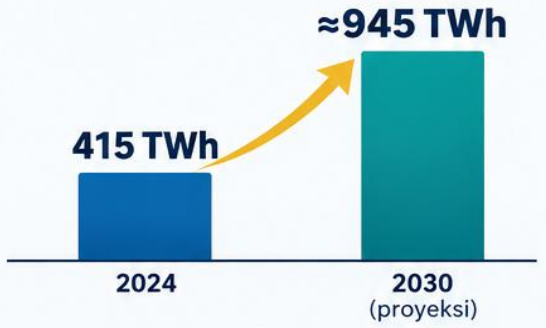
Kebutuhan Energi Pusat Data dan Tantangan Pertumbuhan AI yang Berkelanjutan

AI membutuhkan komputasi, komputasi membutuhkan listrik



415 TWh
konsumsi listrik pusat data global, 2024

≈945 TWh
proyeksi konsumsi listrik pusat data global, 2030

Proyeksi IEA 2025 — skenario dasar

Dampak utama pertumbuhan AI

Jaringan listrik
Beban besar terkonsentrasi di lokasi tertentu

Emisi karbon
Dampak bergantung pada sumber listrik

Air dan pendinginan
Kebutuhan berbeda menurut teknologi dan lokasi

Perangkat keras
Chip, server, baterai, dan material punya jejak siklus hidup

Arah pertumbuhan AI berkelanjutan

1. Pilih model sesuai kebutuhan
2. Ukur energi, emisi, daya puncak, dan air
3. Jadwalkan beban komputasi secara fleksibel
4. Selaraskan pusat data dengan jaringan dan energi rendah emisi

Inovasi digital perlu tumbuh sejalan dengan kapasitas energi dan daya dukung lingkungan.



Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD
Guru Besar Manajemen dan AI Data Analyst
IBM-ASMI | RudyCT Academic Series
www.rudyct.com/cv.pdf

Kebutuhan Energi Pusat Data dan Tantangan Pertumbuhan AI yang Berkelanjutan

Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD

www.rudyct.com/cv.pdf

Guru Besar Manajemen dan AI Data Analyst

IBM-ASMI | RudyCT Academic Series

Abstract

Pertumbuhan kecerdasan buatan (AI), komputasi awan, dan layanan digital menjadikan pusat data sebagai infrastruktur strategis sekaligus konsumen ublic yang berkembang cepat. Artikel ini menjelaskan hubungan antara komputasi, permintaan energi, jaringan ublic , air, emisi, rantai pasok perangkat keras, dan tata ublic. International Energy Agency (IEA) memperkirakan konsumsi ublic pusat data global sekitar 415 TWh pada 2024 dan sekitar 945 TWh pada 2030 dalam ublic dasarnya; angka tersebut merupakan proyeksi, bukan kepastian. Dampak sistemik terutama muncul ublic beban baru terkonsentrasi di ublic tertentu, sementara pembangkit, jaringan transmisi, pendinginan, dan pasokan air tidak bertumbuh seirama. AI juga berpotensi membantu efisiensi energi, tetapi manfaat itu bergantung pada penerapan, kualitas data, dan efek pantulan permintaan. Artikel mengusulkan kerangka pengelolaan yang menggabungkan efisiensi perangkat dan model, transparansi pengukuran, pengadaan ublic rendah emisi yang kredibel, fleksibilitas beban, perlindungan sumber daya ubli, dan perencanaan ublic

yang partisipatif. Tujuannya bukan menghentikan inovasi, melainkan memastikan manfaat AI tidak dibayar dengan tekanan yang tidak proporsional pada sistem energi dan masyarakat.

Kata kunci: pusat data; kecerdasan buatan; konsumsi listrik; efisiensi energi; emisi karbon; air; jaringan listrik; keberlanjutan.

Pendahuluan: komputasi menjadi infrastruktur energi

Kehidupan digital sering tampak ringan karena antarmuka berada di layar kecil: satu sentuhan membuka peta, menyimpan foto, menerjemahkan kalimat, atau meminta sistem generatif menyusun ringkasan. Namun setiap layanan itu bergantung pada rangkaian perangkat fisik. Data bergerak melalui jaringan telekomunikasi, diproses di server, disimpan di media penyimpanan, dan dijaga dalam rentang suhu serta kelembapan tertentu. Pusat data adalah simpul tempat perangkat tersebut berkumpul. Ia menggunakan listrik untuk menjalankan komputasi dan untuk mendukung komputasi itu sendiri melalui pendinginan, distribusi daya, pencahayaan, keamanan, serta sistem cadangan.

Kecerdasan buatan generatif membuat hubungan antara layanan digital dan energi lebih nyata. Model besar membutuhkan komputasi intensif ketika dilatih, lalu terus menggunakan energi saat melayani permintaan pengguna. Pertumbuhan fitur multimodal, agen perangkat lunak, pencarian berbasis model, personalisasi, dan pemrosesan otomatis memperluas jumlah serta kompleksitas pekerjaan. Meskipun perangkat keras dan algoritme menjadi lebih efisien, penurunan biaya per tugas dapat mendorong penggunaan yang lebih besar. Oleh sebab itu, efisiensi teknis per unit tidak otomatis menurunkan total konsumsi.

Persoalan pokoknya bukan sekadar berapa banyak listrik yang dipakai pusat data dunia. Pertanyaan yang lebih operasional adalah: di mana beban itu muncul, kapan listrik dibutuhkan, dari sumber apa listrik dipasok, seberapa cepat

jaringan dapat menyalurkannya, apa konsekuensinya bagi air dan ruang, siapa yang menerima manfaat, serta siapa yang menanggung biaya eksternal. Pada tingkat lokal, sebuah kampus pusat data dapat menjadi beban besar bagi gardu dan jalur transmisi meskipun porsinya tampak kecil pada neraca listrik nasional.

Artikel ini menempatkan kebutuhan energi pusat data sebagai persoalan sistem sosio-teknis. Pembahasan bergerak dari cara mengukur konsumsi ke dinamika AI, lalu meninjau implikasi global dan Indonesia. Setelah itu, dibahas pilihan teknis, peran pasar, tata kelola, dan kerangka keputusan bagi pemerintah, pengelola pusat data, penyedia AI, serta pengguna institusional. Angka proyeksi diperlakukan sebagai skenario yang sensitif terhadap permintaan, efisiensi, kapasitas jaringan, serta pilihan kebijakan. Argumen utamanya adalah bahwa pertumbuhan AI berkelanjutan memerlukan pengelolaan energi sejak rancangan model dan lokasi pusat data hingga cara layanan dibeli dan digunakan.

