan kecepatan yang sesuai dengan kondisi material dapat meningkatkan efisiensi energi dibandingkan pengoperasian pada kecepatan konstan (Ji et al., 2020).

Selain kecepatan belt dan laju aliran material, karakteristik geometris *belt conveyor* juga berkaitan dengan kebutuhan energi sistem. Penelitian mengenai efisiensi pengangkutan dan estimasi konsumsi daya pada *belt conveyor* dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik sistem pengangkutan serta menggunakan pendekatan statistik untuk memperkirakan kebutuhan daya (Jena, 2022). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa parameter sistem dapat digunakan untuk membangun hubungan matematis dalam mengestimasi konsumsi daya *belt conveyor* (Jena, 2022). Penelitian

mengenai *belt conveyor* dengan kondisi lintasan miring juga menunjukkan bahwa perubahan sudut inklinasi dapat memengaruhi karakteristik pengangkutan material dan kinerja sistem. Hal tersebut memperlihatkan bahwa sudut inklinasi merupakan salah satu parameter yang perlu dipertimbangkan dalam analisis sistem *belt conveyor*, selain parameter kecepatan dan kapasitas angkut.

Meskipun penelitian terdahulu telah membahas konsumsi energi *belt conveyor* melalui pengaturan kecepatan, laju aliran material, *specific energy consumption*, dan estimasi kebutuhan daya, sebagian besar kajian tersebut menganalisis beberapa parameter secara bersamaan atau lebih menitikberatkan pada strategi pengaturan kecepatan dan karakteristik aliran material (Ji et al., 2020)(Jena, 2022). Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat peluang untuk melakukan analisis yang lebih terfokus terhadap kontribusi satu parameter operasi terhadap konsumsi daya *belt conveyor*. Dalam penelitian ini, parameter yang dipilih adalah sudut inklinasi, sedangkan kecepatan belt dan kapasitas angkut ditetapkan sebagai kondisi kontrol. Pendekatan tersebut memungkinkan perubahan kebutuhan daya diamati secara lebih terarah berdasarkan variasi sudut inklinasi pada kondisi operasi yang telah ditentukan.

kebaruan penelitian ini terletak pada pemfokusan sudut inklinasi sebagai satu variabel operasi utama dalam analisis konsumsi daya *belt conveyor* menggunakan model matematis yang mengacu pada konsep perhitungan energi ISO 5048 dan simulasi MATLAB. Model dasar penelitian dibangun berdasarkan parameter operasional *belt conveyor*, sedangkan pada artikel ini analisis diarahkan secara khusus untuk mengetahui perubahan kebutuhan daya dan konsumsi energi akibat variasi sudut inklinasi dengan kecepatan belt dan kapasitas angkut sebagai variabel kontrol. Dengan pendekatan tersebut, penelitian tidak hanya menghasilkan nilai konsumsi daya, tetapi juga memberikan gambaran hubungan antara perubahan sudut inklinasi dengan kebutuhan energi pada kondisi operasi yang ditetapkan. Pemodelan matematis dan simulasi MATLAB juga memberikan pendekatan analitis yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi operasi tanpa melakukan modifikasi fisik pada sistem *belt conveyor*.

Permasalahan utama yang dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh perubahan sudut inklinasi terhadap konsumsi daya dan konsumsi energi *belt conveyor* pada kondisi kecepatan belt dan kapasitas angkut yang tetap. Permasalahan tersebut penting dikaji karena perubahan kemiringan lintasan menyebabkan perubahan kondisi pengangkutan material dan komponen gaya yang bekerja pada sistem. Berdasarkan konsep perhitungan energi *belt conveyor* dalam ISO 5048, kebutuhan daya berkaitan dengan gaya total yang harus diatasi oleh sistem selama proses pengangkutan material sehingga perubahan kondisi lintasan dapat memengaruhi kebutuhan tenaga operasional (ISO, 1989). Berdasarkan hubungan tersebut, hipotesis penelitian ini adalah bahwa peningkatan sudut inklinasi *belt conveyor* akan meningkatkan kebutuhan daya dan konsumsi energi pada kondisi kecepatan belt dan kapasitas angkut yang tetap.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh sudut inklinasi terhadap konsumsi daya dan konsumsi energi *belt conveyor* menggunakan model matematis berbasis konsep perhitungan energi ISO 5048 melalui simulasi MATLAB. Kecepatan belt dan kapasitas angkut ditetapkan sebagai kondisi kontrol, sedangkan sudut inklinasi digunakan sebagai variabel utama yang divariasikan. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah berupa analisis yang lebih terfokus mengenai hubungan antara sudut inklinasi dan kebutuhan daya *belt conveyor*, sekaligus memberikan pendekatan pemodelan yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi operasi yang lebih efisien pada rentang sudut

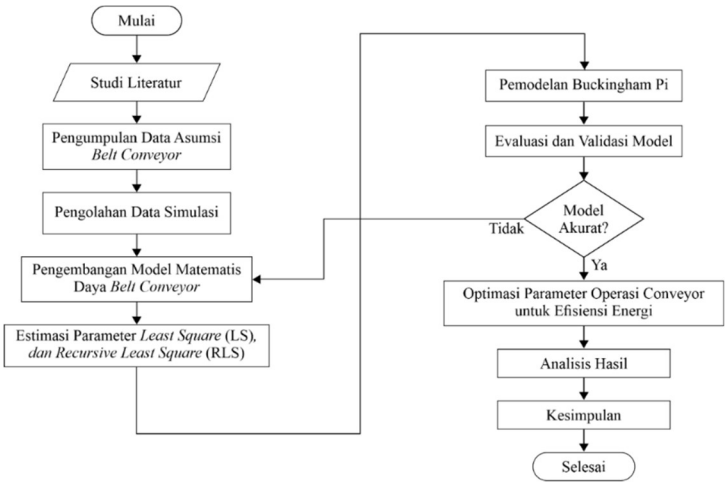
yang ditinjau. Hal tersebut sejalan dengan tujuan penelitian induk yang mengembangkan model matematis konsumsi daya *belt conveyor* dan menggunakannya untuk menganalisis kondisi operasi melalui simulasi MATLAB.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan matematis dan simulasi numerik untuk menganalisis kebutuhan daya dan konsumsi energi *belt conveyor* berdasarkan variasi sudut inklinasi. Pemodelan kebutuhan daya disusun dengan mengacu pada konsep perhitungan resistansi dan kebutuhan daya *belt conveyor* dalam standar ISO 5048. Selanjutnya, parameter model diidentifikasi menggunakan metode *Least Square* (LS) dan *Recursive Least Square* (RLS), sedangkan pendekatan *Buckingham Pi* digunakan sebagai model pembanding. Implementasi pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan MATLAB. Metode ini dikembangkan dari penelitian utama yang menggunakan kecepatan *belt*, kapasitas angkut, dan sudut *inklinasi* sebagai parameter operasional *belt conveyor*.

