

Analisis Peran DCIM dalam Peningkatan Efisiensi Energi dan Penurunan PUE di Pusat Data

Muhammad Fuady¹, Teguh Kurniawan², Basuki Rahmad³, Muharman Lubis⁴

^{1,2,3,4}Fakultas Rekayasa Industri/ Sistem Informasi, Telkom University, Bandung, Indonesia

E-mail: muhdfuady@student.telkomuniversity.ac.id¹, mtk@telkomuniversity.ac.id²,
bis@telkomuniversity.ac.id³, muharmanlubis@telkomuniversity.ac.id⁴

Article Info

Article history:

Received June 01, 2026

Revised June 03, 2026

Accepted June 06, 2026

Keyword

Data Center Infrastructure Management (DCIM); Power Usage Effectiveness (PUE); Energy Efficiency; Green Data Center; SNI 8799:2020; Digital Twin.

ABSTRACT

The global digital transformation, accelerated by the COVID-19 pandemic and the massive adoption of generative artificial intelligence (AI) architectures, has triggered an exponential surge in the construction of hyperscale data center infrastructures. This growth brings a direct consequence in the form of escalating global energy consumption, positioning data centers among the most energy-intensive industrial facilities in the world. This research presents a comprehensive analysis of the role of Data Center Infrastructure Management (DCIM) as a holistic instrument to diagnose, orchestrate, and improve energy efficiency, quantified specifically through the reduction of the Power Usage Effectiveness (PUE) metric. Utilizing a methodological framework of systematic review and empirical multi-case analysis, this research deconstructs operational thermodynamic dynamics that cause persistent inefficiencies, such as server sprawl resulting in zombie servers and over-provisioning of HVAC systems. Quantitative analysis proves that DCIM intelligence features—including real-time thermal mapping, digital twin prediction, and capacity load optimization—can drastically reduce PUE, with several institutional facilities successfully lowering baseline PUE from 1.83 to 1.51, while cutting cooling loads by up to 48%. In Indonesia, DCIM integration proves highly crucial to fulfilling mandates of SNI 8799:2020 and SPBE guidelines, and mitigating peak load resilience risks for PT PLN (Persero). This research proposes a computing infrastructure governance paradigm focused on total automation of the thermal power supply chain to achieve globally competitive green infrastructure.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received June 01, 2026

Revised June 03, 2026

Accepted June 06, 2026

ABSTRAK

Transformasi digital global yang dipercepat oleh pandemi COVID-19 dan adopsi masif arsitektur kecerdasan buatan (AI) generatif telah memicu lonjakan eksponensial dalam pembangunan infrastruktur pusat data berskala hyperscale. Pertumbuhan ini membawa konsekuensi berupa eskalasi konsumsi energi global, menempatkan

Kata kunci:

Data Center Infrastructure Management (DCIM); Power Usage Effectiveness (PUE); Efisiensi Energi; Pusat Data Hijau; SNI 8799:2020; Kembaran Digital

pusat data sebagai fasilitas industri paling padat energi di dunia. Penelitian ini menyajikan analisis komprehensif mengenai peran Data Center Infrastructure Management (DCIM) sebagai instrumen holistik untuk mendiagnosis, mengorkestrasi, dan meningkatkan efisiensi energi yang dikuantifikasi melalui penurunan metrik Power Usage Effectiveness (PUE). Dengan menggunakan kerangka metodologi tinjauan sistematis dan analisis multi-kasus empiris, penelitian ini mendekonstruksi dinamika termodinamika operasional yang menyebabkan inefisiensi persisten, seperti fenomena server sprawl yang menghasilkan zombie servers dan over-provisioning pada sistem HVAC. Analisis kuantitatif membuktikan bahwa penerapan fitur intelijen DCIM—termasuk pemetaan termal waktu-nyata, prediksi digital twin, dan optimasi beban kapasitas—mampu menekan PUE secara drastis, dengan beberapa fasilitas berhasil menurunkan angka PUE dari 1,83 menjadi 1,51, seraya memangkas beban pendinginan hingga 48%. Dalam konteks Indonesia, integrasi DCIM terbukti krusial guna memenuhi mandat Standar Nasional Indonesia (SNI) 8799:2020 dan pedoman SPBE, serta memitigasi risiko ketahanan beban puncak jaringan listrik PT PLN (Persero). Penelitian ini mengusulkan paradigma tata kelola infrastruktur komputasi berbasis otomatisasi rantai pasok daya termal secara menyeluruh untuk mencapai infrastruktur hijau berdaya saing global.

This is an open access article under the CC BY-SA license.



