SISTEM PEMANTAUAN ENERGI DAN PENGENDALIAN HVAC TERINTEGRASI MENGGUNAKAN PLATFORM ECOSTRUXURE

Bintang Widhi Samudra[1)], Eko Budi Utomo[2)], dan Himmawan Sabda Maulana[3)]

[1]Mekatronika, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
[2]Mekatronika, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
[3]Mekatronika, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

E-mail: bintangsamudra3328@gmail.com

Abstract

Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems contribute significantly to building energy consumption and require an integrated monitoring and control system to support efficient operation and centralized supervision. This study aims to implement an integrated HVAC energy monitoring and control system using the EcoStruxure Building Operation platform. The developed system integrates two chillers, Air Handling Units (AHU), cooling towers, Chilled Water Pumps (CHWP), Condenser Water Pumps (CWP), and energy monitoring devices through BACnet and Modbus communication protocols. The implementation includes graphical user interface (GUI) visualization, trend logging, alarm monitoring, programming logic, and real-time monitoring of operational and energy parameters. The results show that all HVAC equipment and monitoring devices were successfully integrated into a centralized Building Management System (BMS) platform capable of performing real-time monitoring, data acquisition, historical data recording, and operational control. Based on trend log analysis, the average Relative Load Amperage (RLA) values were 40.10% during standalone operation of Chiller 2, 50.77% during standalone operation of Chiller 1, and 26.51% and 44.02% for Chiller 1 and Chiller 2, respectively, during simultaneous operation. Energy monitoring results indicate average daily energy consumption values of 1,722.99 kWh/day for standalone operation of Chiller 2, 1,040.87 kWh/day for standalone operation of Chiller 1, and 731.56 kWh/day and 1,584.03 kWh/day for Chiller 1 and Chiller 2, respectively, during simultaneous operation. These results demonstrate that the developed system can support integrated HVAC supervision, operational monitoring, and energy monitoring in modern building automation applications.

Keywords: *HVAC, Building Management System (BMS), EcoStruxure Building Operation, Modbus, Energy Monitoring*

PENDAHULUAN

Sistem *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) merupakan pengguna energi listrik terbesar di gedung komersial dan industri dengan konsumsi mencapai 40%–60% dari total kebutuhan listrik (Al Dakheel et al., 2023). Pemborosan energi pada instalasi pendingin sentral (*chiller plant*) umumnya dipicu oleh koordinasi pengoperasian multi-chiller (*chiller sequencing*) yang tidak optimal, di mana dua kompresor dipaksa bekerja simultan pada rasio pembebanan rendah (*low-part load*) yang menurunkan efisiensi (Afroz et al., 2022; Zhang et al., 2022; Li et al., 2024).

Penelitian otomasi gedung sebelumnya masih terfragmentasi antara pemantauan fisik HVAC dan konsumsi daya listrik. Kajian integrasi protokol IoT (Bhamare et al., 2022; Hasan et al., 2023) hanya berfokus pada transmisi jaringan tanpa menghubungkan dinamika mekanikal kompresor dengan daya aktif. Di sisi lain, sistem pemantauan energi (Markus et al., 2021; Pritoni et al., 2021) mencatat konsumsi kWh kumulatif tanpa menyelaraskannya dengan modulasi beban kompresor (*Relative Load Amperage*/RLA). Selain itu, kajian deteksi kerusakan (Gao et al., 2021; Sharma & Mistry, 2023) belum mengevaluasi dampak konsumsi daya saat terjadi pengalihan beban otomatis (*fault handover*), sehingga evaluasi efisiensi operasi sulit diukur secara presisi (Zhuang et al., 2022). Perbandingan keterbatasan studi terdahulu dengan sistem yang diusulkan dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1
Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Sistem Terintegrasi yang Diusulkan