1. Apa yang sebenarnya dihitung sebagai energi pusat data

Pusat data bukan hanya ruang server. Perangkat teknologi informasi (TI) meliputi server komputasi, akselerator, penyimpanan, dan perangkat jaringan. Di luar TI terdapat infrastruktur fasilitas seperti unit pendingin, kipas, pompa, catu daya tanpa gangguan, konverter, pencahayaan, serta sistem keselamatan. Beban TI menghasilkan panas; panas itu harus dipindahkan agar perangkat beroperasi dengan andal. Dengan demikian, konsumsi fasilitas adalah jumlah energi TI dan energi pendukungnya, dengan kehilangan tambahan pada konversi dan distribusi.

Salah satu metrik yang umum adalah Power Usage Effectiveness (PUE), yaitu energi total fasilitas dibagi energi peralatan TI. Nilai yang mendekati satu menunjukkan bahwa bagian energi yang digunakan peralatan pendukung relatif kecil. Namun PUE bukan ukuran langsung dari produktivitas komputasi, intensitas karbon, penggunaan air, atau efisiensi model. Pusat data dapat memiliki PUE yang baik tetapi tetap memakai listrik besar karena kapasitas server

berlebih atau permintaan komputasi terus meningkat. Sebaliknya, fasilitas berukuran kecil dapat memiliki PUE lebih tinggi tetapi total konsumsi dan dampak absolutnya rendah.

Karena itu, pengukuran sebaiknya memakai beberapa indikator secara bersamaan. Konsumsi kWh per layanan atau pekerjaan memberi konteks produktivitas, tetapi perlu definisi tugas dan kualitas keluaran yang konsisten. Carbon Usage Effectiveness (CUE) membandingkan emisi operasional dengan energi TI, sementara Water Usage Effectiveness (WUE) menyatakan penggunaan air langsung relatif terhadap energi TI. Ukuran-ukuran tersebut belum sepenuhnya menangkap air yang digunakan pembangkit listrik, emisi pembuatan chip, atau dampak ekstraksi mineral. Batas sistem dan periode pelaporan harus dinyatakan dengan jelas.

Perbandingan antar pusat data juga mudah menyesatkan jika karakteristik beban berbeda. Fasilitas yang melayani layanan web dengan variasi trafik harian tidak sama dengan klaster pelatihan AI yang bekerja terus-menerus. Iklim setempat, temperatur target, usia perangkat, tingkat redundansi, dan bauran listrik juga memengaruhi indikator. Oleh karena itu, angka tunggal seperti PUE harus dibaca sebagai satu bagian dari dasbor yang menjelaskan kondisi teknis dan lingkungan, bukan sebagai sertifikat keberlanjutan menyeluruh.

Konsumsi energi harus dibedakan dari daya. Energi dalam kWh atau TWh menunjukkan pemakaian selama suatu periode; daya dalam kW atau MW menunjukkan laju kebutuhan pada suatu saat. Dua fasilitas dapat menggunakan energi tahunan yang sama, tetapi profil daya puncaknya sangat berbeda. Operator jaringan perlu mengetahui daya maksimum yang diminta, ramp atau perubahan bebannya, faktor daya, kebutuhan cadangan, dan pola pemeliharaan. Untuk lokasi yang padat, dampak kapasitas sesaat ini dapat lebih penting daripada total tahunan.

2. Mengapa AI memperbesar kebutuhan komputasi

Kebutuhan AI muncul dalam beberapa tahap. Pelatihan awal menggunakan banyak operasi komputasi untuk menyesuaikan parameter model dengan data. Eksperimen dan penyetelan ulang dapat mengulang proses tersebut berkali-kali. Setelah model diluncurkan, inferensi menghasilkan jawaban untuk pengguna dan aplikasi. Dalam layanan yang sukses, inferensi dapat berlangsung jauh lebih sering daripada pelatihan. Model yang sama dapat melayani jutaan permintaan, sehingga efisiensi operasi sehari-hari menjadi perhatian yang setara dengan biaya pelatihan.

Beban komputasi dipengaruhi ukuran model, panjang konteks, jumlah token keluaran, tipe tugas, jumlah pengguna serentak, target latensi, dan tingkat redundansi. Permintaan yang memerlukan pemahaman gambar, suara, atau video umumnya menambah pemrosesan dibanding tugas teks pendek. Agen AI yang mengurai masalah menjadi beberapa langkah dapat memanggil model berulang kali, menggunakan pencarian, memeriksa hasil, lalu merangkum. Fitur tersebut mungkin meningkatkan kemampuan tetapi memperbesar pekerjaan komputasi per tujuan akhir.

Tidak ada angka universal yang dapat menyatakan bahwa satu pertanyaan kepada AI selalu menggunakan energi tertentu. Hasilnya berubah menurut model, perangkat keras, panjang masukan dan keluaran, lokasi pusat data, sistem pendingin, utilisasi, serta bauran listrik. Perkiraan publik sering menggabungkan asumsi yang berbeda atau tidak memisahkan energi server dari fasilitas. Praktik yang lebih tepat adalah melaporkan rentang dengan metodologi dan tanggal pengukuran, serta menyatakan jenis tugas yang dibandingkan.

Perbaikan efisiensi tetap nyata. Akselerator khusus, komputasi presisi rendah, kompresi model, kuantisasi, distilasi, kernel perangkat lunak yang lebih baik, dan optimasi memori dapat mengurangi energi per operasi atau per keluaran. Batching dan caching mengurangi pekerjaan berulang. Pemilihan model yang

lebih kecil untuk tugas sederhana dapat menghindari penggunaan model terbesar pada setiap permintaan. Namun bila efisiensi menurunkan harga layanan, perusahaan dan konsumen mungkin menggunakan AI untuk kegiatan tambahan. Fenomena ini merupakan efek pantulan: biaya per layanan turun, tetapi jumlah layanan meningkat.

Pertumbuhan juga didorong oleh strategi perusahaan dan persaingan. Organisasi berinvestasi pada kapasitas lebih awal untuk mengantisipasi pasar, mengurangi keterlambatan, dan menjaga ketersediaan. Kapasitas cadangan dapat meningkatkan ketahanan, tetapi server yang menganggur tetap mengonsumsi energi dan menuntut fasilitas. Perencanaan yang berkelanjutan perlu membedakan kapasitas yang benar-benar mendukung ketahanan dari kapasitas yang tidak terpakai akibat perkiraan permintaan yang terlalu optimistis.

IEA dalam laporan Energy and AI memperkirakan pusat data mengonsumsi sekitar 415 TWh pada 2024, setara sekitar 1,5 persen konsumsi listrik global. Dalam skenario dasar, jumlah itu dapat meningkat menjadi sekitar 945 TWh pada 2030. IEA mengidentifikasi AI sebagai pendorong utama pertumbuhan, bersama layanan digital lainnya. Proyeksi tersebut bukan ramalan tunggal: hasil aktual akan dipengaruhi efisiensi, pembatasan jaringan, harga listrik, perubahan model bisnis, dan kecepatan adopsi. Perkiraan yang berbeda dapat muncul karena definisi pusat data, cakupan fasilitas, serta asumsi pertumbuhan yang tidak sama (IEA, 2025).