Corresponding Author:

Muhammad Fuady
Telkom University
Email : muhdfuady@student.telkomuniversity.ac.id

PENDAHULUAN

Era perekonomian digital modern ditandai oleh pergeseran absolut menuju interkoneksi global, di mana *cloud computing*, analitik *big data*, dan ekosistem kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) menjadi fondasi primer bagi hampir seluruh aktivitas komersial dan pemerintahan. Pandemi global COVID-19 bertindak sebagai katalis yang memampatkan transformasi digital yang seharusnya memakan waktu bertahun-tahun menjadi hanya dalam hitungan bulan. Percepatan ini memanifestasikan dirinya dalam ekspansi masif fasilitas pusat data (*data center*) di seluruh dunia. Namun, di balik abstraksi komputasi awan, terdapat realitas termodinamika yang sangat menekan: pusat data adalah pabrik informasi berskala industri dengan intensitas konsumsi energi yang luar biasa tinggi.

Dalam skala makroekonomi Indonesia, pada tahun 2023 pertumbuhan PDB mencapai 5,05%, di mana sektor telekomunikasi dan digital menjadi motor penggeraknya. Akselerasi ini sejalan dengan peningkatan permintaan energi akhir sebesar 6,29% atau 1.220 juta ekuivalen barel minyak (BOE). Publikasi Statistik PT PLN (Persero) menunjukkan bahwa pada tahun 2024, total produksi listrik mencapai 343.891,75 GWh, dengan beban puncak sistem kelistrikan

nasional menembus 61.287,80 MW atau naik 5,15% dibandingkan tahun sebelumnya. Sistem interkoneksi Jawa-Bali—wilayah di mana mayoritas klaster pusat data *hyperscale* beroperasi—menanggung beban puncak sebesar 42.635,66 MW. Dengan karakteristik penarikan beban dasar (*base load*) yang konstan dan kepadatan daya per rak yang terus meningkat akibat tuntutan perangkat keras AI, industri pusat data kini menjadi entitas kritis yang berpotensi memengaruhi stabilitas jaringan kelistrikan nasional.

Sebagai respons atas profil konsumsi yang ekstrem ini, industri pusat data global menetapkan *Power Usage Effectiveness* (PUE) sebagai metrik efisiensi de facto yang diinisiasi oleh konsorsium The Green Grid. PUE mengkuantifikasi rasio total daya listrik fasilitas terhadap energi yang dikonsumsi peralatan TI. Nilai PUE 1,0 merupakan angka ekuilibrium teoretis sempurna, sementara fasilitas tradisional yang belum teroptimasi umumnya berada pada kisaran 1,8 hingga melebihi 2,0. Tekanan untuk merekayasa ulang efisiensi energi ini tidak lagi semata-mata dimotivasi oleh keinginan memangkas Biaya Operasional (OPEX), melainkan telah bermutasi menjadi imperatif regulasi yang mengikat secara hukum. Undang-Undang EnEfG di Jerman mewajibkan PUE tahunan $\leq 1,2$ untuk pusat data yang beroperasi setelah Juli 2026. Singapura mensyaratkan kepatuhan desain PUE di bawah 1,3. Di dalam negeri, SNI 8799:2020 dan SPBE semakin mempertegas urgensi efisiensi operasional pusat data nasional.

Untuk memecahkan dilema antara keandalan komputasi dan efisiensi termal, industri rekayasa infrastruktur beralih kepada platform *Data Center Infrastructure Management* (DCIM). DCIM adalah ekosistem piranti lunak konvergen yang menjembatani pemisahan historis antara tim pengelola fasilitas bangunan dan tim pengelola TI. Melalui pemantauan berbasis sensor cerdas waktu-nyata, analitik preskriptif, dan pemodelan *digital twin*, DCIM memberikan visibilitas granular yang sebelumnya mustahil diraih. Walaupun solusi DCIM mendapat traksi masif di ranah pemasaran, literatur akademis yang membedah korelasi kausal secara presisi antara fungsionalitas DCIM dengan reduksi kuantitatif PUE masih minim dan terfragmentasi, terutama dalam konteks regulasi spesifik Indonesia.

