

# Audit Energi pada *Data Center* Kampus untuk Efisiensi Energi Berbasis *Digital Twin*

## *Digital - Twin Based Energy Audit at Campus' Data Center for Energy Efficiency*

<sup>1</sup>Rizal Fariz Mustaram\*), <sup>1</sup>Teguh Solavide Gulo, <sup>1</sup>Edi Leksono & <sup>1</sup>Justin Pradipta

<sup>1</sup>Teknik Fisika Institut Teknologi Bandung

\*) [rizal.fariz@office.itb.ac.id](mailto:rizal.fariz@office.itb.ac.id)

### Abstrak

Penelitian dikembangkan menggunakan teknik *digital twin* untuk membuat representasi digital sistem energi dan termal melalui *data real time* pada sistem infrastruktur ICT dan HVAC di *data center*. Digitalisasi sistem perangkat fisik dilakukan dengan menggunakan teknologi IoT (*Internet of Things*), melalui teknologi IoT ini ruang digital dibuat untuk merepresentasikan model energi dan termal dari sistem *data center*. Instrumentasi akuisisi data dan sistem pemantauan *real time* dibuat melalui teknik IoT berikut analisis kinerja sistem pendingin *data center*. Tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah mendapatkan pengukuran beban termal sistem energi *data center*, kemudian dianalisis menggunakan metode *heat balance* agar dapat diketahui rasio beban termal terhadap kinerja (kapasitas pendinginan) perangkat pendingin *data center* yang ada secara *real time*. Hal ini dilakukan agar dapat mengetahui potensi penghematan energi listrik yang dapat direkomendasikan kepada operator *data center*. Analisis penggunaan energi dapat dilakukan secara cepat dan efisien, data dapat ditampilkan secara berkesinambungan setiap waktu. Pada analisis beban harian, didapat nilai kesetimbangan beban panas (*heat balance*) terhadap kapasitas pendinginan nominal perangkat pendingin terpasang yaitu 40, 95 % untuk PAC 1 dan 49,21 % untuk PAC 2.

*Kata Kunci: digital twin, data center, HVAC, kesetimbangan panas, manajemen energi.*

### Abstract

The research was developed using the *digital twin* technique to create a digital representation of energy and thermal systems through *real time* data on ICT and HVAC infrastructure systems in *data centers*. Digitization of physical device systems is carried out using IoT (*Internet of Things*) technology. Through this IoT technology, a digital space is created to represent the energy and thermal model of the *data center* system. Instrumentation of data acquisition and *real time* monitoring system is created through IoT techniques along with *data center* cooling system performance analysis. The goal to be achieved in this study is to obtain measurements of the thermal load of the *data center* energy system, then analyze using the *heat balance* method so that the ratio of thermal load to performance (cooling capacity) of existing *data center* cooling devices can be determined in *real time*. This is done to know the potential for saving electrical energy, which can be recommended to *data center* operators. Analysis of energy use can be carried out quickly and efficiently, data can be displayed continuously at any time. In the daily load analysis, the *heat balance* value for the nominal cooling capacity of installed cooling devices was obtained, namely 40.95% for PAC 1 and 49.21% for PAC 2.

*Keywords : digital twin, data center, HVAC, heat balance, energy management.*

Makalah diterima 20 Maret 2023 - makalah direvisi 19 April 2023 - disetujui 30 April 2023

### Pendahuluan

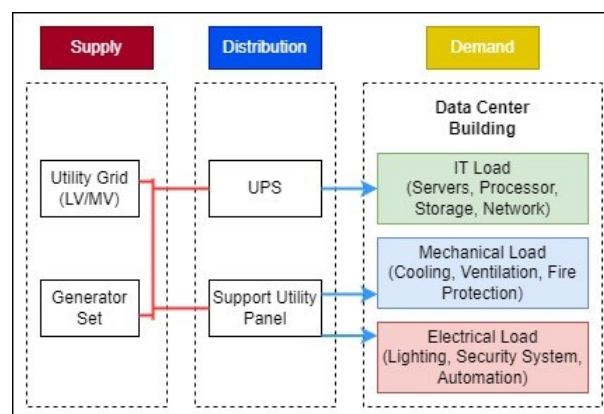
Konsumsi energi di sektor ICT (Teknologi Informasi dan Komunikasi) telah meningkat secara eksponensial selama beberapa tahun terakhir, terutama karena kemajuan teknologi seperti komputasi awan (*cloud computing*) dan pertumbuhan pesat penggunaan layanan internet [1]. Sektor ICT termasuk *data center* menghasilkan hingga 2% emisi CO<sub>2</sub> global, angka yang setara dengan kontribusi sektor penerbangan dan *data center* diperkirakan memiliki jejak karbon yang tumbuh paling cepat dari seluruh sektor ICT [2]. Manajemen termal dan energi menjadi tantangan utama dalam desain dan pengoperasian *data center*, dalam hal ini efisiensi penggunaan energi *data center* yang menjadi kunci penting karena beberapa aspek wacana dampak yang dipengaruhi antara lain (i) nilai ekonomi yang tinggi, (ii) lingkungan, dan (iii) dampak kinerja [3]. Secara global, jaringan transmisi data menggunakan energi listrik 260-340 TWh pada tahun 2021, atau 1,1-1,4% dari penggunaan listrik global [4]. Konsumsi daya diperkirakan akan tumbuh dari 200 TWh pada tahun 2016 menjadi 974 TWh pada tahun 2030 [5]. Beberapa penelitian yang telah dilakukan seperti [6] menjelaskan bahwa untuk meningkatkan efisiensi energi *data center* adalah dengan menyesuaikan set *point* pendinginan. Penelitian [7] mengungkap bahwa banyak parameter sistem pendingin di *data center* terutama bergantung pada kontrol manual dan [8] menjelaskan *digital twin* membantu menganalisis dan memprediksi sistem energi dalam bentuk refleksi digital yang beroperasi secara paralel dengan sistem fisik.

