

Pengembangan Kerangka Kerja Manajemen Energi Berbasis *Cloud Real-Time* Menggunakan *Industrial Energy Performance Index* untuk Implementasi ISO 50001 pada Industri Tekstil

Irpan Restu Ade Putra, Marsul Siregar, Karel Octavianus Bachri*

Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Indonesia

Email: karel.bachri@atmajaya.ac.id*

Keywords:

Sistem Manajemen Energi; Komputasi Awan; Industrial Internet of Things; Industrial Energy Performance Index; ISO 50001

Abstract

Energy efficiency has become a critical challenge in the manufacturing sector due to increasing energy costs, operational demands, and the need for sustainable industrial practices. Textile industries are among the sectors with high electricity consumption because of their continuous production processes and complex electrical load characteristics. However, conventional energy monitoring systems generally rely on manual data recording and provide limited performance evaluation capabilities. This study aims to develop and validate a Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework (RCEMF) integrated with the Industrial Energy Performance Index (IEPI) to support energy monitoring, performance evaluation, and decision-making for ISO 50001 implementation in the textile industry. The research employed a Research and Development (R&D) method with an experimental approach, including system architecture design, automatic data acquisition development, Modbus RTU communication implementation, cloud database integration, IEPI development, and framework validation. The results demonstrate that RCEMF successfully integrates digital power meters, IoT gateways, cloud computing, energy analytics, and decision support systems into a unified platform. The framework reduced data acquisition time by more than 96% compared with conventional methods, achieved 99.9% communication reliability, and enabled real-time energy performance evaluation. Furthermore, IEPI effectively represented changes in operational conditions by integrating Specific Energy Consumption, Power Factor, Load Factor, and Maximum Demand Utilization indicators. In conclusion, RCEMF provides an effective digital solution for improving energy management systems, supporting ISO 50001 implementation, and enhancing sustainable energy efficiency in textile industries.

Kata Kunci:

Sistem Manajemen Energi; Komputasi Awan; Industrial Internet of Things; Industrial Energy Performance Index; ISO 50001

Abstrak

Efisiensi energi menjadi tantangan penting pada sektor manufaktur akibat meningkatnya biaya energi, tuntutan efisiensi operasional, serta kebutuhan terhadap praktik industri berkelanjutan. Industri tekstil merupakan salah satu sektor dengan konsumsi energi listrik yang tinggi karena memiliki proses produksi berkelanjutan dan karakteristik beban listrik yang kompleks. Namun, sistem monitoring energi konvensional masih banyak bergantung pada pencatatan manual serta belum mampu menyediakan evaluasi performa energi secara terintegrasi dan real-time. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan memvalidasi *Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework* (RCEMF) yang terintegrasi dengan *Industrial Energy Performance Index* (IEPI) untuk mendukung

pemantauan energi, evaluasi performa energi, serta pengambilan keputusan dalam implementasi ISO 50001 pada industri tekstil. Penelitian menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan eksperimental yang mencakup perancangan arsitektur sistem, pengembangan akuisisi data otomatis, implementasi komunikasi Modbus RTU, integrasi basis data berbasis *cloud*, pengembangan IEPI, dan validasi framework. Hasil penelitian menunjukkan bahwa RCEMF mampu mengintegrasikan *digital power meter*, IoT Gateway, komputasi awan, analitik energi, dan sistem pendukung keputusan dalam satu platform terpadu. Framework ini mampu mengurangi waktu akuisisi data lebih dari 96%, mencapai tingkat keandalan komunikasi sebesar 99,9%, serta melakukan evaluasi performa energi secara real-time. IEPI juga mampu merepresentasikan perubahan kondisi operasi melalui integrasi indikator SEC, PF, LF, dan MDU. Kesimpulannya, RCEMF menjadi solusi digital yang efektif untuk meningkatkan sistem manajemen energi, mendukung implementasi ISO 50001, dan meningkatkan efisiensi energi berkelanjutan pada industri tekstil.

PENDAHULUAN

Transformasi digital pada sektor industri manufaktur telah mendorong perubahan paradigma dalam pengelolaan proses produksi (Kraus et al., 2021), pemanfaatan sumber daya, dan pengambilan keputusan berbasis data. Sejalan dengan perkembangan konsep Industri 4.0, perusahaan saat ini tidak lagi hanya berfokus pada peningkatan kapasitas produksi, tetapi juga dituntut untuk meningkatkan efisiensi energi (Zahid et al., 2025), mengurangi biaya operasional, serta mendukung keberlanjutan lingkungan. Dalam konteks tersebut, energi listrik menjadi salah satu dari komponen biaya operasional terbesar pada industri manufaktur sehingga pengelolaannya secara efektif menjadi faktor penting dalam meningkatkan daya saing perusahaan (Onu et al., 2023).

Meningkatnya biaya energi, tuntutan efisiensi operasional, serta penerapan konsep industri berkelanjutan mendorong sektor manufaktur untuk mengembangkan sistem manajemen energi yang mampu melakukan pemantauan dan evaluasi performa energi secara real-time. Namun, sebagian besar sistem monitoring energi di industri manufaktur Indonesia masih terbatas pada penyajian parameter kelistrikan tanpa menyediakan evaluasi performa energi secara terintegrasi.

Industri tekstil merupakan salah satu sektor manufaktur yang memiliki tingkat konsumsi energi listrik yang relatif tinggi (“Preface,” 2026; Sakti et al., 2021) karena melibatkan berbagai proses produksi yang beroperasi secara kontinu, seperti spinning, weaving, dyeing, finishing, serta sistem utilitas yang meliputi kompresor udara, *chiller*, *cooling tower*, pompa, dan sistem ventilasi. Kompleksitas proses tersebut menyebabkan konsumsi energi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi mesin, kualitas daya listrik, dan karakteristik pembebanan. Oleh karena itu, perusahaan memerlukan sistem manajemen energi yang mampu melakukan pemantauan secara berkelanjutan serta menyediakan informasi yang akurat sebagai dasar pengambilan keputusan (Harsanto et al., 2023).