Angka global dapat menutupi variasi regional. Permintaan pusat data terkonsentrasi di sejumlah pasar dan klaster, sehingga dampak jaringan lokal lebih berat dibanding kontribusi globalnya. IEA memperkirakan kebutuhan ini tumbuh cepat di Amerika Serikat, Tiongkok, dan Eropa, sementara Asia Tenggara menjadi salah satu kawasan berkembang. Konteks nasional menentukan apakah tambahan beban dapat diimbangi pembangkit bersih, jaringan transmisi, penyimpanan, serta pengelolaan permintaan.

3. Energi, jaringan, dan keandalan sistem

Pusat data membutuhkan suplai yang stabil, berkualitas, dan tersedia sepanjang waktu. Gangguan listrik dapat menghentikan layanan, merusak pekerjaan komputasi, atau menimbulkan kerugian bagi pengguna yang bergantung pada layanan digital. Karena itu, fasilitas biasanya memiliki UPS, generator cadangan, sistem distribusi redundan, dan kontrak pasokan. Ketahanan ini bermanfaat bagi layanan kritis, tetapi memiliki biaya material dan lingkungan, termasuk pengujian generator, penyimpanan bahan bakar, baterai, dan emisi lokal.

Jaringan listrik direncanakan jauh sebelum suatu beban beroperasi. Sambungan baru berkapasitas besar memerlukan studi teknis, transformator, gardu, jalur transmisi, dan kadang pembangkit tambahan. IEA mencatat antrean sambungan dan keterbatasan komponen dapat memperlambat proyek; kebutuhan pusat data yang terkonsentrasi dapat memperparah hambatan di titik tertentu. Pembangunan fasilitas yang lebih cepat daripada pembangunan jaringan berisiko menimbulkan kemacetan, menambah penggunaan pembangkit fosil lokal, atau memindahkan biaya peningkatan jaringan kepada pelanggan lain.

Fleksibilitas beban menjadi salah satu instrumen untuk mengelola tantangan tersebut. Tidak semua beban AI harus diproses pada lokasi dan menit yang sama. Pelatihan, evaluasi, pencadangan, dan sebagian analitik dapat dijadwalkan ketika jaringan memiliki kapasitas atau listrik rendah emisi tersedia. Pekerjaan dapat dipindahkan antarkawasan bila latensi, privasi, dan aturan data mengizinkan. Namun layanan interaktif dengan kebutuhan respons cepat, transaksi, sistem keselamatan, atau kewajiban layanan tidak dapat diperlakukan sebagai beban yang bebas ditunda.

Operator dapat menawarkan pengurangan beban sementara, menggunakan baterai, atau mengalihkan sebagian pekerjaan komputasi sebagai respons terhadap sinyal jaringan. Partisipasi semacam itu harus didesain dengan standar keandalan yang jelas dan kompensasi yang wajar. Generator cadangan sebaiknya tidak menjadi sumber listrik rutin yang menggantikan perencanaan

jaringan. Penggunaan generator dalam program respons permintaan perlu dibatasi, dipantau emisinya, dan dibandingkan dengan alternatif baterai atau pengurangan beban.

Perencanaan lokasi menjadi instrumen sistem. Data center baru sebaiknya dinilai terhadap kapasitas jaringan, rencana pembangkit, ketersediaan air, risiko iklim, konektivitas, potensi energi bersih, serta beban kumulatif dari proyek lain. Lokasi yang menarik karena dekat pusat bisnis atau kabel bawah laut dapat memiliki kendala lahan dan jaringan. Insentif ekonomi yang hanya mengutamakan investasi modal dapat menghasilkan klaster berlebih di wilayah yang sama. Sinyal tarif dan kebijakan tata ruang dapat mengarahkan pembangunan ke tempat yang lebih siap.

Sistem tenaga juga memerlukan transparansi mengenai siapa membayar perluasan infrastruktur. Jika pembangkit atau gardu baru hanya dibangun untuk satu pelanggan besar, perjanjian perlu menjelaskan pembagian biaya, risiko jika proyek gagal, serta manfaat yang dapat dipakai masyarakat dan industri lain. Prinsipnya adalah mencegah pemindahan biaya privat menjadi kewajiban publik tanpa keterbukaan. Regulator dapat meminta kajian dampak jaringan dan rencana pengelolaan beban sebelum menyetujui sambungan berskala besar.

4. Emisi karbon dan arti listrik rendah emisi

Emisi operasional pusat data ditentukan oleh konsumsi listrik dan intensitas emisi pasokan. Pengadaan sertifikat energi terbarukan atau kontrak pembelian listrik (power purchase agreement/PPA) dapat membantu membiayai kapasitas baru, tetapi klaim lingkungan perlu dinilai berdasarkan tambahan kapasitas, lokasi, waktu produksi, dan dampak pada jaringan. Kontrak tahunan untuk energi bersih di wilayah yang berbeda tidak selalu berarti fasilitas memakai listrik bersih pada setiap jam. Ketika pembangkit terbarukan tidak menghasilkan, jaringan tetap harus memenuhi beban.

Pelaporan emisi berbasis lokasi menggambarkan rata-rata bauran listrik tempat fasilitas beroperasi, sedangkan pelaporan berbasis pasar mencerminkan instrumen kontraktual yang dibeli perusahaan. Keduanya menjawab pertanyaan berbeda. Untuk memahami dampak sistem, organisasi dapat melaporkan kedua angka, metodologi penghitungan, faktor emisi, cakupan kontrak, dan pembelian atribut lingkungan. Pelaporan per jam atau per kawasan semakin berguna untuk menguji apakah pengadaan benar-benar selaras dengan waktu dan lokasi konsumsi.

Sumber energi yang disebut rendah karbon juga tidak otomatis bebas dampak. Pembangkit terbarukan memerlukan lahan, bahan, jaringan, dan sistem penyimpanan atau cadangan. Nuklir memiliki profil emisi operasional rendah tetapi memerlukan tata kelola keselamatan, investasi, dan pengelolaan limbah. Gas alam dapat menyediakan daya yang dapat dikendalikan, tetapi menghasilkan karbon dioksida dan kebocoran metana di rantai pasok. Keputusan bauran energi karenanya perlu mempertimbangkan biaya penuh, keandalan, waktu pembangunan, dan konsekuensi lingkungan.

