JURNAL KETAHANAN NASIONAL
Vol. 32, No. 2, Agustus 2026, Hal 221-238
DOI:http://dx.doi.org/ 10.22146/jkn.117602
ISSN:0853-9340(Print), ISSN:2527-9688(Online)
Online sejak 28 Desember 2015 di :http://jurnal.ugm.ac.id/JKN

VOLUME 32 | No. 2, Agustus 2026 | Halaman 221-238

Digitalisasi Monitoring Energi sebagai Infrastruktur Informasi Ketahanan Energi Tingkat Fasilitas: Prototipe Sistem Monitoring Daya Listrik Tiga Fasa Berbasis PLC dan IoT di PEM Akamigas, Cepu

Pujianto[1], M.Zaky Zaim Muhtadi [2*], Suka Handaja [3], Wasis Waskito Adi [4]
[1,2,3,4] Prodi Instrumentasi Kilang, PEM Akamigas, Indonesia
*Korespondensi email: mzakyzm@gmail.com

Dikirim:12-3-2026 .Direvisi: 20-8-2026 , Diterima: 31-8-2026

ABSTRACT

Energy resilience at the regional level depends on the ability of individual facilities to recognize the condition of their own energy systems, yet monitoring at many facilities still relies on periodic panel inspection, so that changes in condition are often only recognized after they have developed into disturbances. This study positions energy monitoring digitalization as an information infrastructure for facility-level energy resilience and tests its feasibility through a prototype three-phase electrical power monitoring system based on Programmable Logic Controller (PLC) and Internet of Things (IoT) technology at the Energy Laboratory of PEM Akamigas, Cepu, Blora Regency. Feasibility was assessed through three information capacities, namely information reliability, condition readability for early detection, and information comparability as a reference condition. Test results show that the system provides sufficiently trustworthy information, with an average measurement deviation of 1.32% relative to the reference instrument across five parameters. The system also revealed a load imbalance that was not detectable through total power readings alone, namely a concentration of 54.3% of active power on a single phase, and recorded power factor, frequency, and voltage conditions that all fell within standard operating limits, allowing them to serve as a comparative reference across periods. These three capacities are prerequisites rather than guarantees, as their benefit depends on operator readiness, working procedures, and decision-making authority. This study concludes that the reduction of energy vulnerability can begin with strengthening facility-level information capacity, and that its contribution to regional resilience requires data standardization, information security, and inter-facility institutional coordination.

Keywords: Energy Resilience; Energy Information Infrastructure; Energy Monitoring Digitalization; IoT.

ABSTRAK

Ketahanan energi pada tingkat wilayah bertumpu pada kemampuan fasilitas-fasilitas di dalamnya untuk mengenali kondisi energinya sendiri, namun pemantauan pada banyak fasilitas masih bergantung pada pemeriksaan panel secara berkala sehingga perubahan kondisi sering baru diketahui setelah berkembang menjadi gangguan. Penelitian ini memosisikan digitalisasi monitoring energi sebagai infrastruktur informasi ketahanan energi tingkat fasilitas dan menguji kelayakannya melalui prototipe sistem monitoring daya listrik tiga fasa berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC) dan *Internet of Things* (IoT) di Laboratorium Energi PEM Akamigas, Cepu, Kabupaten Blora. Kelayakan tersebut dinilai melalui tiga kapasitas informasi, yaitu keandalan informasi, keterbacaan kondisi untuk deteksi dini, dan keterbandingan informasi sebagai kondisi acuan. Hasil pengujian menunjukkan sistem menyediakan informasi yang cukup dapat dipercaya, dengan rata-rata penyimpangan pengukuran 1,32% terhadap instrumen referensi pada lima parameter. Sistem juga menampakkan ketidakmerataan pembebanan yang tidak terbaca melalui pembacaan daya total, yakni konsentrasi 54,3% daya aktif pada satu fasa, serta merekam kondisi faktor daya, frekuensi, dan tegangan yang seluruhnya berada dalam batas standar operasi sehingga dapat dijadikan acuan pembanding antarperiode. Ketiga kapasitas tersebut merupakan prasyarat, bukan jaminan dimana manfaatnya bergantung pada kesiapan operator, prosedur kerja, dan kewenangan pengambilan keputusan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penurunan kerentanan energi dapat dimulai dari penguatan kapasitas informasi tingkat fasilitas, dan bahwa kontribusinya bagi ketahanan wilayah mensyaratkan standardisasi data, keamanan informasi, serta koordinasi kelembagaan antarfasilitas.

Kata Kunci: Ketahanan Energi; Infrastruktur Informasi Energi; Digitalisasi Monitoring Energi; *IoT.*

Copyright (c) 2025 Pujianto, et al.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. Jurnal Ketahanan Nasional is published by the Graduate School of Universitas Gadjah Mada.

PENGANTAR

Ketersediaan energi listrik yang andal merupakan prasyarat bagi keberlangsungan produksi industri, daya saing, dan pencapaian target pembangunan jangka panjang (Goldthau, 2014; International Energy Agency (IEA), 2022). Seiring meningkatnya digitalisasi dan otomasi proses industri, kebutuhan terhadap energi listrik dan kualitas layanan energi terus meningkat sehingga pengelolaan energi yang efisien dan berkelanjutan menjadi semakin penting. Perkembangan lingkungan strategis juga menunjukkan bahwa keamanan energi tidak hanya dipengaruhi oleh ketersediaan sumber energi, tetapi juga oleh perubahan pasar, ketergantungan antarwilayah, gangguan rantai pasok, perubahan teknologi, serta kemampuan infrastruktur dalam mempertahankan kontinuitas layanan. IEA (2022) menunjukkan bahwa dinamika geopolitik dan gangguan pasar energi dapat memberikan dampak luas terhadap stabilitas ekonomi dan keamanan energi, sehingga penguatan ketahanan memerlukan perhatian tidak hanya pada sisi pasokan, tetapi juga pada kemampuan sistem energi untuk menghadapi dan memulihkan diri dari berbagai gangguan. Kajian terhadap literatur keamanan energi selama dua dekade terakhir juga menegaskan bahwa dimensi ketahanan (*resilience*) semakin menjadi pusat perhatian seiring meningkatnya kompleksitas ancaman terhadap sistem energi modern (Novikau, 2023).

Dalam perspektif ketahanan energi, ketersediaan pasokan merupakan unsur mendasar, tetapi belum cukup untuk menjamin keberlangsungan layanan. Ketahanan energi juga berkaitan dengan kemampuan sistem dalam mengenali perubahan kondisi, mengelola kerentanan, menjaga fungsi utama, dan merespons gangguan secara tepat. Winzer (2012) menekankan bahwa keamanan energi perlu memperhatikan sumber risiko, cakupan dampak, serta karakter gangguan yang dapat memengaruhi kontinuitas layanan. Sementara itu, Sovacool dan Mukherjee (2011) menguraikan keamanan energi sebagai konsep multidimensional yang mencakup ketersediaan, keterjangkauan, perkembangan teknologi, keberlanjutan, dan tata kelola. Pandangan tersebut memperlihatkan bahwa ketahanan energi dibangun melalui hubungan antara sumber energi, infrastruktur, teknologi, pengelolaan, dan kapasitas pengambilan keputusan.

Salah satu unsur yang sering kurang mendapat perhatian dalam pembahasan ketahanan energi adalah ketersediaan informasi mengenai kondisi sistem energi itu sendiri. Kemampuan mengenali perubahan kondisi hanya dapat berjalan apabila pengelola memiliki gambaran yang cukup memadai mengenai keadaan instalasi yang dioperasikannya. Ketika informasi tersebut terbatas, kerentanan tidak dengan sendirinya hilang, melainkan menjadi tidak terlihat, sehingga tindakan perbaikan baru dilakukan setelah gangguan berlangsung dan biaya penanganannya menjadi lebih besar. Dengan demikian, keterbatasan informasi dapat dipandang sebagai bentuk kerentanan tersendiri yang bersifat organisatoris, bukan semata bersifat teknis. Perspektif ini menempatkan penyediaan informasi kondisi energi sebagai bagian dari upaya pengurangan kerentanan, sejajar kedudukannya dengan penambahan kapasitas pasokan maupun perbaikan perangkat.