Penerapan Sistem Manajemen Energi berdasarkan ISO 50001 (Fitzgerald et al., 2023) telah menjadi salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi energi melalui proses perencanaan, implementasi, pemantauan, evaluasi, dan perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*). Salah satu persyaratan utama dalam standar tersebut

adalah tersedianya data energi yang akurat, terdokumentasi, dan diperoleh secara berkesinambungan sehingga organisasi dapat mengevaluasi kinerja energi secara objektif. Namun, pada praktiknya masih banyak industri yang mengandalkan proses pencatatan manual terhadap data digital power meter, kemudian melakukan pengolahan menggunakan perangkat lunak spreadsheet. Pendekatan tersebut memerlukan waktu yang relatif lama, berpotensi menimbulkan human error, serta belum mampu menyediakan informasi secara real-time.

Perkembangan teknologi *Industrial Internet of Things* (IIoT), komputasi awan (*cloud computing*), dan komunikasi industri memberikan peluang untuk membangun sistem manajemen energi yang lebih terintegrasi. Melalui teknologi (Rajagopalan, 2024) tersebut, data dari digital power meter dapat diakuisisi secara otomatis menggunakan protokol komunikasi industri, dikirim menuju cloud database, kemudian dianalisis dan divisualisasikan secara real-time. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kecepatan akuisisi data, tetapi juga memungkinkan tersedianya data historis yang dapat dimanfaatkan untuk analisis tren konsumsi energi, evaluasi kualitas daya listrik, serta penyusunan strategi peningkatan efisiensi energi [(Afrin, 2025; Hanifi et al., 2025; Mirani et al., 2024).

Berbagai penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem pemantauan energi berbasis IoT dan komputasi awan pada sektor industri. Sebagian besar penelitian berfokus pada pengembangan arsitektur komunikasi (Choudhary, 2024), visualisasi (Eber et al., 2023; Lamas et al., 2025) data, maupun sistem pemantauan konsumsi energi secara real-time (Agustiarni, 2025; Bonavolontà et al., 2025; G., 2024). Beberapa penelitian juga telah memanfaatkan dashboard berbasis web (Awad, 2024; Wiczak & Szymoniak, 2024) untuk menampilkan parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya aktif, faktor daya, frekuensi, dan konsumsi energi. Meskipun demikian, sebagian besar sistem tersebut masih berfungsi sebagai media visualisasi data sehingga pengguna tetap harus melakukan interpretasi terhadap masing-masing parameter secara terpisah (Ficili et al., 2025) untuk mengevaluasi kondisi performa energi.

Selain itu, penelitian sebelumnya umumnya belum mengintegrasikan indikator efisiensi energi dan kualitas daya listrik ke dalam suatu indeks yang mampu merepresentasikan kondisi performa energi secara komprehensif. Akibatnya, proses evaluasi masih memerlukan analisis manual terhadap berbagai parameter kelistrikan sehingga identifikasi kondisi abnormal maupun potensi pemborosan energi menjadi kurang efektif. Di sisi lain, integrasi antara sistem monitoring berbasis cloud dengan mekanisme evaluasi (Ahmed et al., 2025; Magara & Phahlane, 2026), performa energi dan sistem pendukung keputusan juga masih relatif terbatas, khususnya pada implementasi di industri tekstil (Singh, 2025).

Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat kesenjangan penelitian (research gap) dalam pengembangan sistem manajemen energi yang tidak hanya mampu melakukan akuisisi data secara otomatis dan real-time, tetapi juga menyediakan mekanisme evaluasi performa energi yang terintegrasi serta mendukung pengambilan keputusan secara cepat dan berbasis data. Oleh karena itu, diperlukan suatu *framework* yang mampu menghubungkan proses akuisisi data, komunikasi industri, penyimpanan data berbasis cloud, analisis energi, serta evaluasi performa energi dalam satu platform yang terpadu.

Penelitian ini mengusulkan Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework (Ke et al., 2017; Mansouri et al., 2024) (RCEMF) yang terintegrasi dengan Industrial Energy Performance Index (IEPI) sebagai pendekatan baru untuk mendukung implementasi Sistem Manajemen Energi pada industri tekstil. RCEMF mengintegrasikan proses akuisisi data

otomatis dari digital power meter, komunikasi Modbus RTU, IoT Gateway, penyimpanan data berbasis cloud, (Sequeira et al., 2014) analitik energi, dan sistem pendukung keputusan (*Decision Support System*) dalam satu platform. Sementara itu, IEPI dikembangkan sebagai indeks komposit yang mengintegrasikan indikator *Specific Energy Consumption* (SEC), *Power Factor* (PF), *Load Factor* (LF) dan *Maximum Demand Utilization* (MDU), sehingga kondisi performa energi dapat dievaluasi secara lebih sederhana, komprehensif, dan mudah dipahami oleh operator maupun manajemen. Berdasarkan uraian tersebut, tujuan penelitian ini dapat mengembangkan dan memvalidasi *Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework* (RCEMF) yang terintegrasi dengan *Industrial Energy Performance Index* (IEPI) untuk mendukung pemantauan, evaluasi performa energi, dan pengambilan keputusan secara real-time pada industri tekstil. Framework yang dikembangkan diharapkan mampu meningkatkan efektivitas implementasi Sistem Manajemen Energi, mempercepat identifikasi potensi pemborosan energi, serta menyediakan informasi yang lebih akurat sebagai dasar pengambilan keputusan dan peningkatan efisiensi energi secara berkelanjutan.

