

Efisiensi Energi pada HVAC dengan Pengendalian Dinamis AHU Berbasis PLC

Fransiscus Didik Chandra*, Linda Wijayanti

Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51 Jakarta 12930

| Article Info | Abstract |
|---------------------------|--|
| <i>Article history:</i> | <i>Common implementation of HVAC in high rise buildings involves combination of multiple AHUs, chillers and cooling towers. Where the adaptive operation only happens with the chillers as the chilled and cool water circulates between AHU – chiller – cooling tower. This paper is the design and implementation of adaptive AHU operation based on the supply and return air of each AHU within the HVAC system. The usage of PLC as local controller, multiple sensor and actuators within the AHU system (thermocouple sensor, pressure transmitter, air temperature – humidity sensor, air damper position sensor), common area & outdoor air temperature – humidity sensor, VSD, motorized valve, motorized fresh air damper, power meter, PLC and networked control system will ensure adaptive and programmable system suitable for various AHU operation and installation conditions. With the target temperature of 25°C in the common area, the system dynamically adjust the actuators to keep temperature within +/- 1C° range. Within the implementation, the energy usage on the AHU system itself can be lowered from 100% to 65% - 73%.</i> |
| Received July, 24 2025 | |
| Accepted July, 28 2025 | |

| Info Artikel | Abstrak |
|-----------------------------|---|
| <i>Histori Artikel:</i> | <i>Pemasangan HVAC pada gedung bertingkat umumnya menggunakan beberapa AHU, chiller dan cooling tower. Operasional yang bersifat adaptif hanya dilakukan pada chiller sesuai aliran air dingin dan air dingin bersirkulasi antara AHU – chiller – cooling tower. Paper ini bertujuan untuk menjelaskan tahap rancang bangun operasional adaptif pada setiap AHU pada suatu sistem HVAC. Penggunaan PLC sebagai pengendali lokal, beberapa type sensor dan penggerak dalam sistem AHU (sensor suhu, sensor tekanan air, sensor suhu dan kelembapan udara, sensor posisi damper udara), sensor suhu dan kelembapan di area umum dan area luar ruangan, VSD, motorized valve, motorized fresh air damper, power meter, PLC dan sistem pengendali terkoneksi membuat sistem yang dibangun dapat beroperasi secara adaptif dan diprogram sesuai kondisi operasional dan instalasi AHU yang berbeda – beda. Dengan target suhu 25°C di area umum, sistem secara dinamis menyesuaikan penggerak yang ada agar suhu berada pada kisaran +/- 1C°. Dengan penerapan metode ini, penggunaan energi pada AHU terkait dapat diturunkan dari sebelumnya 100% menjadi kisaran 65% - 73%.</i> |
| Diserahkan: 24 Juli 2025 | |
| Diterima: 28 Juli 2025 | |

1. PENDAHULUAN

HVAC merupakan singkatan dari *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*, yang menggambarkan sistem tata udara dalam ruangan untuk memenuhi kebutuhan kenyamanan

*Corresponding author. Fransiscus Didik Chandra
Email address: fydidikchandra@totalprima-si.com

termal, kesehatan dan keselamatan penghuni bangunan, serta menjaga kondisi lingkungan yang dibutuhkan oleh peralatan atau proses dalam ruangan (W. Larsen Angel, P.E, LEED AP, 2020). Sistem ini dirancang untuk mengatur suhu, kelembapan, dan kualitas udara di dalam bangunan, baik untuk kepentingan manusia maupun proses industri.

Pada gedung bertingkat, sistem HVAC umumnya terdiri atas beberapa unit *Air Handling Unit* (AHU), *chiller*, dan *cooling tower*. Ketiga komponen utama ini terhubung melalui instalasi perpipaan. Jalur pipa menghubungkan *cooling tower* dengan *chiller*, serta *chiller* dengan AHU. Jalur ini berfungsi mensirkulasikan media pendingin berupa air. Khusus pada pipa yang mengalirkan air dingin dari dan menuju AHU, umumnya dilengkapi dengan selimut isolasi termal guna mempertahankan suhu air tetap rendah dan mencegah kehilangan panas.

Sementara itu, aliran udara dari unit *Air Handling Unit* (AHU) menuju ruang-ruang yang dikondisikan disalurkan melalui *air duct supply* dan dikembalikan melalui *air duct return*. Untuk menjaga efisiensi termal selama distribusi udara, saluran suplai umumnya dilapisi dengan selimut isolasi termal. Sistem saluran udara ini berfungsi sebagai jaringan distribusi yang terintegrasi, memastikan udara dingin tersebar secara merata ke seluruh area layanan, serta menjaga stabilitas suhu dan kenyamanan termal di dalam gedung (Samuel C. Sugarman, 2016).