Pada penelitian dipersempit dengan menetapkan sudut inklinasi (θ) sebagai satu-satunya variabel bebas yang divariasikan. Kebutuhan daya (P) dan konsumsi energi (E) digunakan sebagai variabel terikat, sedangkan kecepatan belt (V) dan kapasitas angkut (Q) ditetapkan sebagai variabel kontrol. Dengan pendekatan tersebut, pengaruh perubahan sudut inklinasi terhadap kebutuhan daya dan konsumsi energi dapat dianalisis tanpa dipengaruhi oleh perubahan kecepatan belt dan kapasitas angkut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian Pemodelan Dan Optimasi Efisiensi Energi *Belt Conveyor*

2.2 Parameter dan Data Penelitian

Data penelitian yang digunakan berupa data simulasi parameter operasional *belt conveyor* yang disusun berdasarkan parameter dan kondisi sistem pada penelitian sebelumnya. Data penelitian difokuskan pada variasi sudut inklinasi (θ) sebagai variabel bebas, sedangkan kecepatan belt (V) dan kapasitas angkut (Q) ditetapkan sebagai variabel kontrol. Pendekatan ini dilakukan untuk mengisolasi pengaruh perubahan sudut inklinasi terhadap kebutuhan daya dan konsumsi energi *belt conveyor*. Parameter sistem seperti panjang *conveyor*, lebar belt, jenis material, massa jenis material, dan koefisien gesekan dipertahankan konstan.

Parameter sistem *belt conveyor* yang digunakan dalam simulasi meliputi panjang *conveyor* sebesar 500 m, lebar belt sebesar 1200 mm, material angkut berupa batubara,

massa jenis material sebesar 1300 kg/m³, dan koefisien gesekan sebesar 0,02. Parameter tersebut ditetapkan sebagai parameter tetap selama simulasi untuk menjaga kondisi sistem tetap dan mengisolasi pengaruh variabel operasional yang dianalisis. Parameter tetap tersebut mengacu pada parameter sistem yang digunakan dalam pemodelan penelitian sebelumnya.

Pada penelitian ini, sudut inklinasi (θ) ditetapkan sebagai variabel bebas, sedangkan kebutuhan daya (P) dan konsumsi energi (E) merupakan variabel terikat. Kecepatan belt (V) dan kapasitas angkut (Q) digunakan sebagai variabel kontrol dan ditetapkan masing-masing sebesar 5,0 m/s dan 900 ton/jam. Sudut inklinasi divariasikan pada tujuh kondisi, yaitu 0°, 3°, 5°, 7°, 10°, 12°, dan 15°. Variasi tersebut digunakan untuk menganalisis perubahan kebutuhan daya dan konsumsi energi akibat perubahan sudut inklinasi pada kondisi operasi yang sama.

Tabel 1. Data Asumsi Operasional *Belt Conveyor*

No	Kecepatan *Belt*, V (m/s)	Kapasitas Angkut, Q (ton/jam)	Sudut Inklinasi, θ (°)
(1)	(2)	(3)	(4)
1	5,0	900	0
2	5,0	900	3
3	5,0	900	5
4	5,0	900	7
5	5,0	900	10
6	5,0	900	12
7	5,0	900	15

2.3 Pemodelan dan Identifikasi Parameter

Pemodelan kebutuhan daya *belt conveyor* dibuat mengacu pada konsep perhitungan dalam ISO 5048. Standar tersebut digunakan sebagai dasar untuk menentukan resistansi total sistem dan kebutuhan daya berdasarkan gaya yang harus diatasi selama pengoperasian *belt conveyor*. Secara umum, kebutuhan daya penggerak dapat dinyatakan sebagai hubungan antara gaya tangensial efektif dan kecepatan belt dalam Persamaan 1.

$$P = F_u V \quad \text{..... (1)}$$

Model kebutuhan daya selanjutnya diidentifikasi menggunakan metode *Least Square* (LS). Estimasi parameter LS dilakukan dengan meminimalkan jumlah kuadrat kesalahan antara nilai daya acuan dan nilai daya hasil estimasi. Secara umum, estimasi parameter LS dinyatakan dalam Persamaan 2.

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad \text{..... (2)}$$

Metode *Recursive Least Square* (RLS) digunakan untuk melakukan estimasi parameter secara iteratif berdasarkan data yang diproses secara bertahap. Pembaruan parameter secara umum dinyatakan dalam Persamaan 3.

$$\theta(k) = \theta(k-1) + K(k)[y(k) - \phi^T(k)\theta(k-1)] \quad \text{..... (3)}$$

Selain LS dan RLS, digunakan pendekatan *Buckingham Pi* sebagai model pembanding. Pendekatan ini membentuk hubungan antarbesaran fisik dalam bentuk

kelompok tak berdimensi. Secara umum, teorema Buckingham Pi dinyatakan dalam Persamaan 4.

$$\Pi_1 = \gamma_0 + \gamma_1\Pi_2 + \gamma_2\Pi_3 \quad \text{..... (4)}$$

Kelompok tak berdimensi yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk membentuk model kebutuhan daya. Model *Buckingham Pi* kemudian dibandingkan dengan model LS dan RLS dalam merepresentasikan kebutuhan daya *belt conveyor*. Dengan demikian, *Buckingham Pi* berperan sebagai pendekatan pemodelan pembanding, sedangkan LS dan RLS berperan sebagai metode estimasi parameter.

2.4 Perhitungan Konsumsi Energi

Nilai daya yang diperoleh dari model acuan, LS, RLS, dan Buckingham Pi digunakan untuk menentukan konsumsi energi. Konsumsi energi dihitung menggunakan Persamaan 5.

$$E = P \times t \quad \text{..... (5)}$$

2.5 Implementasi dan Evaluasi

Pemodelan, identifikasi parameter, dan simulasi dilakukan menggunakan MATLAB. Program menghitung daya acuan berdasarkan model ISO 5048, kemudian menghasilkan estimasi daya menggunakan LS, RLS, dan Buckingham Pi pada tujuh variasi sudut inklinasi. Hasil ketiga pendekatan dilakukan evaluasi menggunakan *Goodness of Fit, Residual Error, Predicted vs Actual*. Kemudian untuk metode yang digunakan dalam validasi model adalah *Root Mean Square Error* (RMSE) dan koefisien determinasi (R^2). Selanjutnya, nilai daya digunakan untuk menghitung konsumsi energi dan menganalisis kecenderungan perubahan daya serta energi akibat peningkatan sudut inklinasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengembangan Model Matematis Konsumsi Daya

Pengembangan model matematis konsumsi daya diawali dari persamaan dasar ISO 5048 yang menyatakan bahwa daya *conveyor* diperoleh dari hasil perkalian pada persamaan 4.1 yaitu antara gaya tahanan total sistem dengan kecepatan *belt*

$$P = F_u V \quad \text{..... (6)}$$

Dimana:
P = Daya *conveyor* (W atau kW)
F_u = Gaya tahanan total *conveyor* (N)
V = Kecepatan *belt* (m/s)

Berdasarkan persamaan tersebut, kebutuhan daya *conveyor* dipengaruhi oleh kondisi operasi sistem. Pada penelitian ini dipilih tiga parameter operasi yang memiliki pengaruh dominan terhadap konsumsi daya, yaitu kecepatan *belt* (V), kapasitas angkut material (Q), dan sudut kemiringan *conveyor* (theta). Oleh karena itu, hubungan antara daya dan parameter operasi dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan 4.2

$$P = f(V, Q, \theta) \quad \text{..... (7)}$$

Dimana:
V = kecepatan *belt* (m/s)
Q = kapasitas angkut material (ton/jam)
θ = sudut kemiringan *conveyor* (°)