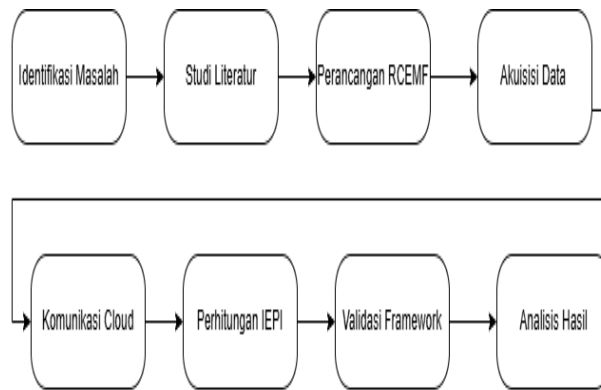
Kontribusi utama penelitian ini meliputi tiga aspek. Pertama, pengembangan *Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework* (RCEMF) sebagai arsitektur terpadu yang mengintegrasikan akuisisi data, komunikasi industri, komputasi awan, analitik energi, dan sistem pendukung keputusan. Kedua, pengembangan *Industrial Energy Performance Index* (IEPI) sebagai metode baru untuk mengevaluasi performa energi industri melalui integrasi berbagai indikator efisiensi energi dan kualitas daya listrik ke dalam satu indeks komposit. Ketiga, implementasi dan validasi *framework* pada sistem distribusi tenaga listrik di industri tekstil untuk mendukung pemantauan energi secara real-time dan implementasi ISO 50001.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan eksperimental untuk mengembangkan dan memvalidasi *Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework* (RCEMF) yang terintegrasi dengan *Industrial Energy Performance Index* (IEPI). Framework dikembangkan sebagai sistem manajemen energi berbasis cloud yang mampu melakukan akuisisi data secara otomatis, pemantauan performa energi secara real-time, analisis data, serta penyediaan rekomendasi sebagai pendukung pengambilan keputusan.

Tahapan penelitian meliputi identifikasi kebutuhan sistem, perancangan arsitektur framework, pengembangan sistem akuisisi data, implementasi komunikasi berbasis Modbus RTU, integrasi dengan IoT Gateway dan cloud database, pengembangan metode evaluasi menggunakan IEPI, serta validasi kinerja framework pada sistem distribusi tenaga listrik di industri tekstil.



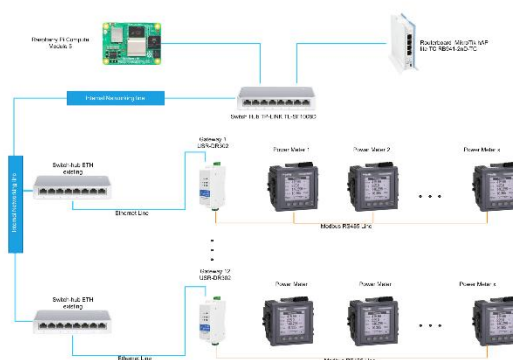
Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian dalam Perancangan Framework RCEMF Menggunakan IEPI

Arsitektur *Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework (RCEMF)*

Framework yang dikembangkan terdiri atas lima lapisan utama (five-layer architecture), yaitu:

1. *Data Acquisition Layer*, berfungsi memperoleh data kelistrikan secara otomatis dari digital power meter.
2. *Communication Layer*, berfungsi mengirimkan data menggunakan protokol Modbus RTU melalui jaringan RS-485 menuju IoT Gateway.
3. *Cloud Data Management Layer*, berfungsi menyimpan data pada cloud database sehingga dapat diakses secara real-time maupun sebagai data historis.
4. *Energy Analytics Layer*, berfungsi mengolah data kelistrikan menjadi indikator performa energi, termasuk perhitungan *Industrial Energy Performance Index (IEPI)*.
5. *Decision Support Layer*, berfungsi memberikan rekomendasi operasional berdasarkan hasil evaluasi performa energi dan kondisi sistem tenaga listrik.

Arsitektur ini memungkinkan integrasi seluruh proses mulai dari akuisisi data hingga penyajian informasi sebagai dasar pengambilan keputusan secara otomatis.



Gambar 2. Arsitektur *Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework (RCEMF)*

Akuisisi Data Kelistrikan

Akuisisi data dilakukan menggunakan digital power meter Schneider PM2200 yang dipasang pada panel distribusi listrik di industri tekstil. Perangkat ini mampu mengukur berbagai parameter kelistrikan secara kontinu, meliputi:

1. Tegangan (*Voltage*)
2. Arus (*Current*)
3. Daya Aktif (*Active Power*)
4. Faktor Daya (*Power Factor*)
5. Frekuensi (*Frequency*)
6. Konsumsi Energi (*Energy Consumption*)
7. *Maximum Demand*

Seluruh data dibaca secara otomatis menggunakan protokol Modbus RTU melalui jaringan RS-485 tanpa memerlukan pencatatan manual oleh operator.

Komunikasi Data Berbasis *Cloud*

Data hasil pengukuran dikirimkan dari IoT Gateway menuju *cloud database* menggunakan jaringan internet sehingga seluruh parameter kelistrikan dapat dipantau secara real-time. Penyimpanan data dilakukan secara kontinu untuk membangun basis data historis yang dapat dimanfaatkan dalam analisis tren konsumsi energi, evaluasi performa energi, serta penyusunan laporan manajemen energi.

Selain penyimpanan data, sistem juga menyediakan dashboard berbasis web yang menampilkan parameter kelistrikan secara interaktif sehingga pengguna dapat memonitor kondisi sistem distribusi tenaga listrik dari berbagai lokasi.

Industrial Energy Performance Index (IEPI)

Penelitian ini mengembangkan *Industrial Energy Performance Index (IEPI)* sebagai indeks komposit untuk mengevaluasi performa energi industri secara menyeluruh. Berbeda dengan sistem monitoring konvensional yang hanya menampilkan parameter kelistrikan secara terpisah, IEPI mengintegrasikan beberapa indikator utama ke dalam satu nilai indeks sehingga memudahkan interpretasi kondisi sistem.