Emisi tidak langsung mencakup pembuatan server, semikonduktor, baterai, bangunan, dan sistem pendingin. Produksi chip memerlukan proses industri yang intensif energi dan bahan kimia. Perangkat yang cepat usang meningkatkan emisi tertanam serta limbah elektronik. Pengelolaan perangkat dapat mencakup umur pakai yang lebih panjang, perbaikan, pemanfaatan ulang, dan daur ulang yang bertanggung jawab. Keputusan penggantian perlu memperbandingkan efisiensi perangkat baru dengan jejak pembuatan dan potensi perangkat lama untuk pekerjaan yang kurang intensif.

Analisis daur hidup membantu menghindari pemindahan dampak dari satu kategori ke kategori lain. Misalnya, pendinginan evaporatif dapat mengurangi kebutuhan listrik pada kondisi tertentu tetapi memakai air. Pendinginan cair dapat meningkatkan kepadatan komputasi dan efisiensi penghilangan panas, namun menuntut desain infrastruktur, bahan, dan perawatan khusus. Sasaran

keberlanjutan yang baik mencakup energi, karbon, air, material, dan dampak lokal, bukan optimasi satu metrik saja.

Masanet dan kolega (2020) menunjukkan pentingnya pemisahan antara pertumbuhan layanan digital dengan konsumsi energi pusat data. Analisis mereka menekankan bahwa peningkatan efisiensi historis dapat menahan pertumbuhan konsumsi meskipun komputasi meningkat. Temuan itu penting sebagai koreksi terhadap anggapan bahwa volume data otomatis berbanding lurus dengan listrik. Akan tetapi, lonjakan beban AI, karakter akselerator, dan pola penggunaan baru mengharuskan pemantauan terus-menerus; efisiensi masa lalu tidak menjamin konsumsi masa depan terkendali.

5. Air, pendinginan, dan dampak setempat

Panas dari server harus dibuang. Sistem pendingin mekanis menggunakan kipas, chiller, pompa, dan sirkulasi udara atau cairan. Pendinginan evaporatif memanfaatkan penguapan air untuk menurunkan suhu, yang dapat mengurangi energi pendinginan tetapi mengonsumsi air secara langsung. Sistem yang memakai udara luar dapat mengurangi beban pendingin pada iklim tertentu, namun tetap membutuhkan kendali kualitas udara, kelembapan, dan suhu. Pilihan teknis sangat dipengaruhi iklim, rancangan gedung, kepadatan rak, serta kebutuhan keandalan.

Penggunaan air pusat data memiliki dua komponen penting: konsumsi langsung di fasilitas dan konsumsi tidak langsung dalam pembangkitan listrik. Air yang diambil tidak sama dengan air yang dikonsumsi; sebagian dapat dikembalikan ke sistem setelah digunakan, meskipun kualitas dan waktu pengembaliannya bervariasi. Laporan yang menyebut satu angka tanpa batasan tersebut sulit ditafsirkan. Selain volume, lokasi dan musim sangat menentukan arti dampak. Penggunaan yang moderat di daerah berlimpah air berbeda dari penggunaan yang sama di wilayah dengan tekanan air atau kekeringan musiman.

Mytton (2021) menyoroti kesenjangan transparansi pengukuran air di sektor pusat data. Karena perusahaan sering mengungkap angka agregat atau tidak mengungkapkannya sama sekali, masyarakat dan perencana tidak selalu dapat menilai risiko lokal. Kebijakan yang baik meminta pelaporan penggunaan air langsung, sumber air, penggunaan air daur ulang, intensitas WUE, dan konteks risiko daerah aliran sungai. Data komersial yang sensitif dapat dilindungi melalui format pelaporan agregat, tetapi tidak boleh meniadakan akuntabilitas atas dampak publik.

Penggunaan air nonpotabel, air daur ulang, atau air laut yang telah diolah dapat mengurangi persaingan dengan kebutuhan rumah tangga dan pertanian, tetapi tidak selalu tersedia atau tanpa biaya. Infrastruktur pipa dan pengolahan memerlukan investasi, energi, serta izin. Desain pendinginan kering dapat menghindari konsumsi air langsung yang tinggi, namun mungkin meningkatkan penggunaan listrik ketika cuaca panas. Penilaian harus membandingkan konsekuensi untuk keseluruhan sistem lokal, bukan menganggap satu teknologi paling baik pada semua tempat.

Perubahan iklim menambah kompleksitas. Gelombang panas meningkatkan suhu udara dan kebutuhan pendinginan, sementara kekeringan dapat membatasi air. Pada saat yang sama, pusat data membutuhkan keandalan saat sistem listrik menghadapi tekanan puncak. Kajian risiko iklim perlu menguji skenario panas, banjir, kebakaran, gangguan air, dan gangguan jaringan selama umur fasilitas. Adaptasi tidak cukup berupa generator cadangan: desain tapak, sistem drainase, sumber air alternatif, perlindungan pekerja, dan koordinasi dengan pemerintah setempat juga dibutuhkan.

Dampak lokal melampaui energi dan air. Pusat data dapat mengubah penggunaan lahan, menambah lalu lintas konstruksi, menghasilkan kebisingan dari pendingin dan generator, serta meningkatkan permintaan material bangunan. Pekerjaan konstruksi bersifat intensif pada masa pembangunan, sedangkan operasi harian cenderung membutuhkan tenaga kerja lebih sedikit

dibanding industri manufaktur dengan nilai investasi sebanding. Pemerintah daerah dapat memasukkan manfaat ketenagakerjaan, pelatihan, pajak, dan akses jaringan ke dalam evaluasi izin. Perjanjian manfaat masyarakat sebaiknya terukur dan diawasi, bukan sekadar janji umum.

6. Efisiensi pada model, perangkat, dan operasi

Pengurangan konsumsi dapat dimulai sebelum pusat data dibangun: apakah tugas perlu memakai AI generatif, seberapa besar model yang diperlukan, dan seberapa sering pekerjaan harus dilakukan? Desain layanan yang bertanggung jawab memilih metode paling sederhana yang memenuhi standar kualitas. Sistem pencarian biasa, aturan deterministik, atau model kecil dapat lebih hemat untuk tugas rutin. Pemilihan ini tidak merendahkan AI; ia meningkatkan kecocokan antara sumber daya komputasi dan nilai yang dibutuhkan.

Pada tahap model, teknik kuantisasi mengurangi presisi numerik, pruning menghilangkan sebagian koneksi, distilasi memindahkan kemampuan ke model yang lebih kecil, dan sparsity mengurangi operasi yang tidak diperlukan. Teknik tersebut dapat mengurangi latensi serta kebutuhan memori, walau kualitas dan stabilitas perlu diuji. Pengembang perlu menyatakan metrik kualitas, energi, dan batasan penggunaan. Mengoptimalkan satu benchmark saja berisiko menghasilkan model yang hemat di laboratorium tetapi boros pada kondisi produksi.