Parameter Evaluasi	Penelitian Terdahulu	Penelitian Ini
Arsitektur Jaringan	Protokol terpisah atau berfokus pada simulasi numerik	*Multi-protocol hybrid* (BACnet/IP & Modbus RTU) terpusat
Parameter Chiller	Status digital *run/trip* atau pemodelan beban teoritis	Perekaman dinamis nilai riil pembebanan RLA (%)
Integrasi Daya	Pengukuran kWh global tanpa sinkronisasi mekanikal	Sinkronisasi *real-time* RLA dengan meteran daya DPM
Evaluasi Skenario	Simulasi teoritis / uji komunikasi data parsial	Komparasi riil 3 skenario: mandiri, simultan, dan *fault handover*

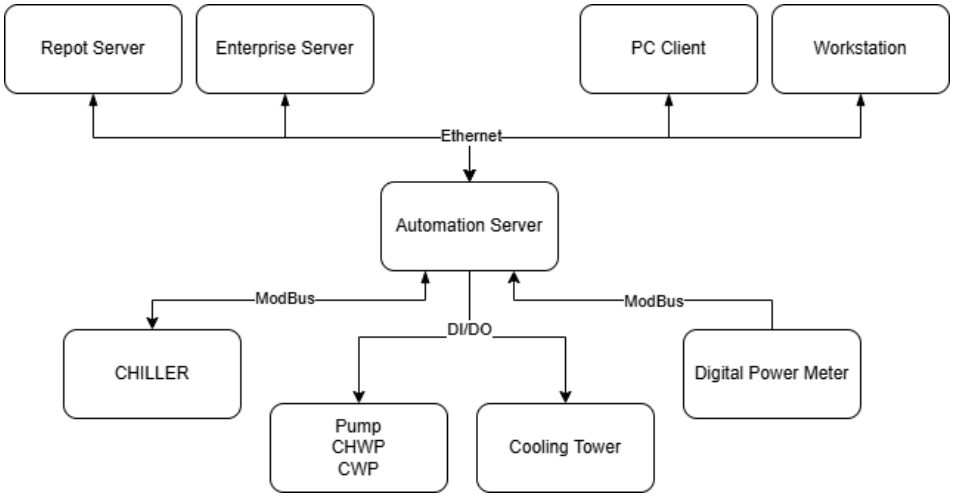
Guna menjawab kesenjangan tersebut, platform EcoStruxure Building Operation (EBO) dimanfaatkan untuk mengintegrasikan kontrol terdistribusi dan akuisisi data multi-protokol (Schneider Electric, 2023, 2024). Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada:

1. Perancangan arsitektur *multi-protocol hybrid* (BACnet/IP dan Modbus RTU) yang mengonsolidasikan 122 *data point* dari 2 chiller, 17 AHU, *cooling tower*, pompa sirkulasi, dan *Digital Power Meter* (DPM) ke dalam satu basis data *Automation Server*.
2. Pembuktian efisiensi energi secara empiris melalui analisis *trend log* yang mengorelasikan nilai RLA (%) kompresor terhadap konsumsi energi harian (kWh/hari) pada tiga skenario operasional riil, guna membuktikan potensi penghematan energi dari koordinasi pembebanan chiller secara terukur.

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan sistem pemantauan dan pengendalian HVAC terintegrasi pada platform EBO, serta mengevaluasi unjuk kerja sistem dan efisiensi konsumsi energi pada berbagai kondisi operasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental terapan pada instalasi pendingin terpusat gedung komersial. Tahapan penelitian mencakup perancangan arsitektur komunikasi *multi-protocol*, pemetaan titik data (*data point mapping*), konfigurasi logika interlok dan sekuensial pada *Automation Server*, perancangan antarmuka grafis (GUI), perekaman data berbasis *trend log*, serta analisis kuantitatif efisiensi energi . Konfigurasi arsitektur sistem ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur Sistem EcoStruxure™

Integrasi sistem dirancang dalam tiga tingkatan hierarki: (1) *Field Layer*, parameter operasional internal chiller dan listrik DPM dihubungkan via Modbus RTU (RS-485), sedangkan sensor suhu, status hambatan filter AHU, dan status pompa dihubungkan melalui *direct Input/Output* (analog/digital); (2) *Edge Control Layer*, di mana *Automation Server* memetakan seluruh register Modbus ke objek standar BACnet (*BACnet Analog/Binary Values*); dan (3) *Supervisory Layer*, di mana platform EBO menjalankan fungsi kendali terpusat, manajemen alarm, penyimpanan *trend log*, dan GUI. Rincian perangkat dan parameter operasional dirangkum pada Tabel 2 .