Untuk mempermudah proses identifikasi parameter menggunakan metode LSQ dan RLS, fungsi tersebut didekati menggunakan model regresi linear multivariabel dengan bentuk pada persamaan 4.3

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n \quad \text{.....} \quad (8)$$

Pada model regresi linear multivariabel, parameter β_0 merupakan konstanta atau *intercept* yang merepresentasikan komponen daya dasar atau pengaruh gabungan dari faktor-faktor yang tidak dimodelkan secara *eksplisit* dalam penelitian. Sementara itu β_1, β_2, dan β_3 merupakan koefisien *regresi* yang menunjukkan pengaruh masing-masing variabel operasional terhadap konsumsi daya *belt conveyor*. Parameter β_1 menunjukkan besarnya perubahan konsumsi daya akibat perubahan kecepatan belt (V), dengan variabel lainnya dianggap tetap. Parameter β_2 menunjukkan besarnya perubahan konsumsi daya akibat perubahan kapasitas angkut material (Q), dengan variabel lainnya dianggap tetap. Selanjutnya, parameter β_3 menunjukkan besarnya perubahan konsumsi daya akibat perubahan sudut kemiringan conveyor (θ), dengan variabel lainnya dianggap tetap. Kemudian, pada penelitian ini dilakukan substitusi variabel dengan $Y = P, X_1 = V, X_2 = Q, X_3 = \theta$, sehingga diperoleh model matematis konsumsi daya *belt conveyor* sesuai pada persamaan 4.4 dibawah ini

$$P = \beta_0 + \beta_1 \cdot \mathrm{V} + \beta_2 \cdot \mathrm{Q} + \beta_3 \cdot \theta \quad \text{.....} \quad (9)$$

Dimana:
P = daya motor *conveyor* (kW)
V = kecepatan *belt* (m/s)
Q = kapasitas angkut material (ton/jam)
θ = sudut inklinasi *conveyor* (derajat)
β_0 = konstanta atau *intercept* model
β_1 = koefisien pengaruh kecepatan *belt*
β_2 = koefisien pengaruh kapasitas angkut material
β_3 = koefisien pengaruh sudut kemiringan *conveyor*

Model tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses estimasi parameter menggunakan metode *Least Square* (LS) dan *Recursive Least Square* (RLS). Metode LS digunakan untuk memperoleh estimasi parameter model berdasarkan keseluruhan data yang tersedia, sedangkan RLS digunakan untuk memperbarui estimasi parameter secara iteratif berdasarkan data yang masuk secara bertahap. Dengan demikian, kedua metode tersebut menghasilkan estimasi terhadap parameter β_0, β_1, β_2, dan β_3 yang selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung nilai daya hasil prediksi.

Selain model yang diperoleh melalui metode LS dan RLS, penelitian ini juga menggunakan pendekatan Buckingham Pi sebagai pendekatan pemodelan pembanding. *Buckingham Pi* digunakan untuk membentuk hubungan matematis berdasarkan keterkaitan antarbesaran fisik dan dimensi yang terlibat dalam sistem *belt conveyor*. Model yang diperoleh melalui pendekatan *Buckingham Pi* kemudian digunakan sebagai pembanding terhadap model LS dan RLS. Dengan demikian, ketiga pendekatan tersebut menghasilkan representasi matematis konsumsi daya yang selanjutnya dapat dibandingkan untuk melihat kesesuaian dan karakteristik masing-masing model dalam merepresentasikan hubungan antara konsumsi daya dengan parameter operasional *belt conveyor*.

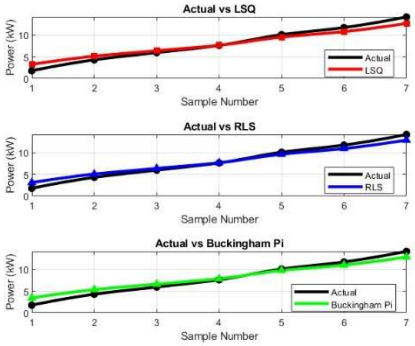
Dengan pendekatan tersebut, LS dan RLS berperan sebagai metode estimasi parameter pada model regresi, sedangkan *Buckingham Pi* berperan sebagai pendekatan pemodelan pembanding terhadap model LS dan RLS. Perbandingan tersebut selanjutnya

digunakan untuk mengetahui model yang memberikan representasi hubungan variabel yang paling sesuai dengan karakteristik sistem dan data penelitian.

4.2 Validasi Model

4.2.1 Evaluasi tingkat kesesuaian model terhadap data aktual (*Goodness of Fit*)

Evaluasi *Goodness of Fit* dilakukan untuk mengetahui kemampuan model *Least Square* (LSQ), *Recursive Least Square* (RLS), dan *Buckingham Pi* dalam merepresentasikan pola daya *actual belt conveyor*. Pada penelitian ini, kecepatan belt ditetapkan sebesar 5 m/s dan kapasitas angkut sebesar 900 ton/jam, sedangkan sudut *inklinasi* divariasikan pada tujuh kondisi, yaitu 0°, 3°, 5°, 7°, 10°, 12°, dan 15°. Evaluasi dilakukan secara visual dengan membandingkan kurva daya aktual terhadap hasil prediksi masing-masing model sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan daya aktual dan hasil prediksi model LSQ, RLS, dan Buckingham Pi

Berdasarkan Gambar 2. hasil pemodelan menggunakan LSQ, RLS, dan *Buckingham Pi* secara umum menunjukkan pola yang sesuai dengan data *actual*. Ketiga model mampu mengikuti kecenderungan perubahan daya, yaitu peningkatan daya seiring dengan bertambahnya sudut *inklinasi*. Hal ini menunjukkan bahwa pemodelan yang dilakukan telah sesuai dalam merepresentasikan karakteristik hubungan antara kondisi operasi conveyor dan kebutuhan daya pada rentang kondisi yang diuji. Meskipun demikian, masih terdapat perbedaan antara nilai prediksi dan aktual pada beberapa titik, sehingga tingkat kesesuaian masing-masing model perlu dianalisis lebih lanjut melalui *Residual Error*, *Predicted vs Actual*, serta evaluasi kuantitatif menggunakan RMSE dan R^2.

Pada model LS, hasil prediksi menunjukkan kecenderungan yang mengikuti pola data *actual*. Prediksi LS meningkat dari sekitar 3,25948 kW pada sampel pertama menjadi 12,7273 kW pada sampel ketujuh. Pada sampel ke-4, nilai prediksi sebesar 7,67778 kW sangat dekat dengan daya aktual sekitar 7,6471 kW. Meskipun demikian, terdapat penyimpangan pada beberapa kondisi, terutama pada sampel pertama dan ketujuh. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa model LS telah mampu menangkap kecenderungan umum perubahan daya, tetapi masih memiliki deviasi pada kondisi tertentu.