Proses kerja sistem HVAC melibatkan pertukaran kalor yang berlangsung secara berjenjang antara tiga komponen utama: AHU, *chiller*, dan *cooling tower*. Setiap komponen beroperasi pada rentang suhu target yang berbeda, sesuai dengan prinsip dan peran fungsionalnya. Pada AHU, proses penurunan suhu udara terjadi melalui *evaporator coil* yang menerima air dingin dari *chiller* dengan suhu antara 12 °C hingga 16 °C. Air ini digunakan untuk mendinginkan udara sebelum didistribusikan ke ruang-ruang terlayani, menghasilkan suhu udara keluaran dalam kisaran 17 °C hingga 27 °C sesuai kebutuhan ruangan.

Chiller sebagai unit penghasil air dingin, memiliki rentang suhu keluaran air antara 8 °C hingga 14 °C. Untuk mempertahankan suhu tersebut, *chiller* menerima air balik dari *cooling tower* dengan suhu berkisar 20 °C hingga 26 °C. Proses ini memungkinkan sistem mempertahankan efisiensi perpindahan panas pada unit *evaporator* di dalam *chiller*. Selanjutnya, *cooling tower* bekerja menurunkan suhu air yang telah menyerap panas dari *chiller*. Suhu air keluaran *cooling tower* yang dikembalikan ke *chiller* biasanya berada pada kisaran 22 °C hingga 27 °C, tergantung pada suhu udara luar yang digunakan sebagai media pendingin, yang umumnya berkisar antara 25 °C hingga 32 °C (ASHRAE, 2019).

Dengan pengaturan suhu berjenjang antara AHU, *chiller*, dan *cooling tower*, setiap komponen dalam sistem HVAC dapat beroperasi secara optimal dalam siklus pendinginan. Namun untuk meningkatkan efisiensi energi dan menyesuaikan kinerja sistem terhadap fluktuasi beban pendinginan yang bersifat dinamis, diperlukan strategi pengendalian yang lebih adaptif dan terdistribusi pada setiap unit dalam sistem.

Saat ini, pengendalian adaptif umumnya hanya diterapkan pada unit *chiller*, yang dapat beroperasi pada rentang 60% hingga 100% dari kapasitas. Sementara itu, unit AHU dan *cooling tower*, termasuk komponen pendukung seperti *air duct* dan *liquid pipe*, biasanya beroperasi pada kapasitas penuh secara terus-menerus tanpa penyesuaian terhadap kondisi aktual ruangan. Ketika beban termal ruangan berubah secara dinamis, hal ini seharusnya direspon secara berjenjang oleh semua komponen sistem HVAC. Namun, karena hanya *chiller* yang dilengkapi sistem kendali adaptif, respons sistem menjadi tidak efisien dan tidak menyeluruh.

Berdasarkan analisis tersebut, maka diperlukan identifikasi adanya potensi penerapan sistem kendali tambahan yang lebih adaptif pada unit AHU, *cooling tower*, *air duct*, dan *liquid pipe*. Pengendalian ini dirancang agar menyesuaikan kondisi operasional setiap unit berdasarkan data sensor yang terpasang, seperti suhu, kelembapan, tekanan, dan posisi *damper*. Dengan cara ini, rentang operasional suhu pada setiap unit dapat diperketat, yang tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga memperpanjang umur pakai komponen karena tidak bekerja pada kapasitas maksimum secara terus-menerus.

Implementasi praktik keinsinyuran dilakukan pada unit AHU, dengan menerapkan pengaturan kecepatan motor *blower* menggunakan *Variable Speed Drive* (VSD) yang dikendalikan berdasarkan pembacaan sensor suhu, baik di dalam unit AHU maupun di area umum yang dilayani. Setiap AHU dikendalikan secara lokal menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC), yang terhubung antar lantai melalui perangkat lunak terintegrasi yang dikembangkan oleh penulis. Sistem ini memungkinkan pertukaran data antar lantai dan perangkat secara *real-time*. Penggunaan daya dan energi dari setiap unit AHU dipantau melalui *power meter* yang terhubung dengan sistem pencatatan (data *logging*), untuk keperluan evaluasi dan analisis kinerja energi.

Adapun pengendalian pada *cooling tower*, *air duct*, dan *liquid pipe* belum diimplementasikan dalam tahap ini karena keterbatasan anggaran dan waktu pelaksanaan. Oleh karena itu, fokus utama dari praktik ini adalah pada penerapan kendali adaptif pada unit AHU sebagai langkah awal menuju optimasi sistem HVAC secara menyeluruh.

