

Pengembangan Integrated Energy Decision Framework Berbasis Iso 50001 dan Simulasi Proses Untuk Optimasi Sistem Utilitas Industri Petrokimia

Daryanto^{1*}, Anton Irawan², Alia Badra Pitaloka³, Yazid Bindar⁴

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia^{1,2,3}

Institut Teknologi Bandung, Indonesia⁴

Email: d4ryhp.2@gmail.com^{1*}, antonirawan@untirta.ac.id²

Keywords:	Abstract
ISO 50001; energy review; absorption refrigerator; energy efficiency; process simulation	The implementation of ISO 50001:2018 through an energy review is widely used to establish the Energy Baseline (EnB), Energy Performance Indicator (EnPI), and Significant Energy Use (SEU). However, this approach has not been able to provide recommendations for optimum operating conditions to improve energy efficiency in a measurable manner. This study aims to develop an Integrated Energy Decision Framework that integrates the energy review with process simulation to support operational decision-making in industrial utility systems. The study was conducted at Plant C of a petrochemical industry through data cleansing, energy consumption analysis, development of EnB and EnPI using linear regression, and SEU identification using Pareto analysis. The identified SEU, an absorption refrigerator unit, was modeled using process simulation software and optimized through sensitivity analysis by varying generator temperature, cooling water temperature, and refrigerant flow rate. The results demonstrate that increasing the refrigerant flow rate provides the best operating performance, reducing steam consumption by 6.4–11.9% while improving the Coefficient of Performance (COP) by 7.6–14.9%. The recovered excess steam can subsequently be utilized either to increase electricity generation through a steam turbine generator or to reduce natural gas consumption in the boiler, depending on utility demand. The integration of energy review and process simulation proves to produce a more effective decision-support framework compared to conventional approaches, thereby improving energy efficiency while delivering economic benefits for industrial utility systems. This research contributes to the development of industrial energy management science through the integration of ISO 50001-based energy management systems with process optimization, and provides a scientific basis for adaptive operational decision-making in improving energy efficiency and reducing operating costs in the chemical industry with integrated utility systems.
Kata kunci:	Abstrak
ISO 50001; energy review; absorption refrigerator; efisiensi energi; simulasi proses	Penerapan ISO 50001:2018 melalui energy review telah banyak digunakan untuk mengidentifikasi Energy Baseline (EnB), Energy Performance Indicator (EnPI), dan Significant Energy Use (SEU), namun pendekatan ini belum mampu memberikan rekomendasi kondisi operasi optimum untuk meningkatkan efisiensi energi secara terukur. Penelitian ini bertujuan mengembangkan <i>Integrated Energy Decision Framework</i> yang mengintegrasikan energy review dengan simulasi proses sebagai dasar pengambilan keputusan operasional pada sistem utilitas industri. Studi dilakukan di Plant C industri petrokimia melalui tahapan <i>data cleansing</i>, perhitungan konsumsi energi, penyusunan EnB dan EnPI menggunakan regresi linier, serta identifikasi SEU melalui analisis Pareto. Unit <i>absorption refrigerator</i> yang teridentifikasi sebagai SEU dimodelkan menggunakan perangkat lunak simulasi proses dan dioptimasi melalui <i>sensitivity analysis</i> terhadap temperatur generator, temperatur <i>cooling water</i>, dan laju alir refrigeran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan laju alir refrigeran memberikan kinerja terbaik dengan penurunan konsumsi steam sebesar 6,4–11,9% dan peningkatan <i>Coefficient of Performance</i> (COP) sebesar 7,6–14,9%.

Steam eksekusi hasil optimasi selanjutnya dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan pembangkitan listrik melalui *steam turbine generator* atau mengurangi konsumsi gas alam pada boiler sesuai kebutuhan utilitas. Integrasi *energy review* dan simulasi proses terbukti menghasilkan kerangka pendukung keputusan yang lebih efektif dibandingkan pendekatan konvensional, sehingga mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus memberikan manfaat ekonomi pada sistem utilitas industri. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu manajemen energi industri melalui integrasi sistem manajemen energi berbasis ISO 50001 dengan optimasi proses, serta menyediakan dasar ilmiah bagi pengambilan keputusan operasional yang adaptif dalam meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan biaya operasi pada industri kimia dengan sistem utilitas terintegrasi.

PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi energi pada sektor industri menjadi salah satu tantangan utama dalam mendukung efisiensi operasional sekaligus pencapaian target konservasi energi nasional. Di Indonesia, sektor industri merupakan konsumen energi terbesar dengan kontribusi sekitar 45% dari total konsumsi energi final nasional, sehingga peningkatan efisiensi energi pada sektor ini menjadi prioritas strategis dalam kebijakan energi nasional. Kondisi tersebut diperkuat melalui Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2023 yang mewajibkan industri dengan konsumsi energi lebih dari 4.000 TOE per tahun untuk menerapkan sistem manajemen energi berbasis ISO 50001. Meskipun implementasi ISO 50001 telah terbukti mampu meningkatkan kinerja energi melalui identifikasi *Energy Performance Indicator* (EnPI), *Energy Baseline* (EnB), dan *Significant Energy Use* (SEU), kompleksitas sistem utilitas pada industri proses yang terus berkembang seringkali menyebabkan distribusi energi belum berada pada kondisi operasi yang optimal (Ambabunga et al., 2026; Arief et al., 2026; Irsan et al., 2025). Permasalahan ini menjadi semakin penting pada industri yang melakukan ekspansi fasilitas produksi, karena perubahan konfigurasi sistem utilitas dapat mengubah pola aliran energi, distribusi steam, konsumsi bahan bakar, serta produksi listrik internal sehingga berpotensi meningkatkan biaya operasi apabila tidak dievaluasi secara menyeluruh (Sale, 2022; Tauruy et al., 2022).

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi energi melalui implementasi ISO 50001 (Fitriadhi et al., 2025). Sejumlah penelitian berfokus pada penyusunan metodologi *energy review* untuk menentukan EnPI, EnB, dan SEU sebagai dasar penyusunan program konservasi energi. Piccioni et al. (2024) mengevaluasi indikator kinerja energi dan peluang penghematan energi pada industri manufaktur karet Italia, dengan temuan bahwa konsumsi energi terkonsentrasi pada beberapa peralatan utama yang diidentifikasi melalui analisis Pareto. Penelitian lain mengembangkan model simulasi proses untuk mengevaluasi karakteristik termodinamika dan kinerja *absorption refrigerator*, termasuk analisis *Coefficient of Performance* (COP), perpindahan panas, serta pengaruh parameter operasi terhadap performa sistem.