Model RLS juga menunjukkan pola yang konsisten terhadap data aktual. Nilai prediksi RLS berturut-turut sekitar 3,10929; 5,07418; 6,38411; 7,69404; 9,65893; 10,9689; dan 12,9338 kW. Nilai tersebut menunjukkan kecenderungan peningkatan yang sama dengan daya aktual. Pada sampel ke-4, prediksi RLS sebesar 7,69404 kW sangat dekat dengan daya aktual sekitar 7,6471 kW. Dengan demikian, secara visual model RLS juga telah mampu merepresentasikan pola perubahan daya akibat variasi sudut inklinasi.

Sementara itu, model Buckingham Pi menghasilkan prediksi sekitar 3,45304; 5,36789; 6,64187; 7,64713; 9,80642; 11,06; dan 12,9226 kW. Model ini juga

menunjukkan kecenderungan yang sama dengan data aktual. Pada sampel ke-4, nilai prediksi Buckingham Pi sebesar 7,64713 kW hampir identik dengan daya aktual sekitar 7,6471 kW. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa pendekatan dimensional Buckingham Pi mampu membentuk representasi matematis yang mengikuti karakteristik data pada kondisi pengujian.

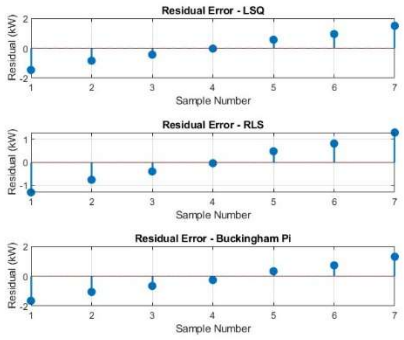
Secara keseluruhan, ketiga pendekatan menunjukkan bahwa model matematis yang dikembangkan telah sesuai dengan pola data aktual, ditunjukkan oleh kecenderungan kurva prediksi yang mengikuti peningkatan daya aktual pada seluruh variasi sudut inklinasi. Kesesuaian ini mendukung penggunaan model sebagai representasi matematis konsumsi daya belt conveyor pada kondisi penelitian. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Zhang dan Xia (2011) yang mengembangkan model energi belt conveyor berdasarkan karakteristik operasional dan prinsip ISO 5048, kemudian menggunakan estimasi parameter untuk memperoleh model yang dapat merepresentasikan karakteristik energi conveyor. Dalam penelitian Anda, pendekatan tersebut dikembangkan lebih lanjut dengan membandingkan LSQ, RLS, dan Buckingham Pi pada kondisi operasi yang telah ditetapkan.

Dengan demikian, hasil *Goodness of Fit* menunjukkan bahwa pemodelan telah sesuai secara umum terhadap karakteristik data aktual, tetapi kesesuaian visual tersebut belum cukup untuk menentukan metode terbaik. Oleh karena itu, analisis dilanjutkan dengan Residual Error untuk melihat pola penyimpangan prediksi, kemudian Predicted vs Actual untuk melihat kedekatan prediksi terhadap nilai aktual. Selanjutnya, RMSE dan R^2 digunakan sebagai indikator kuantitatif untuk mengevaluasi dan menentukan kinerja model yang paling baik. Pendekatan bertahap tersebut juga sesuai dengan kerangka evaluasi yang telah digunakan dalam penelitian Anda, yaitu menilai model melalui beberapa indikator agar kualitas model tidak hanya ditentukan berdasarkan satu ukuran.

4.2.2. Selisih antara nilai aktual hasil pengamatan dengan nilai yang diprediksi oleh model regresi (*Residual Error*)

Selain membandingkan hasil prediksi dengan data aktual, evaluasi performa model dilakukan melalui analisis *residual error*. *Residual error* merupakan selisih antara nilai daya acuan dengan nilai daya hasil prediksi, sehingga dapat digunakan untuk mengetahui besarnya penyimpangan prediksi pada setiap kondisi operasi. Dalam evaluasi model regresi, residual yang relatif kecil dan tersebar di sekitar nilai nol tanpa membentuk pola tertentu menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan pola data dengan baik dan tidak menunjukkan kecenderungan kesalahan yang sistematis (Montgomery, D.C., Peck, E.A. and Vining, 2021). Konsep tersebut digunakan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi hasil prediksi model LS, RLS, dan *Buckingham Pi*.

Selanjutnya, validasi dilakukan menggunakan *Residual Error* untuk mengetahui selisih antara daya aktual dan daya hasil prediksi. Nilai residual yang mendekati nol menunjukkan bahwa hasil prediksi semakin dekat dengan kondisi aktual. Distribusi residual dari ketiga model ditunjukkan pada Gambar 3.



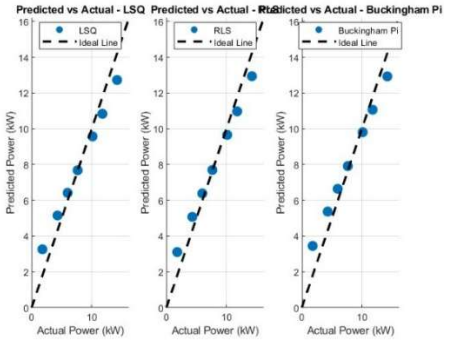
Gambar 3. Grafik *Residual Error*

Berdasarkan Gambar 3. ketiga model menunjukkan pola residual yang relatif serupa, yaitu bernilai negatif pada sampel awal, mendekati nol pada sampel ke-4, kemudian menjadi positif pada sampel berikutnya. Pola tersebut menunjukkan bahwa model cenderung mengalami *overprediction* pada kondisi awal dan *underprediction* pada kondisi dengan daya lebih tinggi. Pada sampel ke-4, residual LSQ, RLS, dan Buckingham Pi masing-masing sebesar −0,03065 kW, −0,04691 kW, dan −0,26482 kW, sehingga ketiga model memberikan prediksi yang sangat dekat dengan nilai aktual.

Secara keseluruhan, RLS menunjukkan penyimpangan yang relatif lebih kecil dibandingkan LS, dengan residual pada sampel pertama dan ketujuh masing-masing sebesar −1,3099 kW dan 1,28473 kW. Hasil ini menunjukkan bahwa pemodelan telah mampu mengikuti pola perubahan daya aktual, meskipun masih terdapat penyimpangan pada beberapa kondisi. Temuan tersebut sejalan dengan prinsip validasi model regresi bahwa residual yang relatif kecil dan berada di sekitar nilai nol menunjukkan kemampuan model dalam merepresentasikan pola data.

4.2.3 Evaluasi kemampuan model dalam memprediksi nilai aktual melalui penyebaran titik data terhadap garis ideal (*Predicted* vs *Actual*)

Evaluasi *Predicted vs Actual* dilakukan untuk mengetahui kemampuan model LSQ, RLS, dan Buckingham Pi dalam memprediksi daya aktual. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan nilai daya aktual pada sumbu horizontal dengan daya hasil prediksi pada sumbu vertikal. **Garis ideal** menunjukkan kondisi ketika nilai prediksi sama dengan nilai aktual, sehingga semakin dekat titik data terhadap garis tersebut, semakin baik kemampuan model dalam menghasilkan prediksi.