*Digital twin* diperkenalkan pertama kali pada tahun 2003 yang dikenal sebagai cermin digital dan pemetaan digital. Sejak saat itu, definisinya terus berkembang karena beberapa ahli telah memberikan definisi yang bervariasi dari teknologi ini [9-12]. *Digital twin* didefinisikan juga sebagai cara untuk menghubungkan model digital dan mesin simulasi dengan data dunia nyata yang membantu organisasi untuk membuat keputusan yang lebih baik, mengarah ke hasil yang lebih baik [13]. Seperti yang telah dilakukan oleh beberapa industri dengan memanfaatkan perkembangan teknologi digital, metoda operasional *data center* yang reaktif dapat beralih menjadi pemeliharaan proaktif melalui penerapan pendekatan *digital twin*. Konsep *digital twin* ini dikarakterisasi oleh tiga komponen utama: (1) Sistem fisik *real*, (2) representasi virtual, dan (3) interkoneksi yang bertukar informasi antara realitas fisik dan representasi virtual [14]. Pada tingkat dasar, *digital twin* dari suatu sistem merupakan replika digital dari yang terakhir yang mencerminkan kembaran [15]. Dalam penelitian lain *digital twin* telah digunakan secara tidak menentu untuk menggambarkan berbagai koneksi antara komponen fisik dan digital [16]. Infrastruktur komunikasi antara komponen fisik dan digital, yang umumnya tidak diperhitungkan [17]. *Digital twin* dijabarkan juga sebagai multi-fisika, multi-skala, simulasi probabilistik dari sistem kompleks yang menggunakan model fisik terbaik yang tersedia, sensor pembaruan, dan sebagainya untuk mereplikasi [18]. Dalam rancangan penelitian ini, dikembangkan teknik *digital twin* monitoring secara *real time* pada sistem HVAC *data center*. Ruang lingkup penelitian yang dikembangkan untuk mengembangkan metode audit energi berbasis *digital twin* pada manajemen termal *data center* ini adalah pertama kerangka kerja *digital twin* yang merepresentasikan objek fisik dan objek digital sistem termal dan daya listrik *data center*. Kedua instrumentasi akuisisi data dan sistem pemantauan *real time* melalui teknik IoT (*Internet of Things*) dan ketiga analisis kinerja sistem pendingin *data center*. Pada kajian manajemen termal *data center* ini objek penelitian dilakukan di *Data center* CRCS ITB, kajian investigasi audit energi *data center* ini bertujuan untuk (i) mengetahui kondisi profil penggunaan energi aktual *data center* eksisting berikut permasalahan operasionalnya (ii) mengidentifikasi potensi penghematan energi terutama pada sistem HVAC (iii) menganalisis perlakuan energi konservasi *low cost* atau *no cost* yang dapat direkomendasikan untuk meningkatkan *power utilization effectiveness data center*.

## Metode

### 1. Objek Penelitian

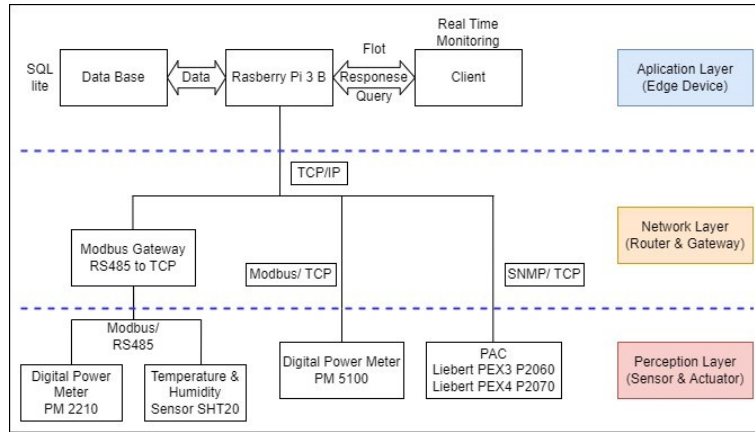
Observasi dilakukan dengan cara studi lapangan terhadap objek *data center* yang berada di kampus Institut Teknologi Bandung yaitu *Data Center* CRCS ITB. Lokasi geografis penelitian Kampus Ganesa, Jl. Ganesa No. 10 Kota Bandung terletak di antara 107° Bujur Timur dan 6° 55' Lintang Selatan. Skematik distribusi daya *data center* CRCS seperti pada Gambar 1.