Mansouri et al. (2015) memodelkan *absorption refrigerator* amonia-air menggunakan platform Aspen Plus untuk menganalisis pengaruh temperatur generator dan *cooling water* terhadap COP. Sementara itu, beberapa penelitian industri mengidentifikasi peluang penghematan energi pada sistem boiler, distribusi steam, maupun utilitas lainnya berdasarkan hasil evaluasi konsumsi energi. Namun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih dilakukan secara terpisah sehingga hasil *energy review* belum diintegrasikan dengan simulasi

optimasi proses untuk mengevaluasi pengaruh perubahan kondisi operasi peralatan utilitas terhadap neraca energi pabrik secara menyeluruh .

Kesenjangan penelitian (*research gap*) yang diidentifikasi dari literatur adalah sebagai berikut. Pertama, penelitian *energy review* (Piccioni et al., 2024; Kamaluddin et al., 2022; Iskandar, 2015) umumnya berhenti pada tahap identifikasi indikator kinerja energi dan tidak menerjemahkan hasilnya menjadi rekomendasi operasi yang terukur. Kedua, penelitian simulasi proses (Mansouri et al., 2015; Le Lostec et al., 2013; Fatimata Dione et al., 2022) dilakukan secara terpisah tanpa mengaitkan dengan sistem manajemen energi. Ketiga, belum ada penelitian yang mengintegrasikan *energy review* berbasis ISO 50001 dengan simulasi optimasi proses untuk mengevaluasi pengaruh perubahan kondisi operasi peralatan utilitas terhadap neraca energi pabrik secara menyeluruh. Keempat, belum ada kerangka pengambilan keputusan yang menghubungkan identifikasi SEU dengan optimasi parameter operasi dan evaluasi dampaknya terhadap distribusi steam, produksi listrik, dan konsumsi bahan bakar. Kesenjangan ini diperkuat oleh temuan bahwa metodologi *energy review* yang sistematis dan terperinci untuk sektor petrokimia masih sangat terbatas, di mana sebagian besar panduan berhenti pada tingkat sistem utilitas tanpa melihat potensi pemulihan energi pada tingkat proses itu sendiri .

Urgensi penelitian ini didasarkan pada beberapa faktor kritis. Pertama, industri petrokimia merupakan salah satu sektor dengan intensitas energi tertinggi, sehingga peningkatan efisiensi energi sekalipun dalam skala kecil dapat memberikan dampak ekonomi dan lingkungan yang signifikan. Kedua, implementasi ISO 50001 yang diwajibkan oleh Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2023 memerlukan pendekatan yang tidak hanya memenuhi kepatuhan regulasi tetapi juga memberikan manfaat operasional yang terukur. Ketiga, kompleksitas sistem utilitas terintegrasi memerlukan kerangka pengambilan keputusan yang mampu mengevaluasi dampak perubahan operasi secara holistik, bukan hanya pada tingkat peralatan individu. Keempat, target dekarbonisasi industri menuntut strategi pengurangan emisi yang terintegrasi dengan peningkatan efisiensi energi, di mana pengurangan konsumsi energi secara langsung berkontribusi pada penurunan emisi gas rumah kaca *Scope 1* dan *Scope 2* . Kelima, pendekatan konvensional yang hanya mengandalkan *energy review* tanpa integrasi simulasi proses tidak mampu memberikan rekomendasi kondisi operasi optimum yang dapat diterapkan secara langsung di lapangan.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengembangan *Integrated Energy Decision Framework* yang menjembatani keluaran *energy review* berbasis ISO 50001 (EnPI-EnB-SEU) dengan simulasi optimasi proses sebagai *decision support framework* untuk pengelolaan sistem utilitas. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya memisahkan evaluasi manajemen energi dan optimasi proses, *framework* ini mampu mengubah hasil identifikasi EnPI-EnB-SEU menjadi rekomendasi konfigurasi operasi yang optimal dan terukur. Kebaruan spesifik meliputi transformasi fungsi *energy review* dari sekadar alat evaluasi kinerja energi menjadi instrumen pendukung pengambilan keputusan operasional evaluasi simultan pengaruh perubahan kondisi operasi terhadap distribusi steam, produksi listrik internal, konsumsi bahan bakar boiler, kinerja energi, serta biaya operasional pengembangan dua skenario implementasi (*Moderate Case* dan *Maximum Case*) yang mempertimbangkan aspek implementabilitas dan risiko operasional dan analisis komparatif strategi pemanfaatan surplus energi yang mempertimbangkan fleksibilitas sistem dan risiko

operasional. Pendekatan ini sejalan dengan perkembangan *digital twin* dan simulasi proses di industri minyak dan gas yang menekankan integrasi data real-time dengan analitik lanjutan untuk optimasi energi .

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan *Integrated Energy Decision Framework* yang mengintegrasikan *energy review* berbasis ISO 50001:2018 dengan simulasi optimasi proses untuk menentukan konfigurasi operasi sistem utilitas yang paling efisien pada industri petrokimia. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi EnPI, EnB, dan SEU pada sistem utilitas Plant C industri petrokimia melalui *energy review* berbasis ISO 50001:2018 mengembangkan dan memvalidasi model simulasi proses untuk *absorption refrigerator* yang teridentifikasi sebagai SEU; menentukan kondisi operasi optimum *absorption refrigerator* melalui *sensitivity analysis* terhadap parameter operasi (temperatur generator, temperatur *cooling water*, dan laju alir refrigeran) mengevaluasi dampak perubahan kondisi operasi terhadap distribusi steam, produksi listrik internal, konsumsi bahan bakar, dan biaya energi serta membandingkan efektivitas *Integrated Energy Decision Framework* dengan pendekatan *energy review* konvensional.

Kontribusi dan manfaat penelitian ini mencakup aspek teoritis dan praktis. Secara teoritis, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu manajemen energi industri melalui integrasi ISO 50001 dengan simulasi proses, menyediakan kerangka teoritis untuk transformasi *energy review* dari alat evaluasi menjadi *decision support framework*, serta memperkaya literatur tentang optimasi sistem utilitas terintegrasi pada industri proses. Secara praktis, penelitian ini menyediakan dasar ilmiah bagi pengambilan keputusan operasional yang adaptif dalam meningkatkan efisiensi energi industri kimia, menurunkan konsumsi bahan bakar dan listrik eksternal serta meminimalkan biaya operasi pada industri yang memiliki sistem utilitas terintegrasi, memberikan kontribusi terhadap pencapaian target konservasi energi nasional dan dekarbonisasi industri melalui pengurangan emisi gas rumah kaca, serta menyediakan metodologi yang dapat direplikasi pada industri proses lain dengan karakteristik sistem utilitas serupa. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menjembatani kesenjangan antara sistem manajemen energi dan optimasi proses yang selama ini berjalan secara terpisah.

