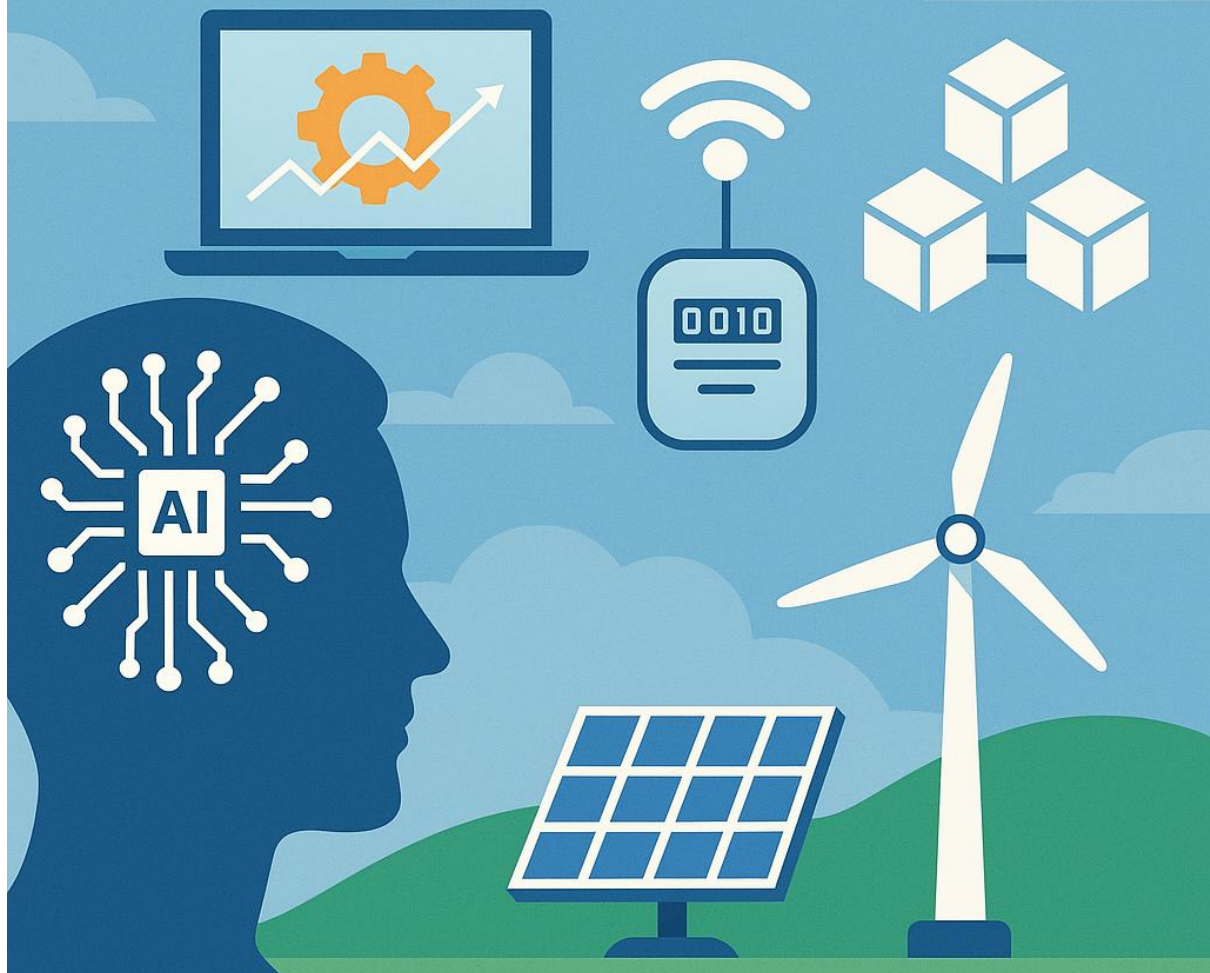


AI, IoT, dan Blockchain dalam Manajemen Energi



Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD

Guru Besar Manajemen NUP: 9903252922

Rektor, Universitas Cenderawasih, Papua (1978-1988)

Rektor, Universitas Kristen Krida Wacana, Jakarta (1991-2000)

Ketua Dewan Guru Besar, IPB-University, Bogor (2005-2006)

Data Analyst, dan Ketua Senat Akademik, IBM-ASMI, Jakarta

© RUDYCT Academic Series

rudymct75@gmail.com

Bogor, Indonesia

10 December 2025

DIGITAL ENERGY TRANSITION: AI, IOT, DAN BLOCKCHAIN DALAM MANAJEMEN ENERGI

I. Pendahuluan: Transisi Energi Masuk ke Era Digital

Transisi energi global menuju sistem **rendah karbon** sudah tidak bisa ditawar, namun laju perubahannya masih jauh dari cukup. Laporan berbagai lembaga menunjukkan bahwa meskipun kapasitas energi terbarukan (surya, angin, hidro, dsb.) terus bertambah, **emisi global tetap meningkat** karena pertumbuhan permintaan energi – termasuk dari pusat data AI, industrialisasi baru, dan elektrifikasi transportasi. ([Financial Times](#))

Dalam konteks ini, transisi energi bukan lagi sekadar soal mengganti PLTU batubara dengan PLTS atau PLTB, tetapi juga tentang **mendigitalisasi sistem energi**: membuat jaringan listrik, pembangkit, bangunan, dan konsumen menjadi “pintar” (smart), saling terhubung, dan dapat dikendalikan secara adaptif.