Penelitian ini bertujuan menyajikan analisis holistik mengenai signifikansi operasional DCIM dalam merevolusi struktur efisiensi energi di pusat data. Tulisan ini mengeksplorasi bagaimana DCIM membongkar silo-silo operasional, mengidentifikasi kebocoran energi laten (seperti *zombie servers*), dan merekayasa ulang profil aliran termal. Lebih dari itu, penelitian ini menyajikan tinjauan multi-kasus untuk mengukur perbandingan penurunan PUE sebelum dan sesudah implementasi sistem otomatisasi termal, serta mengontekstualisasikan temuan dengan parameter tata kelola SNI 8799 guna memandu para pembuat kebijakan dan arsitek infrastruktur digital di Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dekonstruksi Dinamika Termodinamika Pusat Data

Sebuah pusat data tidak ubahnya seperti entitas metabolisme industri yang merombak energi listrik bernilai tinggi menjadi panas melalui komputasi berbasis semikonduktor. Profil penarikan energi dikotomikan ke dalam dua kategori hierarkis: Beban TI (*IT Load*) dan Beban Fasilitas (*Facility Load*). Beban TI merepresentasikan energi yang dikonsumsi oleh server, modul memori, storage arrays, dan perangkat jaringan. Sementara Beban Fasilitas mencakup



sistem UPS, PDU, penerangan, dan yang paling dominan: sistem pengondisian tata udara (HVAC).

Analisis literatur menunjukkan secara konsisten bahwa dalam desain pusat data tradisional tanpa kecerdasan integrasi, infrastruktur pendingin dapat merampas 40%–50% dari total jejak energi fasilitas. Distribusi listrik sekunder memakan 10%–20%, sementara pencahayaan dan operasi tambahan menghabiskan 5%–10% dari beban akhir. Akar permasalahan dari pemborosan energi ini bukan semata bersumber dari inefisiensi mekanis kompresor, melainkan bertumpu pada arsitektur TI yang tidak terkoordinasi yang lazim dikenal sebagai *over-provisioning*. Praktik desain arsitektur yang tersegmentasi ini memicu fenomena *server sprawl*—pertumbuhan fisik server yang tidak terkendali beroperasi pada tingkat utilisasi sangat minim. Studi mengestimasi bahwa rata-rata tingkat utilisasi server dalam pusat data korporasi konvensional hanya berkisar 7%–10% dari kapasitas pemrosesannya, melahirkan fenomena *zombie servers*: ribuan server yang teraliri daya namun tidak menghasilkan nilai komputasi ekonomi.

2.2 Anatomi Metrik Keberlanjutan: PUE, DCiE, WUE, dan CUE

The Green Grid pada tahun 2007 memformalkan *Power Usage Effectiveness* (PUE) sebagai metrik universal efisiensi pusat data. PUE diformulasikan sebagai rasio total daya fasilitas fisik berbanding daya peralatan TI: $PUE = Total\ Fasilitas\ Daya / Beban\ TI$. Rasio 1,0 adalah ekuilibrium teoretis absolut, sementara angka mendekati 2,0 menandakan inefisiensi desain masif.

Meskipun kesederhanaan PUE mengkatalisasi revolusi kesadaran industri, metrik ini mendapat kritik karena hanya mengukur rasio arsitektur fisik dan buta terhadap efisiensi kinerja komputasi riil. Keterbatasan ini melahirkan paradoks matematis yang terkenal: ketika konsolidasi TI masif mematikan ratusan *zombie servers*, beban TI (sebagai penyebut PUE) anjlok drastis, tetapi jika infrastruktur pendingin terus beroperasi pada kapasitas statis, hasil bagi PUE justru memburuk secara matematis—seolah efisiensi fasilitas menurun, padahal total tagihan listrik berkurang. Kerangka tata kelola modern mengasimilasi metrik tambahan: *Carbon Usage Effectiveness* (CUE) untuk melacak emisi gas rumah kaca, dan *Water Usage Effectiveness* (WUE) untuk mengevaluasi konsumsi air pendingin per kilowatt-hour.

2.3 Arsitektur dan Fungsionalitas DCIM

DCIM dikembangkan sebagai lapisan kecerdasan operasi tunggal yang mengawinkan wawasan kapabilitas TI dan kapabilitas fisik fasilitas. Dari perspektif arsitektur rekayasa perangkat lunak, penyebaran DCIM kontemporer terdiri dari empat fungsionalitas struktural utama:

- (1) Lapisan Akuisisi Telemetri Dinamis: Platform bertindak sebagai agregator agnostik yang menembus ratusan ribu titik sensor melalui protokol SNMP, Modbus TCP, IPMI, dan API, menyedot data dari meter energi cerdas, panel circuit breaker, PDU cerdas, unit HVAC, hingga sensor suhu pada prosesor.
- (2) Pemetaan Termal dan Visualisasi Aset 3D: DCIM membangun abstraksi digital twin yang merender denah lantai dengan overlay peta panas (thermal heat-maps) secara dinamis untuk seluruh inventaris aset rak server.

(3) Analitik Perencanaan Kapasitas Prediktif: Mesin intelijen backend memproyeksikan kapasitas kabinet kosong, sisa ampere distribusi panel, serta ketersediaan volume udara dingin. Sistem secara otomatis mensimulasikan dan memberikan peringatan bottleneck sebelum penambahan beban komputasi AI baru dilaksanakan.