METODE PENELITIAN

Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis studi kasus pada sistem utilitas Plant C di salah satu industri kimia yang menerapkan sistem pemanfaatan panas buang (*waste heat recovery*). Data operasional dikumpulkan selama periode April 2023 hingga Maret 2025 melalui Plant Information Management System (PIMS) Yokogawa Exaquantum yang terintegrasi dengan sistem kendali proses. Data tersebut meliputi konsumsi energi listrik, laju pembangkit steam, konsumsi steam pada setiap peralatan utilitas laju alir refrigeran, temperatur dan tekanan operasi, temperatur *cooling water*, data pembangkitan Listrik steam turbine generator (STG), serta beban produksi bulanan.

Selain data historis proses, penelitian juga menggunakan data pendukung berupa konsumsi listrik aktual, laporan produksi, tarif energi, faktor emisi karbon, spesifikasi peralatan, serta dokumen internal manajemen energi Perusahaan. Nilai entalpi steam dihitung berdasarkan temperatur dan tekanan operasi menggunakan Microsoft Excel Add-ins yang telah divalidasi

terhadap steam table sehingga diperoleh nilai energi steam yang digunakan pada seluruh tahapan analisis.

Pengelolaan dan Analisis Data

Data yang telah diverifikasi selanjutnya melalui proses data cleansing untuk menghilangkan data yang tidak merepresentasikan kondisi operasi normal, seperti startup, shutdown, plant upset, dan trial operation. Konsumsi energi dihitung berdasarkan penggunaan listrik dan steam pada setiap unit operasi, sedangkan energi steam ditentukan menggunakan metode neraca entalpi ($Q=m(h_1-h_2)$), dengan nilai entalpi steam dan air umpan diperoleh dari fungsi termodinamika di Microsoft Excel yang telah divalidasi menggunakan steam table. Total pembangkitan steam dihitung dari akumulasi keluaran seluruh Waste Heat Recovery Boiler (WHRB), sedangkan total konsumsi steam diperoleh dari penjumlahan kebutuhan steam pada setiap peralatan. Selanjutnya dilakukan analisis net energy balance untuk menentukan kebutuhan energi bersih dan estimasi biaya energi. Berdasarkan hasil energy review sesuai ISO 50001:2018, ditetapkan Energy Baseline (EnB) menggunakan regresi linier antara konsumsi energi dan beban produksi, Energy Performance Indicator (EnPI) dalam bentuk Indeks Konsumsi Energi (IKE), serta Significant Energy Use (SEU) melalui analisis Pareto untuk mengidentifikasi peralatan dengan kontribusi konsumsi energi terbesar sebagai prioritas peningkatan efisiensi energi.

Pengembangan Model Simulasi

Unit absorption refrigerator yang teridentifikasi sebagai Significant Energy Use (SEU) dimodelkan menggunakan perangkat lunak simulasi proses berdasarkan konfigurasi aktual sistem utilitas Plant C yang meliputi generator, kondensor, subcooler, katup ekspansi, evaporator, pre-absorber, absorber, pompa, dan solution heat exchanger. Model dikembangkan menggunakan data desain dan kondisi operasi aktual berupa tekanan, temperatur, laju alir, serta komposisi larutan amonia-air. Perhitungan perpindahan panas pada setiap heat exchanger dilakukan menggunakan metode Log Mean Temperature Difference (LMTD), sedangkan kinerja sistem dievaluasi berdasarkan Coefficient of Performance (COP), yaitu perbandingan antara beban pendinginan pada evaporator dan kebutuhan panas pada generator. Validasi model dilakukan dengan membandingkan parameter hasil simulasi terhadap data operasi aktual, meliputi temperatur, tekanan, laju alir steam, dan nilai COP, sehingga model layak digunakan untuk mengevaluasi skenario optimasi operasi.

Simulasi Optimasi Unit Absorption Refrigerator

Optimasi unit absorption refrigerator dilakukan menggunakan metode sensitivity analysis terhadap model simulasi yang telah tervalidasi dengan memvariasikan parameter operasi berupa temperatur generator, temperatur cooling water, dan laju alir refrigeran sebagai variabel bebas, sementara temperatur dan laju alir media pendingin dipertahankan konstan sebagai variabel kontrol. Pengaruh perubahan setiap variabel dianalisis terhadap nilai Coefficient of Performance (COP), konsumsi steam generator, dan tekanan operasi sistem untuk menentukan kondisi operasi yang memberikan efisiensi energi optimum tanpa melampaui batas operasi peralatan. Berdasarkan hasil simulasi, disusun dua skenario optimasi, yaitu Moderate Case sebagai kondisi operasi yang mudah diimplementasikan dengan risiko operasional rendah dan Maximum Case sebagai kondisi operasi dengan efisiensi termal maksimum yang masih memenuhi batas operasi sistem.

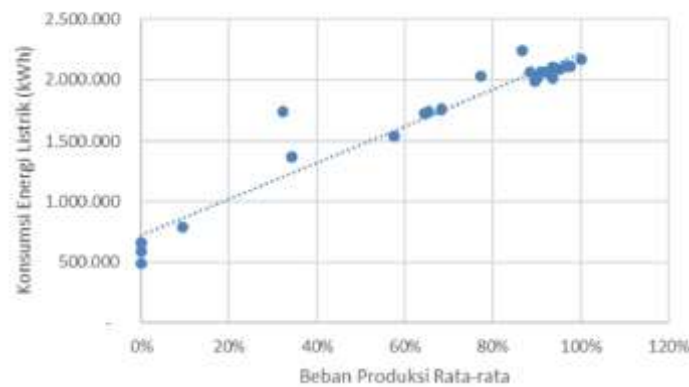
Potensi penghematan energi dihitung berdasarkan selisih konsumsi steam antara kondisi baseline dan hasil optimasi operasi absorption refrigerator. Steam eksese yang diperoleh selanjutnya dialokasikan berdasarkan prioritas kebutuhan, yaitu dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan steam proses atau dikonversi menjadi energi listrik melalui steam turbine generator (STG) apabila tidak terdapat kebutuhan steam. Penghematan energi dihitung sebagai pengurangan konsumsi gas alam pada boiler atau konsumsi listrik dari PLN sesuai skenario pemanfaatan steam, sedangkan penghematan biaya ditentukan dengan mengalikan besarnya energi yang dihemat terhadap harga gas alam dan tarif listrik yang berlaku di perusahaan. Seluruh analisis dilakukan menggunakan Microsoft Excel dan dibandingkan pada kondisi baseline, Moderate Case, dan Maximum Case untuk mengevaluasi manfaat teknis dan ekonomis dari strategi optimasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis *Energy Review* sebagai Dasar Penentuan *Significant Energy Use* dan Pengambilan Keputusan Optimasi