Pada tahap inferensi, batching menggabungkan pekerjaan serupa untuk meningkatkan utilisasi akselerator. Caching menghindari komputasi ulang untuk permintaan berulang. Pemilihan rute dapat mengarahkan pertanyaan mudah ke model kecil dan kasus sulit ke model lebih besar. Pembatasan panjang konteks dan jawaban dapat mengurangi komputasi tanpa menghilangkan kebutuhan pengguna. Teknik ini memerlukan pengujian privasi dan mutu, terutama ketika cache menyimpan data yang dapat dikenali atau jawaban yang bergantung pada konteks mutakhir.

Utilisasi server merupakan variabel penting. Perangkat yang terus aktif tetapi hanya mengerjakan sebagian kapasitas dapat membuang energi siaga dan energi sistem pendukung. Orkestrasi beban, konsolidasi mesin virtual, penjadwalan, dan pengelolaan kapasitas dapat menaikkan utilisasi. Namun penghematan tidak boleh mengorbankan latensi layanan atau ketahanan. Sumber daya cadangan dapat dibutuhkan untuk pemeliharaan, lonjakan permintaan, atau kegagalan. Tujuannya adalah mengelola cadangan secara terukur, bukan mengejar utilisasi maksimum pada setiap jam.

Pendinginan cair langsung ke chip dan sistem imersi menjadi relevan karena akselerator modern menghasilkan kepadatan panas tinggi. Pemindahan panas lebih dekat ke sumber dapat mengurangi kebutuhan kipas dan mendukung rak dengan daya lebih tinggi. Akan tetapi, retrofit gedung lama, kebocoran, kompatibilitas perangkat, keselamatan teknisi, dan umur cairan pendingin harus diperhitungkan. Penggunaan panas buangan untuk pemanas gedung, rumah kaca, atau proses industri dapat meningkatkan pemanfaatan energi, tetapi hanya layak jika ada pengguna panas yang dekat dan kebutuhan suhunya sesuai.

Pengukuran energi komputasi dalam pengembangan AI masih belum seragam. Henderson dan kolega (2020) mendorong pelaporan jejak energi dan karbon secara sistematis, termasuk perangkat, lokasi, durasi, dan campuran listrik. Praktik tersebut memudahkan peneliti membandingkan pendekatan dan mendorong optimasi. Laporan eksperimen sebaiknya mencatat jumlah percobaan, konfigurasi perangkat keras, penggunaan akselerator, durasi, energi terukur, intensitas karbon yang digunakan, dan mutu hasil. Catatan ini membantu mengungkap biaya eksperimen yang gagal maupun yang berhasil.

Patterson dan kolega (2021) menegaskan bahwa emisi pelatihan model besar tidak hanya ditentukan ukuran model; lokasi, perangkat keras, efisiensi pusat data, dan sumber listrik turut memengaruhi hasil. Kesimpulan kebijakan yang hanya menyoroti skala parameter dapat salah sasaran. Pengembang dapat menggunakan pusat data yang lebih efisien dan listrik yang lebih bersih, tetapi

ukuran model tetap relevan. Pendekatan yang lengkap menilai energi total, emisi, kualitas model, dan manfaat tugas.

7. Pusat data, AI, dan konteks Indonesia

Indonesia memiliki kebutuhan digital yang terus tumbuh serta posisi geografis yang menarik bagi konektivitas regional. Jakarta dan kawasan sekitarnya menjadi pusat kegiatan bisnis, jaringan, dan komputasi; Batam serta Kepulauan Riau menawarkan kedekatan dengan kabel bawah laut dan pusat ekonomi Singapura. Pertumbuhan dapat membawa investasi, kapasitas cloud, layanan lokal, dan peluang pengembangan kompetensi. Namun nilai investasi tidak cukup untuk membuktikan keberlanjutan. Setiap klaster baru perlu dinilai berdasarkan pasokan daya, jaringan, air, ketahanan iklim, dan manfaat yang benar-benar tinggal di daerah.

RUPTL PLN 2025–2034 mencantumkan pusat data sebagai salah satu pendorong pertumbuhan penjualan listrik. Dokumen FAQ resmi Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan menyebut proyeksi penjualan listrik meningkat dari 306 TWh pada 2024 menjadi 511 TWh pada 2034, dengan pusat data termasuk di antara sektor pendorong. Rencana tersebut memuat tambahan kapasitas 69,5 GW, termasuk 52,9 GW energi terbarukan dan penyimpanan serta 16,6 GW pembangkit fosil. Angka tersebut merupakan rencana sistem ketenagalistrikan, bukan jaminan bahwa setiap proyek akan dibangun tepat waktu atau bahwa listrik suatu fasilitas otomatis rendah emisi (Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2025).

Pemberitaan Kementerian ESDM pada 2026 mengutip kapasitas pusat data yang tersedia, berkomitmen, atau dalam pengembangan di Batam mencapai 1,47 GW dan menyebut kontrak pasokan 450 MW antara PLN Batam dan DayOne. Pernyataan tersebut menunjukkan skala pipeline proyek yang signifikan, tetapi kategori “tersedia, berkomitmen, dan dikembangkan” tidak boleh dibaca sebagai beban aktual yang seluruhnya telah beroperasi. Perencana perlu

memisahkan kapasitas yang diumumkan, yang memiliki izin, yang telah memperoleh sambungan, yang sedang dibangun, dan beban terukur pada sistem (Kementerian ESDM, 2026).

Tantangan utama Indonesia ialah menyelaraskan pertumbuhan beban baru dengan dekarbonisasi dan pemerataan akses listrik. Tambahan pembangkit rendah emisi memerlukan jaringan yang dapat mengalirkan daya dari lokasi sumber ke pusat beban. Pembangkit surya dan angin bersifat berubah mengikuti cuaca sehingga membutuhkan kombinasi penyimpanan, fleksibilitas, interkoneksi, dan sumber daya lain. Dalam wilayah kepulauan, penguatan sistem dapat lebih rumit dan mahal. Perencanaan yang baik harus melihat sistem per wilayah, bukan mengandalkan klaim kapasitas nasional agregat.

Kawasan industri dan pusat data bersaing untuk lahan, listrik, air, serta perhatian kebijakan. Jika insentif investasi diberikan tanpa transparansi biaya jaringan dan target efisiensi, masyarakat dapat menanggung biaya yang tidak terlihat melalui tarif, tekanan sumber daya, atau keterlambatan elektrifikasi. Sebaliknya, jika dirancang dengan baik, investasi pusat data dapat mendukung jaringan serat optik, keterampilan teknis, pengembangan energi bersih, dan pemanfaatan panas atau infrastruktur secara bersama. Pemerintah pusat, pemerintah daerah, PLN, regulator, operator pusat data, dan komunitas harus terlibat sebelum keputusan lokasi terkunci.