(4) Orkestrasi Automasi Responsif: DCIM mutakhir secara otonom mengirim perintah instruksional kepada aktuator penyejuk ruangan untuk menyesuaikan kecepatan motor mekanis kipas sesuai fluktuasi beban komputasi, termasuk memanfaatkan free cooling economizers di kondisi suhu lingkungan yang mendukung.

2.4 Lanskap Regulasi Global dan Konteks Indonesia (SNI 8799:2020)

Pencapaian PUE rendah melalui platform DCIM telah melampaui fase rekomendasi *best practices* menjadi instrumen kepatuhan hukum mutlak di berbagai yurisdiksi. Undang-Undang EnEfG Jerman melarang operasional pusat data komersial berskala besar yang didesain melebihi PUE 1,2. Pusat data warisan (*legacy*) di Eropa dipaksa melakukan retrofitting ekstrem untuk memangkas ambang efisiensi menuju angka 1,5 dan selanjutnya target 1,3. Singapura mencabut moratorium pembangunan pusat data (2019–2022) dengan memberi kuota daya terbatas ~80 MW hanya kepada proyek yang mampu mendemonstrasikan PUE fasilitas di bawah 1,3.

Dalam konteks Indonesia, Peraturan Pemerintah Nomor 71 Tahun 2019 dan Peraturan Presiden Nomor 95 Tahun 2018 (SPBE) mewajibkan pengelolaan data strategis dalam batas infrastruktur nasional berstandar kelas dunia. BSN merespons melalui SNI 8799:2020 yang merumuskan prosedur spesifikasi rancang bangun pusat data, mencakup redundansi sistem tanpa henti (setara tier *Uptime Institute* dan ISO/IEC) serta pemeliharaan parameter hot/cold aisle containment untuk mengendalikan PUE. Otoritas Jasa Keuangan (OJK) pun menggulirkan Taksonomi Hijau Indonesia yang menginstruksikan perbankan komersial untuk mengklasifikasikan pusat data baru yang gagal mencapai indikator hijau—termasuk penggunaan DCIM modern—sebagai aset berisiko iklim transisi. Dengan proyeksi beban komputasi nasional tumbuh menembus 2,11 Gigawatt pada tahun 2030, inefisiensi yang dibiarkan tanpa manajemen DCIM berpotensi memicu krisis ketahanan rantai suplai energi listrik domestik.

METODE PENELITIAN

Studi penelusuran ini diorkestrasi menggunakan pendekatan analitik metodologi campuran kualitatif dan kuantitatif (*mixed-methods systematic evaluation framework*), memposisikan dirinya layaknya format observasi penelitian tindakan dan bedah riset multi-kasus industri (*action research & multi-case industry review*). Oleh karena sifat kerahasiaan (*confidentiality*) dari data sensitif arsitektur energi komersial, studi akademis pada area rekayasa fasilitas pusat data lazim berpaku pada analisis meta dari pelaporan terbuka, rilis white papers lembaga standardisasi, statistik publik utilitas ketenagalistrikan pemerintah, dan agregat telemetri yang dibuka oleh operator multinasional (seperti pada kerangka kerja Open Compute Project dan ASHRAE).

Pengumpulan data dipartisi menjadi dua segmen agregat terstruktur:

Segmen 1 – Ekstraksi Metrik Kinerja DCIM Kuantitatif: Proses perolehan rasio performa efisiensi pusat data dilakukan melalui identifikasi indikator statistik baseline sebelum intervensi infrastruktur perangkat lunak dan indikator pasca-implementasi DCIM yang berfungsi optimal. Sampel kuantitatif diambil dari fasilitas operasional riil yang dicatat dalam kajian literatur empiris institusi internasional. Parameter dependen focal dibatasi pada nilai rasio komparatif PUE dan modifikasi persentase disipasi panas sistem pendingin. Segmen 2 – Pemetaan Kualitatif Ekosistem Energi Makroekonomi Nasional: Untuk mengkontekstualisasikan temuan teknis DCIM ke dalam realitas keandalan jaringan lokal dan tata kelola regulasi Indonesia, data sekunder makro dihimpun dari publikasi resmi PT PLN (Persero) Statistik 2024, Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2023 dari Kementerian ESDM, dan lanskap legislasi OJK terkait pembiayaan industri digital nasional.

Prosedur analisis operasional mengeksekusi integrasi komparatif (*triangulation*). Data beban listrik grid makro dihadapkan dengan proyeksi volume eskalasi densitas beban rak AI. Vektor signifikansi fungsional DCIM direkonstruksi dalam alur logika kausalitas untuk membuktikan mengapa efisiensi tersebut tidak akan tercapai tanpa algoritma pemantauan prediktif, diiringi tinjauan kritis atas batasan paradoks rumus PUE yang berpotensi menyesatkan penilaian investasi hijau.