Tahapan awal penelitian difokuskan pada pelaksanaan *energy review* berdasarkan SNI ISO 50001:2018 untuk Energi Baseline (EnB), *Energy Performance Indicator* (EnPI), serta mengidentifikasi *Significant Energy Use* (SEU) pada sistem utilitas Plant C. Analisis dilakukan menggunakan data operasional selama periode April 2023 hingga Maret 2025 yang diperoleh dari *Plant Information Management System* (PIMS) Yokogawa Exaquantum, dilengkapi dengan pencatatan manual konsumsi energi listrik dan data produksi bulanan. Seluruh data terlebih dahulu melalui proses data cleansing dengan mengeliminasi kondisi *star-up*, *shutdown*, *plant upset*, maupun *trial operation*, sehingga model hanya dibangun menggunakan data yang mempresentasikan kondisi operasi normal. Pendekatan tersebut sejalan dengan prinsip dasar SNI ISO 50001:2018 yang menekankan bahwa pembentukan *energy baseline* harus didasarkan pada kondisi operasi yang stabil agar indikator kinerja energi mampu menggambarkan performa sistem secara objektif dan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi peningkatan kinerja energi secara berkelanjutan (ISO, 2018 ; Pariasamy *et al.*, 2022).

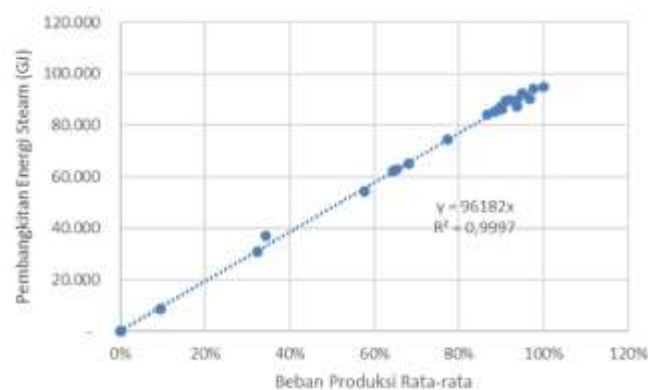
Hasil analisis menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik memiliki hubungan linear yang sangat kuat terhadap beban produksi dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,925 (Gambar 1). Tingginya nilai R^2 menunjukkan bahwa perubahan konsumsi energi listrik pada Plant C terutama dikendalikan oleh variasi kapasitas produksi, sedangkan pengaruh faktor operasional lainnya relatif kecil. Fenomena tersebut mencerminkan karakteristik umum industri proses kontinu, di mana peningkatan laju produksi diikuti oleh meningkatnya kebutuhan energi untuk mengoperasikan pompa, kompresor, motor listrik, serta sistem utilitas pendukung, sehingga konsumsi energi umumnya berkorelasi dengan tingkat produksi (ISO, 2018; Iskandar, 2015; Piccioni *et al.*, 2024). Persamaan regresi juga menghasilkan intersep sekitar 724 ribu kWh yang merepresentasikan *base electrical load*, yaitu konsumsi energi minimum yang tetap diperlukan untuk mempertahankan fungsi-fungsi kritis pabrik, seperti sistem kendali proses, instrumen keselamatan, sistem pendingin tangki penyimpanan, dan utilitas penunjang lainnya.



Gambar 1. Analisis Regresi Konsumsi Energi Listrik vs Beban Produksi

Sumber: Pengolahan Data Operasional & Produksi Dept., 2026

Temuan ini menunjukkan bahwa sebagian konsumsi energi bersifat independen terhadap tingkat produksi sehingga evaluasi kinerja energi tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan konsumsi energi absolut, tetapi perlu dinormalisasi terhadap beban produksi melalui pendekatan *Energy Baseline* (EnB). Oleh karena itu, *Energy Performance Indicator* (EnPI) yang dibangun berdasarkan model regresi memberikan representasi kinerja energi yang lebih akurat dibandingkan perbandingan konsumsi energi antarperiode tanpa mempertimbangkan perubahan kapasitas produksi (ISO, 2018; Iskandar, 2015; Piccioni *et al.*, 2024). Karakteristik yang lebih kuat bahkan ditunjukkan pada sistem pembangkitan steam. Hubungan antara pembangkitan steam dan beban produksi menghasilkan nilai koefisien determinasi sebesar 0,998 (Gambar 2), yang menunjukkan bahwa hampir seluruh variasi pembangkitan steam dijelaskan oleh perubahan tingkat produksi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem *Waste Heat Recovery Boiler* (WHRB) telah beroperasi secara efektif dalam memanfaatkan panas buang proses sebagai sumber energi untuk menghasilkan steam, sebagaimana prinsip pemanfaatan panas pada sistem pemulihan energi di industri proses (Smith *et al.*, 2018; Le Lostec *et al.*, 2013; Mansouri *et al.*, 2015).



Gambar 2. Analisis Regresi Pembangkitan Energi Steam vs Produksi

Sumber: Pengolahan Data Operasional Boiler & Produksi, 2026

Semakin tinggi beban produksi, semakin besar panas reaksi yang dilepaskan sehingga semakin besar pula potensi energi yang dapat direcovery menjadi steam. Nilai R^2 yang mendekati satu sekaligus menunjukkan bahwa kehilangan energi pada tahap pembangkitan

relative kecil sehingga ruang peningkatan efisiensi pada sisi pembangkitan menjadi terbatas. Interpretasi tersebut diperkuat oleh nilai EnPI pembangkitan steam yang berada pada kisaran 0,97-1,02 selama operasi normal, yang menunjukkan bahwa sistem telah beroperasi sangat dekat dengan kondisi *baseline*. Dengan demikian, peningkatan efisiensi energi tidak lagi memberikan manfaat yang signifikan apabila hanya difokuskan pada unit pembangkitan steam, melainkan perlu diarahkan pada peningkatan efektivitas pemanfaatan steam di sisi pengguna (*end-use energy efficiency*), yang secara konseptual merupakan tahapan berikutnya dalam penerapan sistem manajemen energi berbasis ISO 50001.