Indikator yang digunakan meliputi:

1. *Specific Energy Consumption (SEC)*
2. *Power Factor (PF)*
3. *Load Factor (LF)*
4. *Maximum Demand Utilization (MDU)*

Setiap indikator dinormalisasi dan diberikan bobot tertentu sebelum dihitung menjadi nilai IEPI. Semakin tinggi nilai IEPI menunjukkan semakin baik performa energi sistem.

Persamaan umum IEPI dinyatakan sebagai:

$$IEPI = \sum_{i=1}^n w_i S_i$$

dengan:

1. w_i = bobot indikator ke-i
2. S_i = nilai normalisasi indikator ke-i
3. $\sum w_i = 1$

Keterangan mengenai metode normalisasi dan pembobotan dijelaskan pada bagian pengembangan indeks.

Validasi Framework

Validasi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan RCEMF dalam mendukung sistem manajemen energi secara *real-time*. Evaluasi dilakukan berdasarkan lima aspek utama, yaitu:

1. *Automatic Data Acquisition*, untuk menilai keberhasilan sistem dalam memperoleh data secara otomatis.
2. *Cloud Communication Performance*, untuk mengevaluasi kecepatan dan keandalan komunikasi data menuju cloud.
3. *Industrial Energy Performance Index Validation*, untuk menguji kemampuan IEPI dalam merepresentasikan kondisi performa energi.
4. *Decision Support Validation*, untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam memberikan rekomendasi operasional secara otomatis.
5. *ISO 50001 Compliance Analysis*, untuk menilai kesesuaian framework terhadap persyaratan utama Sistem Manajemen Energi ISO 50001.

Signifikansi

Signifikansi pada sistem manajemen energi berbasis cloud secara real-time dalam melakukan evaluasi kinerja energi industri terletak pada kemampuannya untuk mengubah pemantauan energi dari aktivitas periodik dan retrospektif menjadi proses yang berkelanjutan, cerdas, dan berbasis kepada data. Tidak seperti sistem manajemen energi konvensional yang bergantung pada audit manual atau pengukuran periodik, platform berbasis cloud mengintegrasikan *Industrial Internet of Things* (IIoT), perangkat edge, dan analitik cloud untuk terus memperoleh, memproses, dan mengevaluasi data energi dari berbagai aset dan fasilitas produksi. Hal ini memungkinkan industri untuk mengidentifikasi inefisiensi secara langsung, mengoptimalkan operasi, dan mempertahankan kinerja energi dari waktu ke waktu.

Pentingnya Manajemen Energi Berbasis *Cloud Real-Time* yaitu :

1. Evaluasi Kinerja Energi Berkelanjutan

Evaluasi kinerja energi tradisional seringkali bergantung pada tagihan utilitas bulanan atau audit berkala, yang menunda identifikasi inefisiensi energi. Sistem manajemen energi berbasis cloud memungkinkan pemantauan berkelanjutan terhadap peralatan, jalur produksi, dan seluruh pabrik dengan mengumpulkan data konsumsi energi secara *real-time* dari sensor yang tersebar. Akibatnya, manajer industri dapat mengevaluasi kinerja energi secara berkelanjutan, bukan secara retrospektif. Pada system ini memiliki manfaat antara lain proses perhitungan Indikator Kinerja Energi (EnPI) yang berkelanjutan, kemudahan untuk melakukan deteksi langsung penurunan kinerja. Terlaksanakan kepatuhan yang lebih baik terhadap praktik manajemen energi ISO 50001, serta perbandingan yang akurat dengan kinerja dasar historis.

2. Deteksi Dini Anomali Energi

Salah satu keunggulan utama dari platform cloud real-time adalah deteksi anomali pada sistem. Peningkatan konsumsi listrik yang tidak terduga dapat mengindikasikan degradasi peralatan, malfungsi proses, kebocoran udara, perawatan yang buruk, atau kesalahan operasional. Alih-alih menemukan masalah ini beberapa minggu kemudian, analitik cloud segera memberi tahu operator, memungkinkan tindakan korektif sebelum terjadi kehilangan energi yang berlebihan. Seperti penurunan efisiensi motor, masalah pada sistem HVAC,

ketidakefisienan boiler, Kebocoran udara terkompresi & konsumsi energi mesin yang menganggur.

3. Pengambilan Keputusan Berbasis Data

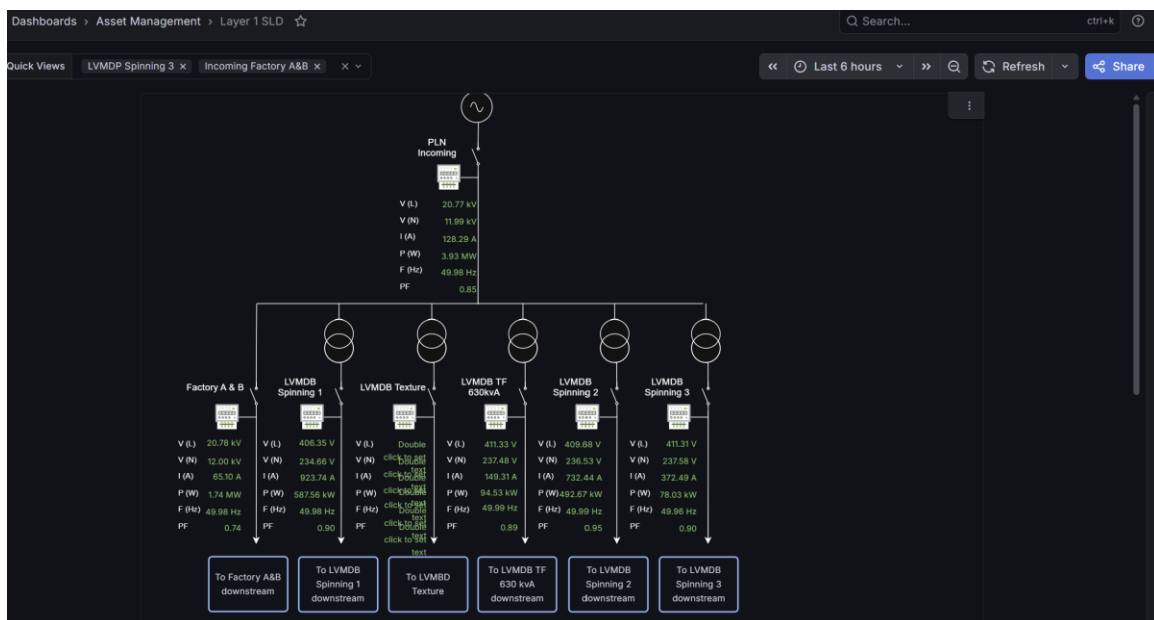
Komputasi awan memusatkan data energi dari berbagai pabrik dan jalur produksi ke dalam basis data yang terpadu. Analisis tingkat lanjut, pembelajaran mesin, dan dasbor visualisasi mengubah data sensor mentah menjadi informasi yang dapat ditindaklanjuti. Oleh karena itu, pengambil keputusan dapat membandingkan jalur produksi, membandingkan kinerja pabrik, memprioritaskan pemeliharaan, mengoptimalkan jadwal produksi, mengidentifikasi kondisi operasi terbaik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi *Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework (RCEMF)*