2. METODE PELAKSANAAN

Kendali adaptif pada sistem HVAC bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dengan mengatur kapasitas kerja unit berdasarkan kondisi lingkungan dan kebutuhan aktual. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah dengan memanfaatkan *Variable Speed Drive* (VSD) untuk mengatur kecepatan motor *blower* pada AHU secara otomatis, berdasarkan sinyal masukan dari sensor suhu atau kelembapan (EIA, 2019). Dengan sistem kendali adaptif, masing-masing unit dalam HVAC dapat beroperasi dalam rentang yang lebih efisien, tidak selalu pada kapasitas maksimum. Hal ini tidak hanya menghemat energi tetapi juga memperpanjang umur pakai komponen.

Programmable Logic Controller (PLC) adalah perangkat kendali digital yang digunakan untuk mengotomatisasi proses industri, termasuk sistem HVAC. PLC menerima input dari berbagai sensor (suhu, tekanan, kelembapan, dan posisi *damper*), memprosesnya menggunakan logika yang diprogram, dan menghasilkan output untuk mengontrol aktuator seperti motor, katup, atau fan (Bolton, W., 2015). Dalam konteks penulisan ini, PLC digunakan secara spesifik untuk mengendalikan unit AHU. Setiap unit AHU dilengkapi dengan sensor suhu dan kelembapan yang memberikan data ke PLC. Berdasarkan data ini, PLC akan mengatur kecepatan motor *blower* secara otomatis melalui *Variable Speed Drive* (VSD), sehingga sistem mampu menyesuaikan aliran udara sesuai kebutuhan aktual ruangan secara presisi dan efisien. Sistem ini juga mendukung komunikasi antar lantai melalui jaringan integratif, memungkinkan pengelolaan sistem HVAC secara menyeluruh dan adaptif.

Sensor THD (*Temperature and Humidity Sensor*) adalah alat pengukuran yang digunakan untuk memantau kondisi udara di lingkungan tertentu. Sensor ini sangat penting dalam sistem HVAC karena menjadi dasar dalam pengambilan keputusan kendali, khususnya untuk sistem adaptif yang mengatur suhu dan sirkulasi udara secara otomatis (Omega Engineering, 2021). Sensor suhu digunakan untuk membaca temperatur aktual udara di dalam ruangan maupun di dalam unit AHU, sedangkan sensor kelembapan

memberikan informasi mengenai kadar uap air di udara. Data dari sensor ini dikirimkan ke PLC untuk diproses dan digunakan sebagai acuan dalam pengaturan kecepatan *blower* atau pembukaan *damper*.

2.1. Peralatan dan Komponen yang Digunakan

Beberapa peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. PLC

Digunakan untuk pemrosesan logika kendali dan komunikasi antara sensor dan aktuator dengan aplikasi yang dirancang.

2. Sensor THD

Untuk mendeteksi suhu dan kelembapan di dalam unit AHU dan ruang terlayani.

3. Variable Speed Drive (VSD)

Untuk mengatur kecepatan motor *blower* secara variabel berdasarkan sinyal dari aplikasi buatan penulis.

4. Motorized Valve

Untuk mengatur posisi buka dan tutup dari *fresh air* dari luar gedung dan juga *chilled water* dari *chiller*.

5. Power Meter

Untuk memantau konsumsi daya listrik dari masing-masing unit AHU.

6. PC (Personal Computer)

Sebagai pusat pengambilan dan pengiriman data.

7. Aplikasi berbasis windows buatan penulis untuk pemantauan dan pengendalian sistem yang diinstal pada PC.

2.2. Tahap Pelaksanaan

Rancang bangun ini merupakan bagian dari pekerjaan yang dilaksanakan dalam proyek implementasi *smart building* pada dua lokasi, yaitu Gedung Menara Multimedia dan Gedung Djuanda 2 yang berlokasi di Jakarta. Gedung Menara Multimedia dimiliki oleh PT Graha Sarana Duta, anak perusahaan dari PT Telkom Indonesia dan dilengkapi dengan sistem HVAC terpusat. Proyek pada Gedung Menara Multimedia dilaksanakan mulai Oktober 2022 hingga Agustus 2023, mencakup tiga gedung, yaitu Gedung Menara Multimedia, Gedung Graha Telkom Property, dan Gedung Annex. Dari ketiga gedung tersebut, hanya Gedung Menara Multimedia yang memiliki sistem HVAC terpusat dengan konfigurasi terdiri dari 2 unit *chiller*, 2 unit *cooling tower*, dan 23 unit AHU yang tersebar di 21 lantai. Adapun proyek pada Gedung Djuanda 2, yang merupakan bagian dari kawasan Kementerian Keuangan, dilaksanakan pada periode Oktober 2024 hingga Desember 2024.

Tahapan pelaksanaan pada proyek ini meliputi:

1. Identifikasi Panel Kontrol AHU pada Sistem HVAC Existing

Panel kontrol lama AHU berbasis kontaktor (dengan mode operasi DOL atau *star-delta*), diperlihatkan pada Gambar 1.