Tabel 2
Perangkat dan Parameter yang Dimonitor

No	Perangkat	Parameter

1	Chiller	RLA, Status Operasi, Alarm
2	AHU	Suhu Supply, Suhu Return, Alarm Filter
3	CHWP	Status Operasi
4	CWP	Status Operasi
5	Cooling Tower	Status Operasi
6	DPM	Energi (kWh), Arus, Tegangan

Perekaman data operasional dilakukan memanfaatkan fitur *trend log* pada EBO. Parameter RLA kompresor dicatat berdasarkan perubahan nilai (*change of value*), sedangkan konsumsi energi listrik kumulatif (kWh) direkam berkala setiap 15 menit. Data historis kemudian diekstraksi untuk menghitung nilai rata-rata pembebanan kompresor ($RLA_{avg} = \frac{1}{n}\sum RLA_i$) dan konsumsi energi harian rata-rata ($E_{avg} = \frac{1}{n}\sum E_i$) pada tiga skenario operasi: Chiller 2 beroperasi mandiri, kedua chiller beroperasi simultan, dan Chiller 1 beroperasi mandiri setelah Chiller 2 mengalami gangguan teknis. Validitas pengujian diverifikasi berdasarkan keterbacaan data secara *real-time*, ketiadaan galat transmisi, dan kesesuaian eksekusi interlok sekuensial pompa-chiller.

Pengambilan data operasional fasilitas HVAC dan profil konsumsi energi pada penelitian ini telah memperoleh persetujuan resmi dari pihak pengelola fasilitas terkait guna keperluan penelitian dan publikasi ilmiah. Identitas spesifik gedung disamarkan untuk menjaga kerahasiaan operasional mitra. Naskah ini juga telah melalui pemeriksaan uji kemiripan (*similarity index*) untuk menjamin integritas akademik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil integrasi sistem HVAC dievaluasi berdasarkan keberhasilan pembacaan point monitoring dan kontrol yang terhubung ke platform EcoStruxure Building Operation (EBO). Seluruh point yang berhasil dikonfigurasi pada Automation Server tersimpan pada database EBO dan digunakan sebagai sumber data untuk proses monitoring, pengendalian, serta pencatatan data historis menggunakan fitur trend log.

Tabel 3
Hasil Integrasi Point Pada Platform EBO

NO	Perangkat	Total Point	Point Berhasil	Presentase
1	*Automation Server*	6	6	100%
2	DPM	36	36	100%
3	Sensor Suhu	34	34	100%
4	Sensor Filter AHU	17	17	100%
5	Motorized Valve	12	12	100%
6	AHU	17	17	100%