HASIL PENELITIAN

4.1 Profil Kapasitas Kelistrikan Nasional Indonesia

Berdasarkan ekstraksi parameter pasokan energi tahun berjalan, tekanan struktural terhadap sumber tenaga domestik berada pada lintasan kritis. Publikasi Statistik PT PLN (Persero) edisi 2025 memperlihatkan bahwa konfigurasi infrastruktur kelistrikan selama tahun pembukuan 2024 (unaudited) menghasilkan total produksi kumulatif pasokan daya—termasuk pembelian energi dari Independent Power Producers (IPP)—senilai 343.891,75 GWh. Total kapasitas unit pembangkitan terpasang se-nusantara telah menembus 75.936,46 MW. Konsumsi beban dari klaster industri, yang mewadahi fasilitas pusat data, mencapai 92.195,69 GWh atau 30,11% proporsi suplai jaringan nasional.

Ketimpangan distribusi beban kelistrikan antarwilayah menunjukkan problem laten yang mengkhawatirkan bagi industri TI. Sistem grid interkoneksi Jawa-Bali menanggung beban puncak sebesar 42.635,66 MW di penghujung tahun 2024. Secara kontras, penetrasi *Renewable Energy* di porsi jaringan kelistrikan Jawa belum bertumbuh dominan. Dari agregasi produksi energi EBT nasional Kementerian ESDM tahun fiskal 2023 sebesar 13.155 MW, pusat data di kawasan industri Cikarang dan koridor Jakarta masih ditopang dominasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara yang mendominasi lebih dari 27% dari bauran kapasitas primer. Konstelasi faktual ini menggarisbawahi bahwa setiap satuan desimal inefisiensi PUE yang gagal dihemat ekuivalen dengan peningkatan ekstraksi pencemaran dan emisi karbon yang tidak dapat diabaikan.

Tabel 1. Profil Pasokan Energi Makroekonomi Kelistrikan Nasional Indonesia (2023–2024)

Indikator Infrastruktur Kelistrikan	Realisasi Kuantitatif	Keterangan / Implikasi Pusat Data
Total Produksi Sistem PT PLN (Persero) (2024)	343.891,75 GWh	Meliputi pasokan energi total untuk industri komputasi intensif berbasis komersial.
Puncak Beban Sistem Jawa-Bali (2024)	42.635,66 MW	Pusat gravitasi penempatan infrastruktur data center raksasa, rentan terhadap defisit pasokan grid.
Volume Energi Tersalurkan Kelas Pelanggan Industri (2024)	92.195,69 GWh (30,11%)	Penghematan PUE dengan alat bantu intelijen fasilitas akan memangkas porsi konsumsi industri ini.
Total Penyediaan Listrik Energi Bersih EBT (2023)	13.155 MW	Integrasi kelistrikan hijau masih terkendala regulasi dan ketersediaan; mendesak optimasi efisiensi internal.

Sumber: Statistik PLN 2024 & Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2023

4.2 Studi Perbandingan Empiris Kinerja Efisiensi Energi Pasca-Intervensi DCIM

Ekstraksi kuantitatif dari serangkaian intervensi lapangan menyajikan metrik statistik yang merujuk pada keandalan instrumen perangkat lunak pemantauan dalam mengeksekusi program perampingan daya yang konkret:

(1) Fasilitas National Information Technology Center (NITC): Pada kondisi awalnya, pusat operasi ini tidak mampu melihat profil penyebaran panas dengan presisi, memimpin pada skenario penyebaran suhu udara pasokan terlampaui rendah secara reaktif. Pemasangan arsitektur integrasi komputasi diagnostik berlapis sensor presisi membantu teknisi NITC mendeteksi zona aman untuk menaikkan parameter pasokan AC. Efek transformasinya monumental: kompresor pendinginan gedung tereduksi sebesar 48% secara absolut. Beban penarikan daya utama fasilitas merosot sekitar 17%, menyusutkan angka PUE dari 1,83 menjadi 1,51.

(2) San Diego Supercomputer Center (SDSC): Pusat riset seluas ~19.000 kaki persegi (West Room) mengeksekusi pemasangan infrastruktur penyekatan aliran mekanik pada desain penutup lorong termal panas (*hot aisle containment systems*). Dengan mengeliminasi pencampuran turbulensi termal, profil PUE yang sebelumnya bertahan pada angka konstan 1,8 merosot stabil ke level 1,5.