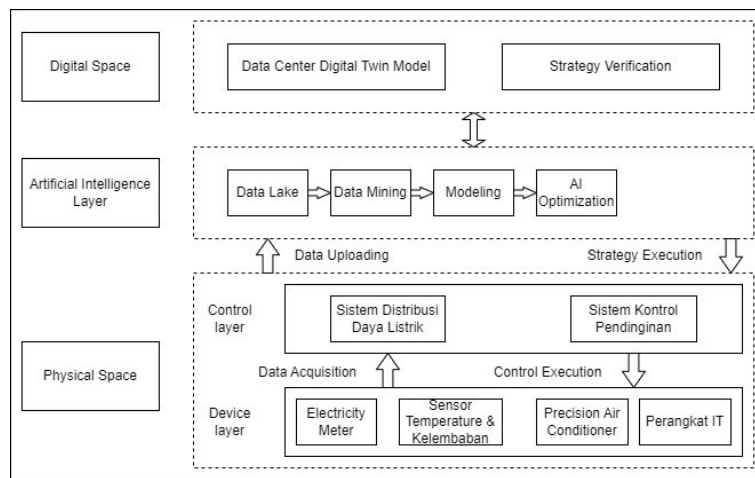
Gambar 1. Diagram skematik distribusi daya *data center* CRCS

### 2. Desain Instrumentasi Akuisisi Data

Berdasarkan kerangka kerja *digital twin*, salah satu aspek yang penting adalah adanya konektivitas antara ruang fisik (*physical space*) dan ruang digital (*digital space*). Salah satu teknologi yang memungkinkan hal itu terjadi adalah teknologi IoT (*Internet of Things*). Ruang digital dapat dibuat dengan cara digitalisasi perangkat fisik *data center*, ruang digital untuk objek fisik direpresentasikan menjadi *Human Machine Interface* (HMI) yang terkoneksi secara *real time*. Pada tahap ini, untuk keperluan pembuatan model dikembangkan sistem akuisisi data instrumentasi pengukuran fisis objek infrastruktur elektrik dan termal dari objek *data center* agar didapat digital *database* (*time series data*) dan *dashboard monitoring* secara *real time* melalui kerangka kerja IoT seperti pada Gambar 2.



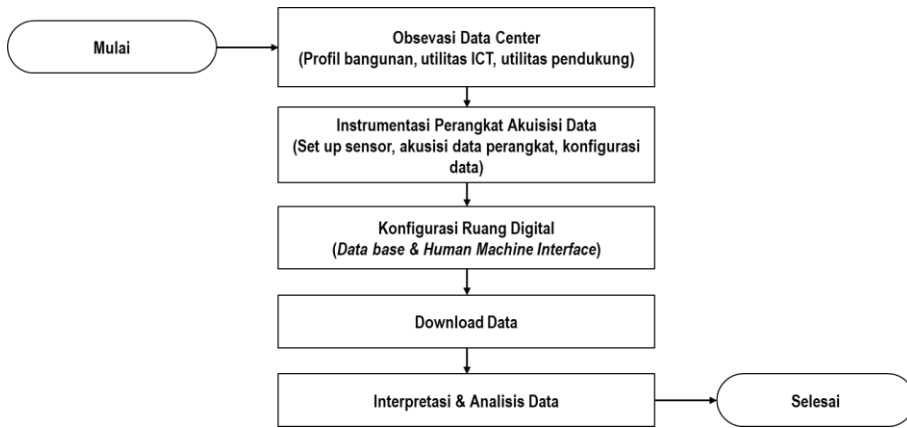
Gambar 2. Arsitektur kerangka kerja IoT sistem energi data center



Gambar 3. Kerangka kerja digital twin data center

Akuisisi data pengukuran meliputi: daya elektrik total data center, daya elektrik perangkat IT (server), daya elektrik perangkat pendingin PAC (Precision Air Conditioner), temperatur & kelembaban: ambien, return & supply PAC, cold aisle, hot aisle. Data yang dikumpulkan merupakan time series database yang dapat diakses melalui jaringan internet. Pada lapisan persepsi terdapat perangkat sensor dan aktuator yang dapat melakukan transmisi data melalui protokol komunikasi data Modbus RS485 untuk Digital power meter PM2210 dan sensor temperatur dan kelembaban SHT MD2Y 02. Protokol komunikasi Modbus/TCP digunakan untuk digital power meter PM5100, dan protocol SNMP/TCP digunakan untuk komunikasi data PAC Liebert PEX3 dan PEX4.

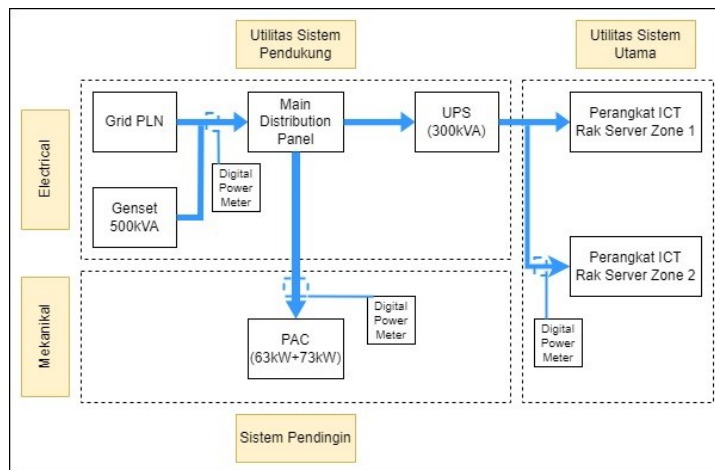
Pada lapisan jaringan terdapat Modbus gateway HF2211 sebagai converter modbus RS485 ke jaringan TCP/IP melalui transmisi wifi/router yang terkoneksi ke jaringan data lokal. Raspberry Pi digunakan sebagai edge device untuk menjalankan aplikasi-aplikasi akuisisi data berikut visualisasi dashboard HMI (Human Machine Interface), ioBroker dipilih sebagai open platform IoT yang mampu memenuhi kebutuhan konektivitas komunikasi data maupun otomasi. Kerangka kerja digital twin pada penelitian ini seperti pada Gambar 3 dan diagram alir metode pada penelitian ini terlihat pada Gambar 4.