Ketahanan energi perlu dipahami pada berbagai tingkat. Pada tingkat nasional, ketahanan energi berkaitan dengan kemampuan negara dalam memenuhi kebutuhan energi

secara berkelanjutan. Pada tingkat wilayah, ketahanan energi berhubungan dengan kemampuan daerah menjaga layanan energi bagi kegiatan ekonomi dan sosial. Adapun pada tingkat fasilitas, ketahanan energi dapat dilihat dari kemampuan organisasi dalam mengetahui kondisi penggunaan energi, mengenali perubahan yang memerlukan perhatian, serta menjaga keberlangsungan aktivitas utama. Cherp dan Jewell (2014) memandang keamanan energi sebagai upaya mengurangi kerentanan pada sistem energi yang bernilai penting, sedangkan Jansen dan Seebregts (2010) menekankan kemampuan memenuhi kebutuhan layanan energi dalam jangka panjang. Dengan demikian, kapasitas pada tingkat fasilitas dapat diposisikan sebagai salah satu unsur pendukung ketahanan pada skala yang lebih luas. Penelitian ini mengambil tingkat fasilitas sebagai unit analisis, dengan pertimbangan bahwa kerentanan yang paling dapat dikendalikan oleh pengelola justru bersifat internal, yaitu keterbatasan pengetahuan mengenai kondisi instalasi yang dioperasikannya sendiri.

Pendekatan tersebut relevan karena sistem energi merupakan sistem sosial-teknis yang tidak hanya terdiri atas infrastruktur fisik, tetapi juga manusia, prosedur kerja, institusi, dan tata kelola. Goldthau (2014) menjelaskan bahwa infrastruktur energi berhubungan dengan aktor, institusi, dan norma yang bekerja pada berbagai tingkat. Oleh sebab itu, penguatan ketahanan energi tidak cukup dilakukan melalui penambahan pasokan atau pembangunan infrastruktur. Penguatan juga memerlukan kemampuan memahami kondisi infrastruktur yang telah tersedia, menyediakan informasi secara berkelanjutan, dan menggunakan informasi tersebut untuk mendukung keputusan operasional. Sathurshan et al. (2022) menunjukkan bahwa kajian resiliensi infrastruktur kritis masih banyak berfokus pada tingkat makro, sementara kajian empiris mengenai kapasitas pada tingkat fasilitas individual masih relatif terbatas.

Hubungan antara ketahanan energi dan ketahanan wilayah menjadi penting karena energi merupakan layanan dasar bagi keberlangsungan aktivitas ekonomi dan sosial. Fasilitas pendidikan, industri, perdagangan, pelayanan publik, serta berbagai kegiatan masyarakat memerlukan energi listrik yang memadai dan andal. Gangguan pada satu fasilitas tidak selalu berdampak pada wilayah, tetapi kerentanan yang berulang pada fasilitas berfungsi penting dapat terakumulasi. Oleh karena itu, penguatan kapasitas pengelolaan energi pada tingkat fasilitas dapat menjadi bagian dari upaya mengurangi kerentanan pada tingkat organisasi, sektor, dan wilayah.

Dalam konteks Indonesia, energi memiliki kedudukan strategis bagi pembangunan nasional. Undang-Undang Nomor 30 (2007) tentang Energi menempatkan pengelolaan energi sebagai bagian penting dalam pembangunan. Peraturan Presiden Nomor 22 (2017) menetapkan Rencana Umum Energi Nasional sebagai pedoman pencapaian sasaran energi nasional. Selanjutnya, Peraturan Pemerintah Nomor 33 (2023) tentang Konservasi Energi dan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 8 (2025) tentang Manajemen Energi menegaskan pentingnya penggunaan energi secara efisien serta pelaksanaan pengukuran, pemantauan, dan evaluasi energi. Ketentuan tersebut menempatkan kemampuan mengukur dan memantau kondisi energi sebagai kewajiban operasional pengguna energi, bukan sekadar praktik teknis yang bersifat pilihan. Dalam kerangka ketahanan nasional, energi

juga berkaitan dengan aspek ekonomi dan pembangunan yang memengaruhi kemampuan negara dalam menjaga keberlangsungan aktivitas masyarakat (Lemhannas RI, 2020).

Ketentuan-ketentuan tersebut memperlihatkan bahwa pengukuran dan pemantauan energi tidak lagi diposisikan sebagai kegiatan pelengkap, melainkan sebagai bagian dari sistem manajemen energi yang perlu dijalankan secara berkelanjutan. Pelaksanaan manajemen energi mensyaratkan tersedianya data penggunaan energi yang dapat diverifikasi, tersimpan dalam rentang waktu tertentu, dan dapat digunakan sebagai dasar penyusunan program konservasi. Pada banyak fasilitas, kebutuhan tersebut masih dipenuhi melalui pencatatan manual atas hasil pembacaan panel yang dilakukan secara berkala, sehingga data yang terkumpul bersifat terputus dan sulit digunakan untuk menelusuri perubahan kondisi antarwaktu. Kesenjangan antara kewajiban normatif dan praktik pencatatan di lapangan inilah yang membuka ruang bagi digitalisasi monitoring, baik sebagai sarana pemenuhan kewajiban maupun sebagai sarana penguatan kapasitas pengelolaan energi pada tingkat fasilitas.

Ketahanan energi nasional tidak terbentuk hanya melalui kebijakan pada tingkat pusat. Ketahanan tersebut juga berkembang melalui kapasitas di tingkat daerah, organisasi, dan fasilitas. Pengelolaan energi yang baik pada tingkat fasilitas dapat mendukung ketahanan organisasi; apabila kapasitas tersebut tumbuh pada banyak fasilitas, dampaknya dapat memperkuat sektor atau kawasan. Pandangan ini sejalan dengan Pratama (2023), yang menunjukkan bahwa pemanfaatan energi pada tingkat satuan dapat mendukung ketahanan energi pada tingkat tersebut, serta Rizky et al. (2023), yang menempatkan pengembangan energi baru dan terbarukan sebagai bagian dari penguatan ketahanan energi nasional.

Konteks ini relevan bagi Kabupaten Blora, Jawa Tengah, khususnya Kecamatan Cepu. Cepu memiliki keterkaitan historis dan fungsional yang kuat dengan kegiatan minyak dan gas bumi serta pendidikan vokasi di bidang energi. Penelitian ini dilaksanakan di Politeknik Energi dan Mineral Akamigas (PEM Akamigas), Kecamatan Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah. Sebagai institusi pendidikan vokasi bidang energi dan mineral, PEM Akamigas memiliki peran dalam menyiapkan sumber daya manusia untuk sektor energi. Lokasi tersebut dipilih secara sengaja atas tiga pertimbangan, yaitu fasilitasnya mengoperasikan instalasi listrik tiga fasa yang mewakili konfigurasi umum fasilitas pendidikan vokasi dan industri kecil, praktik pengelolaan energinya memiliki nilai pembelajaran bagi calon tenaga kerja sektor energi, serta lokasinya berada pada daerah yang struktur ekonominya berkaitan erat dengan sektor energi. Lokasi tersebut memberikan konteks yang sesuai untuk mengkaji pengelolaan energi pada tingkat fasilitas, meskipun tidak diposisikan sebagai representasi langsung kondisi ketahanan energi Kabupaten Blora secara keseluruhan.

Keterkaitan energi dengan pembangunan wilayah juga terlihat dari struktur ekonomi Kabupaten Blora. Pada tahun 2024, sektor pertambangan dan penggalian menyumbang sekitar 21,74% terhadap Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) Kabupaten Blora. Sektor perdagangan menyumbang sekitar 15,98%, sedangkan industri pengolahan memberikan kontribusi sekitar 10,92%; pada tahun yang sama, pertumbuhan ekonomi daerah mencapai 3,06% (Pemerintah Kabupaten Blora, 2025). Struktur tersebut

menunjukkan bahwa kegiatan ekonomi daerah memiliki hubungan yang cukup kuat dengan sumber daya alam, industri, serta perdagangan. Keberlanjutan layanan energi dengan demikian menjadi salah satu faktor pendukung bagi produktivitas, kegiatan pendidikan, aktivitas ekonomi, dan pembangunan wilayah.