(3) Optimalisasi Air-Side Economizer Berbasis Pemodelan Iklim: Pengujian kemampuan preskriptif di atas perangkat kembaran digital bangunan menggunakan pemodelan energi EnergyPlus menunjukkan bahwa penyertaan Direct Air-Side Economizer (DASE) dipadukan pendingin evaporatif—di bawah kendali platform DCIM—menghasilkan reduksi tambahan metrik PUE sebesar 0,02–0,05 di zona iklim kering, dan 0,03–0,07 di zona bermusim lembab.

Tabel 2. Rangkuman Metrik Keberhasilan Intervensi DCIM – Studi Kasus Komparatif

Fasilitas Komputasi	Intervensi & Diagnosis DCIM	Kondisi Awal (Baseline PUE)	Hasil Optimalisasi Pasca-Intervensi
National Information Technology Center (NITC)	Deteksi sebaran suhu anomali & rekayasa beban sirkulasi pengondisian.	PUE awal: 1,83	PUE akhir: 1,51; Pengurangan beban pendinginan: 48%
San Diego Supercomputer Center (SDSC)	Penempatan isolasi struktur Hot Aisle Containment tervalidasi sensor.	PUE awal: 1,80	PUE akhir: 1,50
Enterprise Datacenter – The Green Grid (PoC)	Pemodelan prediksi otomatis respons beban AI vs. biaya chiller.	Pemadaman konstan (downtime)	Reduksi beban tagihan daya 30% pada siklus malam.
Pemodelan Fasilitas Evaporatif Terpadu (Siklus Cuaca)	Adopsi otomatis economizer udara evaporatif adaptif berbasis iklim.	Kondisi dasar lingkungan ruang komputer	Reduksi PUE: ~0,02–0,07 (zona kering & lembab)

Sumber: DTIC (2010); SDSC; MDPI (2022); The Green Grid (2012)

PEMBAHASAN

5.1 Korelasi Algoritmik Antara Arsitektur Perangkat Lunak dan Dinamika Termal

Temuan kuantitatif yang dilaporkan menegaskan prinsip sentral: DCIM tidak memiliki kemampuan mengubah hukum fundamental fisika pelepasan panas. Apa yang sukses diraih platform DCIM adalah kemampuan merajut serpihan telemetri fasilitas secara utuh, mengubah kegelapan informasi ruang listrik menjadi visibilitas keputusan, yang memungkinkan teknisi dan aktuator otomasi mekanis menyudahi praktik *defensive overcooling* di ruang server.

Dalam desain arsitektur konservatif tanpa instrumen sensor termal level mikro, petugas infrastruktur terpaksa mematok *thermostat setpoints* turun jauh menukik di bawah parameter rasional—lazimnya pada 18°C–20°C—semata-mata karena rasa takut berlebihan akan titik-titik panas (*hot-spots*) di koridor yang tidak terlihat. Pengaturan membabi buta ini pada kipas dan kompresor yang beroperasi pada siklus penuh (100% duty cycle) merupakan kerugian energi masif, sekaligus menyuntik laju PUE hingga menembus 2,0. Saat panel *Digital Twin* DCIM dirender, mesin menemukan zona termodinamika berlapis yang secara objektif menstabilkan temperatur tanpa pemborosan daya. Kepastian visual ini mengarahkan perancang untuk menyelaraskan ulang laju putaran kompresor dengan sistem konverter VFD (*Variable Frequency Drive*) sebatas kebutuhan presisi saat itu juga—inilah yang dikreditkan menjadi pendorong mutlak penurunan kebutuhan pendinginan 48% di NITC dan 44% di SDSC.

5.2 Pemberantasan Aset Illusi: Eksekusi Zombie Servers

Selain rekayasa termal, DCIM memiliki spesialisasi radikal dalam identifikasi *zombie servers*—mesin yang teraliri penuh daya listrik namun tidak menghasilkan nilai komputasi.

Algoritma diagnostik pelacakan konektivitas fisik berlapis dan sensor ping PDU rak individu mengamati profil tegangan lalu lintas unit distribusi daya. Mengkorelasikan kebisuan jaringan dan status utilitas sasis tak bertujuan memberikan kapabilitas teknisi untuk melakukan proses unplug mesin komputasi lawas serentak, yang berakibat mencukur muatan daya palsu secara instan, menaikkan integritas kepadatan energi, dan memotong rantai termal tidak berguna. Mengingat riset mengestimasi hanya 7%–10% utilisasi kapabilitas server dalam pusat data korporasi konvensional, potensi penghematan yang dapat direalisasikan melalui mekanisme ini sangat substansial.