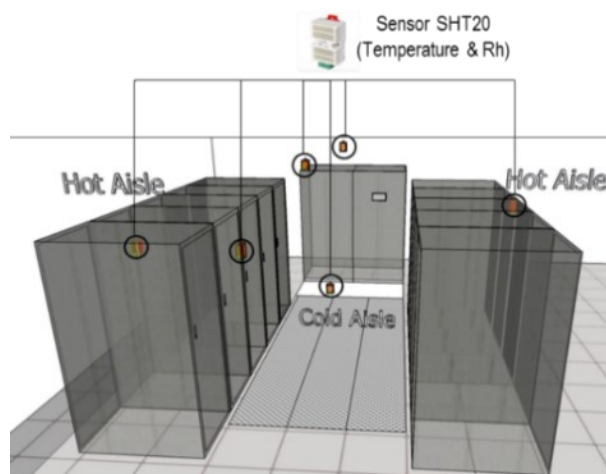
Gambar 4. Diagram alir metode penelitian

### 3. Instalasi Sensor

Perangkat meter yang dipasang meliputi pengukuran parameter elektrik dan termal yaitu; *digital power meter* berikut sensor arus (*current transformer*), sensor temperatur dan Rh (*Relative humidity*) seperti pada Gambar 5. Masing-masing perangkat tersebut dipasang melalui serial protokol *modbus RS485*. *Digital power meter* dipasang pada panel distribusi daya server zona 1 dan zona 2 untuk mengukur daya listrik yang digunakan oleh perangkat ICT, penggunaan daya listrik oleh perangkat ICT ini dikonversi menjadi beban termal internal ruang server.



Gambar 5. Instalasi *digital power meter* pada distribusi daya data center

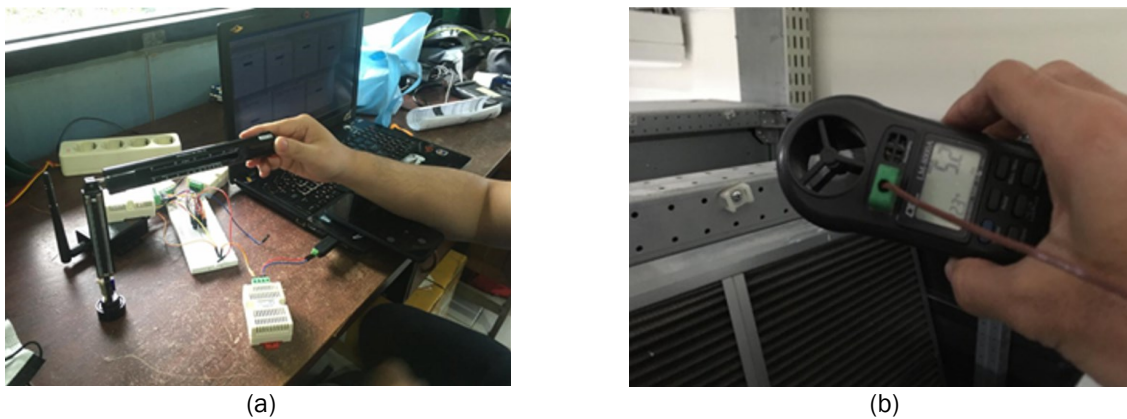


Gambar 6. Instalasi sensor temperatur dan kelembaban ruang data center

Pengukuran kapasitas aktual pendinginan PAC, sensor temperatur/Rh dipasang pada bagian *return* dan *supply* PAC. Sementara itu, *flow rate* udara dapat diukur melalui bacaan sensor kapasitas fan yang terpasang (built in) di dalam PAC menggunakan protokol SNMP/TCP seperti pada Gambar 6. Untuk mengukur beban termal dari lingkungan, sensor temperatur/Rh dipasang dinding luar ruangan dan di dalam ruangan. Selain itu, sensor juga dipasang pada bagian *inlet* dan *outlet* rak server untuk memantau kondisi temperatur rak server.

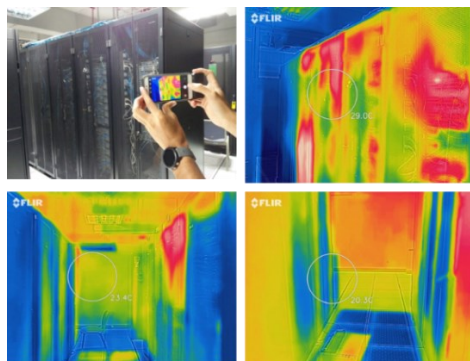
#### 4. Kalibrasi Sensor

Memastikan data pengukuran dari sensor memiliki akurasi yang baik, diperlukan kalibrasi sebelum dipasang ataupun setelah dipasang di lapangan seperti pada Gambar 7. Kalibrasi sensor temperatur/Rh SHT20-MD02 sebelum dipasang menggunakan alat ukur *benchmark*: *sling psychrometer bacharach* dan *digital thermometer*, nilai bacaan sensor (*dry bulb temperature* dan *relative humidity*) dimonitor melalui *tools modbus poll* pada komputer kemudian di-*adjust* (ketelitian satu angka dibelakang koma) sampai nilainya mendekati bacaan alat ukur *benchmark*. Semua sensor yang akan dipasang dikalibrasi dengan cara yang sama agar pengukuran menghasilkan nilai selisih yang akurat untuk pengolahan data.



Gambar 7. Kalibrasi sensor temperatur dan Rh (*Relative humidity*) ; (a) sebelum, (b) sesudah instalasi

Sebelum sensor temperatur dan kelembaban relatif (Rh) dipasang dilakukan identifikasi posisi penempatan sensor dengan cara memindai distribusi termal di dalam ruangan server dengan menggunakan *thermal imaging camera* seperti pada Gambar 8. Hal ini dilakukan untuk memastikan sensor berada posisi yang tepat sesuai keperluan tujuan parameter pengukuran. Kemudian instalasi sensor dapat dilakukan seperti pada Gambar 9.