RCEMF diimplementasikan pada sistem distribusi tenaga listrik di industri tekstil dengan mengintegrasikan digital power meter, komunikasi Modbus RTU, IoT Gateway, cloud database, dan dashboard berbasis web dalam satu platform. Framework ini memungkinkan proses akuisisi, penyimpanan, analisis, dan visualisasi data energi dilakukan secara otomatis tanpa memerlukan pencatatan manual oleh operator.

Data yang diperoleh dari digital power meter dikirimkan melalui jaringan RS-485 menuju IoT Gateway, kemudian diteruskan ke cloud database melalui jaringan internet. Selanjutnya, data diolah untuk menghasilkan informasi mengenai kondisi sistem tenaga listrik, indikator performa energi, serta rekomendasi operasional yang ditampilkan secara real-time pada dashboard. Integrasi ini mengubah sistem monitoring energi yang sebelumnya bersifat manual menjadi sistem digital yang bekerja secara berkelanjutan dan terpusat.



Gambar 3. Implementasi RCEMF pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik Industri Tekstil

Kinerja Akuisisi Data Otomatis

Pengujian dilakukan untuk membandingkan proses akuisisi data menggunakan RCEMF dengan metode konvensional yang mengandalkan pencatatan manual terhadap digital power meter. Parameter yang dievaluasi meliputi waktu pengumpulan data, jumlah parameter yang diperoleh, serta potensi kesalahan pencatatan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh parameter kelistrikan dapat diperoleh secara otomatis tanpa intervensi operator. Dibandingkan metode konvensional, RCEMF mampu mengurangi waktu pengumpulan data lebih dari 96%, sehingga proses monitoring menjadi jauh lebih efisien. Selain mempercepat proses akuisisi, sistem juga menghilangkan kebutuhan pencatatan manual sehingga risiko human error dapat diminimalkan. Hasil ini menunjukkan bahwa otomatisasi akuisisi data memberikan peningkatan efisiensi operasional sekaligus meningkatkan kualitas data yang digunakan dalam evaluasi performa energi.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Metode Konvensional dan RCEMF dalam Akuisisi dan Monitoring Data Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Parameter Evaluasi	Metode Konvensional	RCEMF	Peningkatan
Waktu akuisisi data	300 s	12 s	96.0%
Jumlah parameter yang diperoleh	7	7	-
Frekuensi pembaruan data	Manual	Real-time	Ketersediaan Data
Human error	Tinggi	Sangat rendah	Menurun
Penyimpanan data historis	Tidak tersedia	Otomatis	Ya
Monitoring jarak jauh	Tidak	Ya	Ya

Tabel 1 menunjukkan bahwa RCEMF mampu mengurangi waktu akuisisi data hingga lebih dari 96% dibandingkan metode konvensional. Selain meningkatkan kecepatan pengumpulan data, framework juga menghilangkan proses pencatatan manual sehingga risiko human error dapat diminimalkan.

Pada data yang dihasilkan didapatkan hasil data dalam periode tersebut pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran power meter pada dashboard

Waktu	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Aktif (kW)	Faktor Daya (Cos Phi)	Frekuensi (Hz)	Konsumsi Energi (MWh)	<i>Maximum Demand</i> (MWh)
07.00	20.93	12.09	130.36	0.87	50.06	3.57	4.16
08.00	20.93	12.09	129.94	0.87	50.07	3.37	4.09
09.00	20.92	12.08	130.27	0.87	50.04	3.97	4.11
10.00	20.92	12.08	129.36	0.87	50.06	4.03	4.06
11.00	20.88	12.06	124.45	0.87	50.06	3.92	4.03
12.00	20.85	12.04	124.28	0.87	49.98	3.84	3.90
13.00	20.87	12.05	124.59	0.87	50.05	3.73	3.91
14.00	20.84	12.03	122.74	0.87	50.02	3.68	3.84
15.00	20.85	12.04	122.81	0.87	49.96	3.74	3.86
16.00	20.81	12.01	124.44	0.87	49.98	3.91	4.32
17.00	20.85	12.04	124.49	0.87	49.97	3.92	4.36
18.00	20.85	12.04	126.39	0.87	50.04	3.97	4.20
19.00	20.83	12.03	123.67	0.87	50.00	3.86	4.27
20.00	20.82	12.02	122.63	0.87	50.08	3.87	4.16