Dokumen perencanaan daerah menunjukkan bahwa kebutuhan energi dan sumber daya mineral di Kabupaten Blora terus meningkat sejalan dengan perkembangan penduduk, kegiatan ekonomi, dan pembangunan infrastruktur. Di sisi lain, pemanfaatan energi baru dan terbarukan masih memerlukan pengembangan lebih lanjut (Pemerintah Kabupaten Blora, 2025). Kondisi ini menegaskan bahwa penguatan ketahanan energi tidak hanya berkaitan dengan upaya penambahan sumber energi, tetapi juga dengan kemampuan dalam mengelola penggunaan energi dan kondisi infrastruktur secara berkelanjutan. Informasi mengenai kondisi energi pada tingkat fasilitas menjadi penting sebagai dasar untuk mengenali potensi kerentanan dan menentukan tindakan yang sesuai.

Salah satu pendekatan yang dapat mendukung pengelolaan tersebut adalah digitalisasi monitoring energi. Sistem monitoring memungkinkan informasi mengenai penggunaan dan kondisi energi dikumpulkan serta disajikan secara lebih teratur. Dengan informasi yang tersedia secara berkelanjutan, pengelola dapat memahami pola penggunaan energi, mengenali perubahan kondisi, dan melakukan evaluasi sebelum masalah berkembang menjadi gangguan yang lebih besar. Dalam perspektif ketahanan energi, monitoring tidak hanya berfungsi sebagai sarana pencatatan, tetapi juga sebagai pendukung kesiapan organisasi dalam menjaga keberlangsungan layanan.

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) mendukung pengembangan sistem monitoring energi yang lebih terhubung. Data dari perangkat pengukuran dapat dikumpulkan, diolah, dan disajikan kepada pengguna dalam waktu yang relatif cepat. Shi et al. (2016) menjelaskan bahwa pengolahan data yang dilakukan dekat dengan sumber data dapat mempercepat penyediaan informasi dan mengurangi ketergantungan terhadap pengolahan terpusat. Pendekatan tersebut banyak digunakan dalam sistem monitoring energi berbasis IoT untuk mendukung ketersediaan informasi yang lebih cepat dan berkelanjutan (Minh et al., 2022). Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa monitoring energi berbasis IoT dapat membantu menyediakan informasi penggunaan energi, mendukung pengawasan kondisi, serta membantu mengenali perubahan yang memerlukan perhatian (Mirani et al., 2024; Ullah et al., 2023).

Pada lingkungan industri dan pendidikan vokasi, PLC tetap digunakan secara luas untuk mendukung pengendalian dan pemantauan peralatan. Integrasi PLC dengan IoT memungkinkan informasi energi diperoleh dari fasilitas, diolah pada tingkat lokal, dan disajikan melalui media pemantauan yang lebih mudah diakses. Pemanfaatan teknologi tersebut dapat mendukung keberlanjutan informasi bagi pengelola fasilitas, terutama ketika diperlukan pemantauan kondisi energi secara rutin. Namun, manfaat teknologi tidak hanya terletak pada kemampuan menghasilkan atau mengirimkan data, melainkan juga pada sejauh mana informasi yang tersedia dapat digunakan dalam pengelolaan energi.

Pada instalasi tiga fasa, informasi mengenai pembagian beban antarfasa memiliki

arti teknis tersendiri. Pembebanan yang terpusat pada satu fasa dapat meningkatkan arus pada penghantar netral, memperbesar rugi-rugi daya, serta menambah beban termal pada penghantar dan peralatan proteksi. Kondisi tersebut umumnya tidak tampak pada pembacaan daya total, karena nilai keseluruhan dapat tetap berada dalam kapasitas terpasang meskipun distribusinya antarfasa tidak merata. Oleh karena itu, pemantauan yang menyajikan nilai setiap fasa secara terpisah memberikan gambaran yang berbeda dari pemantauan yang hanya menampilkan nilai agregat. Kemampuan membedakan kedua hal tersebut menjadi salah satu pertimbangan dalam menentukan parameter yang diamati pada penelitian ini.

Penelitian terkait monitoring energi di lingkungan PEM Akamigas telah dilakukan oleh Muhtadi et al. (2025) melalui pengembangan sistem monitoring energi listrik berbasis IoT dan Firebase. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa data kondisi energi dapat dikirimkan secara waktu nyata untuk mendukung kebutuhan monitoring di lingkungan kampus. Temuan tersebut memberikan dasar bagi pengembangan sistem monitoring energi pada lokasi penelitian. Penelitian ini melanjutkan sekaligus membedakan diri dari penelitian tersebut dalam tiga hal. Pertama, pada arsitektur sistem: penelitian terdahulu menggunakan mikrokontroler dengan basis data awan, sedangkan penelitian ini menempatkan PLC sebagai pengendali utama dengan akuisisi data melalui Modbus RTU dari *smart meter* ber-CT, sehingga sistem dapat menumpang pada perangkat kendali yang umumnya telah terpasang di fasilitas industri dan pendidikan vokasi. Kedua, pada fokus evaluasi: penelitian terdahulu menilai keberhasilan akuisisi, pengiriman, dan visualisasi data, sedangkan penelitian ini menilai sejauh mana informasi yang dihasilkan memenuhi syarat untuk digunakan dalam pengelolaan energi. Ketiga, pada kerangka penafsiran: penelitian ini membaca kinerja sistem melalui perspektif ketahanan energi tingkat fasilitas, bukan semata melalui kinerja teknis perangkat. Dengan demikian, hubungan antara sistem monitoring dan kapasitas ketahanan energi pada tingkat fasilitas menjadi persoalan yang dijawab dalam penelitian ini.

Pemilihan laboratorium sebagai lokasi pengujian juga memiliki arti tersendiri dalam konteks pendidikan vokasi energi. Laboratorium tidak hanya berfungsi sebagai tempat pengujian perangkat, tetapi juga sebagai lingkungan pembelajaran tempat calon tenaga kerja sektor energi mengenal praktik pengelolaan energi secara langsung. Ketika sistem monitoring dioperasikan pada lingkungan tersebut, pengetahuan mengenai pembacaan parameter kelistrikan, penafsiran pola penggunaan, serta penentuan tindak lanjut dapat ditumbuhkan sejak masa pendidikan. Kapasitas informasi pada tingkat fasilitas dengan demikian memiliki dua sisi yang saling melengkapi, yaitu sisi teknis berupa ketersediaan data yang dapat dipercaya dan sisi sumber daya manusia berupa kesiapan menafsirkan data tersebut menjadi tindakan pengelolaan.

Pada tingkat fasilitas, perubahan kondisi penggunaan energi perlu diperhatikan secara berkelanjutan. Kondisi penggunaan yang tidak merata, perubahan kebutuhan operasi, atau gangguan pada peralatan dapat memengaruhi efisiensi dan keandalan layanan energi. Apabila kondisi tersebut tidak dikenali sejak awal, dampaknya dapat berkembang menjadi gangguan terhadap aktivitas utama

fasilitas. Oleh karena itu, pemantauan energi diperlukan agar pengelola memperoleh gambaran mengenai kondisi aktual dan dapat mengidentifikasi perubahan yang memerlukan evaluasi.

Pemantauan yang dilakukan secara berkelanjutan membantu organisasi untuk tidak hanya bereaksi setelah gangguan terjadi (Rezaei et al., 2022). Informasi hasil monitoring dapat memperkuat pemahaman terhadap pola penggunaan energi dan membantu mengenali tanda awal kondisi yang berpotensi menghambat keberlangsungan layanan. Dalam konteks ketahanan energi, kemampuan tersebut penting karena memungkinkan organisasi meningkatkan kesiapan serta menentukan respons berdasarkan informasi yang tersedia.