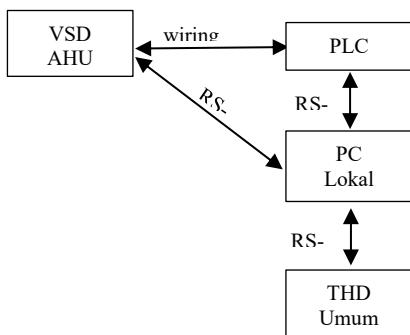
Gambar 1.

Panel AHU *Existing*, berisi kontaktor dan *thermal overload* dengan rangkaian DOL

2. Perancangan Sistem Kendali Adaptif

Perancangan sistem kendali adaptif dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

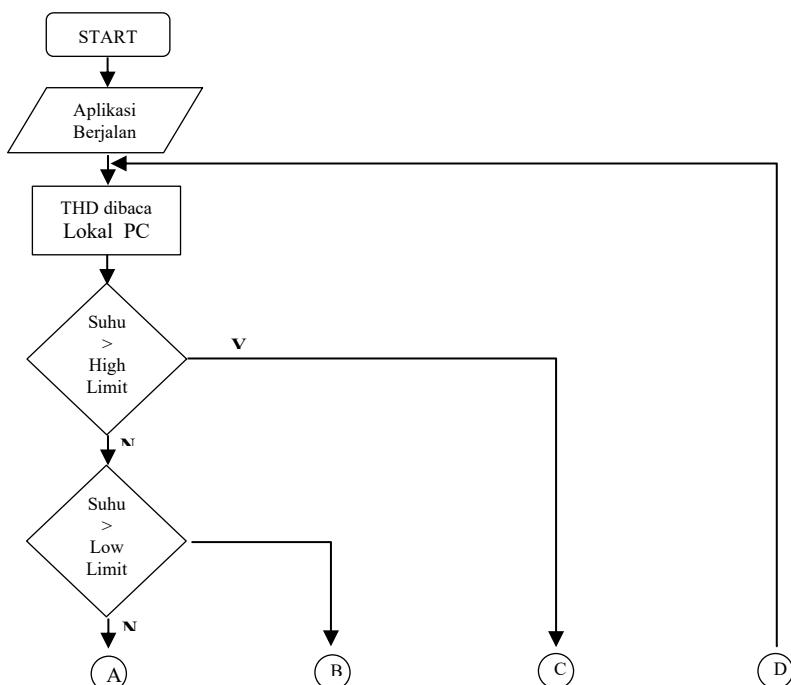
- Menentukan titik-titik pemasangan sensor THD (*Temperature and Humidity*) pada unit AHU serta di area umum ruangan.
- Merancang logika kendali adaptif berbasis masukan dari sensor, dengan output berupa pengaturan kecepatan motor *blower* melalui *Variable Speed Drive* (VSD). Rancangan berupa diagram sistem VSD-THD umum dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2.

Diagram Sistem VSD – THD Umum – PLC – PC Lokal

Nilai dari sensor THD Umum (sensor yang terpasang di area umum) dibaca secara *real-time* oleh PC lokal melalui antarmuka RS-485, lalu diproses oleh aplikasi yang dikembangkan penulis untuk menentukan frekuensi VSD AHU. Nilai frekuensi ini dikirimkan ke VSD melalui RS-485. PC lokal juga terhubung ke PLC melalui RS-232 untuk membaca dan atau menulis register serta *input-output* PLC. Selain itu, terminal PLC dan VSD saling terhubung untuk mengirimkan perintah ON-OFF dari PLC ke VSD. Proses penentuan frekuensi VSD ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3.