Konteks regulasi perlu membedakan kewajiban pengelola pusat data, penyedia cloud, perusahaan AI, dan pelanggan institusional. Operator gedung menguasai pendinginan serta pembelian listrik; penyedia layanan menguasai penjadwalan dan desain model; pelanggan menentukan skala penggunaan dan kebutuhan kinerja. Tanggung jawab yang tersebar dapat menimbulkan celah akuntabilitas. Kontrak layanan sebaiknya memuat indikator energi dan emisi yang dapat diverifikasi, batas ketersediaan, lokasi pemrosesan jika relevan, serta mekanisme pelaporan bagi pelanggan besar.

Pemerintah Indonesia dapat menyusun kerangka data energi pusat data yang seragam. Pelaporan dapat mencakup konsumsi listrik tahunan dan daya puncak, PUE, bauran energi berbasis lokasi dan pasar, emisi, penggunaan air, sumber air, serta kapasitas beban fleksibel. Untuk melindungi rahasia dagang, regulator dapat menerima data rinci dan menerbitkan ringkasan teragregasi menurut wilayah dan jenis fasilitas. Keterbukaan terukur memungkinkan perencanaan, pengawasan insentif, dan pembandingan kinerja tanpa mengungkap arsitektur sistem yang sensitif.

8. Ekonomi, tata kelola, dan efek pantulan

Pusat data merupakan investasi modal besar dengan keputusan yang berumur panjang. Perusahaan mempertimbangkan harga listrik, pajak, kepastian regulasi, konektivitas, risiko politik, dan ketersediaan tenaga kerja. Pemerintah dapat terdorong menawarkan kemudahan untuk menarik investasi. Namun kebijakan yang hanya mengejar nilai investasi awal mengabaikan biaya layanan jaringan, konsumsi air, emisi, dan penggunaan lahan. Analisis manfaat-biaya publik perlu memasukkan nilai tambah ekonomi lokal, ketahanan layanan, transfer keterampilan, dan biaya eksternal selama masa operasi.

Efek pantulan penting dalam menilai AI. Jika komputasi menjadi lebih murah dan cepat, organisasi mungkin menerapkan model pada lebih banyak proses. Sebagian aplikasi baru memberi manfaat nyata, seperti deteksi kerusakan jaringan atau optimasi logistik. Sebagian lain mungkin menambah komputasi tanpa nilai sepadan. Evaluasi perlu mengukur energi per hasil yang berguna, bukan sekadar jumlah permintaan atau keluaran. Pada level institusi, penggunaan AI sebaiknya dikaitkan dengan tujuan layanan dan indikator kinerja yang dapat diuji.

AI juga dapat membantu sistem energi: memprediksi beban dan produksi terbarukan, mendeteksi gangguan jaringan, mengoptimalkan pendinginan, serta memperbaiki pemeliharaan. IEA mengidentifikasi potensi AI untuk efisiensi

operasi energi, tetapi manfaatnya tidak terjadi otomatis. Sistem perlu data berkualitas, validasi, keamanan siber, tenaga ahli, dan mekanisme pengawasan manusia. Penghematan dari optimasi harus diukur terhadap konsumsi tambahan perangkat komputasi serta perubahan operasi yang ditimbulkan.

Tata kelola perusahaan dapat menghubungkan keputusan teknis dan tujuan iklim. Dewan atau pimpinan perlu menetapkan batas dan target, mengaitkan anggaran komputasi dengan nilai layanan, mewajibkan pelaporan eksperimen, dan menilai pemasok perangkat keras. Pengadaan cloud dapat meminta data emisi dan energi berdasarkan lokasi serta periode. Tim produk dapat menjalankan penilaian dampak sebelum fitur AI dirilis secara luas. Tim keberlanjutan harus bekerja bersama tim infrastruktur dan ilmu data, bukan hanya menyusun laporan akhir tahun.

Ruang lingkup kebijakan publik mencakup standar efisiensi fasilitas, pengungkapan penggunaan energi dan air, perencanaan interkoneksi, sinyal tarif yang merefleksikan biaya, insentif tambahan bagi pasokan bersih, serta tata ruang yang mempertimbangkan risiko lokal. Regulasi tidak harus menentukan model AI mana yang boleh digunakan. Ia dapat meminta transparansi, mengurangi pemborosan, menginternalisasi biaya jaringan, dan memastikan prosedur partisipasi masyarakat. Standar yang dapat diperbarui lebih baik daripada angka yang cepat usang seiring perubahan teknologi.

Keadilan energi menuntut pembagian manfaat dan beban yang wajar. Pusat data sering melayani pelanggan global, sementara dampak pembangkit, transmisi, air, kebisingan, dan penggunaan lahan terjadi di sekitar lokasi. Mekanisme konsultasi masyarakat perlu dimulai sebelum izin diberikan, menyediakan informasi yang dapat dipahami, dan memberi saluran pengaduan. Komitmen investasi lokal dapat mencakup pelatihan teknisi, pengadaan barang dan jasa lokal, dukungan pendidikan, dan kontribusi pada infrastruktur yang juga digunakan warga.

9. Kerangka keputusan untuk pertumbuhan yang berkelanjutan

Keputusan pertama adalah menilai kebutuhan. Sebelum membangun kapasitas baru atau menambah model, organisasi perlu menyatakan masalah yang hendak diselesaikan, keluaran yang dianggap berhasil, dan alternatif non-AI. Evaluasi ini mencegah komputasi dipakai sebagai tujuan tersendiri. Bila AI memang diperlukan, pengujian dapat membandingkan model kecil dan besar, pendekatan lokal dan cloud, serta tingkat kualitas yang dibutuhkan.

Keputusan kedua adalah merancang pengukuran dari awal. Energi server, energi fasilitas, daya puncak, bauran listrik, emisi, air, utilisasi, dan kinerja layanan perlu dicatat dengan definisi yang sama selama tahap uji coba dan operasi. Pelaporan harus membedakan data aktual dari estimasi, serta menjelaskan faktor emisi, periode, batas organisasi, dan ketidakpastian. Tanpa baseline, klaim penghematan tidak dapat diverifikasi.

Keputusan ketiga adalah memilih lokasi dan pasokan sebagai satu paket. Evaluasi harus mencakup kapasitas jaringan, sumber energi tambahan, kemudahan transmisi, risiko air, panas ekstrem, banjir, konektivitas, dan biaya untuk pelanggan lain. PPA atau sertifikat perlu dievaluasi dari sisi tambahanitas, lokasi, waktu, dan pengaruhnya terhadap sistem. Penyimpanan energi atau sumber fleksibel dapat meningkatkan nilai energi terbarukan, tetapi harus disesuaikan dengan profil beban.