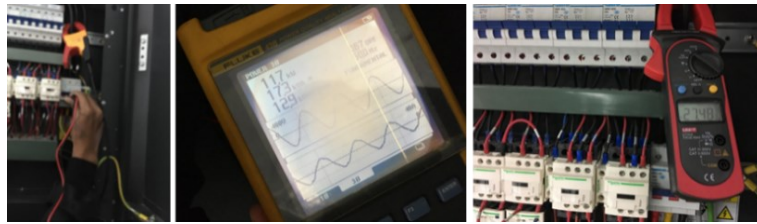


Gambar 8. Identifikasi distribusi termal pada ruang server menggunakan *thermal imaging camera*



Gambar 9. Instalasi sensor temperature atau Rh SHT20 MD02

Dilakukan pula kalibrasi hasil bacaan sensor arus pada *digital power meter* dengan bantuan alat *Power Quality Analyzer* "Fluke" 43B seperti pada Gambar 10, untuk memastikan pembacaan data elektrik memiliki akurasi yang baik. Agar hasil bacaan sensor akurat, nilai rasio kumparan primer-sekunder CT pada *digital power meter* harus diatur pada nilai yang tepat sesuai nominal spesifikasi CT (30/5A). *Adjustment value* rasio CT dapat dilakukan pada *digital power meter* seperti pada Gambar 11.



Gambar 10. Kalibrasi pembacaan sensor arus *digital power meter* dengan *Power Quality Analyzer*



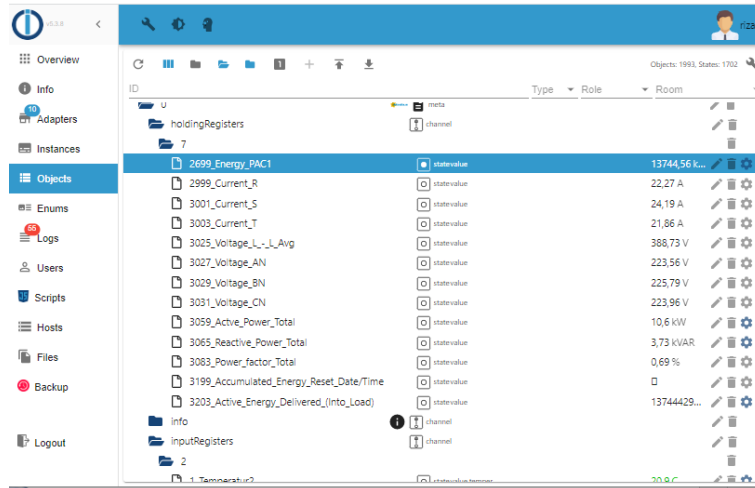
Gambar 11. Pemasangan *digital power meter* berikut sensor arus (*current transformer*) pada unit *Precision Air Conditioner*

## 5. Akuisisi Data: Konfigurasi Parameter Pada Aplikasi Database

*IoBroker* adalah salah satu *platform* otomasi terbuka untuk penggunaan *Internet of Things* yang dapat menjadi digunakan sebagai aplikasi kontrol saat ini telah menggunakan bahasa lebih dari 200 teknologi protokol komunikasi, seperti *KNX*, *LCN*, *Modbus*, *Bacnet*, *Wifi*, *Tuya*, *Hue* ataupun *Homematic*. Dengan *ioBroker* dimungkinkan untuk menerapkan teknologi akuisisi data dan mengimplementasikan aksi dan reaksi kontrol pada seluruh perangkat teknologi *operational technology* (OT). Pada *platform ioBroker* ini tersedia *plug-in* aplikasi *database* antara lain *MySQL* dan *SQL lite*, *SQL lite* dipilih sebagai aplikasi *database* karena relatif komputasinya lebih ringan untuk dijalankan pada *Raspberry Pi*.

Pekerjaan akuisisi data diawali dengan konfigurasi pada saat instalasi *hardware* sensor. Pada jaringan *hardware modbus* RS485 dilakukan pengaturan *register slave ID* untuk masing-masing sensor, sementara untuk *hardware* yang terkoneksi pada jaringan *TCP/IP* diperlukan konfigurasi *IP address* untuk setiap *hardware*. Pada aplikasi *ioBroker* dilakukan konfigurasi untuk menghubungkan ID sensor pada aplikasi *database*, parameter-parameter pengukuran yang disediakan oleh sensor/*hardware* dapat ditambahkan sesuai keperluan akuisisi data yang dibutuhkan seperti pada Gambar 12. Parameter-parameter data *modbus* disimpan pada *16 bit input register* dan *holding register*. Parameter pengukuran yang diambil dari sensor *SHT20 MD02* yaitu; temperatur (°C) dan kelembaban/Rh (%), parameter pengukuran yang diambil dari *digital power meter* antara lain; *active energy*, *current r*, *current s*, *current t*, *voltage l-l avg*, *active power total*, *reactive power total*, dan *power factor*.

Sesuai dengan kebutuhan pengolahan data untuk tujuan analisis ataupun *forecasting*, proses *data logging* dapat dibuat menjadi data deret waktu dalam interval tertentu (*time series data*) untuk semua parameter terukur. *Logging* data diatur pada interval waktu 1 menit untuk semua parameter data pengukuran oleh sensor.