Diagram Alir Sistem VSD – THD Umum – PLC – PC Lokal

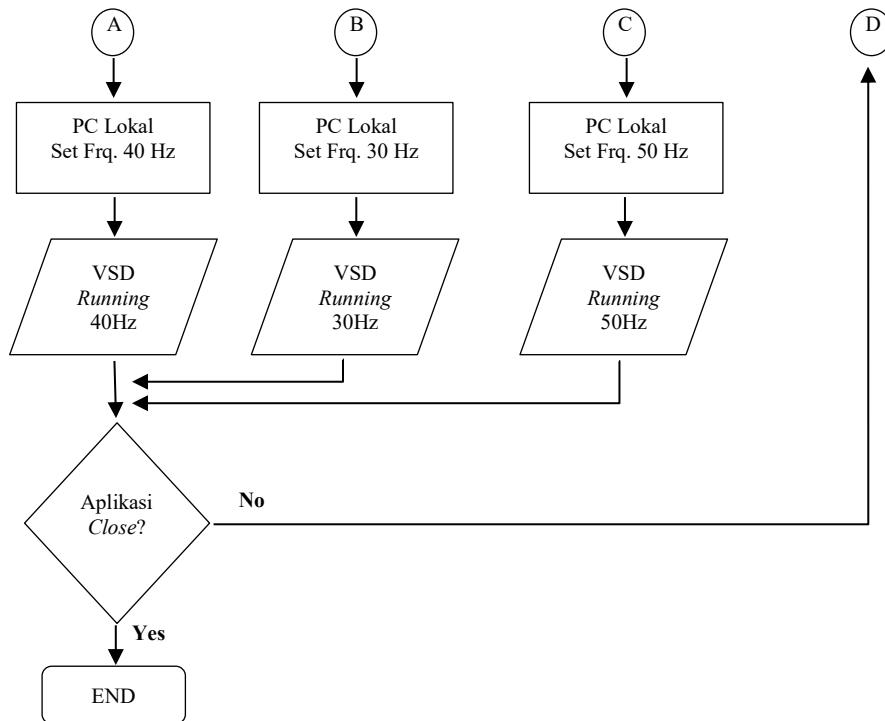
**Gambar 3. (Lanjutan)**

Diagram Alir Sistem VSD – THD Umum – PLC – PC Lokal

VSD akan beroperasi pada kecepatan 50 Hz jika suhu melebihi *high limit*, 30 Hz jika suhu di bawah *low limit*, dan 40 Hz jika suhu berada di antara kedua batas tersebut.

3. Merancang logika kendali adaptif berbasis masukan dari sensor, dengan *output* berupa level pembukaan *valve liquid outlet*. Rancangan diagram sistemnya dapat dilihat pada Gambar 4.

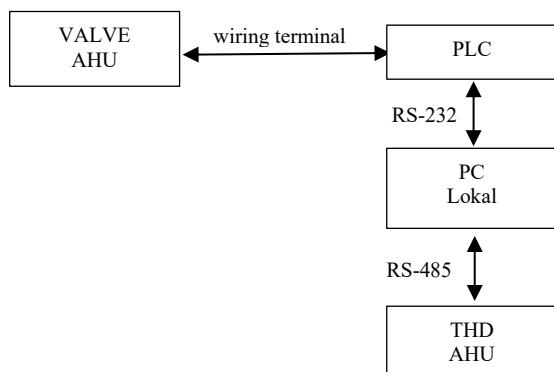
**Gambar 4.**

Diagram Sistem THD AHU – Valve AHU – PLC – PC Lokal

Nilai dari sensor THD AHU (sensor yang terpasang pada *liquid inlet AHU*) dibaca secara *real-time* oleh PC lokal melalui antarmuka RS-485, kemudian diteruskan ke PLC melalui RS-232 untuk diproses. Hasil pemrosesan tersebut digunakan untuk menentukan tingkat pembukaan *valve AHU*, yang dikirimkan dalam bentuk sinyal analog. Proses penentuan nilai pembukaan *valve AHU* ditunjukkan pada Gambar 5.