Implikasi penting dari hasil *energy review* tersebut adalah terjadinya pergeseran fokus konservasi energi dari aspek penyediaan energi (*energy supply*) menuju aspek pemanfaatan energi (*energy utilization*). Analisis Pareto menunjukkan bahwa sekitar 77% konsumsi steam Plant C terkonsentrasi pada tiga peralatan utama, yaitu steam turbin generator (35%), absorption refrigerator (33%) dan deaerator (9%). Akan tetapi, besarnya konsumsi energi tidak serta merta menjadikan suatu peralatan sebagai prioritas optimasi. Dalam kerangka ISO 50001, penetapan SEU mempertimbangkan tidak hanya besarnya konsumsi energi, tetapi juga peluang peningkatan kinerja energi (*opportunity for improvement*) yang masih tersedia. Steam turbin generator memang merupakan pengguna steam terbesar, namun karakteristik operasinya sebagai unit konversi energi menyebabkan fleksibilitas optimasi relatif terbatas karena efisiensi konversinya sebagian besar ditentukan oleh desain turbin dan kondisi termodinamika operasi. Sebaliknya, absorption refrigerator memiliki tingkat konsumsi energi yang hampir setara, namun kinerjanya masih dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi, seperti laju alir refrigeran, beban panas generator, distribusi steam dan kondisi perpindahan panas. Fleksibilitas operasional tersebut membuka peluang yang lebih besar untuk memperoleh peningkatan efisiensi melalui optimasi parameter operasi tanpa memerlukan modifikasi peralatan. Hasil ini memperkuat temuan Piccioni *et al.* (2024) bahwa prioritas konservasi energi seharusnya ditetapkan berdasarkan kombinasi antara besarnya kontribusi konsumsi energi dan potensi peningkatan efisiensi yang masih dapat dicapai, sehingga manfaat teknis maupun ekonominya menjadi lebih optimal.

Berbeda dengan implementasi *energy review* pada umumnya yang berhenti pada tahap identifikasi EnPI, EnB, dan SEU sebagai instrumen evaluasi kinerja energi, penelitian ini memanfaatkan keluaran *energy review* sebagai dasar penyusunan skenario simulasi optimasi proses. Dengan demikian, informasi yang diperoleh dari identifikasi SEU tidak hanya digunakan untuk menentukan prioritas konservasi energi, tetapi juga diterjemahkan menjadi variabel keputusan (*decision variables*) dalam simulasi optimasi sistem utilitas. Pendekatan ini menunjukkan bahwa *energy review* dapat bertransformasi dari sekadar alat evaluasi menjadi instrumen pendukung pengambilan keputusan operasional (*decision-support framework*) yang mampu menghubungkan sistem manajemen energi dengan optimasi proses secara kuantitatif. Integrasi inilah yang menjadi fondasi *Integrated Energy Decision Framework* yang diusulkan dalam penelitian ini, sehingga keluaran EnPI, EnB, dan SEU tidak berhenti sebagai indikator kinerja, tetapi berkembang menjadi dasar analitis dalam menentukan konfigurasi operasi sistem utilitas yang paling efisien.

Pengembangan Kerangka Pengambilan Keputusan Energi Terintegrasi Melalui Optimasi Proses

Hasil tinjauan energi pada tahap sebelumnya selanjutnya dimanfaatkan sebagai dasar dalam pengembangan *Integrated Energy Decision Framework*, yaitu suatu kerangka pengambilan keputusan yang mengintegrasikan keluaran *energy review* berbasis ISO 50001 dengan simulasi optimasi proses. Berbeda dengan implementasi ISO 50001 yang umumnya berhenti pada tahap identifikasi *Energy Performance Indicator* (EnPI), *Energy Baseline* (EnB), dan *Significant Energy Use* (SEU), penelitian ini menerjemahkan hasil identifikasi SEU menjadi parameter optimasi proses sehingga menghasilkan rekomendasi kondisi operasi yang

dapat diterapkan secara langsung pada sistem utilitas. Dengan demikian, proses *energy review* tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi kinerja energi, tetapi berkembang menjadi dasar analitis dalam menentukan strategi peningkatan efisiensi energi yang berbasis mekanisme proses.

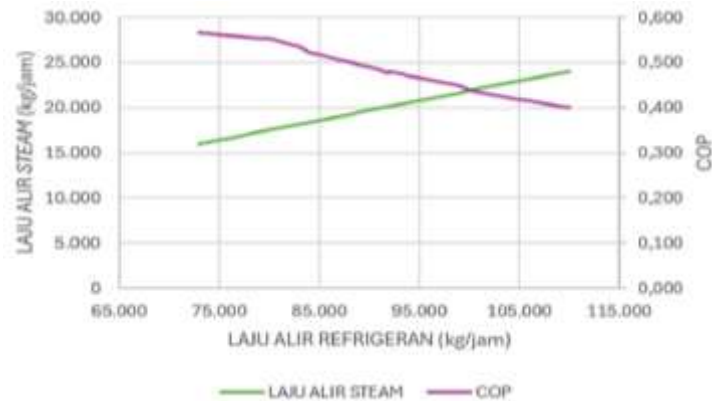
Berdasarkan hasil identifikasi SEU, *absorption refrigerator* dipilih sebagai objek optimasi karena memiliki kontribusi konsumsi steam yang tinggi sekaligus menyediakan fleksibilitas operasi yang lebih besar dibandingkan pengguna steam lainnya. Berbeda dengan *steam turbine generator* yang efisiensi konversinya sangat dipengaruhi oleh karakteristik desain turbin, kinerja *absorption refrigerator* masih dapat ditingkatkan melalui pengaturan variabel operasi, seperti laju alir refrigeran, beban panas generator, maupun distribusi steam. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa peluang peningkatan efisiensi energi lebih banyak berada pada sisi pemanfaatan energi (*energy utilization*) dibandingkan pada sistem pembangkitan energi (*energy supply*), sehingga optimasi difokuskan pada unit ini.

Sebelum digunakan sebagai instrumen optimasi, model simulasi terlebih dahulu divalidasi menggunakan data operasi aktual. Hasil validasi menunjukkan bahwa sebagian besar variabel proses memiliki tingkat deviasi yang masih berada dalam batas toleransi rekayasa. Meskipun model menghasilkan konsumsi steam yang lebih tinggi dibandingkan kondisi aktual sehingga nilai *Coefficient of Performance* (COP) mengalami *underestimation*, pola perubahan seluruh variabel operasi tetap mengikuti kecenderungan sistem aktual secara konsisten. Kondisi ini menunjukkan bahwa model memiliki trend sensitivity yang baik, yaitu mampu merepresentasikan respons termodinamika sistem terhadap perubahan kondisi operasi meskipun masih terdapat perbedaan pada nilai absolut. Perbedaan tersebut diduga berasal dari penyederhanaan konfigurasi generator pada model simulasi, di mana unit generator aktual dimodelkan sebagai kolom distilasi konvensional sehingga kebutuhan energi termalnya menjadi lebih besar akibat adanya beban *reflux* internal. Oleh karena itu, model simulasi lebih tepat digunakan sebagai alat analisis komparatif untuk mengevaluasi perubahan relatif antar skenario dibandingkan sebagai alat prediksi nilai operasi absolut. Pendekatan tersebut umum digunakan dalam simulasi proses karena tujuan utama optimasi bukan memperoleh kesesuaian numerik secara sempurna, melainkan menangkap kecenderungan perubahan sistem akibat intervensi variabel operasi (Le Lostec *et al.*, 2013; Mansouri *et al.*, 2015).