Meskipun pengembangan sistem monitoring energi berbasis PLC dan IoT terus berkembang, masih terdapat kesenjangan antara kajian teknis monitoring dan pembahasan mengenai ketahanan energi. Kajian ketahanan energi umumnya berfokus pada ketersediaan pasokan, kebijakan, diversifikasi sumber energi, ekonomi, dan tata kelola pada tingkat nasional atau wilayah. Sebaliknya, kajian monitoring energi sering kali lebih menekankan ketelitian pengukuran, pengiriman data, dan penyajian informasi. Padahal, data operasional pada tingkat fasilitas dapat menjadi dasar penting untuk mengenali kerentanan, memahami perubahan kondisi, dan mendukung tindakan yang lebih cepat.

Stanković et al. (2022) menegaskan bahwa data operasional pada tingkat aset dan fasilitas merupakan masukan penting dalam memahami ketahanan pada tingkat sistem yang lebih luas. Alrowaili et al. (2023) juga menunjukkan bahwa pemantauan kondisi secara berkelanjutan dapat membantu mengenali kerentanan sebelum berkembang menjadi gangguan yang lebih besar. Dengan demikian, sistem monitoring dapat diposisikan sebagai infrastruktur informasi yang menghubungkan kondisi penggunaan energi dengan proses pengelolaan dan pengambilan keputusan organisasi.

Ketersediaan data, bagaimanapun, belum secara otomatis menciptakan ketahanan energi. Data perlu dapat dipercaya, tersedia pada waktu yang diperlukan, dipahami oleh pengguna, dan digunakan untuk mendukung tindakan yang relevan. Mühlhofer et al. (2023) menunjukkan bahwa kualitas serta ketepatan waktu data pada tingkat aset dapat memengaruhi ketepatan penilaian risiko pada tingkat sistem yang lebih luas. Oleh sebab itu, teknologi monitoring perlu dipahami sebagai bagian dari sistem sosial-teknis yang melibatkan perangkat, manusia, prosedur kerja, dan tata kelola organisasi. Sistem monitoring akan memberikan manfaat apabila informasi yang dihasilkan dapat mendukung evaluasi, komunikasi, dan respons terhadap kondisi yang berpotensi mengganggu layanan energi.

Berdasarkan kerangka tersebut, penelitian ini menggunakan tiga kapasitas informasi untuk menjembatani kinerja sistem monitoring dengan perspektif ketahanan energi pada tingkat fasilitas, yaitu keandalan informasi, keterbacaan kondisi untuk deteksi dini, dan keterbandingan informasi sebagai kondisi acuan. Ketiga kapasitas ini tidak diposisikan sebagai ukuran langsung ketahanan energi wilayah atau nasional, melainkan sebagai prasyarat informasi yang harus dipenuhi sebelum data monitoring dapat digunakan dalam pengelolaan energi.

Keandalan informasi menunjukkan sejauh mana nilai yang disajikan sistem sesuai

dengan keadaan aktual instalasi. Kapasitas ini mendasari kedua kapasitas lainnya, karena penilaian yang dibangun di atas data yang tidak akurat akan menghasilkan kesimpulan yang keliru. Keterbacaan kondisi menunjukkan kemampuan sistem menampakkan pola penggunaan energi yang sebelumnya tidak terbaca melalui pemeriksaan panel secara berkala, khususnya pola yang memerlukan tindak lanjut pengelola. Keterbandingan informasi menunjukkan tersedianya rekaman kondisi kelistrikan yang dapat dijadikan acuan untuk membandingkan keadaan antarperiode, karena perubahan kondisi jarang dapat dikenali melalui satu kali pengamatan dan lebih sering tampak sebagai kecenderungan. Operasionalisasi ketiga kapasitas tersebut disajikan pada Tabel 1.

Ketiga kapasitas tersebut merupakan prasyarat, bukan jaminan. Terpenuhinya keandalan, keterbacaan, dan keterbandingan informasi belum dengan sendirinya menghasilkan respons pengelolaan yang cepat dan tepat, karena hal itu masih bergantung pada kesiapan operator, prosedur kerja, kewenangan pengambilan keputusan, dan ketersediaan tindakan perbaikan. Kecepatan penyampaian informasi serta efektivitas penggunaannya oleh pengelola berada di luar cakupan pengujian penelitian ini dan diuraikan sebagai agenda penelitian lanjutan.

Berdasarkan perspektif tersebut, penelitian ini mengembangkan dan memvalidasi prototipe sistem monitoring energi listrik tiga fasa berbasis PLC dan IoT di Laboratorium Energi, Program Studi Teknik Instrumentasi Kilang, PEM Akamigas, Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah. Tiga pertanyaan yang dijawab adalah: pertama, sejauh mana prototipe yang dikembangkan mampu menyediakan informasi kondisi energi yang andal pada tingkat fasilitas; kedua, kondisi apa yang dapat ditampakkan oleh sistem yang sebelumnya tidak terbaca melalui pemeriksaan konvensional; dan ketiga, bagaimana kapasitas informasi tersebut dapat diposisikan dalam kerangka ketahanan energi yang lebih luas beserta prasyarat kelembagaan yang diperlukannya. Sejalan dengan pertanyaan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan dan memvalidasi prototipe sistem monitoring, mengukur ketiga kapasitas informasi sebagaimana dioperasionalkan pada Tabel 1, serta merumuskan implikasinya bagi pengurangan kerentanan infrastruktur energi pada tingkat fasilitas. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada satu fasilitas laboratorium dengan kondisi

Tabel 1. Operasionalisasi Tiga Kapasitas Informasi Tingkat Fasilitas

Kapasitas	Definisi operasional	Indikator	Sumber data
Keandalan informasi	Kesesuaian nilai yang disajikan sistem dengan nilai instrumen referensi pada kondisi uji	Rata-rata dan nilai maksimum penyimpangan pengukuran; jumlah parameter yang memenuhi kriteria	Uji banding per parameter terhadap instrumen referensi (Tabel 2)
Keterbacaan kondisi untuk deteksi dini	Kemampuan keluaran sistem menampakkan pola penggunaan energi yang memerlukan tindak lanjut	Distribusi daya aktif antarfasa	Rekaman daya aktif per fasa selama periode pengujian (Tabel 3)
Keterbandingan informasi sebagai kondisi acuan	Tersedianya rekaman parameter kelistrikan yang dapat dijadikan pembanding antarperiode	Nilai minimum, maksimum, dan rata-rata faktor daya, frekuensi, serta tegangan antarfasa terhadap batas standar operasi	Rekaman parameter kualitas daya selama periode pengujian (Tabel 4)

Sumber: Diolah penulis, 2025.

beban yang relatif terkendali dan periode pengujian yang terbatas, sehingga hasilnya merupakan pembuktian awal kelayakan infrastruktur informasi energi pada tingkat fasilitas, bukan pengukuran langsung terhadap ketahanan energi daerah maupun nasional..

PEMBAHASAN

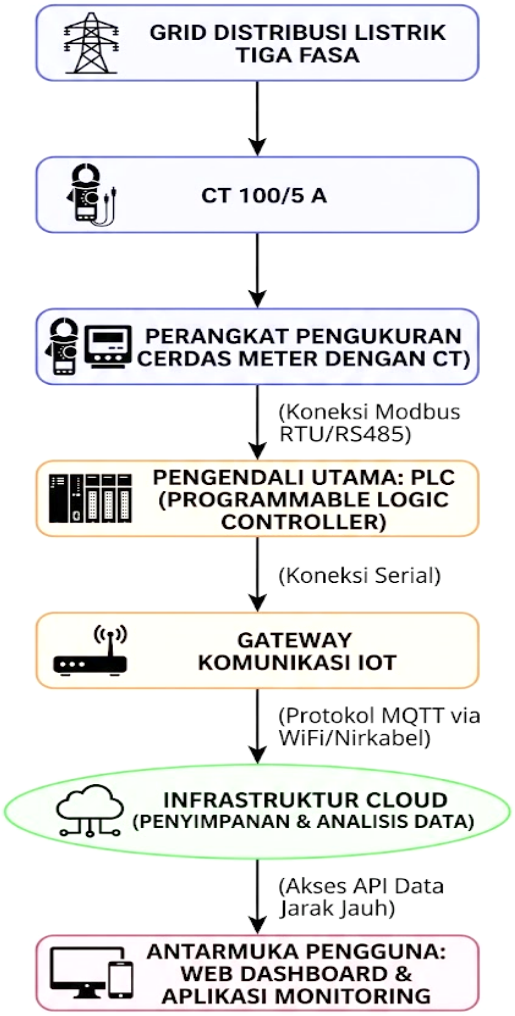
Pembahasan berikut menafsirkan hasil pengujian menggunakan tiga kapasitas informasi yang telah diuraikan pada Pengantar, yaitu keandalan informasi, keterbacaan kondisi untuk deteksi dini, dan keterbandingan informasi sebagai kondisi acuan. Ketiga kapasitas tersebut tidak digunakan sebagai ukuran langsung ketahanan energi wilayah ataupun nasional, tetapi untuk menjelaskan bagaimana kinerja sistem monitoring dapat berkontribusi pada pengurangan kerentanan energi pada tingkat fasilitas. Dengan demikian, penelitian ini tidak mengklaim bahwa penerapan satu prototipe dapat meningkatkan ketahanan energi secara langsung, tetapi menunjukkan bahwa penurunan kerentanan dapat dimulai dari kemampuan fasilitas memperoleh, memahami, dan menggunakan informasi mengenai kondisi energinya sendiri.