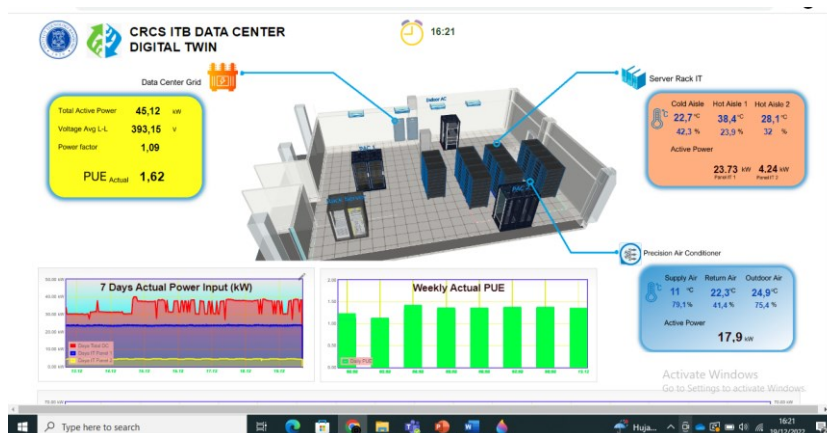
Gambar 12. Hasil konfigurasi parameter pengukuran untuk akuisisi data

### 6. Visualisasi Data/Ruang Digital pada Human Machine Interface

Berdasarkan konsep *digital twin*, melalui data *real time* dari objek fisik sistem energi utilitas *data center* dibuatkan ruang digital yang merepresentasikan perilaku energi elektrik dan termal perangkat-perangkat sistem *data center*. Melalui aplikasi tampilan *Human Machine Interface* (HMI), ruang digital tersebut dapat direalisasikan.

Selain fungsi *database*, *ioBroker* juga dapat melakukan fungsi visualisasi data melalui beberapa plugin yang tersedia antara lain *float* untuk membuat visualisasi grafik *time series*, *plug-in* visualisasi digunakan untuk membuat *dashboard* HMI (*Human Machine Interface*) seperti pada Gambar 13. Fungsi HMI terutama sebagai monitoring dari sistem energi *data center* secara *real time*, tampilan data pada HMI dapat disesuaikan sesuai kebutuhan sehingga dapat memudahkan pekerjaan pemantauan tanpa perlu mengunjungi sistem fisik.

Tampilan dari HMI ini dibuat secara *web-based* agar dapat diakses melalui aplikasi *browser* yang terkoneksi jaringan internet, karena itu dapat diakses melalui perangkat komputer/*gadget* yang terhubung ke jaringan internet. Melalui HMI ini pula kita dapat melakukan pemantauan untuk memastikan data terkoneksi dan tersimpan pada *database*.

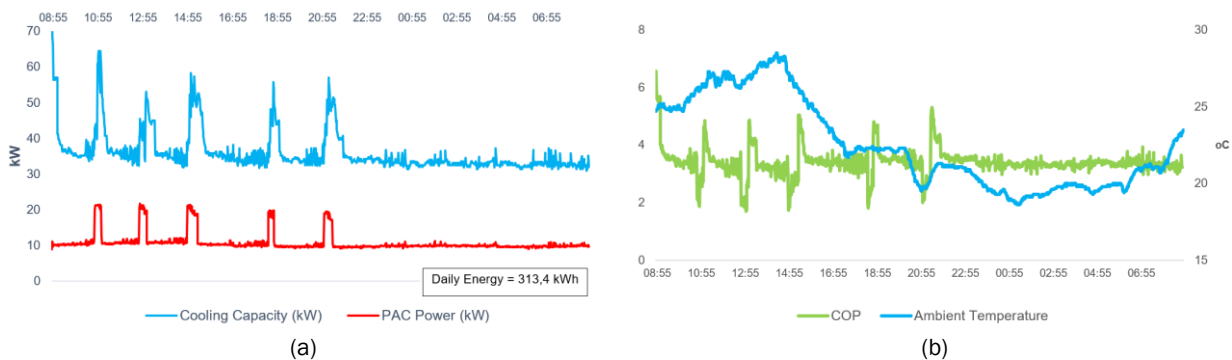


Gambar 13. Visualisasi ruang digital *data center* (*web-based* HMI)

## Hasil dan Diskusi

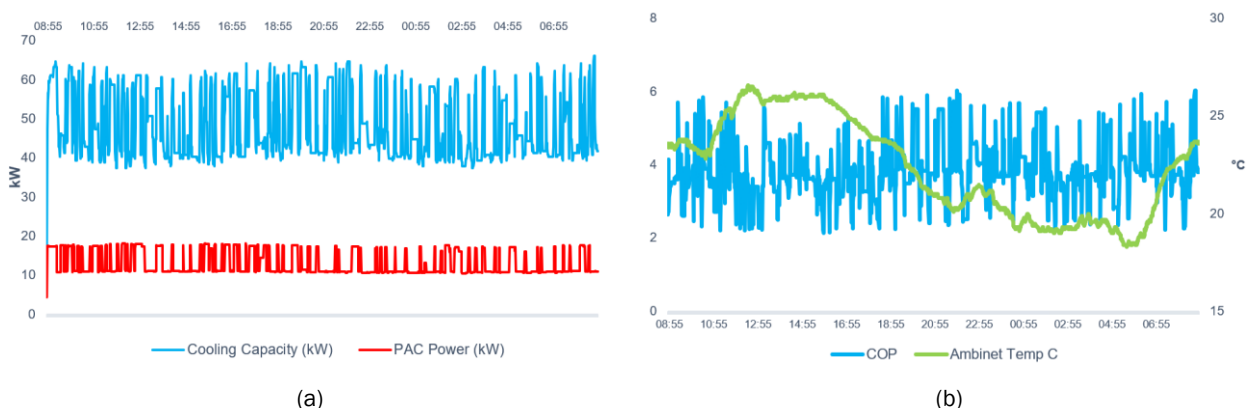
### 1. Analisis Kinerja Kapasitas Pendinginan *Precision Air Conditioner*