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa tidak seluruh variabel operasi memberikan pengaruh yang sama terhadap kinerja energi sistem. Variasi temperatur generator maupun temperatur *cooling water* tidak menghasilkan perubahan COP yang signifikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem telah beroperasi pada rentang temperatur yang relatif optimum sehingga perubahan kecil pada kedua parameter tersebut belum mampu mengubah keseimbangan termodinamika siklus refrigerasi absorpsi (Mansouri *et al.*, 2015). Selain itu, temperatur *cooling water* selama operasi aktual dijaga relatif konstan oleh sistem *cooling tower*, sehingga hambatan perpindahan panas pada kondensor dan absorber tidak menjadi faktor pembatas utama terhadap efisiensi sistem (Le Lostec *et al.*, 2013; Panahizadeh *et al.*, 2021). Dengan demikian, peningkatan performa tidak dapat dicapai hanya melalui pengaturan temperatur operasi.

Sebaliknya, laju alir refrigeran menunjukkan sensitivitas paling tinggi terhadap perubahan konsumsi steam maupun nilai COP (Gambar 3). Peningkatan laju alir refrigeran menyebabkan kebutuhan energi pada generator meningkat hampir secara linier karena semakin banyak larutan refrigeran yang harus dipanaskan untuk memisahkan amonia dari air. Akan tetapi, peningkatan suplai energi tersebut tidak diikuti oleh kenaikan kapasitas pendinginan evaporator yang sebanding. Hasil simulasi menunjukkan bahwa beban pendinginan evaporator relatif konstan setelah mencapai kebutuhan pendinginan proses, sehingga tambahan energi panas yang diberikan ke generator tidak lagi menghasilkan peningkatan efek refrigerasi. Fenomena ini menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi *thermal saturation*, yaitu

ketika kapasitas pendinginan dibatasi oleh kebutuhan proses, bukan oleh kemampuan generator menghasilkan refrigeran. Akibatnya, tambahan energi steam hanya meningkatkan konsumsi energi tanpa memberikan peningkatan manfaat pendinginan sehingga nilai COP mengalami penurunan. Secara termodinamika, kondisi tersebut menggambarkan terjadinya penurunan efisiensi konversi energi panas (*diminishing thermal return*), di mana setiap tambahan energi input menghasilkan peningkatan keluaran yang semakin kecil. Hasil ini konsisten dengan penelitian Ciambellotti *et al.* (2022) dan Darwish (2008), yang menyatakan bahwa strategi peningkatan efisiensi pada sistem refrigerasi absorpsi lebih efektif dilakukan melalui penurunan beban termal generator dibandingkan peningkatan kapasitas pendinginan.



Gambar 3. Hubungan antara Laju Alir Refrigeran dengan Laju Alir Steam dan COP

Sumber: Hasil Pengolahan Data Peneliti, 2026

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas, kondisi operasi optimum diperoleh pada laju alir refrigeran sekitar 81.000 kg/jam. Pada titik operasi tersebut, sistem masih berada dalam batas operasi mekanis yang aman karena tekanan keluaran *expansion valve* belum mencapai kondisi kritis, sementara kebutuhan steam generator telah berkurang secara signifikan sehingga menghasilkan peningkatan COP. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi energi pada *absorption refrigerator* tidak diperoleh melalui penambahan kapasitas sistem, melainkan melalui penyesuaian kondisi operasi sehingga energi panas yang digunakan benar-benar sesuai dengan kebutuhan pendinginan aktual. Dengan kata lain, efisiensi dicapai melalui optimasi distribusi energi, bukan melalui peningkatan konsumsi energi (Mansouri *et al.*, 2015; Panahizadeh *et al.*, 2021).

Aspek lain yang membedakan penelitian ini dibandingkan studi optimasi sebelumnya adalah pengembangan dua skenario implementasi, yaitu *Moderate Case* dan *Maximum Case*. Pendekatan ini didasarkan pada pertimbangan bahwa penerapan hasil simulasi secara langsung pada kondisi operasi aktual berpotensi meningkatkan risiko operasional, sehingga perubahan parameter operasi perlu dilakukan secara bertahap untuk menjaga keseimbangan antara peningkatan efisiensi energi dan keandalan sistem (ISO, 2018; Mansouri *et al.*, 2015). *Moderate Case* berfungsi sebagai strategi transisi dengan risiko operasional yang rendah karena titik operasi masih berada relatif dekat dengan kondisi eksisting, sedangkan *Maximum Case* merepresentasikan batas atas efisiensi termal yang masih memenuhi batas operasi mekanis peralatan. Pendekatan bertahap tersebut menunjukkan bahwa *Integrated Energy Decision Framework* yang dikembangkan tidak hanya menghasilkan rekomendasi kondisi operasi optimum secara teoritis, tetapi juga mempertimbangkan aspek implementabilitas dalam proses pengambilan keputusan. Dengan demikian, *framework* yang diusulkan mampu menjembatani hasil *energy review* dengan strategi optimasi proses yang lebih adaptif, realistis,

dan aplikatif untuk mendukung peningkatan kinerja energi sistem utilitas industri, sejalan dengan prinsip *continual improvement* dalam ISO 50001 (ISO, 2018; Piccioni *et al.*, 2024).

Dampak Penerapan Kerangka Pengambilan Keputusan Energi Terintegrasi terhadap Kinerja Energi dan Biaya Operasional

Implementasi *Integrated Energy Decision Framework* yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi antara *energy review* berbasis ISO 50001 dan simulasi optimasi proses mampu menghasilkan peningkatan kinerja energi yang terukur pada sistem utilitas. Berbeda dengan pendekatan manajemen energi konvensional yang umumnya berfokus pada penyusunan *Energy Baseline* (EnB), *Energy Performance Indicator* (EnPI), identifikasi *Significant Energy Use* (SEU), dan peluang konservasi energi (ISO, 2018; Iskandar, 2015; Kamaluddin *et al.*, 2022; Piccioni *et al.*, 2024), kerangka yang diusulkan mampu menerjemahkan hasil identifikasi SEU menjadi rekomendasi kondisi operasi yang dapat dievaluasi secara kuantitatif melalui simulasi proses (Mansouri *et al.*, 2015). Dengan demikian, proses pengambilan keputusan tidak lagi didasarkan semata pada besarnya konsumsi energi, tetapi juga mempertimbangkan dampak perubahan parameter operasi terhadap kinerja peralatan dan neraca energi sistem secara menyeluruh.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan laju alir refrigeran memberikan dampak langsung terhadap penurunan kebutuhan steam pada generator *absorption refrigerator*. Pada skenario *Moderate Case*, konsumsi steam berhasil diturunkan sebesar 6,4% disertai peningkatan *Coefficient of Performance* (COP) sebesar 7,6%, sedangkan pada *Maximum Case* konsumsi steam menurun hingga 11,9% dengan peningkatan COP mencapai 14,9%. Peningkatan COP tersebut menunjukkan bahwa energi panas yang sama mampu menghasilkan kapasitas pendinginan yang lebih besar, atau sebaliknya, kapasitas pendinginan proses dapat dipertahankan dengan kebutuhan energi termal yang lebih rendah. Secara termodinamika, kondisi ini menunjukkan bahwa efisiensi sistem tidak diperoleh melalui peningkatan produksi efek pendinginan, melainkan melalui penurunan kehilangan energi pada sisi generator sehingga rasio antara energi pendinginan yang dihasilkan terhadap energi panas yang dikonsumsi menjadi lebih tinggi. Fenomena ini konsisten dengan karakteristik dasar sistem refrigerasi absorpsi, di mana beban panas generator merupakan komponen yang paling menentukan efisiensi keseluruhan siklus (Ciambellotti *et al.*, 2022).