Gambar 4. Grafik Daya Prediksi dengan Daya Aktual

Berdasarkan Gambar 4. titik prediksi ketiga model secara umum berada di sekitar garis ideal dan mengikuti kecenderungan peningkatan daya aktual. Hal ini menunjukkan bahwa model matematis yang dikembangkan telah mampu merepresentasikan hubungan antara kondisi operasi dan daya aktual belt conveyor. Pada beberapa kondisi, titik berada

di atas garis ideal yang menunjukkan *overprediction*, sedangkan titik yang berada di bawah garis ideal menunjukkan *underprediction*. Pola tersebut sesuai dengan hasil analisis *Residual Error* sebelumnya.

Model LS menunjukkan penyebaran titik yang mengikuti garis ideal, meskipun terdapat penyimpangan pada kondisi daya rendah dan tinggi. Model RLS menunjukkan titik prediksi yang relatif dekat dengan garis ideal, sedangkan Buckingham Pi juga mampu mengikuti pola data aktual tetapi memperlihatkan penyimpangan yang lebih besar pada beberapa titik. Dengan demikian, secara visual ketiga pendekatan telah mampu memberikan prediksi yang sesuai terhadap kecenderungan data aktual.

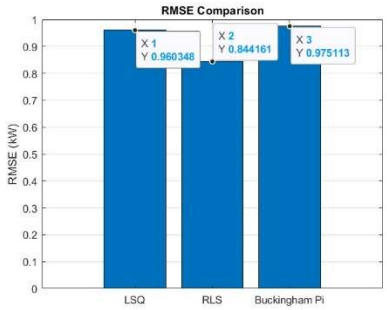
Hasil tersebut mendukung pendekatan Zhang dan Xia (2011) yang menyatakan bahwa model energi analitis belt conveyor dapat dibentuk dari parameter sistem dan selanjutnya dilakukan identifikasi parameter menggunakan LSQ untuk estimasi *off-line* dan RLSQ untuk estimasi *on-line*. Hasil estimasi tersebut digunakan untuk memperoleh model energi yang lebih akurat dan praktis dalam penerapan pada belt conveyor. Zhang dan Xia juga menunjukkan bahwa akurasi estimasi parameter dipengaruhi oleh karakteristik data yang digunakan, dan hasil estimasi dapat digunakan untuk mendukung penerapan model energi dalam optimasi operasi conveyor.

Dengan demikian, hasil *Predicted vs Actual* memperkuat hasil *Goodness of Fit* dan *Residual Error* bahwa pemodelan yang dilakukan telah sesuai dalam mengikuti karakteristik data aktual, meskipun masih terdapat penyimpangan pada beberapa kondisi. Namun, kedekatan titik terhadap garis ideal secara visual belum cukup untuk menentukan model terbaik. Oleh karena itu, kemampuan ketiga model selanjutnya dievaluasi secara kuantitatif menggunakan RMSE dan R^2.

4.3 Evaluasi Kinerja Model

4.3.1 Akurasi model dengan mempertimbangkan besarnya kesalahan prediksi secara keseluruhan *Root Mean Square Error* (RMSE)

Evaluasi *Root Mean Square Error* (RMSE) dilakukan untuk mengetahui besarnya rata-rata kesalahan prediksi antara nilai daya aktual dan daya hasil pemodelan. Nilai RMSE yang lebih kecil menunjukkan kesalahan prediksi yang lebih rendah, sehingga model memiliki tingkat akurasi yang lebih baik. Pendekatan ini juga digunakan dalam penelitian sebelumnya, di mana RMSE digunakan untuk mengukur besarnya rata-rata kesalahan prediksi model terhadap data aktual.



Gambar 5. Grafik RMSE Comparison

Berdasarkan Gambar 5. diperoleh nilai RMSE sebesar 0,9603 kW untuk LSQ, 0,8442 kW untuk RLS, dan 0,9751 kW untuk Buckingham Pi. Nilai RMSE ketiga model berada di bawah 1 kW, sehingga menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan prediksi masih relatif kecil terhadap rentang daya aktual yang digunakan. Hasil penelitian sebelumnya dalam skripsi juga menunjukkan bahwa nilai RMSE yang relatif kecil, apabila disertai

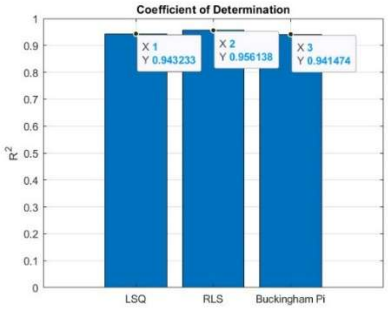
nilai R^2 yang mendekati satu, menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang cukup baik dalam merepresentasikan data simulasi.

Berdasarkan perbandingan ketiga metode, RLS menghasilkan nilai RMSE paling rendah, yaitu 0,8442 kW. Hal ini menunjukkan bahwa RLS memiliki kesalahan prediksi paling kecil dibandingkan LSQ dan Buckingham Pi. Dengan demikian, berdasarkan indikator RMSE, model yang dikembangkan dapat dinilai memiliki tingkat kesesuaian yang baik dan layak digunakan pada rentang kondisi pengujian penelitian, dengan RLS sebagai metode yang memberikan kinerja terbaik. Penilaian kelayakan tersebut selanjutnya diperkuat menggunakan nilai R^2, sehingga keputusan pemilihan model tidak hanya didasarkan pada satu indikator.

Hasil penelitian juga memperlihatkan bahwa nilai RMSE ketiga metode relatif berdekatan, yaitu berada pada rentang 0,8442–0,9751 kW. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga model telah mampu memberikan prediksi dengan tingkat kesalahan yang relatif rendah, tetapi RLS memberikan hasil paling baik berdasarkan indikator RMSE. Kesimpulan ini memperkuat hasil *Goodness of Fit*, *Residual Error*, dan *Predicted vs Actual* sebelumnya, sehingga RLS selanjutnya dipilih sebagai model yang digunakan untuk analisis pengaruh sudut inklinasi terhadap daya dan konsumsi energi.

4.3.2 *Coefficient of Determination* (R^2)

Evaluasi menggunakan *Coefficient of Determination* (R^2) dilakukan untuk mengetahui kemampuan model dalam menjelaskan variasi data daya aktual. Nilai R^2 yang semakin mendekati **1** menunjukkan bahwa semakin besar proporsi variasi data aktual yang dapat dijelaskan oleh model. Untuk hasil evaluasi model menggunakan *Coefficient of Determination* (R^2) ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Coefficient of Determination (R^2)

Berdasarkan Gambar 6. diperoleh nilai R^2 sebesar 0,9432 untuk LS, 0,9561 untuk RLS, dan 0,9415 untuk Buckingham Pi. Ketiga nilai tersebut menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi karena seluruhnya mendekati nilai 1. Model RLS menghasilkan nilai R^2 tertinggi sebesar 0,9561, yang berarti sekitar 95,61% variasi daya aktual dapat dijelaskan oleh model RLS, sedangkan sisanya sekitar 4,39% dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak direpresentasikan dalam model.

Nilai R^2 LSQ sebesar 0,9432 menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan sekitar 94,32% variasi data aktual, sedangkan Buckingham Pi dengan nilai 0,9415 mampu menjelaskan sekitar 94,15% variasi data. Meskipun ketiga model memiliki nilai R^2 yang relatif tinggi, RLS memberikan kemampuan penjelasan data yang paling besar dibandingkan kedua metode lainnya.