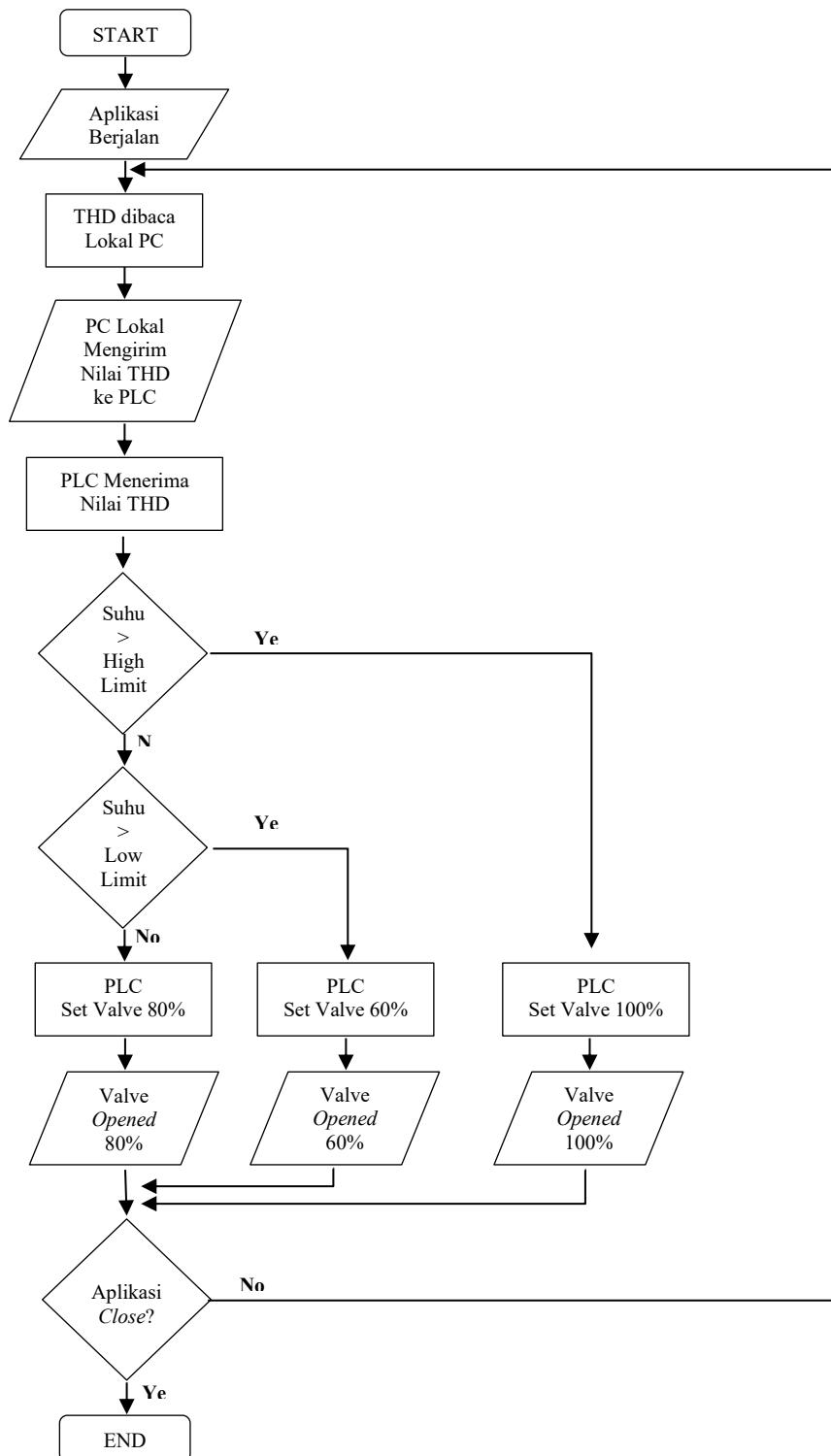
**Gambar 5.**

Diagram Alir Valve AHU – THD AHU – PLC – PC Lokal – Valve

4. Merancang sistem komunikasi antar lantai menggunakan aplikasi buatan penulis, sehingga pemantauan dan pengendalian sistem semua lantai dapat berpusat di satu tempat. Rancangan diagram sistem komunikasi dapat dilihat pada Gambar 6.

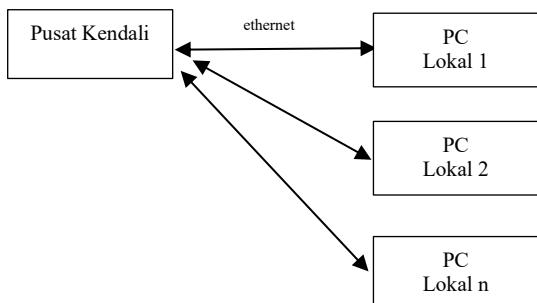
**Gambar 6.**

Diagram Sistem Komunikasi PC Lokal – Pusat Kendali

5. Implementasi Sistem

- Penggantian panel kontrol *existing* dengan panel kontrol berbasis PLC dan VSD dapat dilihat pada Gambar 7.

**Gambar 7.**

Panel Kontrol Berbasis PLC, VSD, PC Lokal dan Konverter Komunikasi RS232 & RS485

- Pemasangan sensor THD di area umum dapat dilihat pada Gambar 8.

**Gambar 8.**

Pemasangan THD Sensor pada Area Umum, berisi sensor THD, O2, dan CO2

- Pemasangan sensor THD *Air Inlet AHU*, dapat dilihat pada Gambar 9.

**Gambar 9.**Pemasangan Sensor THD *Air Inlet AHU*

d. Instalasi aplikasi buatan penulis pada PC lokal

Aplikasi yang diinstal pada PC lokal berfungsi untuk mengambil data dari berbagai perangkat dan sensor (seperti VSD, sensor THD, *power* meter, dan lainnya), kemudian meneruskannya ke pusat kendali. Aplikasi ini berjalan secara terus-menerus di latar belakang (background). Tampilan aplikasi pada PC lokal dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10.

Pemasangan Sensor THD Air Inlet AHU

e. Instalasi aplikasi buatan penulis pada PC di pusat kendali

Aplikasi yang diinstal pada PC di pusat kendali berfungsi untuk mengambil data dari seluruh PC lokal, sehingga pemantauan dan pengaturan semua lantai dapat dilakukan secara terpusat dalam satu sistem. Tampilan aplikasi pada pusat kendali dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11.