Digitalisasi Monitoring sebagai Infrastruktur Informasi

Sistem yang dikembangkan membentuk alur informasi dari kondisi kelistrikan pada fasilitas menuju informasi yang dapat diakses oleh pengelola. Data diperoleh melalui perangkat pengukuran, diproses pada tingkat fasilitas, diteruskan melalui sistem komunikasi, dan ditampilkan melalui dashboard. Arsitektur sistem pada Gambar 1 menunjukkan bahwa digitalisasi monitoring membangun hubungan antara kondisi fisik infrastruktur dengan informasi yang dapat digunakan untuk mendukung pengelolaan energi.

Penempatan PLC sebagai pengendali utama dalam arsitektur tersebut membawa dua konsekuensi yang berkaitan dengan ketahanan energi tingkat fasilitas. Pertama, akuisisi data dilakukan melalui protokol Modbus RTU dari smart meter ber-CT, sehingga sistem dapat menumpang pada perangkat kendali dan perangkat ukur yang pada banyak fasilitas industri maupun pendidikan vokasi telah terpasang. Kebutuhan penggantian instalasi menjadi lebih kecil dan biaya penerapan dapat ditekan, sehingga peluang penerapan pada fasilitas dengan anggaran terbatas menjadi lebih besar. Kedua, pengolahan data pada tingkat lokal membuat fungsi pemantauan dasar tetap dapat berjalan meskipun sambungan menuju layanan awan sedang terganggu. Sifat tersebut sejalan dengan gagasan pengolahan data yang dilakukan dekat dengan sumbernya (Shi et al., 2016; Minh et al., 2022) dan bernilai penting bagi fasilitas yang kualitas jaringan komunikasinya belum sepenuhnya stabil.

Nilai utama sistem bukan pada penggunaan PLC, IoT, atau dashboard secara terpisah melainkan pada kemampuannya menjembatani kesenjangan antara kondisi aktual infrastruktur dan informasi yang diterima pengelola sehingga keterbatasan informasi tidak lagi membuat perubahan kondisi baru diketahui setelah berkembang menjadi gangguan melainkan dapat dipantau secara teratur untuk mendukung evaluasi perencanaan pemeliharaan dan tindak lanjut sesuai kebutuhan fasilitas dengan implementasi di Laboratorium Energi PEM Akamigas sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 yang dilakukan dalam lingkungan laboratorium terkendali sehingga hasil lebih tepat dipahami sebagai pembuktian



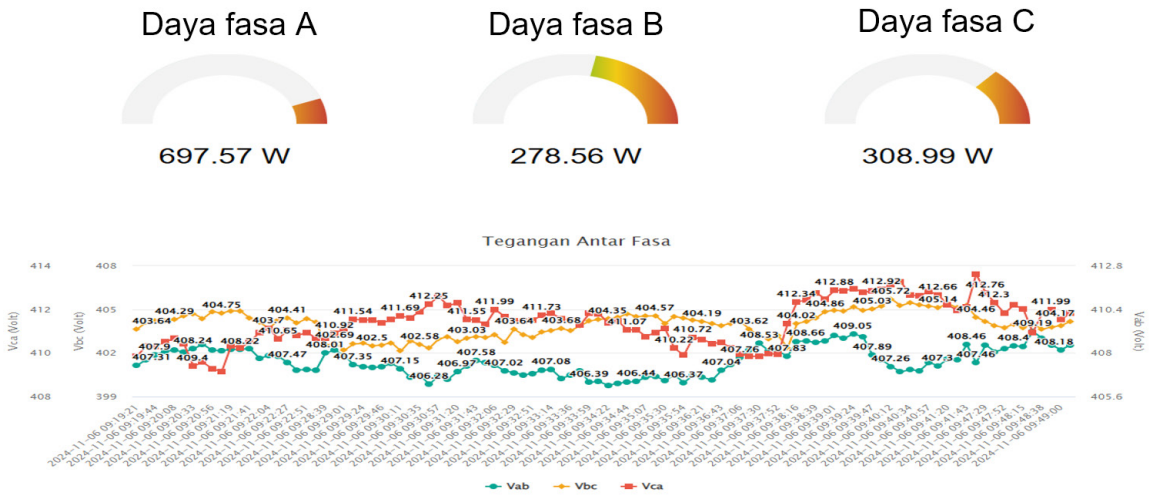
Gambar 1. Arsitektur Perangkat Keras dan Aliran Data Sistem Monitoring Daya Listrik Tiga Fasa Berbasis PLC-IoT di Laboratorium PEM Akamigas

awal kelayakan sistem monitoring energi di tingkat fasilitas dan bukan sebagai gambaran penerapan pada seluruh jenis fasilitas industri atau infrastruktur energi.

Dashboard pada Gambar 3 menunjukkan bahwa data hasil pengukuran dapat diubah menjadi informasi kondisi energi yang lebih mudah dipahami. Penyajian secara terpusat membantu pengguna memperoleh gambaran penggunaan energi tanpa harus selalu memeriksa panel secara langsung. Dalam konteks ketahanan energi, ketersediaan data perlu didukung oleh keandalan, ketepatan, dan kemudahan akses agar dapat digunakan sebagai dasar tindakan, sejalan dengan Mühlhofer et al. (2023) yang menempatkan kualitas dan ketepatan informasi pada tingkat aset sebagai unsur yang berkontribusi terhadap penilaian risiko pada tingkat sistem yang lebih luas. Dashboard karena itu berpotensi menjadi pendukung pengambilan keputusan, meskipun efektivitasnya bergantung pada kemampuan pengguna menafsirkan informasi dan melakukan tindak lanjut. Monitoring energi dengan demikian perlu dipandang sebagai bagian dari sistem sosial-teknis yang memadukan teknologi, manusia, prosedur, dan tata kelola.



Gambar 2. Implementasi Perangkat Keras Sistem Monitoring Energi di Laboratorium PEM Akamigas



Gambar 3. Dashboard Monitoring Daya dan Tegangan

Tabel 2. Hasil Uji Keandalan Sistem Monitoring

Parameter	Nilai sistem	Nilai referensi	*Error* (%)	Status
Tegangan antarfasa (V)	387,9	394,1	1,57	Memenuhi
Arus (A)	2,97	3,03	1,98	Memenuhi
Daya aktif (W)	615,82	626,99	1,78	Memenuhi
Faktor daya	0,89	0,9	1,11	Memenuhi
Frekuensi (Hz)	49,92	50	0,16	Memenuhi
Rata-rata			**1,32**	
Maksimum			**1,98**	

Sumber: Hasil Pengujian, 2025

Keandalan Informasi sebagai Prasyarat Dasar

Keandalan informasi diuji dengan membandingkan nilai yang ditampilkan sistem terhadap pembacaan instrumen referensi pada lima parameter, yaitu tegangan, arus, daya aktif, faktor daya, dan frekuensi. Penyimpangan dihitung sebagai selisih nilai sistem terhadap nilai referensi dibagi nilai referensi, dinyatakan dalam persen, dan diambil rata-rata serta nilai maksimumnya. Kriteria kelulusan ditetapkan sebesar 2%, mengacu pada praktik lazim pengujian instrumen pemantauan energi tingkat fasilitas, berdasarkan Standar IEC 61557-12.