Tiga teknologi digital yang semakin sering dibahas sebagai **pilar transisi energi digital** adalah:

1. **Artificial Intelligence (AI)** – untuk analisis data, prediksi, optimasi, dan pengambilan keputusan real-time. ([MDPI](#))
2. **Internet of Things (IoT)** – untuk menghubungkan jutaan sensor, meter, dan perangkat energi sehingga data dapat dipantau dan dikendalikan dari mana saja. ([Scientific Repository](#))
3. **Blockchain** – untuk mencatat transaksi energi secara transparan, aman, dan terdistribusi, khususnya dalam skema **peer-to-peer**

(P2P) energy trading, sertifikasi energi hijau, dan koordinasi mikrogrid.[\(Nature\)](#)

Artikel ini mengulas secara naratif bagaimana AI, IoT, dan blockchain membentuk “**Digital Energy Transition**”: mengubah manajemen energi dari sistem analog–terpusat menjadi sistem digital–terdesentralisasi, serta implikasinya bagi negara berkembang seperti Indonesia.

II. Digital Energy Transition dan Smart Grid: Kerangka Dasar

1. Dari Grid Konvensional ke Smart Grid

Sistem tenaga listrik tradisional dirancang **satu arah**:

pembangkit besar → transmisi → distribusi → konsumen pasif.

Transisi energi menghadirkan tantangan baru:

- Integrasi **energi terbarukan intermiten** (surya, angin) yang fluktuatif,
- Munculnya **prosumers** (konsumen-produsen) dengan PLTS atap dan baterai,
- Kebutuhan **respons beban (demand response)** untuk menghindari lonjakan puncak,
- Ancaman **cuaca ekstrem** dan risiko keandalan sistem.

Untuk menjawab ini, muncul konsep **smart grid** – jaringan listrik yang diperkaya **sensor, komunikasi, dan algoritma pintar** untuk mengelola suplai dan permintaan secara dinamis. Smart grid menjadi laboratorium alami bagi penerapan AI, IoT, dan blockchain.[\(Pandawan Journal\)](#)

2. Digital Energy Transition

Istilah **digital energy transition** merujuk pada proses integrasi teknologi digital (AI, IoT, blockchain, big data) ke seluruh rantai nilai sistem energi:

- **Upstream**: perencanaan kapasitas pembangkit, integrasi terbarukan, operasi sistem tenaga.
- **Midstream**: transmisi, distribusi, pemeliharaan aset, proteksi dan kontrol jaringan.

- **Downstream:** manajemen energi bangunan, industri, kendaraan listrik, mikrogrid, dan trading energi berbasis platform.

Kajian terbaru menunjukkan bahwa digitalisasi energi mampu:

- Meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem,
- Mempercepat integrasi energi terbarukan,
- Mendorong partisipasi aktif konsumen dalam pengelolaan energi,
- Menghadirkan model bisnis baru (misalnya P2P trading, layanan fleksibilitas, dsb.).([Imaleidykla.lt](http://maleidykla.lt))

AI, IoT, dan blockchain bukan berdiri sendiri, tetapi bekerja **sebagai ekosistem**:

- IoT mengumpulkan data dan memberi kemampuan kendali,
- AI menganalisis dan membuat keputusan,
- Blockchain mencatat dan memverifikasi transaksi serta koordinasi antar aktor.

III. Artificial Intelligence dalam Manajemen Energi

AI dalam konteks sistem energi bisa dipahami sebagai penggunaan **machine learning, deep learning, dan teknik kecerdasan komputasional** untuk mengelola kompleksitas jaringan listrik modern. (MDPI)

1. Peramalan (Forecasting) Beban dan Produksi Terbarukan

Salah satu peran AI paling penting adalah **peramalan jangka pendek dan menengah**:

- **Forecasting beban (load forecasting)** – memprediksi kebutuhan listrik jam-jaman atau harian untuk mengatur operasi pembangkit.
- **Forecasting produksi surya dan angin** – memanfaatkan data cuaca, radiasi, kecepatan angin, dan histori produksi untuk mengestimasi output PLTS/PLTB. (MDPI)

Model AI (misalnya LSTM, random forests, ensemble models) terbukti meningkatkan akurasi peramalan dibanding metode statistik konvensional, sehingga:

- Mengurangi kebutuhan cadangan putar (spinning reserve),
- Menekan biaya operasi sistem (economic dispatch),

- Meminimalkan curtailment (pembuangan energi terbarukan karena jaringan tidak siap).