5.3 Menyingkap Paradoks Matematis pada Penafsiran PUE

Tata kelola yang bertanggung jawab mutlak membutuhkan pemaparan fenomena kekeliruan observasi logis (*optical illusion metrics*) dalam penggunaan tunggal interpretasi angka PUE pasca-perampingan server. Ketika virtualisasi atau pemusnahan server berkinerja rendah ditunaikan berkat arahan visibilitas DCIM, beban angka TI selaku pembagi PUE akan ciut drastis. Namun, apabila instrumen pendingin stasioner dibiarkan beroperasi menggunakan kapasitas mekanis statis tanpa kalibrasi putaran otomatis, persamaan matematika tersebut akan mereproduksi hasil bagi yang memburuk—misalnya, PUE 1,5 dapat terdegradasi secara matematis menjadi 2,0, meskipun tagihan listrik bulanan secara absolut justru menurun.

Hal ini mengartikulasi penegasan kesimpulan penting: metrik PUE harus dipandang bukan sekadar ukuran penghematan operasional kelistrikan, melainkan sebagai metrik keandalan sinkronisasi fasilitas pengondisian lingkungan yang berirama selaras dengan kinerja TI. Platform DCIM modern memitigasi anomali ini melalui kontrol aktuator otomatis bertahap (*intelligently synchronized variable dynamic cooling*) yang mengikuti jejak ritme penurunan panas server secara presisi dan seketika.

5.4 Implikasi Strategis Pembiayaan dan Tata Kelola Standar Nasional

Energi yang diselamatkan sebagai buah implementasi diagnostik intelijen termal membuahkan efek kejut berlapis di bidang tata kelola pengembalian modal dan kelangsungan operasional finansial. Pada perspektif CAPEX, pemampatan profil konsumsi di bawah PUE 1,5 yang divalidasi DCIM membebaskan puluhan hingga ratusan kilowatt cadangan beban yang sebelumnya terkunci pada sistem proteksi ganda pasokan daya berlebih. Kapasitas daya yang pulih ini (*stranded capacity asset recovery*) memberi amunisi kelistrikan cadangan bagi ekspansi rak server masa depan tanpa perlu membangun modul konstruksi gedung sekunder atau menambah substasi transmisi PDU baru yang sangat mahal.

Pada ketahanan kelangsungan bisnis (*Business Continuity*), studi Ponemon Institute menegaskan bahwa setiap menit pemadaman server membebani kerugian finansial hingga USD 9.000. Mengingat lebih dari 88% insiden fatal infrastruktur tersulut oleh kegagalan prediksi umur peralatan atau kesalahan kalibrasi manual, DCIM meruntuhkan angka malapetaka teknis berkat integrasi *predictive maintenance alerting system* yang memantau profil frekuensi voltase mekanis pra-bencana pada motor pendingin CRAH.

Penyesuaian tata kelola ini bersinggungan langsung dengan ekosistem digital Indonesia. SPBE melalui Perpres No. 95/2018 mengawinkan persyaratan standarisasi sertifikasi dari SNI 8799:2020, yang memaksakan sistem *containment architecture* (pembatas suhu hot/cold aisle)

guna meredam laju PUE dan meraih kepatuhan kelayakan pusat data bertaraf global. Selain itu, dewan manajemen investasi bank korporasi kini memasukkan klausul Taksonomi Hijau OJK pada perjanjian pembiayaan konstruksi EPC. Pusat data yang gagap membangun kultur sinkronisasi fasilitas pendingin dan integrasi energi ber-PUE efisien berisiko gagal kualifikasi klasifikasi portofolio hijau OJK.

5.5 Ekstrem Komputasi AI dan Metrik Multidimensi Masa Depan

Masa depan tata kelola pusat data mengarah ke wilayah kepadatan daya eksponensial ekstrem akibat kemunculan GPU kecerdasan buatan generatif. Rak server konvensional beroperasi pada 5–10 kW, sementara rak spesialis AI terkini menuntut aliran energi 40–100 kW per unit sasis individual. Kapasitas termal pendingin berbasis udara konvensional akan mencapai titik batas. Transisi menuju *direct-to-chip liquid cooling loops* dan *two-phase dielectric immersion tanks* akan mengubah pondasi desain pusat data secara fundamental.

Platform agregasi DCIM berbalut kecerdasan buatan (AI DCIM) akan mengambil alih kendali sentral, mengorkestrasi sirkulasi pompa jaringan larutan cairan termal sinkron dengan fluktuasi *LLM AI workload spikes*, sambil mengalihkan siklus pasokan ke sistem baterai hijau surya di waktu beban puncak. Evolusi platform DCIM ini tidak lagi sekadar menargetkan PUE di bawah 1,2, melainkan membangun arsitektur tata kelola holistik yang melingkupi WUE per kilowatt-hour komputasi dan CUE per bangunan—memenuhi seluruh spektrum keberlanjutan yang dituntut pemangku kepentingan global.