Hasil pengujian pada waktu tertentu menunjukkan bahwa sistem mampu menyediakan informasi dengan tingkat keandalan yang memadai untuk tujuan monitoring. Sebagaimana diringkas pada Tabel 2, rata-rata penyimpangan (*error*) pengukuran sebesar 1,31% dengan penyimpangan (*error*) maksimum 1,90%, dan seluruh parameter memenuhi kriteria pengujian.

Pola penyimpangan antarparameter pada Tabel 2 juga memberikan gambaran mengenai karakter keluaran sistem. Penyimpangan terkecil terdapat pada frekuensi, yaitu 0,16%, suatu keadaan yang wajar karena frekuensi merupakan besaran sistem yang relatif seragam pada jaringan yang sama. Penyimpangan terbesar terdapat pada arus, yaitu 1,90%, yang berkaitan dengan penggunaan transformator arus serta rendahnya nilai arus pada kondisi uji sehingga kesalahan relatif lebih mudah terlihat. Daya aktif menunjukkan penyimpangan 1,78% karena besaran tersebut merupakan hasil perkalian beberapa parameter, sehingga

penyimpangan pada masukan ikut terbawa pada keluarannya. Pemahaman terhadap pola tersebut berguna bagi pengelola dalam menetapkan tingkat kepercayaan yang wajar pada setiap parameter, sehingga informasi digunakan sesuai dengan batas ketelitiannya dan tidak ditafsirkan melampaui kemampuan sistem.

Dalam konteks ketahanan energi, hasil uji tersebut tidak menempatkan sistem sebagai pengganti instrumen referensi, melainkan menunjukkan bahwa sistem cukup andal untuk kebutuhan monitoring tingkat fasilitas. Keandalan menjadi prasyarat karena evaluasi penggunaan energi perlu didasarkan pada informasi yang sesuai keadaan aktual. Meskipun demikian, keberadaan sistem monitoring tidak dengan sendirinya menjamin respons yang cepat, karena kecepatan dan ketepatan tindakan tetap dipengaruhi kesiapan operator, prosedur kerja, kewenangan pengambilan keputusan, dan ketersediaan tindakan perbaikan merupakan aspek yang berada di luar cakupan pengujian ini.

Informasi untuk Deteksi Dini Kondisi

Kemampuan mengenali perubahan pola penggunaan energi merupakan salah satu unsur penting dalam pengelolaan energi pada tingkat fasilitas. Informasi yang tersedia secara berkelanjutan memungkinkan pengelola memahami distribusi penggunaan energi, membandingkan kondisi antarperiode, serta mengenali pola yang memerlukan perhatian sebelum berkembang menjadi gangguan operasional. Dalam perspektif ketahanan energi, kemampuan tersebut mendukung deteksi dini kondisi dan membantu organisasi berpindah dari pola pengelolaan yang semata-mata reaktif menuju pengelolaan yang lebih antisipatif.

Hasil monitoring menunjukkan bahwa penggunaan daya pada ketiga fasa selama periode pengujian belum tersebar secara merata. Fasa A menyumbang 54,3% dari total daya aktif, sedangkan Fasa B dan Fasa C masing-masing menyumbang 21,7% dan 24,0%, sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Temuan tersebut menunjukkan adanya konsentrasi penggunaan listrik pada Fasa A selama periode pengujian.

Tabel 3. Daya Aktif Per Fasa dan Kontribusinya terhadap Total Beban

Parameter	Fasa A	Fasa B	Fasa C	Total 3Φ
Daya aktif (W)	697,57	278,56	308,99	1.285,12
Kontribusi (%)	54,3	21,7	24,0	100

Sumber: Hasil Penelitian, 2025.

Temuan ini tidak dapat langsung dikategorikan sebagai gangguan karena diperoleh pada periode pengujian terbatas dan pada konfigurasi beban laboratorium, sehingga lebih tepat dibaca sebagai bukti kemampuan sistem menampakkan ketidakmerataan pembebanan, bukan sebagai temuan mengenai kerentanan instalasi fasilitas secara keseluruhan. Meskipun demikian, informasi semacam ini bernilai bagi pengelola apabila pola yang sama berlangsung konsisten, karena menjadi dasar untuk menentukan perlu tidaknya pemeriksaan lanjutan, evaluasi pola penggunaan, atau penyesuaian pembagian beban, karena tindakan pencegahan jauh lebih murah daripada penanganan gangguan.

Ditinjau dari sisi operasi, konsentrasi beban sebagaimana tampak pada Tabel 3 berhubungan dengan beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemeliharaan. Selisih pembebanan antarfasa dapat menimbulkan arus pada penghantar netral, memperbesar rugi-rugi pada penghantar, serta membuat satu bagian instalasi bekerja mendekati kapasitasnya sementara bagian lain masih

memiliki cadangan yang belum termanfaatkan. Apabila kebutuhan beban fasilitas bertambah, keadaan tersebut dapat mempersempit ruang penambahan beban meskipun kapasitas total yang terpasang masih tersedia. Nilai informasi yang dihasilkan sistem karena itu terletak pada kemampuannya menunjukkan letak persoalan, yaitu pada fasa mana pembebanan terpusat, dan bukan hanya menunjukkan bahwa penggunaan daya total masih berada dalam batas yang diizinkan.

Keterbandingan Informasi sebagai Kondisi Acuan

Hasil pengukuran menunjukkan faktor daya, frekuensi, dan tegangan selama pengujian waktu tertentu berada dalam kondisi yang memadai, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4. Acuan yang digunakan adalah faktor daya minimal 0,85 sesuai ketentuan pengenaan biaya kelebihan pemakaian daya reaktif, sesuai Peraturan Menteri ESDM Nomor 7 (2024), variasi frekuensi 50 ± 0,5 Hz, serta variasi tegangan pelayanan hingga ±5% (Davira et al., 2024). Dengan demikian, informasi ini tidak hanya menggambarkan kondisi saat pengujian, tetapi juga dapat membantu mengenali perubahan, menentukan prioritas evaluasi, dan mendukung deteksi dini terhadap kondisi yang berpotensi mengganggu keandalan sistem. Temuan ini sejalan dengan Stanković et al. (2022) dan Alrowaili et al. (2023), yang menunjukkan bahwa pola ketidakseimbangan atau konsentrasi beban pada satu fasa dapat lebih mudah dikenali ketika data operasional fasilitas tersedia secara berkelanjutan.

Rekaman kondisi normal semacam ini memiliki fungsi sebagai garis dasar (*baseline*) bagi penilaian pada periode berikutnya. Tanpa garis dasar, perubahan hanya dapat dinilai melalui perbandingan terhadap batas standar, sehingga kondisi yang bergerak menjauh dari keadaan biasanya tetap dianggap wajar selama masih berada dalam rentang yang diizinkan. Dengan tersedianya nilai minimum, maksimum, dan rata-rata pada periode acuan, pengelola dapat mengenali kecenderungan lebih awal, misalnya penurunan faktor daya yang berlangsung bertahap atau pelebaran rentang variasi tegangan yang menyertai penambahan beban. Keterbandingan informasi karena itu tidak hanya berkaitan dengan pemenuhan standar pada satu waktu pengamatan, tetapi juga dengan kemampuan membaca arah perubahan kondisi instalasi.

Implikasi bagi Ketahanan Wilayah dan Prasyarat Kelembagaan

Keterkaitan antara monitoring tingkat fasilitas dan ketahanan wilayah perlu dipahami secara bertingkat. Gangguan pada satu fasilitas tidak serta-merta menandakan suatu wilayah rentan, tetapi keterbatasan pemantauan dan respons pada sejumlah fasilitas berfungsi penting dapat terakumulasi dan berdampak pada sektor maupun kawasan yang lebih luas. Data monitoring tingkat fasilitas karena itu dapat dipahami sebagai lapisan informasi dasar, dimana informasi tersebut dapat

Tabel 4. Ringkasan Kondisi Kelistrikan Selama Pengujian

Parameter	Minimum	Maximum	Rata-rata	Batas Standar
Faktor daya	0,86	0,97	0,91	≥ 0,85
Frekuensi (Hz)	49,67	50,04	49,92	50 ± 0,5 Hz
Tegangan antar fasa (V)	389	414	408	400 ± 5%
Variasi tegangan	—	—	± 1,84%	± 5%

Sumber: Hasil Penelitian, 2025.

membantu mengidentifikasi fasilitas yang memerlukan perhatian, menentukan prioritas pemeliharaan, serta mendukung respons yang lebih terarah ketika kondisi berubah.