21.00	20.97	12.01	120.82	0.87	50.00	3.80	4.24
22.00	20.76	11.99	122.64	0.87	49.97	3.84	4.28
23.00	20.91	12.07	122.82	0.85	49.95	3.77	4.44
00.00	20.91	12.07	120.63	0.84	49.96	3.69	4.08
01.00	20.91	12.07	121.85	0.85	49.97	3.75	4.08
02.00	20.90	12.07	119.89	0.85	50.01	3.68	4.32
03.00	20.89	12.06	120.65	0.85	50.03	3.72	4.32
04.00	20.88	12.05	116.71	0.85	50.02	3.58	4.18
05.00	20.92	12.08	117.38	0.85	50.04	3.61	4.20
06.00	20.88	12.06	117.42	0.85	49.99	3.60	4.23

Kinerja Komunikasi Berbasis Cloud

Keandalan komunikasi data merupakan aspek penting dalam sistem manajemen energi berbasis cloud. Oleh karena itu, dilakukan evaluasi terhadap waktu respons, keberhasilan pengiriman data, packet loss, dan ketersediaan layanan cloud.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu unggah rata-rata data sebesar 0,82 detik dengan waktu penyegaran dashboard sekitar 1,15 detik. Selama proses pengujian tidak ditemukan kehilangan paket data (packet loss = 0%), sedangkan keandalan komunikasi mencapai 99,9% dengan tingkat ketersediaan layanan cloud sebesar 99,8%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa framework mampu menyediakan informasi secara mendekati real-time dan memenuhi kebutuhan sistem monitoring energi yang memerlukan kontinuitas data.

Tabel 3. Hasil Evaluasi Kinerja Komunikasi Cloud

Parameter	Nilai	Kriteria
<i>Average Upload Time</i>	0.82 s	Sangat Baik
<i>Dashboard Refresh Time</i>	1.15 s	Sangat Baik
<i>Packet Loss</i>	0 %	Sangat Baik
<i>Communication Reliability</i>	99.9 %	Sangat Baik
<i>Cloud Availability</i>	99.8 %	Sangat Baik

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa komunikasi data antara IoT Gateway dan cloud database memiliki tingkat keandalan yang tinggi dengan waktu respons kurang dari dua detik dan tanpa kehilangan paket data selama proses pengujian.

Evaluasi *Industrial Energy Performance Index* (IEPI)

Untuk memvalidasi kemampuan IEPI sebagai indikator performa energi, dilakukan pengujian pada beberapa kondisi operasi sistem tenaga listrik, yaitu kondisi produksi normal, produksi puncak, faktor daya rendah, dan sistem dengan beban berlebih.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai IEPI menurun seiring memburuknya kondisi operasi sistem. Pada kondisi produksi normal dan produksi puncak, nilai IEPI berada pada kategori *Excellent*, sedangkan pada kondisi faktor daya rendah nilai indeks menurun menjadi kategori Fair. Ketika sistem mengalami beban berlebih (*overloaded system*), nilai IEPI berada pada kategori Poor. Pola tersebut menunjukkan bahwa IEPI mampu merepresentasikan perubahan performa energi secara konsisten sehingga dapat digunakan sebagai indikator komprehensif untuk mengevaluasi kondisi sistem tenaga listrik.

Tabel 4. Hasil Validasi *Industrial Energy Performance Index*

Kondisi Operasi	Nilai IEPI	Kategori	Interpretasi
Produksi Normal	98.3	<i>Excellent</i>	Sistem bekerja optimal
Produksi Puncak	90.8	<i>Excellent</i>	Beban meningkat namun masih efisien
Faktor Daya Rendah	73.5	<i>Fair</i>	Perlu perbaikan faktor daya
Overloaded System	54.2	<i>Poor</i>	Terjadi penurunan performa energi

Nilai IEPI menurun seiring memburuknya kondisi operasi sistem tenaga listrik. Hal ini menunjukkan bahwa IEPI mampu merepresentasikan performa energi secara konsisten melalui satu indeks komposit.

Berbeda dengan sistem monitoring konvensional yang mengharuskan operator menganalisis setiap parameter kelistrikan secara terpisah, IEPI menyajikan hasil evaluasi dalam bentuk satu nilai indeks komposit. Pendekatan ini mempermudah interpretasi kondisi sistem, mempercepat proses identifikasi penyimpangan, dan mendukung pengambilan keputusan secara lebih efektif.

Validasi Sistem Pendukung Keputusan

RCEMF juga dievaluasi berdasarkan kemampuannya dalam memberikan rekomendasi operasional secara otomatis sesuai kondisi sistem yang terdeteksi. Pengujian dilakukan pada beberapa skenario, antara lain faktor daya rendah, nilai parameter yang melebihi batas standar, maximum demand yang melampaui kapasitas, serta konsumsi energi spesifik yang berada di atas target.

Seluruh skenario berhasil diidentifikasi dengan baik oleh sistem dan diikuti dengan rekomendasi tindakan korektif yang sesuai, seperti pemeriksaan bank kapasitor, evaluasi harmonic filter, pengaturan beban puncak, maupun pelaksanaan audit energi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa RCEMF tidak hanya berfungsi sebagai sistem monitoring, tetapi juga berkembang menjadi *Decision Support System* (DSS) yang mampu membantu operator dalam menentukan tindakan berdasarkan kondisi aktual sistem tenaga listrik.

Tabel 5. Hasil Validasi *Decision Support System*

Kondisi yang Terdeteksi	Rekomendasi Sistem	Status
Power Factor < 0.90	Pemeriksaan Capacitor Bank	Berhasil
Maximum Demand Melebihi Target	Peak Load Management	Berhasil
SEC di atas Target	Audit Energi Produksi	Berhasil
Voltage Unbalance	Pemeriksaan Panel Distribusi	Berhasil

Framework berhasil memberikan rekomendasi operasional secara otomatis sesuai kondisi sistem sehingga operator dapat melakukan tindakan korektif dengan lebih cepat dibandingkan metode konvensional.