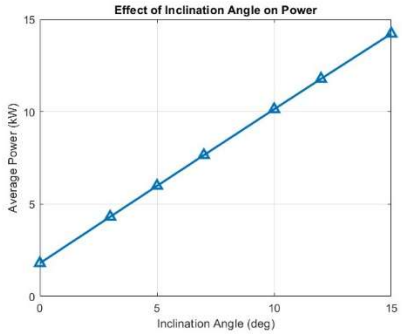
Hasil ini memperkuat evaluasi berdasarkan RMSE, di mana RLS juga menghasilkan nilai kesalahan paling rendah sebesar 0,8442 kW. Dengan demikian, kedua indikator memberikan hasil yang konsisten, yaitu RLS memiliki kinerja terbaik dalam merepresentasikan data daya aktual. Hasil tersebut juga sejalan dengan pendekatan Zhang

dan Xia (2011) yang menggunakan estimasi parameter LSQ dan RLSQ dalam pengembangan model energi belt conveyor untuk memperoleh representasi karakteristik energi yang lebih akurat.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan Yang et al. (2021) yang menekankan pentingnya proses pemodelan energi, identifikasi parameter, dan verifikasi dalam memperoleh model *belt conveyor* yang mampu merepresentasikan karakteristik energi sistem. Penelitian tersebut mengembangkan model energi dinamis dan metode identifikasi parameter berbasis RLS, kemudian memverifikasi efektivitas metode yang diusulkan melalui eksperimen *hardware-in-the-loop*. Dalam penelitian ini, proses verifikasi dilakukan melalui beberapa indikator, yaitu *Goodness of Fit*, *Residual Error*, *Predicted vs Actual*, RMSE, dan R^2. Hasil R^2 sebesar 0,9561 pada RLS menunjukkan bahwa model tersebut mampu menjelaskan variasi daya aktual dengan tingkat kesesuaian yang lebih tinggi pada data simulasi penelitian (Yang et al., 2021).

4.4 Pengaruh Sudut Kemiringan terhadap Daya

Sudut inklinasi menentukan besarnya komponen gaya gravitasi yang harus diatasi oleh *conveyor* selama proses pengangkutan material menuju elevasi yang lebih tinggi, pada Gambar 4.9 ditampilkan pengaruh sudut inklinasi terhadap konsumsi daya yang dibutuhkan pada *belt conveyor*



Gambar 7. Grafik Efek Sudut Inklinasi terhadap Daya

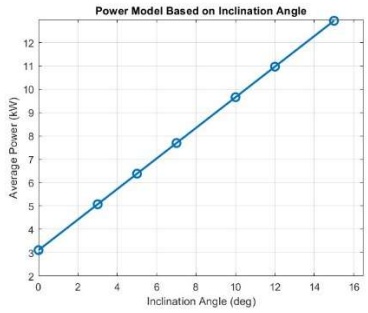
Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan sudut inklinasi menyebabkan peningkatan kebutuhan daya *conveyor* secara signifikan. Semakin besar sudut kemiringan *conveyor* maka semakin besar pula komponen gaya gravitasi yang bekerja berlawanan dengan arah gerak *belt* sehingga motor membutuhkan energi yang lebih besar untuk mengangkat material.

Hasil tersebut sesuai dengan konsep tahanan elevasi pada ISO 5048 yang menyatakan bahwa peningkatan elevasi pengangkutan akan meningkatkan kebutuhan daya sistem *conveyor.* Peningkatan sudut *conveyor* juga menyebabkan peningkatan gaya normal, tegangan *belt*, dan perubahan kapasitas *conveyor* sehingga kebutuhan energi sistem juga meningkat (Bolat & As, 2023).

4.5 Pembahasan Model Daya dan Konsumsi Energi

4.5.1 Grafik Power Model

Berdasarkan hasil pemodelan, daya *belt conveyor* menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya sudut kemiringan. Pada kondisi kecepatan *belt* 5 m/s dan kapasitas angkut 900 ton/jam, peningkatan sudut dari 0° hingga 15° menghasilkan peningkatan kebutuhan daya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sudut kemiringan berpengaruh terhadap kebutuhan daya karena semakin besar kemiringan *conveyor*, semakin besar gaya yang diperlukan untuk mengatasi komponen gaya gravitasi material.



Gambar 8. Grafik Power Model

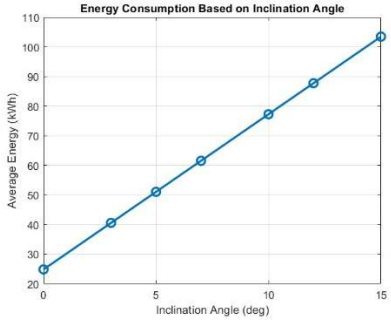
Kecenderungan peningkatan daya yang diperoleh dari pemodelan LSQ, RLS, dan Buckingham Pi menunjukkan pola yang konsisten dengan karakteristik teoritis belt conveyor. Ketiga pendekatan mampu merepresentasikan hubungan antara sudut kemiringan dan kebutuhan daya, meskipun menghasilkan nilai prediksi yang berbeda pada setiap kondisi. Hal ini menunjukkan bahwa model matematis yang dikembangkan telah sesuai dalam menggambarkan kecenderungan perubahan daya akibat variasi sudut kemiringan pada rentang kondisi yang diuji.

Kesesuaian tersebut diperkuat oleh hasil evaluasi model sebelumnya melalui *Goodness of Fit*, *Residual Error*, dan *Predicted vs Actual*, yang menunjukkan bahwa hasil prediksi ketiga metode mampu mengikuti pola data aktual. Selanjutnya, evaluasi kuantitatif menunjukkan nilai RMSE sebesar 0,9603 kW (LSQ), 0,8442 kW (RLS), dan 0,9751 kW (Buckingham Pi) serta R^2 sebesar 0,9432, 0,9561, dan 0,9415 secara berturut-turut. Dengan demikian, ketiga model dapat dinyatakan memiliki kemampuan yang baik dalam merepresentasikan data penelitian, dengan RLS sebagai metode yang memberikan kinerja paling baik berdasarkan RMSE terendah dan R^2 tertinggi.

Dengan demikian, hasil penelitian secara keseluruhan menunjukkan bahwa pemodelan matematis yang dikembangkan telah sesuai untuk merepresentasikan karakteristik kebutuhan daya belt conveyor terhadap variasi sudut kemiringan, sedangkan RLS dipilih sebagai model dengan performa terbaik untuk analisis lebih lanjut.

4.5.2 Grafik Konsumsi Energi

Berdasarkan Gambar 9. konsumsi energi belt conveyor menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya sudut kemiringan. Pada kondisi kecepatan belt 5 m/s dan kapasitas angkut 900 ton/jam, konsumsi energi pada sudut 0° sebesar 24,8743 kWh, kemudian meningkat menjadi 40,5935 kWh pada 3°, 51,0729 kWh pada 5°, 61,5523 kWh pada 7°, 77,2714 kWh pada 10°, 87,7509 kWh pada 12°, dan mencapai 103,47 kWh pada 15°.