Penyajian data secara terpusat memungkinkan kondisi penggunaan energi pada tingkat fasilitas dipantau dengan lebih mudah tanpa bergantung pada pemeriksaan langsung di panel. Ketersediaan informasi secara lebih cepat dapat membantu memperpendek jeda antara terjadinya perubahan kondisi di fasilitas dan diterimanya informasi oleh pengguna, sehingga potensi perubahan dapat lebih segera ditindaklanjuti. Dalam perspektif ketahanan energi, data monitoring tidak hanya perlu tersedia, tetapi juga harus memiliki tingkat keandalan dan ketepatan yang memadai serta mudah diakses agar dapat mendukung pengambilan keputusan. Dengan demikian, informasi yang diperoleh dari tingkat aset dapat menjadi bagian dari dasar penilaian kondisi dan risiko pada tingkat yang lebih luas, sebagaimana dikemukakan oleh Mühlhofer et al. (2023) mengenai pentingnya kualitas dan ketepatan informasi aset dalam mendukung penilaian risiko pada tingkat sistem.

Agar informasi tingkat fasilitas dapat dimanfaatkan pada tingkat yang lebih luas, diperlukan kesamaan cara dalam mendefinisikan dan mencatat data. Kesamaan tersebut mencakup parameter yang direkam, satuan yang digunakan, selang waktu pencatatan, serta penandaan waktu pada setiap rekaman. Tanpa kesepakatan itu, data dari beberapa fasilitas sulit dibandingkan meskipun seluruhnya telah tersedia dalam bentuk digital. Selain aspek teknis, pemanfaatan lintas fasilitas juga memerlukan kejelasan mengenai kepemilikan data, kewenangan akses, dan batas informasi yang dapat dibagikan kepada pihak lain. Dalam konteks Kabupaten Blora, dengan struktur ekonomi yang berkaitan erat dengan sektor pertambangan, industri pengolahan, dan perdagangan (Badan Pusat Statistik Kabupaten Blora, 2025), kesepakatan semacam itu dapat menjadi dasar bagi penyusunan gambaran kondisi energi kawasan secara bertahap.

Ketika informasi hasil monitoring digunakan secara konsisten dalam evaluasi dan prosedur operasional, kapasitas fasilitas memperkuat kesiapan organisasi mengenali dan merespons potensi gangguan. Jika sistem serupa diterapkan pada sejumlah fasilitas yang saling berkaitan dan didukung koordinasi kelembagaan yang memadai, informasi tersebut dapat menjadi masukan bagi pemahaman kondisi energi pada tingkat sektor, kawasan, hingga wilayah. Ketahanan wilayah dengan demikian terbentuk melalui akumulasi kapasitas fasilitas, penguatan organisasi, integrasi informasi, dan koordinasi antaraktor.

Implikasi Strategis dan Keterbatasan

Digitalisasi monitoring energi dapat diposisikan sebagai strategi pendukung ketahanan energi karena meningkatkan visibilitas terhadap kondisi infrastruktur. Dalam lingkungan strategis yang dipengaruhi gangguan pasokan, perubahan teknologi, dan ketergantungan infrastruktur, kemampuan mengetahui kondisi internal fasilitas merupakan langkah awal menurunkan kerentanan. Namun digitalisasi memunculkan ketergantungan baru pada sistem informasi dan komunikasi, sehingga penerapannya perlu disertai perhatian pada keamanan data, keandalan penyimpanan, pengendalian akses, dan prosedur ketika sistem digital terganggu. Pengembangan monitoring karena itu tidak berhenti pada pemasangan perangkat, melainkan menjadi bagian dari tata kelola

energi yang memadukan teknologi, sumber daya manusia, prosedur, dan pengambilan keputusan.

Perhatian pada keamanan dan keandalan sistem informasi perlu disertai prosedur cadangan untuk keadaan ketika sistem digital tidak dapat digunakan. Prosedur tersebut mencakup penyimpanan data secara berlapis, pengaturan hak akses menurut peran, serta ketentuan pemeriksaan panel secara langsung apabila tampilan pemantauan tidak tersedia. Dengan demikian, digitalisasi tidak menghapus kemampuan pemeriksaan konvensional, melainkan mengurangi ketergantungan pada pemeriksaan tersebut sebagai satu-satunya sumber informasi. Di samping itu, manfaat sistem sangat bergantung pada kesiapan sumber daya manusia yang membaca dan menindaklanjuti informasi, sehingga pelatihan operator dan penyusunan panduan penafsiran perlu diposisikan sebagai bagian dari penerapan sistem, bukan sebagai kegiatan tambahan setelah perangkat terpasang.

Penelitian ini terbatas pada satu fasilitas laboratorium dengan kondisi relatif terkendali dan periode pengujian yang singkat, sehingga hasilnya belum dapat digeneralisasi untuk seluruh fasilitas energi maupun dijadikan bukti langsung peningkatan ketahanan energi wilayah. Penelitian ini juga tidak mengukur kecepatan penyampaian informasi dari titik pengukuran hingga tampil pada dashboard dan tidak menguji efektivitas penggunaan informasi oleh pengelola, sehingga kedua aspek tersebut tidak dimasukkan ke dalam simpulan.

Penelitian lanjutan perlu menguji sistem pada lebih dari satu fasilitas dengan kondisi operasional yang lebih beragam, mencakup integrasi data antarfasilitas, pengujian pada kualitas jaringan yang berbeda, penguatan keamanan informasi, penyusunan prosedur respons berbasis hasil monitoring, serta secara khusus pengukuran waktu tunda dan kelengkapan data dan evaluasi penggunaan informasi melalui uji pengguna atau wawancara operator. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa sistem monitoring energi berbasis PLC dan IoT dapat menjadi fondasi awal penurunan kerentanan energi tingkat fasilitas melalui penyediaan informasi yang lebih teratur, kemampuan menampakkan perubahan pola penggunaan, dan dukungan terhadap evaluasi pengelolaan. Apabila dikembangkan melalui standardisasi, integrasi antarfasilitas, penguatan keamanan digital, dan tata kelola yang jelas, kapasitas tersebut berpotensi mendukung ketahanan energi pada skala yang lebih luas.

SIMPULAN

Penelitian ini menempatkan digitalisasi monitoring energi bukan sebagai penambahan perangkat, melainkan sebagai pembentukan infrastruktur informasi yang menghubungkan kondisi fisik fasilitas dengan keputusan pengelolaannya. Melalui prototipe sistem monitoring daya listrik tiga fasa berbasis PLC dan IoT di Laboratorium Energi PEM Akamigas, Cepu, ketiga kapasitas informasi yang dirumuskan pada awal tulisan ini terbukti dapat dipenuhi pada tingkat fasilitas.

Kapasitas pertama, keandalan informasi, ditunjukkan oleh kesesuaian nilai yang disajikan sistem dengan pembacaan instrumen referensi pada lima parameter, dengan rata-rata penyimpangan 1,31%. Keandalan ini penting bukan karena besarnya angka, melainkan karena setiap keputusan pemeliharaan dan efisiensi bertumpu pada asumsi bahwa angka yang terbaca mewakili keadaan sebenarnya. Kapasitas kedua, keterbacaan

kondisi untuk deteksi dini, ditunjukkan oleh tertampakkannya konsentrasi 54,3% daya aktif pada satu fasa. Kondisi tersebut tidak dapat dikenali dari pembacaan daya total maupun dari pemeriksaan panel secara berkala, karena hanya terlihat ketika ketiga fasa dibandingkan secara terus-menerus. Di sinilah nilai tambah digitalisasi terletak: bukan mengukur hal yang sudah diketahui dengan lebih teliti, melainkan menampakkan hal yang sebelumnya tidak terbaca. Kapasitas ketiga, keterbandingan informasi sebagai kondisi acuan, ditunjukkan oleh terekamnya kondisi faktor daya, frekuensi, dan tegangan yang seluruhnya berada dalam batas standar operasi. Rekaman kondisi normal ini berfungsi sebagai garis dasar; tanpanya, perubahan pada periode berikutnya hanya dapat dinilai secara kualitatif atau berdasarkan ingatan pengelola.