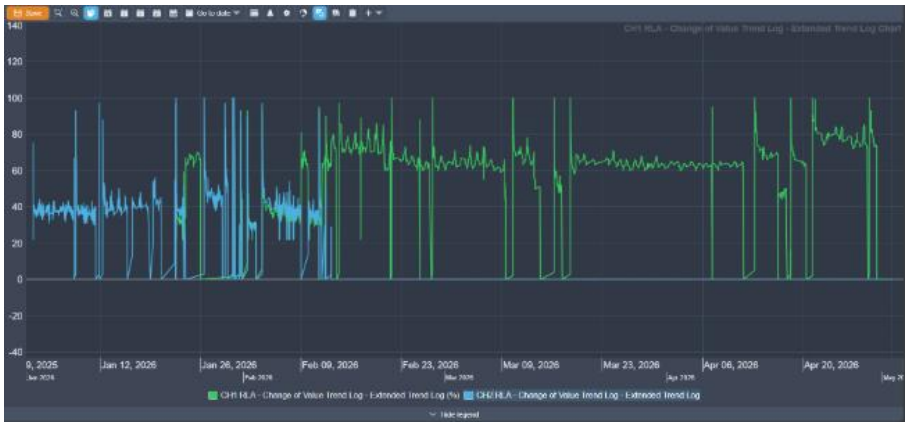
Data terintegrasi yang ditampilkan

secara *real-time* melalui antarmuka grafis (GUI) yang memvisualisasikan skema aliran pipa air dingin (*chilled water*), status operasional pompa primer/sekunder, dan panel parameter kelistrikan Chiller Plant, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. *Dashboard GUI* Pemantauan Parameter Operasional Chiller Plant

Kinerja pembebanan chiller dan konsumsi energi dianalisis berdasarkan data *trend log* pada Gambar 3 dan Gambar 4. Rangkuman hasil pengamatan parameter RLA dan konsumsi daya harian pada ketiga skenario operasi disajikan secara komparatif pada Tabel 4.



Gambar 3. Trend Log RLA Chiller



Gambar 4. Tampilan Monitoring Energi pada EBO

Tabel 4
Evaluasi Kinerja Chiller (RLA) dan Konsumsi Energi Harian Chiller

Kondisi Operasi	RLA Chiller 1 (%)	RLA Chiller 2 (%)	Chiller 1 (kWh/hari)	Chiller 2 (kWh/hari)	Total (kWh/hari)
Chiller 2 Stand Alone	-	40,10	-	1722,99	1722,99
Kedua Chiller Beroperasi	26,51	44,02	731,56	1584,03	2315,59
Chiller 1 Stand Alone	50,77	-	1040,87	-	1040,87

Berdasarkan Tabel 4, evaluasi konsumsi energi menunjukkan bahwa strategi pengoperasian chiller berpengaruh langsung terhadap efisiensi energi sistem secara keseluruhan. Pada kondisi kedua chiller beroperasi secara bersamaan, konsumsi energi gabungan mencapai angka tertinggi yaitu 2.315,59 kWh/hari (Chiller 1 sebesar 731,56 kWh/hari dan Chiller 2 sebesar 1.584,03 kWh/hari). Tingginya konsumsi ini membuktikan inefisiensi pengoperasian multi-chiller pada beban parsial rendah (RLA 26,51% dan 44,02%), di mana kedua kompresor tetap menanggung rugi-rugi daya dasar (*base load power*).

Bukti penghematan energi terlihat jelas ketika beban pendinginan dikonsolidasikan ke unit tunggal melalui sistem pengawasan terpusat EBO. Saat Chiller 1 beroperasi mandiri (Skenario Chiller 1 Stand Alone) dengan pembebanan optimum (RLA 50,77%), total konsumsi energi fasilitas turun menjadi 1.040,87 kWh/hari. Dibandingkan dengan pengoperasian simultan dua unit (2.315,59 kWh/hari), pengoperasian mandiri terkoordinasi ini menghasilkan penghematan energi listrik sebesar 1.274,72 kWh/hari atau efisiensi sebesar 55,05%. Bahkan jika dibandingkan dengan operasi tunggal Chiller

2 (1.722,99 kWh/hari), operasi dua chiller simultan tetap membuang energi sebesar 592,60 kWh/hari (25,59% lebih boros). Temuan ini membuktikan secara kuantitatif bahwa sistem pemantauan terintegrasi mampu mencegah pemborosan akibat pengoperasian kapasitas berlebih (*over-capacity operation*), sekaligus memvalidasi fungsi otomasi pengalihan beban (*fault handover*) secara andal saat unit chiller utama mengalami gangguan.