Sistem pendingin merupakan utilitas pendukung yang penting dalam operasional *data center*. Terdapat dua unit *precision air conditioner* pada ruang *server data center* eksisting yang dikendalikan secara otomatis terjadwal bergantian beroperasi setiap 24 jam, pergantian operasi PAC dijadwalkan pada pukul 08.55. Data operasi harian PAC meliputi beberapa parameter untuk mengukur kinerja pendinginan yaitu *cooling capacity* (kapasitas pendinginan) dan COP (*Coefficient of Performance*). Nilai *cooling capacity* atau panas yang diserap oleh *evaporator* unit PAC didapat dari perhitungan laju aliran massa udara dikalikan dengan beda temperatur udara *return* dan *supply* pada indoor unit PAC. Nilai COP didapat dari rasio *cooling capacity* (dalam kW) terhadap daya elektrik (dalam kW) yang digunakan PAC. Hasil pengukuran kinerja pendinginan ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Grafik performa pendinginan PAC 1 tanggal 25 Oktober 2022; (a) kapasitas pendinginan dan penggunaan daya listrik (b) COP (*coefficient of performance*) dan temperatur ambien.

Terjadi sebanyak lima kali lonjakan kapasitas pendinginan terutama pada saat siang hari ketika temperatur ambien sedang naik, lonjakan kapasitas pendinginan diikuti pula kenaikan daya listrik PAC seperti pada Gambar 15. Hal ini terjadi karena ketika beban panas naik meningkatkan temperatur udara *return* sampai mencapai batas atas *set point*, kapasitas pendinginan dinaikan dengan cara menyalakan *compressor* ke-dua sampai temperatur kembali di bawah batas bawah *set point*.

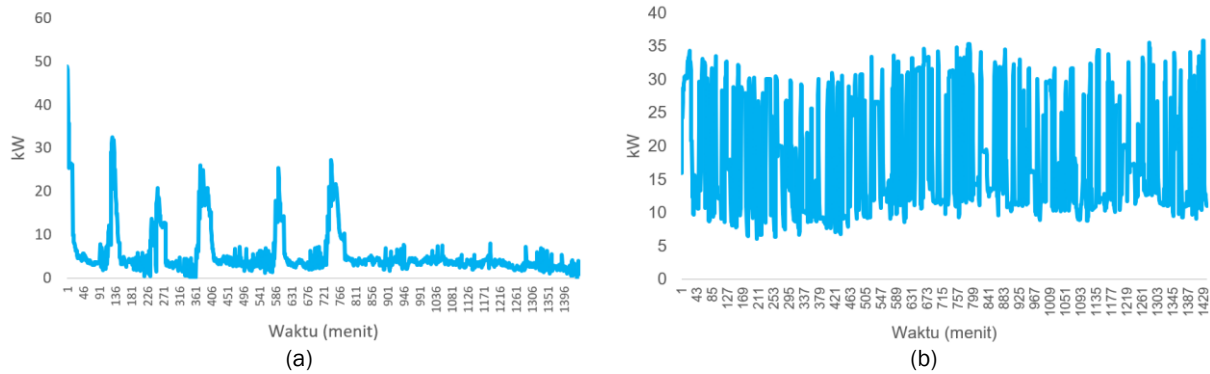


Gambar 15. Grafik performa pendinginan PAC 1 tanggal 26 Oktober 2022; (a) kapasitas pendinginan dan penggunaan daya listrik (b) COP (*coefficient of performance*) dan temperatur ambien.



## 2. Analisis Kesetimbangan Panas

Kinerja kesetimbangan panas harian menunjukkan hasil yang berbeda, dengan menghitung selisih antara kapasitas pendinginan PAC dan beban termal ruangan server didapat grafik delta Q seperti pada Gambar 16.



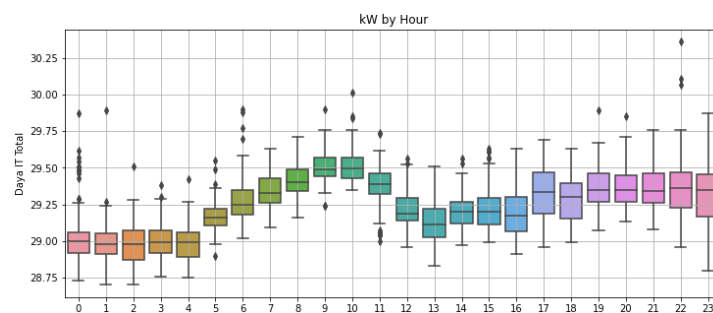
Gambar 16. Grafik selisih termal ruangan server kapasitas pendingin; (a) 25-10-2022 (b) 26-10-2022.

Nilai selisih kapasitas pendinginan dengan beban termal aktual menunjukkan bahwa performa kapasitas pendinginan di atas beban total termal ruangan server. Potensi efisiensi energi dapat dilakukan dengan cara meminimalkan kapasitas pendinginan berlebih dari perangkat pendinginan. Nilai rata-rata kapasitas aktual pendinginan harian dari PAC 1 sebesar 65,64 % dari kapasitas nominal. Sementara kinerja kapasitas pendinginan harian PAC 2 sebesar 57,89 % dari kapasitas nominalnya.