Analisis Kesesuaian terhadap ISO 50001

Salah satu tujuan utama penelitian ini adalah mendukung implementasi Sistem Manajemen Energi berdasarkan ISO 50001. Oleh karena itu, dilakukan analisis terhadap kemampuan framework dalam memenuhi persyaratan utama standar tersebut.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa RCEMF mendukung seluruh tahapan penting dalam implementasi ISO 50001, meliputi perencanaan energi, pengendalian operasional, pemantauan

dan pengukuran, evaluasi performa energi, serta peningkatan berkelanjutan (*continuous improvement*). Integrasi data real-time, analitik energi, dan IEPI memberikan informasi yang lebih cepat dan objektif sehingga memudahkan organisasi dalam melakukan evaluasi kinerja energi secara berkelanjutan.

Tabel 6. Kesesuaian RCEMF terhadap Persyaratan ISO 50001

Klausul ISO 50001	Dukungan RCEMF	Implementasi
Energy Planning	Ya	Analisis data konsumsi energi
Operational Control	Ya	Monitoring real-time
Monitoring and Measurement	Ya	Akuisisi data otomatis
Energy Performance Evaluation	Ya	Perhitungan IEPI
Continuous Improvement	Ya	Dashboard dan DSS

RCEMF mendukung seluruh proses utama dalam implementasi ISO 50001 melalui integrasi pemantauan energi secara real-time, evaluasi indikator performa energi, dan penyediaan informasi untuk proses *continuous improvement*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi antara akuisisi data otomatis, komunikasi berbasis cloud, analitik energi, dan IEPI mampu meningkatkan efektivitas sistem manajemen energi dibandingkan pendekatan konvensional. RCEMF tidak hanya mempercepat proses pengumpulan data dan mengurangi potensi kesalahan pencatatan, tetapi juga menyediakan informasi yang dapat dimanfaatkan secara langsung dalam proses pengambilan keputusan.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan *Industrial Energy Performance Index* (IEPI) sebagai metode evaluasi baru yang mengintegrasikan indikator efisiensi energi dan kualitas daya listrik ke dalam satu indeks komposit. Pendekatan ini mengatasi keterbatasan sistem monitoring konvensional yang hanya menampilkan parameter kelistrikan secara terpisah, sehingga evaluasi kondisi sistem menjadi lebih sederhana, cepat, dan komprehensif.

Selain itu, pengembangan RCEMF memperluas fungsi sistem monitoring menjadi *Decision Support System* (DSS) yang mampu memberikan rekomendasi operasional berdasarkan kondisi aktual sistem. Integrasi tersebut mendukung implementasi ISO 50001 melalui penyediaan data real-time, evaluasi performa energi secara otomatis, dan penyediaan informasi yang mendukung proses *continuous improvement*. Dengan demikian, *framework* yang diusulkan tidak hanya meningkatkan efisiensi proses monitoring energi, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap transformasi digital sistem manajemen energi pada industri manufaktur.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan *Real-Time Cloud-Based Energy Management Framework* (RCEMF) yang terintegrasi dengan *Industrial Energy Performance Index* (IEPI) sebagai pendekatan baru dalam sistem manajemen energi berbasis cloud untuk industri tekstil. Framework yang dikembangkan mampu mengintegrasikan proses akuisisi data otomatis dari digital power meter, komunikasi industri menggunakan Modbus RTU, transmisi data melalui IoT Gateway, penyimpanan pada cloud database, analitik energi, serta sistem pendukung keputusan dalam satu platform yang terpadu. Dengan demikian, proses pemantauan energi tidak lagi bergantung pada pencatatan manual, tetapi dapat dilakukan secara otomatis, berkelanjutan, dan real-time.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa RCEMF mampu meningkatkan efektivitas proses monitoring energi dibandingkan metode konvensional. Seluruh parameter kelistrikan dapat diakuisisi secara otomatis dengan waktu pengumpulan data yang lebih singkat, meningkatkan ketersediaan data, mengurangi potensi human error, serta menyediakan data historis yang dapat dimanfaatkan untuk analisis performa energi. Selain itu, komunikasi berbasis cloud menunjukkan tingkat keandalan yang tinggi sehingga informasi kondisi sistem tenaga listrik dapat diakses secara real-time sebagai dasar pengambilan keputusan operasional.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan *Industrial Energy Performance Index* (IEPI) sebagai metode evaluasi performa energi yang mengintegrasikan beberapa indikator utama, yaitu *Specific Energy Consumption (SEC)*, *Power Factor (PF)*, *Load Factor (LF)*, dan *Maximum Demand Utilization (MDU)*, ke dalam satu indeks komposit. Pendekatan ini menyederhanakan proses evaluasi performa energi tanpa mengurangi kelengkapan informasi yang dibutuhkan. Hasil validasi menunjukkan bahwa nilai IEPI mampu merepresentasikan perubahan kondisi operasi sistem secara konsisten, sehingga dapat digunakan sebagai indikator untuk mendeteksi penurunan performa energi dan mengidentifikasi potensi pemborosan energi secara lebih cepat.

Selain memberikan kontribusi pada aspek evaluasi performa energi, RCEMF juga memperluas fungsi sistem monitoring menjadi *Decision Support System (DSS)* yang mampu memberikan rekomendasi operasional berdasarkan kondisi aktual sistem tenaga listrik. Integrasi antara data *real-time*, analitik energi, dan IEPI mendukung penerapan Sistem Manajemen Energi sesuai ISO 50001, khususnya pada aspek pemantauan, pengukuran, evaluasi kinerja energi, dan continuous improvement. Dengan demikian, framework yang diusulkan tidak hanya meningkatkan efektivitas pengelolaan energi, tetapi juga mendukung transformasi digital industri menuju sistem operasi yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Implementasi framework dilakukan pada satu studi kasus di industri tekstil dengan jumlah titik pengukuran yang terbatas. Selain itu, pembobotan indikator dalam IEPI masih menggunakan pendekatan konseptual sehingga belum mempertimbangkan metode pembobotan berbasis pengambilan keputusan multikriteria. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengimplementasikan framework pada berbagai sektor industri dengan karakteristik beban yang berbeda, mengembangkan metode pembobotan menggunakan pendekatan seperti *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *Entropy Weight Method*, atau *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making (MCDM)*, serta mengintegrasikan teknologi *Artificial Intelligence (AI)* dan *Machine Learning* untuk prediksi konsumsi energi, deteksi anomali, dan optimasi penggunaan energi secara adaptif.