SIMPULAN

Sistem pemantauan energi dan pengendalian HVAC terintegrasi menggunakan platform EcoStruxure Building Operation telah berhasil diimplementasikan. Integrasi komunikasi *multi-protocol hybrid* (BACnet/IP dan Modbus RTU) mampu menghubungkan 122 titik data dengan tingkat keberhasilan pembacaan 100%. Analisis data operasional membuktikan bahwa pengoperasian dua chiller secara simultan pada beban rendah menghasilkan konsumsi energi harian tertinggi sebesar 2.315,59 kWh/hari. Melalui pengawasan terpusat, pengalihan beban ke satu unit chiller pada kapasitas optimum (RLA 50,77%) berhasil membuktikan penghematan energi riil hingga 1.274,72 kWh/hari (55,05%) dibandingkan operasi simultan, serta menjamin keandalan sistem saat transisi pengalihan beban darurat (*fault handover*). Untuk penelitian lanjutan, disarankan pengembangan algoritma kontrol sekuensial otomatis berbasis kecerdasan buatan (*Model Predictive Control*) guna mengoptimalkan titik kerja kompresor berdasarkan prediksi dinamika cuaca dan beban okupansi gedung secara adaptif.

DAFTAR PUSTAKA

Afroz, Z., Shafiullah, G. M., Urmee, T., Shoeb, M. A., & Higgins, G. (2022). Predictive modelling and optimization of HVAC systems using neural network and particle swarm optimization algorithm. *Building and Environment*, 209, 108681. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108681

Al Dakheel, J., Del Pero, C., Aste, N., & Leonforte, F. (2023). A review on optimal energy management in commercial buildings. *Energies*, 16(4), 1609. https://doi.org/10.3390/en16041609

ASHRAE. (2020). *ANSI/ASHRAE Standard 135-2020: BACnet—A data communication protocol for building automation and control networks*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Bhamare, V., Rathod, P., & Patil, S. (2022). Implementation of industrial IoT using Modbus and BACnet protocols for smart facility automation. *Journal of Industrial Information Integration*, 28, 100355. https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100355

Gao, D. C., Wang, S., & Shan, K. (2021). In-situ sensor self-calibration and optimal control of centralized HVAC systems: A case study. *Building Services Engineering Research and Technology*, 42(3), 325–341. https://doi.org/10.1177/0143624420980479

Hasan, N., Islam, J., & Rahman, M. (2023). Energy management system architecture in high-performance green buildings using open protocol integration. *Applied Thermal Engineering*, 221, 119850. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119850

Li, S., Li, S., & Wang, Z. (2024). Accelerating chiller sequencing using dynamic programming. *Energy and Buildings*, 325, 115037. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115037

Markus, A. A., Hobson, B. W., Gunay, H. B., & Bucking, S. (2021). A framework for a multi-source, data-driven building energy management toolkit. *Energy and Buildings*, 250, 111255. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111255

Modbus Organization. (2021). *Modbus application protocol specification V1.1b3*. Modbus Organization, Inc.

Pritoni, M., Paine, D., Fierro, G., Mosiman, C., Poplawski, M. E., Saha, A., Bender, J., & Granderson, J. (2021). Metadata schemas and ontologies for building energy applications: A critical review and use case analysis. *Energies*, 14(7), 2024. https://doi.org/10.3390/en14072024

Schneider Electric. (2023). *EcoStruxure Building Operation 2023 technical overview and engineering guide*. Schneider Electric Industries SAS.

Schneider Electric. (2024). *Guide specification: EcoStruxure Building Operation v2024 edge server and automation server*. Schneider Electric Industries SAS.

Sharma, V., & Mistry, V. (2023). Automated fault detection and diagnostics in HVAC systems. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 10(12), 141–147.

Zhang, C., Shen, C., & Sun, K. (2022). Data-driven chiller sequencing and load allocation strategy for multi-chiller plants considering operational constraints. *Energy and Buildings*, 262, 111993. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111993

Zhuang, C., Choudhary, R., & Mavrogianni, A. (2022). Probabilistic occupancy forecasting for risk-aware optimal ventilation through autoencoder Bayesian deep neural networks. *Building and Environment*, 219, 109207. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109207