Grafik 9. Grafik Konsumsi Energi

Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar sudut kemiringan, semakin besar energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan *belt conveyor*. Pada

penelitian ini, kecepatan *belt* dan kapasitas angkut dibuat tetap, sehingga perubahan konsumsi energi terutama menunjukkan pengaruh variasi sudut kemiringan. Kenaikan konsumsi energi dari 24,8743 kWh pada 0° menjadi 103,47 kWh pada 15° menunjukkan selisih sebesar 78,5957 kWh, atau sekitar 315,8% dibandingkan kondisi 0°. Secara teoritis, peningkatan kemiringan menyebabkan kebutuhan gaya untuk mengatasi komponen gravitasi material semakin besar sehingga kebutuhan daya meningkat dan pada akhirnya meningkatkan konsumsi energi .

Hasil tersebut memperlihatkan kecenderungan yang konsisten antara peningkatan sudut kemiringan, daya, dan konsumsi energi. Dengan demikian, hasil analisis konsumsi energi semakin memperkuat bahwa pemodelan matematis yang dikembangkan telah sesuai dalam merepresentasikan pengaruh sudut kemiringan terhadap kebutuhan energi *belt conveyor* pada rentang kondisi yang diuji. Hasil ini juga menjadi dasar untuk menentukan kondisi operasi dengan konsumsi energi paling rendah pada tahap optimasi.

4.7 Hasil Optimasi Operasi Belt Conveyor

Setelah dilakukan proses perhitungan konsumsi energi untuk seluruh kombinasi parameter operasional *belt conveyor*, dilakukan proses pengurutan (*ranking*) berdasarkan nilai konsumsi energi yang dihasilkan. Proses pengurutan dilakukan mulai dari kondisi operasi dengan konsumsi energi paling rendah hingga kondisi operasi dengan konsumsi energi paling tinggi, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi operasi yang paling efisien maupun kondisi operasi yang paling boros energi. Tabel 2. menyajikan hasil ranking konsumsi energi berdasarkan kombinasi parameter kecepatan *belt*, kapasitas angkut, dan sudut inklinasi yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2. Ranking Kondisi Operasi Berdasarkan Konsumsi Energi

Rank	V	Q	Theta	Energy (kWh)
1	5	900	0	24.874
2	5	900	3	40.593
3	5	900	5	51.073
4	5	900	7	61.552
5	5	900	10	77.271
6	5	900	12	87.751
7	5	900	15	103.47

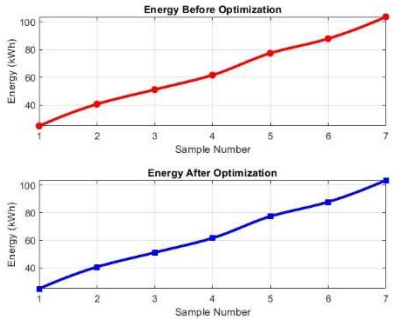
Berdasarkan Tabel 2. diperoleh bahwa kondisi operasi dengan konsumsi energi terendah berada pada kecepatan belt 5 m/s, kapasitas angkut 900 ton/jam, dan sudut inklinasi 0°, dengan kebutuhan energi sebesar 24,874 kWh. Selanjutnya, konsumsi energi meningkat secara bertahap pada sudut inklinasi 3°, 5°, 7°, 10°, dan 12°, masing-masing sebesar 40,593 kWh, 51,073 kWh, 61,552 kWh, 77,271 kWh, dan 87,751 kWh. Konsumsi energi tertinggi diperoleh pada sudut inklinasi 15°, yaitu sebesar 103,47 kWh. Hasil perankingan menunjukkan bahwa peningkatan sudut inklinasi menyebabkan peningkatan kebutuhan energi belt conveyor pada kondisi kecepatan dan kapasitas yang tetap. Kondisi dengan sudut inklinasi 0° kemudian ditetapkan sebagai kondisi dengan konsumsi energi minimum dalam rentang pengujian dan menjadi dasar dalam proses optimasi.

Berdasarkan pola perankingan tersebut, hasil penelitian menunjukkan bahwa model matematis yang dikembangkan mampu menggambarkan hubungan antara sudut inklinasi dan konsumsi energi secara konsisten dan logis. Peningkatan konsumsi energi seiring bertambahnya sudut inklinasi sesuai dengan konsep dasar ISO 5048, yaitu meningkatnya komponen gaya akibat pengaruh gravitasi pada material akan

meningkatkan kebutuhan gaya penggerak dan daya conveyor. Dengan demikian, hasil perankingan semakin memperkuat bahwa model matematis yang dikembangkan telah sesuai dengan konsep ISO 5048 dan mampu merepresentasikan karakteristik konsumsi energi belt conveyor pada rentang kondisi operasi yang diuji.

4.6 Hasil Optimasi Konsumsi Energi

Setelah model matematis berhasil dikembangkan dan divalidasi, dilakukan optimasi terhadap parameter operasional untuk memperoleh kondisi yang menghasilkan konsumsi energi minimum. Berdasarkan Gambar 10. terlihat bahwa konsumsi energi setelah optimasi cenderung lebih rendah dibandingkan kondisi sebelum optimasi. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa pemilihan kombinasi parameter operasi yang tepat dapat mengurangi kebutuhan energi sistem tanpa mengubah struktur dasar model. Hal ini sejalan dengan penelitian Bajda & Hardyg (2022) yang menjelaskan bahwa pengurangan konsumsi energi *belt conveyor* dapat dilakukan melalui pengaturan kondisi operasi dan pemilihan parameter kerja yang lebih efisien (Bajda & Hardyg, 2022).



Gambar 10. Grafik Energi Sebelum dan Sesudah Optimalisasi

Berdasarkan Gambar 10. konsumsi energi belt conveyor meningkat seiring dengan bertambahnya sudut kemiringan. Pada sudut 0°, konsumsi energi sebesar 24,8743 kWh, kemudian meningkat menjadi 40,5935 kWh pada 3°, 51,0729 kWh pada 5°, 61,5523 kWh pada 7°, 77,2714 kWh pada 10°, 87,7509 kWh pada 12°, dan mencapai 103,47 kWh pada 15°. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar sudut kemiringan, semakin besar pula kebutuhan energi conveyor. Pada kondisi penelitian, kecepatan belt sebesar 5 m/s dan kapasitas angkut 900 ton/jam dipertahankan konstan, sehingga perubahan konsumsi energi terutama menunjukkan pengaruh variasi sudut kemiringan.

Berdasarkan hasil tersebut, kondisi sudut kemiringan 0° menghasilkan konsumsi energi paling rendah, sedangkan sudut 15° menghasilkan konsumsi energi tertinggi. Perbedaan antara kondisi minimum dan maksimum mencapai 78,5957 kWh, atau sekitar 75,96%. Hasil ini menunjukkan bahwa model dapat digunakan untuk mengidentifikasi kondisi operasi dengan kebutuhan energi yang lebih rendah pada rentang kondisi yang diuji.