Penurunan konsumsi steam menghasilkan surplus energi yang selanjutnya dapat dimanfaatkan melalui dua alternatif strategi pengelolaan energi. Alternatif pertama adalah mengonversi surplus steam menjadi energi listrik melalui *steam turbine generator* (STG), sedangkan alternatif kedua adalah mengalihkan surplus steam untuk menurunkan beban boiler sehingga konsumsi gas alam dapat dikurangi. Kedua strategi tersebut memberikan konsekuensi teknis dan ekonomi yang berbeda sehingga pemilihannya tidak hanya ditentukan oleh besarnya potensi penghematan energi, tetapi juga oleh fleksibilitas operasional sistem utilitas secara keseluruhan (Smith *et al.*, 2018; Panahizadeh *et al.*, 2021; ISO, 2018).

Pemanfaatan surplus steam melalui STG menghasilkan tambahan pembangkitan listrik internal sekitar 184 kW pada skenario moderat dan meningkat hingga sekitar 340 kW pada skenario maksimum. Tambahan energi tersebut setara dengan pengurangan pembelian listrik dari jaringan sebesar sekitar 1,47 GWh/tahun dan 2,72 GWh/tahun, dengan potensi penghematan biaya listrik masing-masing sekitar Rp1,47 miliar dan Rp2,71 miliar per tahun (Tabel 1). Walaupun nilai ekonominya lebih rendah dibandingkan pengurangan konsumsi bahan bakar boiler, strategi ini mempunyai tingkat keandalan operasional yang lebih tinggi karena tidak dipengaruhi oleh perubahan kebutuhan steam pada unit produksi lain. Selama tersedia surplus steam, STG secara langsung mampu mengonversinya menjadi energi listrik sehingga manfaat penghematan dapat diperoleh secara konsisten. Dengan kata lain, STG berfungsi sebagai *energy sink* yang mampu menyerap fluktuasi surplus energi tanpa bergantung pada kondisi operasi unit lain.

Sebaliknya, apabila surplus steam dimanfaatkan untuk mengurangi beban boiler, potensi manfaat ekonomi yang diperoleh menjadi lebih besar. Pada skenario moderat dan maksimum, penghematan biaya bahan bakar gas alam diperkirakan mencapai sekitar Rp3,91 miliar dan Rp7,20 miliar per tahun. Akan tetapi, keuntungan tersebut hanya dapat direalisasikan apabila terdapat kebutuhan steam pada unit penerima. Ketergantungan terhadap permintaan steam eksternal menyebabkan strategi ini dibatasi oleh kendala operasional (*demand constraint*), sehingga besarnya penghematan aktual sangat dipengaruhi oleh dinamika produksi plant secara keseluruhan. Dengan demikian, meskipun secara teoritis strategi ini memberikan nilai ekonomi yang lebih tinggi, tingkat kepastian implementasinya relatif lebih rendah dibandingkan pemanfaatan surplus steam melalui STG.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengambilan keputusan dalam pengelolaan energi industri seharusnya tidak hanya mempertimbangkan besarnya potensi penghematan, tetapi juga mempertimbangkan tingkat fleksibilitas sistem dan risiko operasional yang menyertainya. Pendekatan ini merupakan salah satu keunggulan *Integrated Energy Decision Framework* yang dikembangkan dalam penelitian ini, karena evaluasi alternatif tidak hanya didasarkan pada indikator konsumsi energi, tetapi juga mempertimbangkan keterkaitan antarutilitas, distribusi steam, serta karakteristik operasi masing-masing unit. Oleh sebab itu, rekomendasi operasi yang dihasilkan lebih adaptif terhadap kondisi aktual industri dibandingkan pendekatan *energy review* konvensional yang umumnya hanya menghasilkan daftar peluang konservasi energi (ISO, 2018; Kamaluddin *et al.*, 2022; Piccioni *et al.*, 2024).

Selain memberikan manfaat ekonomi, implementasi kerangka yang diusulkan juga berkontribusi terhadap pencapaian target dekarbonisasi industri. Pemanfaatan surplus *steam* melalui *steam turbine generator* (STG) mampu menurunkan konsumsi listrik dari jaringan sehingga menghasilkan penurunan emisi tidak langsung (*Scope 2*), sedangkan pengurangan beban *boiler* menurunkan konsumsi gas alam yang berdampak pada penurunan emisi langsung (*Scope 1*) sesuai dengan prinsip inventarisasi emisi gas rumah kaca (Pedoman Penyelenggaraan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Nasional, 2012). Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi energi pada sistem utilitas memberikan manfaat ganda (*co-benefits*), yaitu meningkatkan efisiensi operasional sekaligus mendukung strategi transisi menuju industri rendah karbon melalui pengurangan konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca (PP RI No. 33 Tahun 2023; Sekretariat Jenderal DEN, 2023). Dengan demikian, *Integrated Energy Decision Framework* yang diusulkan tidak hanya memperluas fungsi *energy review* sebagai alat evaluasi kinerja energi sesuai prinsip ISO 50001, tetapi juga mengembangkannya menjadi kerangka pendukung keputusan yang mengintegrasikan indikator kinerja energi, optimasi operasi proses, evaluasi manfaat ekonomi, dan pengurangan emisi karbon secara terpadu (ISO, 2018).