Keputusan keempat adalah mengelola permintaan secara aktif. Pekerjaan yang dapat ditunda dijadwalkan sesuai ketersediaan jaringan dan listrik rendah emisi. Sistem inferensi diarahkan ke model yang sesuai, permintaan duplikat di-cache, dan kapasitas server disesuaikan dengan kebutuhan. Kebijakan layanan perlu menetapkan beban yang tidak boleh ditunda, persyaratan latensi, serta mekanisme pemulihan jika respons jaringan diminta.

Keputusan kelima adalah menilai dampak sepanjang siklus hidup dan pada masyarakat. Pengadaan perangkat mempertimbangkan umur, perbaikan, efisiensi, dan daur ulang. Pendinginan mempertimbangkan air dan listrik dalam

konteks lokal. Rencana konstruksi mencakup dampak lalu lintas, kebisingan, penggunaan lahan, pekerjaan, dan keselamatan. Konsultasi masyarakat dan pemantauan pasca-operasi membantu mengoreksi asumsi awal.

Untuk memperjelas penerapan, bayangkan dua ilustrasi hipotetis. Pertama, sebuah klaster di kawasan metropolitan hendak menambah kapasitas GPU besar. Studi awal menemukan jaringan lokal padat dan air musiman terbatas. Pilihan yang lebih bertanggung jawab ialah mengurangi kapasitas tahap pertama, memastikan sambungan baru tidak membebankan biaya tanpa kesepakatan, menggunakan pendinginan yang membatasi air bersih, serta memindahkan pekerjaan pelatihan yang dapat dijadwalkan ke jam dan lokasi yang lebih sesuai. Ilustrasi ini bukan laporan proyek nyata; ia menunjukkan bagaimana kendala setempat mengubah desain.

Ilustrasi kedua adalah kampus komputasi regional yang direncanakan dekat sumber energi terbarukan dan kabel serat optik. Pengembang merancang fasilitas bertahap, mengadakan pasokan bersih dengan tambahan kapasitas yang dapat diverifikasi, menggunakan baterai untuk dukungan jaringan, mengungkap data air dan energi, serta mengadakan pelatihan teknisi setempat. Nilai proyek tidak hanya dihitung dari kapasitas server, tetapi juga dari kemampuan sistem menyerap energi rendah emisi dan menciptakan manfaat daerah. Keberhasilan tetap bergantung pada jaringan, izin, dan komitmen yang dapat diaudit.

10. Agenda riset dan pendidikan

Banyak angka publik tentang energi AI masih berasal dari estimasi karena perusahaan tidak mengungkap pengukuran terperinci. Riset yang berguna perlu membangun metodologi yang dapat direplikasi untuk mengukur energi per tugas, termasuk jenis akselerator, perangkat lunak, utilisasi, lokasi, pendinginan, dan bauran listrik. Dataset harus mencakup model kecil dan besar, permintaan teks dan multimodal, serta pola kerja produksi. Pelaporan rentang dan

ketidakpastian akan lebih informatif daripada satu angka yang memberi kesan presisi palsu.

Riset sistem energi perlu menghubungkan model proyeksi AI dengan data interkoneksi, lokasi pusat data, pembangkit, transmisi, air, dan permintaan masyarakat. Skenario harus menguji pertumbuhan rendah, dasar, dan tinggi, serta perubahan efisiensi. Analisis perlu mempertimbangkan efek pantulan: seberapa besar efisiensi mengurangi energi per hasil dan seberapa jauh biaya lebih rendah meningkatkan volume penggunaan. Model harus membedakan kapasitas yang diumumkan dari beban aktual.

Pendidikan manajemen dan teknologi perlu membentuk profesional yang memahami keterkaitan antara komputasi dan infrastruktur fisik. Mahasiswa ilmu komputer dapat mempelajari pengukuran energi dan daur hidup perangkat; mahasiswa manajemen dapat menilai biaya penuh dan risiko pasokan; insinyur tenaga dapat memahami profil beban digital; pembuat kebijakan dapat menafsirkan metrik dan klaim pengadaan energi. Kurikulum lintas disiplin memperkecil kesenjangan antara keputusan produk dan konsekuensi operasional.

Perlu juga kajian Indonesia yang berangkat dari karakter wilayah, bukan sekadar menyalin angka global. Data tentang beban pusat data, konsumsi air, bauran listrik per jam, cadangan daya, dan manfaat ekonomi lokal harus diperbaiki. Universitas, pemerintah, dan sektor swasta dapat mengembangkan standar terbuka untuk studi energi komputasi dalam bahasa Indonesia. Kolaborasi ini dapat memperkuat kapasitas audit independen dan membantu daerah menilai proyek secara konsisten.

11. Prioritas pelaksanaan dan ukuran keberhasilan

Penerapan kerangka ini dapat dimulai dengan tata kelola bertahap. Pada tahap perencanaan, pemilik proyek menerbitkan ringkasan kebutuhan beban, profil waktu, kebutuhan air, skenario pertumbuhan, dan rencana pasokan. Pada tahap

konstruksi, regulator memantau pemenuhan izin, efisiensi fasilitas, serta komitmen sambungan dan pembangkit. Pada tahap operasi, operator menyampaikan data aktual dan meninjau ulang target secara berkala. Tahapan ini membantu membandingkan klaim investasi dengan kinerja yang benar-benar tercapai.

Indikator keberhasilan tidak cukup berupa kapasitas energi terbarukan yang dikontrak atau PUE fasilitas. Pemerintah dan perusahaan dapat memantau konsumsi total, energi per layanan bermutu, daya puncak, utilisasi server, intensitas emisi berdasarkan lokasi dan pasar, penggunaan air menurut sumber dan risiko daerah, serta proporsi beban yang mampu merespons sinyal jaringan. Metrik kinerja layanan seperti latensi, ketersediaan, dan akurasi perlu disandingkan supaya penghematan tidak diperoleh dengan menurunkan mutu secara tersembunyi.

Keterbukaan perlu dibangun dengan perlindungan data yang proporsional. Perusahaan mungkin perlu menjaga rincian arsitektur, harga kontrak, dan keamanan sistem. Namun konsumsi energi agregat, emisi, sumber air, daya puncak, serta kepatuhan izin menyangkut perencanaan dan kepentingan publik. Regulator dapat menerima data fasilitas secara rahasia, memeriksanya melalui audit independen, lalu merilis statistik wilayah. Skema ini memberi pemerintah informasi yang diperlukan tanpa membuka rincian teknis yang dapat membahayakan operasi.