Tampilan Aplikasi pada Pusat Kendali (berisi tampilan AHU beserta sensor, VSD dan limit yang ditentukan)

f. Pemantauan dan Pencatatan Data

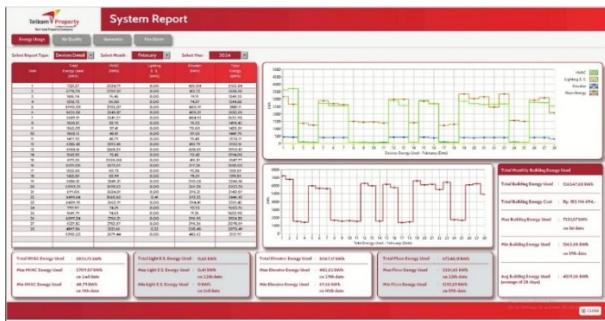
- Pemasangan *power* meter pada masing-masing panel kontrol AHU untuk mencatat konsumsi daya listrik dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12.

Pemasangan *Power* Meter pada Panel Kontrol AHU (berisi *power* meter dan tombol serta saklar untuk pengendalian VSD, valve, dan *fresh air damper*)

- Pembuatan sistem pencatatan data (data *logging*) secara *real-time* untuk memantau energi, suhu area umum, dan *load* dari VSD. Salah satu tampilan layer yang menampilkan pencatatan data pada aplikasi dapat dilihat di Gambar 13.



Gambar 13.

Tampilan *Report Energy Usage* pada Aplikasi (berisi data penggunaan energi setiap lantai pada tahun – bulan – tanggal yang dipilih)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan rancang bangun dan penerapan metode kendali AHU, dilakukan pengumpulan data profil kinerja setiap unit AHU di masing-masing lantai. Dari data tersebut diperoleh informasi mengenai rentang operasional dan durasi yang dibutuhkan setiap AHU untuk mencapai suhu target. Berdasarkan hasil analisis, penulis mengusulkan pembaruan rentang operasional, baik dalam hal kecepatan motor blower maupun jam operasional setiap unit AHU.

Evaluasi awal menunjukkan bahwa tim operasional gedung mengaktifkan AHU sejak pukul 04.00 setiap hari, sebelum jam kerja dimulai pada pukul 08.00. Sementara itu, *chiller* dan *cooling tower* diaktifkan 60 menit lebih awal. Berdasarkan data log suhu area umum dan catatan operasional AHU, diketahui bahwa suhu target umumnya tercapai dalam waktu \pm 90 menit setelah AHU dinyalakan yang dapat dilihat pada Gambar 14.



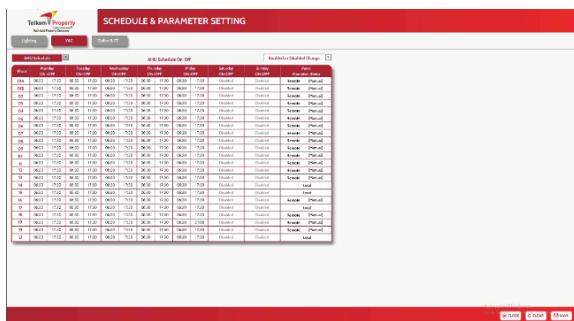
Gambar 14.

Report Data Log Suhu pada Area Umum pada Tahun – Bulan – Tanggal yang dipilih Sepanjang Hari dengan Pencatatan Data Setiap 10 Detik

Dapat dilihat pada Gambar 14, *setpoint* suhu 25oC dapat tercapai dalam waktu \pm 90 menit (06:30 – 08:00).

Berdasarkan temuan tersebut, penulis mengusulkan perubahan jam operasional AHU menjadi pukul 06.30 setiap hari, dengan pengecualian hari Senin dimulai pukul 05.50. *chiller* dan *cooling tower* juga diubah menjadi aktif 30 menit lebih awal dari AHU. Waktu penghentian AHU tetap pada pukul 17.30 mengikuti aktivitas pengunjung, namun waktu

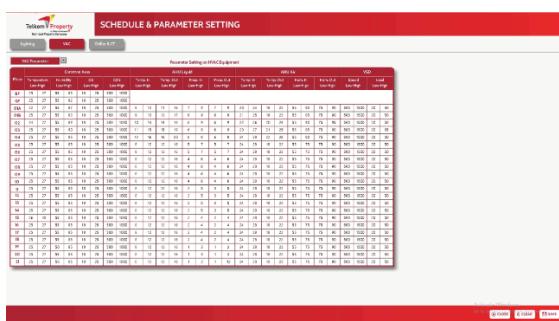
penghentian *chiller* dimajukan dari pukul 16.45 menjadi pukul 16.15. Tampilan jadwal pengoperasian AHU dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15.