Dalam perspektif ketahanan energi, kemampuan tersebut membentuk kapasitas pendukung pada tingkat fasilitas berupa ketersediaan informasi, kemampuan mengenali kondisi yang memerlukan perhatian, dan kegunaan informasi sebagai dasar evaluasi serta respons pengelolaan sehingga pengelolaan energi dapat bergeser dari pola reaktif menuju pola yang lebih antisipatif. Namun, kapasitas informasi tidak dengan sendirinya menghasilkan ketahanan. Manfaatnya bergantung pada kesiapan pengelola, kejelasan prosedur tindak lanjut, kewenangan pengambilan keputusan, dan tata kelola organisasi. Ketahanan energi pada tingkat fasilitas dengan demikian terbentuk melalui keterpaduan antara teknologi, sumber daya manusia, prosedur kerja, dan kelembagaan.

Berdasarkan temuan tersebut, penguatan kapasitas informasi pada tingkat fasilitas dapat ditempuh secara bertahap. Tahap pertama berupa penyediaan pengukuran per fasa yang dapat dipercaya beserta perekamannya secara berkelanjutan. Tahap kedua berupa penetapan kondisi acuan sebagai dasar pembandingan antarperiode, disertai penyusunan prosedur tindak lanjut yang menyebutkan pihak yang berwenang menilai dan bertindak atas informasi tersebut. Tahap ketiga berupa penyeragaman cara pencatatan data agar informasi antarfasilitas dapat dipadukan, disertai pengaturan keamanan dan hak akses. Urutan tersebut menempatkan perangkat sebagai unsur awal, sedangkan prosedur dan kelembagaan sebagai unsur yang menentukan sejauh mana informasi yang tersedia benar-benar menurunkan kerentanan energi pada tingkat fasilitas.

Penelitian ini terbatas pada satu fasilitas laboratorium dengan kondisi yang relatif terkendali dan periode pengujian yang singkat sehingga hasilnya lebih tepat dipahami sebagai pembuktian awal kelayakan infrastruktur informasi energi pada tingkat fasilitas, bukan sebagai pengukuran langsung ketahanan energi wilayah. Penelitian selanjutnya perlu menguji penerapan pada beberapa fasilitas dengan karakteristik dan kondisi jaringan yang lebih beragam, mengkaji mekanisme integrasi dan tata kelola data energi antarfasilitas dalam memanfaatkan informasi yang selanjutnya dapat berkembang menjadi dukungan nyata bagi ketahanan energi pada skala sektor, kawasan, dan wilayah.

DAFTAR PUSTAKA

Alrowaili, Y., Saxena, N., Srivastava, A., Conti, M., Burnap, P., 2023. A review: Monitoring situational awareness of smart grid cyber-physical systems and critical asset identification. IET Cyber-Physical Systems: Theory &

Applications 8, 160–185. https://doi.org/10.1049/cps2.12059

Badan Pusat Statistik Kabupaten Blora, 2025. Kabupaten Blora dalam angka 2025.

Cherp, A., Jewell, J., 2014. The concept of energy security: Beyond the four As." Energy policy 75. Energy policy 75 415. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.005

Davira, B., Rusda, R., Karim, K., 2024. Analisis Kualitas Daya Listrik Gedung Direktorat Politeknik Negeri Samarinda. PoliGrid 5. https://doi.org/10.46964/poligrid.v5i1.20

Goldthau, A., 2014. Rethinking the governance of energy infrastructure: Scale, decentralization and polycentrism. Energy Research & Social Science 1, 134–140. https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.009

Indonesia, 2025. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2025 tentang Manajemen Energi.

International Energy Agency (IEA), 2022. World Energy Outlook 2022.

Jaap C. Jansen, Ad J. Seebregts, 2010. Long-term energy services security: What is it and how can it be measured and valued? 1654–1664. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.047

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2024. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2024 tentang Pengenaan Biaya Kelebihan Pemakaian Daya Reaktif.

Lemhannas RI, 2020. Modul Ketahanan Nasional: Konsepsi Astagatra dalam Pembangunan Nasional.

Minh, Q.N., Nguyen, V.-H., Quy, V.K., Ngoc, L.A., Chehri, A., Jeon, G., 2022. Edge computing for IoT-enabled smart grid: The future of energy. Energies 15, 6140. https://doi.org/10.3390/en15176140

Mirani, A.A., Awasthi, A., O'Mahony, N., Walsh, J., 2024. Industrial IoT-Based Energy Monitoring System: Using Data Processing at Edge. IoT 5, 608–633. https://doi.org/10.3390/iot5040027

Mühlhofer, E., Koks, E.E., Kropf, C.M., Sansavini, G., Bresch, D.N., 2023. A generalized natural hazard risk modelling framework for infrastructure failure cascades. Reliability Engineering & System Safety 234, 109194. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109194

Muhtadi, M.Z.Z., Ranolat, S., Pujianto, 2025. Sistem Monitoring Energi Listrik 3 Fase Berbasis IoT dan Firebase. ELPOSYS:Jurnal Sistem Kelistrikan 12. https://doi.org/10.33795/elposys.v12i2.7206

Novikau, A., 2023. Energy security in security studies: A systematic review of twenty years of literature. Central European Journal of International and Security Studies 17, 36–64. https://doi.org/10.51870/PDDC2102

Pemerintah Kabupaten Blora, 2025. Produk Domestik Regional Bruto 2024.

Pemerintah Republik Indonesia., 2023. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi.

Pemerintah Republik Indonesia., 2007. Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi.

Peraturan Presiden, 2017. Peraturan Presiden Nomor 22 tentang Rencana Umum Energi Nasional.

Pratama, R.J., 2023. Dampak Optimasi Pemanfaatan Plts Terhadap Ketahanan

Energi Satuan Di Kodam Xii/Tpr. Jurnal Ketahanan Nasional 29, 1. https://doi.org/10.22146/jkn.80314

Rezaei, N., Tarimoradi, H., Deihimi, M., 2022. A coordinated management scheme for power quality and load consumption improvement in smart grids based on sustainable energy exchange based model. Sustainable Energy Technologies and Assessments 51, 101903. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101903

Rizky, L., Pratiwi, T.S., Wibawa, A., Achdiyana, I., 2023. Peran negara G20 dalam percepatan transisi energi baru terbarukan (EBT) untuk mewujudkan ketahanan energi nasional. Jurnal Ketahanan Nasional 29, 271–290. https://doi.org/10.22146/jkn.88751

Sathurshan, M., Saja, A., Thamboo, J., Haraguchi, M., Navaratnam, S., 2022. Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks. Infrastructures 7, 67. https://doi.org/10.3390/infrastructures7050067

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., Xu, L., 2016. Edge computing: Vision and challenges. IEEE internet of things journal 3, 637–646. https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198

Sovacool, B.K., Mukherjee, I., 2011. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. Energy 36, 5343–5355. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.043

Stanković, A.M., Tomsovic, K.L., De Caro, F., Braun, M., Chow, J.H., Čukalevski, N., Dobson, I., Eto, J., Fink, B., Hachmann, C., 2022. Methods for analysis and quantification of power system resilience. IEEE Transactions on Power Systems 38, 4774–4787. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3212688

Ullah, Z., Rehman, A.U., Wang, S., Hasanien, H.M., Luo, P., Elkadeem, M.R., Abido, M.A., 2023. IoT-based monitoring and control of substations and smart grids with renewables and electric vehicles integration. Energy 282, 128924. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128924

Winzer, C., 2012. Conceptualizing energy security. Energy Policy 46, 36–48. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.067