REFERENSI

- Afrin, S. (2025). Industrial Internet of Things: Implementations, challenges, and potential solutions across various industries. *Computers in Industry*. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2025.104317>
- Agustiarmi, W. (2025). *Real-Time IoT-based Energy Power Consumption Monitoring System for Smart Homes*. 15(5).
- Ahmed, A., ul Hasan, E., & Hasseni, S. E. I. (2025). Smart and Sustainable: A Global Review of Smart Textiles, IoT Integration, and Human-Centric Design. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s25237267>

- Awad, A. H. (2024). Low-cost IoT-Based sensors dashboard for monitoring the state of health of mobile harbor cranes: Hardware and software description. *Heliyon*, 10(22). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40239>
- Bonavolontà, F., Liccardo, A., Mottola, F., & Proto, D. (2025). Real-Time Monitoring of Energy Contributions in Renewable Energy Communities Through an IoT Measurement System. *Sensors*, 25(5). <https://doi.org/10.3390/s25051402>
- Choudhary, A. (2024). Internet of Things: a comprehensive overview, architectures, applications, simulation tools, challenges and future directions. *Discover Internet of Things*. <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00084-3>
- Eber, R., Kollmann, D., Aschenbrenner, D., Hentsch, M., Schwarzer, S., & Stricker, N. (2023). IIOT visualization applications based on augmented reality - practical approach for easy implementation. *Procedia CIRP*, 964–967. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.108>
- Ficili, I., Giacobbe, M., Tricomi, G., & Puliafito, A. (2025). From Sensors to Data Intelligence: Leveraging IoT, Cloud, and Edge Computing with AI. *Sensors*, 25(6). <https://doi.org/10.3390/s25061763>
- Fitzgerald, P., Therkelsen, P., Sheaffer, P., & Rao, P. (2023). Deeper and persistent energy savings and carbon dioxide reductions achieved through ISO 50001 in the manufacturing sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103280>
- G., K. (2024). Smart energy management: real-time prediction and optimization for IoT-enabled smart homes. *Cogent Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2390674>
- Hanifi, S., Alkali, B., Lindsay, G., & McGlinchey, D. (2025). Optimizing Energy and Air Consumption in Smart Manufacturing: An Industrial Internet of Things-Based Monitoring and Efficiency Enhancement Solution. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/app15063222>
- Harsanto, B., Primiana, I., Sarasi, V., & Satyakti, Y. (2023). Sustainability Innovation in the Textile Industry: A Systematic Review. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su15021549>
- Ke, M.-T., Yeh, C.-H., & Su, C.-J. (2017). Cloud computing platform for real-time measurement and verification of energy performance. *Applied Energy*, 188, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.034>
- Kraus, S., Jones, P., Kailer, N., Weinmann, A., Chaparro-Banegas, N., & Roig-Tierno, N. (2021). Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. *Sage Open*, 11(3). <https://doi.org/10.1177/21582440211047576>
- Lamas, V., Cortiñas, A., & Luaces, M. R. (2025). Low-code framework for IoT data warehousing and visualization. *Computers & Geosciences*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2025.105998>
- Magara, T., & Phahlane, M. (2026). Unlocking IIoT Potential: A Systematic Review of AI Applications, Adoption Drivers, and Implementation Barriers. *Applied AI Letters*, 7(1). <https://doi.org/10.1002/ail2.70017>
- Mansouri, M., Eskandari, M., Asadi, Y., & Savkin, A. (2024). A cloud-fog computing framework for real-time energy management in multi-microgrid system utilizing deep reinforcement learning. *Journal of Energy Storage*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112912>
- Mirani, A. A., Awasthi, A., O'Mahony, N., & Walsh, J. (2024). Industrial IoT-Based Energy Monitoring System: Using Data Processing at Edge. *Internet of Things*, 5(4), 608–633. <https://doi.org/10.3390/iot5040027>
- Onu, P., Pradhan, A., & Mbohwa, C. (2023). The potential of industry 4.0 for renewable energy and materials development – The case of multinational energy companies. *Heliyon*,

- 9(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20547>
- Preface. (2026). *Journal of Physics: Conference Series*, 3246(1), 11001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3246/1/011001>
- Rajagopalan, A. (2024). Empowering power distribution: Unleashing the synergy of IoT and cloud computing for sustainable and efficient energy systems. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101949>
- Sakti, S., Sopha, B. M., & Saputra, E. S. T. (2021). Energy Efficiency Analysis in a Textile Company Using DMAIC Approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 12007. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1096/1/012007>
- Sequeira, H., Carreira, P., Goldschmidt, T., & Vorst, P. (2014). Energy Cloud: Real-Time Cloud-Native Energy Management System to Monitor and Analyze Energy Consumption in Multiple Industrial Sites. *2014 IEEE/ACM 7th International Conference on Utility and Cloud Computing*, 529–534. <https://doi.org/10.1109/UCC.2014.79>
- Singh, A. R. (2025). A scalable cloud-integrated AI platform for real-time optimization of EV charging and resilient microgrid energy management. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-21531-3>
- Witczak, D., & Szymoniak, S. (2024). Review of Monitoring and Control Systems Based on Internet of Things. *Applied Sciences (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/app14198943>
- Zahid, A., Leclaire, P., Hammadi, L., Costa-Affonso, R., & El Ballouti, A. (2025). Exploring the potential of industry 4.0 in manufacturing and supply chain systems: Insights and emerging trends from bibliometric analysis. *Supply Chain Analytics*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100108>