Schedule AHU ON-OFF Berisi Jadwal dan Status AHU Setiap Lantai Selama 1 Minggu

Untuk pengaturan kecepatan VSD AHU dilakukan penyesuaian berdasarkan suhu aktual area umum terhadap nilai *high limit* dan *low limit* pada masing-masing ruangan yang dapat dilihat pada Gambar 16.



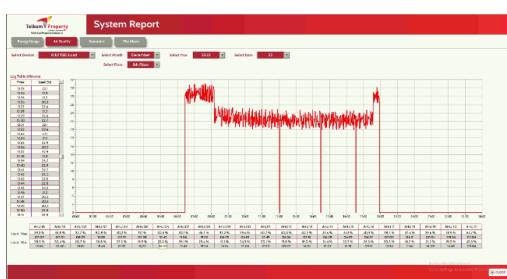
Gambar 16.

Parameter Setting VAC Parameter (berisi limit operasional AHU berdasarkan THD umum)

Misalnya pada lantai 5, temperatur pada *common area* (area umum) di atur pada *low limit* 25°C dan *high limit* pada 27°C.

- Jika suhu berada pada rentang 25°C–27°C , VSD akan berjalan pada frekuensi 40 Hz.
- Jika suhu melebihi 27°C, VSD akan kembali berjalan pada frekuensi 50 Hz.
- Jika suhu berada dibawah 25°C maka VSD akan berjalan pada frekuensi 30 Hz.

Dengan algoritma sederhana ini, AHU mampu menyesuaikan kecepatan secara dinamis berdasarkan kondisi suhu di setiap lantai, yang bervariasi setiap hari bahkan setiap jam. Hal ini memungkinkan VSD tidak selalu beroperasi pada kecepatan *maksimum*, sehingga konsumsi energi dapat dikurangi hal ini dapat dilihat pada Gambar 17. Hasil pengujian menunjukkan potensi penghematan energi sebesar 18%–28%.



Gambar 17.

Report Data Log VSD Load (berisi Load VSD pada tahun – bulan – tanggal yang dipilih)

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Potensi penghematan daya dan energi pada sistem HVAC dapat dicapai melalui penerapan rancang bangun yang diterapkan pada unit AHU di setiap lantai. Bahkan dengan hanya mengatur kecepatan motor blower AHU menggunakan *Variable Speed Drive* (VSD) dan pengendali PLC, sudah diperoleh efisiensi energi yang cukup signifikan.

Jika penerapan diperluas dengan mengintegrasikan aktuator lain seperti *motorized valve* dan *motorized damper* pada instalasi *air duct* dan *liquid pipe*, maka efisiensi tambahan dapat dicapai. Hal ini tidak hanya menurunkan konsumsi energi, tetapi juga membantu memperpanjang usia pakai peralatan, serta meningkatkan efisiensi operasional karena mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual yang sebelumnya harus memantau dan mengoperasikan AHU secara langsung di setiap lantai.

Namun, pelaksanaan sistem ini pada gedung yang telah beroperasi cukup lama menghadirkan tantangan tersendiri, terutama terkait infrastruktur lama dan keterbatasan ruang integrasi. Oleh karena itu, implementasi yang cepat dan terencana menjadi penting untuk memastikan sistem dapat memberikan manfaat maksimal dalam memperpanjang usia pakai peralatan maupun gedung secara keseluruhan.

Selain itu, dibutuhkan tenaga kerja yang kompeten dan memahami prinsip kerja serta penerapan sistem kendali ini, agar sistem dapat beroperasi secara optimal dan berkelanjutan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dengan penuh rasa syukur menyampaikan terima kasih kepada PT X atas kepercayaan yang diberikan dalam pelaksanaan implementasi rancang bangun ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh karyawan serta pemilik merek dari berbagai peralatan yang digunakan dalam proyek ini atas dukungan dan kinerja terbaik yang telah diberikan.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. W. Larsen Angel, P.E, LEED AP. (2020), “HVAC Design Sourcebook” (pp. 325 – 355).
2. Samuel C. Sugarman (2016) “HVAC Fundamentals, 3rd ed”.
3. ASHRAE (2019), “HVAC Systems and Equipment Handbook, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers”. (<https://www.ashrae.org/technical-resources/free-resources/publications>). Diakses pada 18 Agustus 2025.
4. EIA (2018) “Commercial Building Energy Consumption Survey (CBECS) final results, U.S. Energy Information Administration”. (<http://www.eia.gov/consumption/comercial/>). Diakses pada 25 Agustus 2025.
5. Bolton, W. (2015). “Programmable Logic Controllers, 6th ed., Newnes”.