Tabel 1. Perbandingan Potensi Pemanfaatan Surplus Steam melalui Steam Turbine Generator (STG) pada Skenario Moderate dan Maximum

Parameter	Satuan	Moderate case	Maximum Case
Potensi daya Listrik yang dihasilkan	kW	184	333
Penghematan Listrik	kWh/Tahun	1.472.000	2.712.000
Efisiensi Biaya	Miliar Rupiah/tahun	1,467	2,712
Penurunan Emisi Karbon	kgCO ₂ /tahun	1.315.968	2.424.528

(Sumber: Hasil Pengolahan Data Peneliti, 2026)

Tabel 2. Perbandingan Potensi Penghematan Gas Alam melalui Pemanfaatan Surplus Steam pada Skenario Moderate dan Maximum

Parameter	Satuan	Moderate case	Maximum Case
Penghematan Gas Alam	MMbtu/jam	4,229	7,806
Total Penghematan Gas Alam kumulatif	MMbtu/tahun	33.832	62.448

Efisiensi Biaya	Miliar Rupiah/tahun	3,908	7,213
Penurunan Emisi Karbon	kgCO ₂ /tahun	2.002.470	3.698.212

(Sumber: Hasil Pengolahan Data Peneliti, 2026)

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan *Integrated Energy Decision Framework* yang mengintegrasikan *energy review* berbasis ISO 50001:2018 dengan simulasi optimasi proses sebagai kerangka pengambilan keputusan operasional pada sistem utilitas industri petrokimia. Berdasarkan hasil *energy review*, *absorption refrigerator* teridentifikasi sebagai *Significant Energy Use* (SEU) dengan kontribusi konsumsi steam sebesar 33% dan peluang peningkatan efisiensi terbesar dibandingkan pengguna steam lainnya, sehingga dipilih sebagai objek optimasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa optimasi laju alir refrigeran pada kisaran 81.000 kg/jam mampu menurunkan konsumsi steam sebesar 6,4–11,9% dan meningkatkan *Coefficient of Performance* (COP) sebesar 7,6–14,9% dibandingkan kondisi baseline.

Penurunan konsumsi steam menghasilkan surplus energi yang dapat dimanfaatkan melalui dua alternatif strategi, yaitu peningkatan pembangkitan listrik internal melalui *steam turbine generator* (STG) yang menghasilkan penghematan biaya listrik sebesar Rp1,47–2,71 miliar per tahun, atau pengurangan konsumsi gas alam pada boiler yang menghasilkan penghematan biaya bahan bakar sebesar Rp3,91–7,20 miliar per tahun. Implementasi *framework* ini juga memberikan manfaat ganda (*co-benefits*) berupa penurunan emisi gas rumah kaca sebesar 1.315.968–2.424.528 kgCO₂/tahun melalui pengurangan listrik jaringan (*Scope 2*) dan 2.002.470–3.698.212 kgCO₂/tahun melalui pengurangan konsumsi gas alam (*Scope 1*). Temuan ini membuktikan bahwa integrasi *energy review* dan simulasi proses menghasilkan kerangka pendukung keputusan yang lebih efektif dibandingkan pendekatan manajemen energi konvensional yang berhenti pada tahap identifikasi indikator kinerja, sehingga berpotensi menjadi instrumen strategis dalam pengelolaan energi pada industri proses yang memiliki sistem utilitas terintegrasi.

REFERENSI

- Ambabunga, Y., Ashari, D., Ibrahim, A. F., Rantererung, I. C. L., Pasae, Y., Buku, I. A., Patoding, H. E., & Seno, T. T. (2026). *Industri kelistrikan dalam transisi energi*. Arsy Media.
- Arief, I. A., Nappu, I. M. B., Manjang, I. S., & Erwin. (2026). *Transformasi sistem tenaga listrik modern: Integrasi distributed generation, energy storage, dan microgrid*. Penerbit Hanif Media Pustaka.
- Ciambellotti, A., Pasini, G., Baccioli, A., Ferrari, L., & Barsali, S. (2022). Absorption chillers to improve the performance of small-scale biomethane liquefaction plants.
- Energy Management Team PT. XXX. (2024). *Energy review report*.
- Fatimata Dione, Thiam, A., Diouf, D., & Maiga, A.-S. (2022). Thermodynamic modelling of a 10-kW ammonia-water absorption machine. *Journal of Energy and Power Engineering*, 16(5), 213–221. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2022.05.003>
- Fitriadhi, F., Fitriadi, D., Ardiyanti, D., & Amrulloh, M. O. R. (2025). Evaluasi implementasi audit energi dan sistem manajemen energi ISO 50001:2018 di PT Putra Perkasa Abadi

- Site Borneo Indobara. *GEMILANG: Jurnal Manajemen dan Akuntansi*, 5(2), 325–334.
- Irsan, M., Radhiansyah, R., Yurika, Y., Noor, N. C., Taryana, E., Abidin, A., & Qadri, U. L. (2025). *Sistem energi: Konsep, teknologi, dan implementasi berkelanjutan*. Yayasan Tri Edukasi Ilmiah.
- Iskandar, N. U. R. R. (2015). *Prosedur standar dan teknik audit energi di industri*.
- ISO. (2018). *ISO 50001:2018 energy management systems—Requirements with guidance for use*. <https://www.iso.org/standard/69426.html>
- Kamaluddin, Budiman, I., & Sembiring, A. C. (2022). Energy analysis of significant energy use in tire company using Pareto diagram. *JKIE (Journal Knowledge Industrial Engineering)*, 9(2), 95–99. <https://doi.org/10.35891/jkie.v9i2.3252>
- Le Lostec, B., Galanis, N., & Millette, J. (2013). Simulation of an ammonia-water absorption chiller. *Renewable Energy*, 60, 269–283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.027>
- Mansouri, R., Boukholda, I., Bourouis, M., & Bellagi, A. (2015). Modelling and testing the performance of a commercial ammonia/water absorption chiller using Aspen Plus platform. *Energy*, 93(Part 2), 2374–2383. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.081>
- Panahizadeh, F., Hamzehei, M., Farzaneh-Gord, M., & Ochoa, A. A. V. (2021). Energy, exergy, economic analysis and optimization of single-effect absorption chiller network. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(3). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09966-4>
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi. (2023).
- Piccioni, M., Martini, F., Martini, C., & Toro, C. (2024). Evaluation of energy performance indicators and energy saving opportunities for the Italian rubber manufacturing industry.
- Sale, C. I. (2022). *Strategi pengembangan sistem manajemen energi ISO 50001:2018 untuk meningkatkan daya saing PT Semen Tonasa = The development strategy of energy management system ISO 50001:2018 to increase competitiveness PT Semen Tonasa* [Tesis, Universitas Hasanuddin].
- Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional. (2023). *Outlook Energi Indonesia 2023*. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-outlook-energi-indonesia-2023.pdf>
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M. M., & Swihart, M. T. (2018). *Introduction to chemical engineering thermodynamics* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- Tauruy, A. Y., Fahmi, I., & Najib, M. (2022). Energy management system implementation strategy in the concentrating division of PT Freeport Indonesia based on ISO 50001:2018. *Business Review and Case Studies*, 3(2), 170.