Secara keseluruhan, hasil analisis daya dan konsumsi energi menunjukkan kecenderungan yang konsisten terhadap perubahan sudut kemiringan. Hal ini diperkuat oleh hasil *Goodness of Fit*, *Residual Error*, dan *Predicted vs Actual* yang menunjukkan bahwa hasil pemodelan mampu mengikuti pola data aktual. Evaluasi kuantitatif juga menghasilkan RMSE sebesar 0,9603 kW untuk LSQ, 0,8442 kW untuk RLS, dan 0,9751 kW untuk Buckingham Pi, sedangkan nilai R^2 masing-masing sebesar 0,9432, 0,9561, dan 0,9415. Dengan demikian, ketiga pendekatan mampu merepresentasikan

karakteristik data penelitian dengan baik, dengan RLS memberikan kinerja terbaik berdasarkan RMSE terendah dan R^2 tertinggi.

Berdasarkan keseluruhan hasil tersebut, model matematis yang dikembangkan telah sesuai dengan konsep dasar ISO 5048, khususnya dalam merepresentasikan hubungan kebutuhan daya conveyor dengan karakteristik operasi dan tahanan yang bekerja pada sistem. Model juga mampu menggambarkan peningkatan daya dan konsumsi energi akibat peningkatan sudut kemiringan serta digunakan untuk mengidentifikasi kondisi dengan konsumsi energi minimum. Dengan demikian, tujuan utama penelitian dalam mengembangkan model matematis konsumsi daya belt conveyor telah tercapai, dan model yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar analisis daya serta konsumsi energi pada kondisi operasi yang diuji.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan harus mengindikasi secara jelas hasil-hasil yang diperoleh, kelebihan dan kekura Model matematis konsumsi daya *belt conveyor* berhasil dibangun dengan mengacu pada konsep perhitungan energi *belt conveyor* ISO 5048, dengan parameter kecepatan belt (V), kapasitas angkut (Q), dan sudut inklinasi (θ). Model dinyatakan dalam bentuk hubungan linear $P = \beta_0 + \beta_1 \cdot \mathrm{V} + \beta_2 \cdot \mathrm{Q} + \beta_3 \cdot \theta$. Model yang dikembangkan mampu menggambarkan hubungan parameter operasional dengan kebutuhan daya dan konsumsi energi.

Metode (*Least Square*)LS dan (*Recursive Least Square*)RLS berhasil digunakan untuk identifikasi parameter model. LS menghasilkan RMSE 0.9603 dan R^2 0.9432, sedangkan RLS menghasilkan RMSE 0.8442 dan R^2 0.9561. Sementara itu, model alternatif *Buckingham Pi* menghasilkan RMSE 0.9751 dan R^2 0.9415, sehingga memberikan kinerja prediksi terbaik pada data simulasi.

Sudut inklinasi berpengaruh terhadap konsumsi energi belt conveyor. Konsumsi energi meningkat dari 24,8743 kWh pada sudut 0° menjadi 103,47 kWh pada sudut 15°. Berdasarkan perankingan kondisi operasi, sudut 0° menghasilkan konsumsi energi terendah pada rentang kondisi yang diuji. Hasil ini menunjukkan bahwa model yang dikembangkan dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik konsumsi energi dan menentukan kondisi operasi dengan kebutuhan energi yang lebih rendah.

Model matematis konsumsi daya *belt conveyor* telah berhasil dikembangkan berdasarkan konsep dasar ISO 5048. Model mampu merepresentasikan hubungan antara sudut *inklinasi* dengan kebutuhan daya dan konsumsi energi pada kondisi kecepatan belt 5 m/s dan kapasitas angkut 900 ton/jam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan sudut inklinasi dari 0° hingga 15° menyebabkan peningkatan kebutuhan daya dan konsumsi energi, sehingga pola yang dihasilkan sesuai dengan karakteristik teoritis sistem *belt conveyor*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing dan dosen penguji yang telah memberikan arahan, motivasi, masukan, serta koreksi dalam proses penyusunan penelitian dan artikel ilmiah ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyediaan data, proses pemodelan, simulasi, hingga penyelesaian penelitian. Segala bentuk dukungan dan bantuan yang diberikan sangat berarti dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR REFERENSI

Abdillah, R., Teknik, J., Universitas, E., Batam, J., & Satu, M. (2023). *Sistem Kendali Kecepatan Konveyor dengan Beban Berubah Berbasis Hibrid Fuzzy Logic- PID*. *11*(3), 789–796.

Bajda, M., & Hardyg, M. (2022). *Energy Efficiency of Conveyor Belts in Raw Materials Industry*. 1–6.

Bolat, B., & As, B. (2023). *Investigation of numerical belt sag and conveyor capacities in inclined belt conveyors : An iterative approach*. *420*(February). https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118394

ISO. (1989). *ISO 5048: Continuous mechanical handling equipment — Belt conveyors with carrying idlers — Calculation of operating power and tensile forces*.

Jena, M. C. (2022). *Experimental investigation on maximizing conveying efficiency of belt conveyors used in series application and estimation of power consumption through statistical analysis*. *August*, 1–11. https://doi.org/10.1002/ep.14031

Ji, J., Id, C. M., & Li, X. (2020). *Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate*. 1–14.

KESDM. (2024). *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2024*. https://www.esdm.go.id/en/publication/handbook-of-energy-economic-statistics-of-indonesia-heesi

Montgomery, D.C., Peck, E.A. and Vining, G. G. (2021). *Introduction to Linear Regression Analysis* (6th editio). John Wiley & Sons.

Pratama, A., Agusman, D., & Mesin, P. T. (2023). *Analysis Kekuatan Kontruksi Rangka pada Perancangan*. *5*(1).

Swarananda, I. K. Y., & Suryawan, I. G. P. (2024). *Inovasi dalam Pengefisiensi Energi Melalui Perancangan Smart Buffer Conveyor (SBC) Line SPS*. *13*(02).

Yang, C., Bu, L., & Chen, B. (2021). Energy modeling and online parameter identification for permanent magnet synchronous motor driven belt conveyors. *Measurement*, *178*(April), 109342. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109342

Zhang, S., & Xia, X. (2010). Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems. *Applied Energy*, *87*(6), 1929–1937. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.01.006

Hidayati, S.N. (2016). Pengaruh Pendekatan Keras dan Lunak Pemimpin Organisasi terhadap Kepuasan Kerja dan Potensi Mogok Kerja Karyawan. *Jurnal Maksipreneur: Manajemen, Koperasi, dan Entrepreneurship*, *5*(2), 57-66. http://dx.doi.org/10.30588/SOSHUMDIK.v5i2.164.

Risdwiyanto, A. & Kurniyati, Y. (2015). Strategi Pemasaran Perguruan Tinggi Swasta di Kabupaten Sleman Yogyakarta Berbasis Rangsangan Pemasaran. *Jurnal Maksipreneur: Manajemen, Koperasi, dan Entrepreneurship*, *5*(1), 1-23. http://dx.doi.org/10.30588/SOSHUMDIK.v5i1.142.

Bator, R. J., Bryan, A. D., & Schultz, P. W. (2011). Who Gives a Hoot?: Intercept Surveys of Litterers and Disposers. *Environment and Behavior*, *43*(3), 295–315. https://doi.org/10.1177/0013916509356884.