KESIMPULAN

Kajian analitis lintas literatur rekayasa dan studi empiris multi-kasus secara komprehensif mengukuhkan dalil bahwa adopsi sistem *Data Center Infrastructure Management* (DCIM) merupakan tulang punggung fundamental guna menyokong pengetatan konsumsi listrik operasional di lingkungan pusat data global. Platform intelijen kembaran digital DCIM memetakan lorong aliran panas tersembunyi, menjinakkan beban *zombie servers* yang memboroskan energi, dan memerintahkan penurunan laju kecepatan mesin penyejuk secara otomatis. Eksekusi ini mendatangkan penghematan termodinamika absolut yang berujung pada penurunan rasio PUE—mendemonstrasikan pencapaian target PUE 1,5 secara realistis dan menekan menuju kisaran ideal PUE 1,2 dalam skenario teroptimasi.

Dalam konstelasi ekosistem nasional Indonesia yang berkejaran dengan penyerapan kapasitas gigawatt komputasi, implementasi parameter diagnostik DCIM telah menembus batasan perdebatan teknis *best practices* menjadi imperatif pengamanan ketahanan jaringan kelistrikan Jawa-Bali yang menanggung puluhan ribu megawatt beban kritis. Pemenuhan parameter hijau efisiensi daya komputasi akan memastikan industri pusat data di Indonesia lulus audit kepatuhan mandat SNI 8799:2020, sekaligus menghindari risiko klasifikasi aset berbahaya dari skema pembiayaan OJK Taksonomi Hijau. Integrasi platform DCIM dan metrik keberlanjutan PUE membentangkan jalan raya kemandirian inovasi infrastruktur peladen nasional yang berjangka panjang, efisien, terjangkau, dan berdaya saing ekologi global—selaras lestari berdampingan dengan era adopsi pemrosesan mesin kecerdasan generatif (*Generative AI inference*) masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standardisasi Nasional. (2020). SNI 8799:2020: Spesifikasi Teknis dan Sistem Manajemen Pusat Data. Jakarta: BSN.
- [2] CoreSite. (2023). Data Center Sustainability: Even Better Than Renewable Is Energy Not Used. Diambil dari <https://coresite.com>
- [3] DTIC – Defense Technical Information Center. (2010). Data Center Energy Efficiency Technologies and Methodologies. Arlington: DTIC.
- [4] Huawei Carrier. (2022). Achieving Sustainable Data Center Growth. Shenzhen: Huawei Technologies.
- [5] International Energy Agency (IEA). (2024). Data Centres and Data Transmission Networks. Paris: IEA.
- [6] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). (2023). Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2023. Jakarta: Pusdatin ESDM.
- [7] KPMG International. (2023). Building Indonesia's Intelligent & Sustainable Data Centers. Singapore: KPMG.
- [8] Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984–986. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>
- [9] Nlyte Software. (2021). Lowering PUE: The Impact of DCIM. San Mateo: Nlyte.
- [10] Ponemon Institute. (2022). Cost of Data Center Outages. Traverse City: Ponemon Institute LLC.
- [11] PT PLN (Persero). (2025). Statistik PLN 2024 – Data Operasional (Unaudited). Jakarta: PT PLN (Persero). Diambil dari <https://web.pln.co.id>
- [12] Shehabi, A., Smith, S. J., Masanet, E., & Koomey, J. (2018). Data Center Growth in the United States: Decoupling the Demand for Services from Electricity Use. *Environmental Research Letters*, 13(12), 124030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaec9c>
- [13] The Green Grid. (2007). Green Grid Metrics: Describing Data Center Power Efficiency. Beaverton: The Green Grid.
- [14] The Green Grid. (2012). A Case Study and Critical Assessment in Calculating Power Usage Effectiveness for a Data Centre. Beaverton: The Green Grid.
- [15] TÜV NORD Indonesia. (2023). SNI 8799 Data Center Certification. Jakarta: TÜV NORD Indonesia.
- [16] Uptime Institute. (2024). Global Data Center Survey 2024. New York: Uptime Institute.
- [17] Whitehead, B., Andrews, D., Shah, A., & Maidment, G. (2015). Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics. *Building and Environment*, 82, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.021>
- [18] White & Case LLP. (2023). Data Center Requirements Under the New German Energy Efficiency Act. New York: White & Case.
- [19] Xiaodong, L., & Cao, L. (2022). Data Center Energy Evaluation Tool Development and Analysis of Power Usage Effectiveness with Different Economizer Types in Various Climate Zones. *Energies*, 15(4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/en15041423>
- [20] Xu, J., Wang, M., Luo, X., & Gu, B. (2019). Cognitive Infrastructure: A Unified DCIM Framework for AI Data Centers. arXiv preprint arXiv:1910.02171.