## 3. Analisis Efisiensi Energi Data Center

Berdasarkan data pengukuran energi didapat nilai rasio penggunaan energi infrastruktur pendukung (terutama sistem pendingin) terhadap energi infrastruktur utama IT (*server, prosesor, GPU, storage, network switch*) yang dinyatakan dalam metrik PUE (*Power Utilization Effectiveness*). Hasil pengukuran energi total dari perangkat IT menunjukkan pola energi harian yang konstan, nilai rerata daya perangkat IT tiap jam untuk 25 Oktober adalah 29, 22 kW dan 29,27 untuk tanggal 26 Oktober. Data pengukuran ini menunjukkan kondisi operasi perangkat IT eksisting data center masih dibawah kapasitas daya total IT terpasang (UPS 300 kVA). Profil daya ICT data center harian dapat dilihat pada Gambar 17.

Nilai rerata PUE tanggal 25 Oktober (Operasional PAC 2) adalah 1,37. Sementara itu nilai rerata PUE untuk tanggal 26 Oktober (Operasional PAC 1) didapat nilai yang lebih besar 1,41. Perbedaan nilai rasio ini sangat dipengaruhi oleh efisiensi energi sistem pendingin PAC. Kinerja pendinginan harian PAC 1 memiliki pola yang berbeda dengan PAC 2, lonjakan daya lebih sering terjadi dengan kerapatan yang tinggi menyebabkan konsumsi energi harian PAC 1 lebih banyak dari PAC 2.



Gambar 17. Profil daya ICT harian data center

## Kesimpulan

Dengan penerapan teknologi *digital twin* untuk infrastruktur *data center*, pengukuran parameter energi dapat dilakukan secara *real time*. Oleh karena itu analisis penggunaan energi dapat dilakukan secara cepat dan efisien, data dapat ditampilkan secara berkesinambungan setiap waktu. Pada analisis beban harian, didapat nilai kesetimbangan beban panas (*heat balance*) terhadap kapasitas pendinginan nominal perangkat pendingin terpasang yaitu 40, 95 % untuk PAC 1 dan 49,21 % untuk PAC 2, artinya untuk saat ini diketahui kondisi beban termal operasi eksisting masih dibawah kapasitas sistem pendinginan. Satu unit perangkat AC Presisi cukup untuk menangani beban termal eksisting data center, pengoperasian PAC secara bergantian merupakan langkah yang tepat untuk kondisi beban termal eksisting data center.

## Referensi

- [1] E. Oró, V. Depoorter, A. Garcia and J. Salom, "Energy Efficiency and Renewable Energy Integration in Data Centres. Strategies and Modelling Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 429-445, 2015.
- [2] B. Whitehead, D. Andrews, A. Shah and G. Maidment "Assessing the Environmental Impact of Data Centres Part 1: Background, Energy Use and Metrics", *Building and Environment*, Vol 82, pp 151-159, 2014.
- [3] M. Dayarathna, Y. Wen and R. Fan, "Data Center Energy Consumption Modeling: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 18, 2016.
- [4] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-data-centre-energy-demand-by-data-centre-type-2010-2022> (accessed: 16 March 2023) .
- [5] M. Koot, and F. Wijnhoven, "Usage Impact on Data Center Electricity Needs: A System Dynamic Forecasting Model," *Applied Energy*, vol 291, 116798, 2021.
- [6] B. Hadid, S. Lecoeuche, D. Gille, and C. Labarre, "Energy Efficiency of Data Centers: A Data-Driven Model-Based Approach", *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, pp. 1-6, 2016.
- [7] Y. Weiping, Z. Wang, Y. Xue, L. Guo and L. Xu, "A Combined Neural and Genetic Algorithm Model for Data Center Temperature Control", *Science and Technology Program of State Grid*, 2017.
- [8] R. Snijders, P. Pileggi, J. Broekhuijsen, J. Verriet, M. Wiering and K. Kok, "Machine Learning for Digital Twins to Predict Responsiveness of Cyber-Physical Energy Systems," *8th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems*, Sydney, NSW, Australia, pp. 1-6, 2020.
- [9] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, "Characterizing the Digital Twin: A Systematic Literature Review," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 29, pp 36-52, 2020.
- [10] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020.
- [11] A. Rasheed, O. San and T. Kvamsdal, "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980-22012, 2020.
- [12] R. Stark and T. Damerou, "Digital Twin". in *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* , Chatti, S., Tolio, T. (eds), Springer, pp. 1-8, 2019.
- [13] X. Xie, Q. Lu, A.K. Parlikad, and J. Schooling, "Digital Twin Enabled Asset Anomaly Detection for Building Facility Management," *IFAC PaperOnLine*, vol.53(3), pp. 380-385, 2020.
- [14] E. Vanderhorn and S. Mahadevan, "Digital Twin: Generalization, Characterization, and Implementation," *Decision Support Systems*, Vol. 145, no. 113524, pp. 0167-9236, 2021.
- [15] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, "Characterizing the Digital Twin: A Systematic Literature Review," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 29, pp. 36-52, 2020.
- [16] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, "Digital Twin in Manufacturing : A Categorical Literature Review And Classification," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 1016-1022, 2018.
- [17] T. Bergs, S. Gierlings, T. Auerbach, A. Klink, D. Schraknepper, and T. Augspurger, "The Concept of Digital Twin and Digital Shadow in Manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 101, pp. 81-84, 2021.
- [18] M. Grieves and J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* : Springer, pp. 85-113, 2017.