Pengembangan pusat data yang berkelanjutan juga memerlukan pengujian atas janji fleksibilitas. Operator dapat mendemonstrasikan seberapa cepat beban nonkritis dapat dikurangi, berapa lama pengurangan dipertahankan, dan bagaimana pemulihan dilakukan. Jaringan kemudian dapat merancang insentif berdasarkan layanan yang terukur, bukan kapasitas teoretis. Uji coba harus mencatat biaya baterai, degradasi perangkat, dampak pada ketersediaan, dan pengurangan pembangkit puncak agar manfaat sistem dapat dibandingkan secara adil.

Pada akhirnya, produktivitas komputasi sebaiknya dibahas sebagai nilai yang dihasilkan per energi dan material yang digunakan. Ukuran tersebut tidak menggantikan hak atas akses teknologi maupun kebebasan riset, tetapi menyediakan dasar untuk memilih investasi. Jika dua pendekatan memberi manfaat yang setara, organisasi memiliki alasan praktis untuk memilih yang lebih hemat dan lebih mudah dipasok dengan energi rendah emisi. Jika kebutuhan sosial menuntut komputasi yang besar, transparansi justru membantu mengupayakan pasokan dan infrastruktur yang memadai.

Kesimpulan

Pusat data adalah infrastruktur energi yang memungkinkan layanan digital dan AI berkembang. Konsumsi listrik global diperkirakan meningkat tajam dalam dekade ini, sementara dampak yang paling terasa dapat muncul pada jaringan dan sumber daya lokal. AI meningkatkan kebutuhan komputasi melalui pelatihan dan inferensi, tetapi efisiensi perangkat, model, dan operasi dapat menekan energi per pekerjaan. Hasil akhirnya bergantung pada apakah efisiensi disertai pengelolaan permintaan atau justru diikuti perluasan penggunaan tanpa batas.

Pertumbuhan berkelanjutan membutuhkan pengukuran yang transparan dan menyeluruh: energi, daya, emisi, air, material, dan dampak lokasi. PUE berguna tetapi tidak cukup. Pengadaan listrik bersih perlu menunjukkan tambahan kapasitas dan kecocokan waktu serta lokasi. Perencanaan jaringan harus memperhitungkan klaster pusat data, biaya sambungan, fleksibilitas beban, dan keandalan. Pengelolaan air dan risiko iklim perlu disesuaikan dengan keadaan daerah, disertai konsultasi masyarakat yang bermakna.

Bagi Indonesia, RUPTL menunjukkan bahwa pusat data mulai dipertimbangkan dalam proyeksi permintaan listrik dan rencana kapasitas. Tantangannya ialah memastikan laju pembangunan fasilitas selaras dengan penguatan jaringan serta pertumbuhan pasokan rendah emisi. Transparansi data, izin berbasis

kapasitas sistem, insentif yang tepat, dan perjanjian manfaat lokal dapat membantu menghindari biaya yang dialihkan kepada masyarakat. Pemerintah, operator, penyedia AI, pelanggan, dan akademisi perlu berbagi tanggung jawab sesuai kendali masing-masing.

AI berkelanjutan bukan sekadar persoalan memperbaiki pendingin atau membeli sertifikat energi. Ia menuntut keputusan yang menghubungkan tujuan layanan, intensitas komputasi, lokasi fisik, sistem tenaga, siklus hidup perangkat, dan keadilan sosial. Dengan mengukur manfaat dan biaya secara bersamaan, masyarakat dapat memperoleh nilai dari inovasi digital sambil menjaga agar pertumbuhan komputasi tetap berada dalam batas kemampuan energi dan lingkungan.

Glossarium

Akselerator: Prosesor khusus, seperti GPU atau unit pemroses AI, yang mempercepat operasi komputasi tertentu.

Beban dasar: Kebutuhan listrik minimum yang relatif terus berlangsung pada suatu sistem atau fasilitas.

Carbon Usage Effectiveness (CUE): Metrik yang menghubungkan emisi karbon operasional pusat data dengan energi peralatan TI.

Efek pantulan: Kenaikan penggunaan setelah efisiensi menurunkan biaya atau hambatan per unit layanan.

Inferensi: Tahap ketika model terlatih memproses masukan untuk menghasilkan prediksi, klasifikasi, atau jawaban.

Kuantisasi: Teknik mengurangi presisi representasi numerik model untuk menekan kebutuhan komputasi atau memori.

PPA: Perjanjian pembelian listrik antara pembeli dan pemasok, sering dipakai untuk mendukung pengadaan energi jangka panjang.

Power Usage Effectiveness (PUE): Rasio energi total fasilitas pusat data terhadap energi yang digunakan peralatan TI.

Pusat data: Fasilitas yang menampung server, penyimpanan, jaringan, dan sistem pendukung untuk memproses serta menyimpan data.

Tambahanitas: Derajat suatu pembelian energi atau investasi benar-benar mendorong kapasitas bersih baru yang tanpa pembelian itu tidak terjadi.

Water Usage Effectiveness (WUE): Metrik penggunaan air langsung pusat data relatif terhadap energi peralatan TI.

Workload shifting: Pemindahan waktu atau lokasi pemrosesan komputasi untuk memanfaatkan kapasitas jaringan dan energi yang lebih sesuai.

Daftar Pustaka

De Vries, A. (2023). The growing energy footprint of artificial intelligence. Joule, 7(10), 2191–2194. https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004

Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. (2025). FAQ RUPTL PLN 2025–2034. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/daa0b-faq-ruptl-pln-2025-2034.pdf

Henderson, P., Hu, J., Romoff, J., Brunskill, E., Jurafsky, D., & Pineau, J. (2020). Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning. Journal of Machine Learning Research, 21(248), 1–43. https://jmlr.org/papers/v21/20-312.html

International Energy Agency. (2025). Energy and AI. https://www.iea.org/reports/energy-and-ai

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2026). Pusat data butuh tambahan 20 GW, Bahlil siapkan energi bersih dan hub baru di Batam–Karimun–Bintan. https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/pusat-data-butuh-tambahan-20-gw-bahlil-siapkan-energi-bersih-dan-hub-baru-di-batam-karimun-bintan

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

Mytton, D. (2021). Data centre water consumption. npj Clean Water, 4, Article 11. https://doi.org/10.1038/s41545-021-00101-w

Patterson, D., Gonzalez, J., Le, Q., Liang, C., Munguia, L.-M., Rothchild, D., So, D., Texier, M., & Dean, J. (2021). Carbon emissions and large neural network training. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.10350

Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and policy considerations for deep learning in NLP. In Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (pp. 3645–3650). Association for Computational Linguistics. https://doi.org/10.18653/v1/P19-1355