2. Optimalisasi Operasi Sistem Tenaga

AI juga digunakan dalam:

- **Optimal power flow (OPF)** – mencari konfigurasi aliran daya yang meminimalkan biaya dan kerugian jaringan dengan tetap menjaga batas tegangan, arus, dan keamanan.
- **Unit commitment** – menentukan unit pembangkit mana yang harus menyala atau padam untuk memenuhi beban dengan biaya dan emisi minimum.
- **Pengaturan frekuensi dan tegangan** – AI membantu menjaga stabilitas frekuensi sistem dan profil tegangan, terutama ketika banyak sumber terbarukan terhubung. ([OUP Academic](#))

Dengan data real-time dari sensor dan SCADA, algoritma AI bisa:

- Mendeteksi kondisi abnormal jauh sebelum terjadi gangguan,
- Mengambil keputusan korektif (misalnya re-dispatch, reconfiguration) secara otomatis atau semi-otomatis.

Ini sangat penting ketika sistem energi makin kompleks dan beban kritis (misalnya **data center AI** yang sangat intensif energi) terus bertumbuh. ([Chron](#))

3. Predictive Maintenance dan Manajemen Aset

Dalam pembangkit, gardu, dan jaringan transmisi:

- Sensor IoT mengirim data getaran, suhu, arus, tegangan, dan kondisi lingkungan,
- AI menganalisis pola untuk **memprediksi kegagalan peralatan** sebelum terjadi (predictive maintenance). ([Imaleidykla.lt](#))

Manfaatnya:

- Mengurangi downtime tak terencana,
- Mengoptimalkan jadwal pemeliharaan (tidak terlalu sering, tidak terlalu jarang),
- Memperpanjang umur aset dan menurunkan biaya O&M.

Kasus konkret: perusahaan utilitas besar di Brasil (Eletrobras)

menggandeng platform AI untuk memodernisasi sistem transmisi,

menggunakan AI untuk **pemantauan real-time dan penanganan gangguan** yang lebih cepat dan presisi. ([Reuters](#))

4. Manajemen Beban dan Demand Response Berbasis AI

AI memungkinkan desain **program demand response (DR)** yang lebih canggih:

- Memprediksi perilaku konsumsi pelanggan berdasarkan data historis, cuaca, harga, dan pola aktivitas,
- Mengirim sinyal harga dinamis atau instruksi otomatis ke perangkat (AC, pemanas air, kendaraan listrik) untuk menurunkan beban saat puncak,
- Mengoptimalkan kenyamanan pengguna vs penghematan biaya dan stabilitas sistem. ([Pandawan Journal](#))

Dengan bantuan AI, DR dapat:

- Menjadi lebih **personalized** (berbasis profil pelanggan),
- Disinergikan dengan produksi surya atap dan baterai rumah,
- Menjadi sumber “pembangkit virtual” (virtual power plant) yang membantu operator sistem tanpa perlu membangun pembangkit fisik baru.

5. AI dan Modernisasi Grid: Contoh Global

Selain Brasil, berbagai utilitas di India dan negara lain memanfaatkan AI dan analitik canggih untuk:

- Menyusun perencanaan integrasi baterai dan terbarukan,
- Mengelola **battery energy storage systems (BESS)** untuk mengurangi lonjakan beban dan menstabilkan grid,
- Meningkatkan akurasi peramalan beban dan mengurangi black-out. ([The Times of India](#))

Contoh-contoh ini menunjukkan: **AI bukan sekadar “tambahan digital”**, tetapi kunci untuk menjaga keandalan ketika sistem energi makin hijau dan makin kompleks.

IV. Internet of Things (IoT) dalam Manajemen Energi

Jika AI adalah “otak”, maka **IoT adalah indera dan saraf** dalam sistem energi digital. IoT memungkinkan setiap komponen – dari pembangkit

besar hingga lampu rumah – menjadi “node” yang dapat memantau dan berkomunikasi.

1. Smart Metering dan Monitoring Real-Time

Smart meter dan perangkat IoT lain menjadi tulang punggung **smart energy management**:

- Mengirim data konsumsi listrik secara hampir real-time,
- Mengurangi kebutuhan pembacaan meter manual,
- Memungkinkan penagihan yang lebih akurat,
- Menjadi dasar program demand response dan tarif dinamis. ([Onomondo](#))

Studi tentang smart metering menunjukkan manfaat:

- Efisiensi operasional (biaya operasional utilitas turun),
- Deteksi gangguan lebih cepat (outage detection),
- Edukasi konsumen melalui aplikasi yang menampilkan pola konsumsi dan tips penghematan. ([Onomondo](#))

2. Smart Grid dan Otomasi Berbasis IoT

IoT mentransformasi jaringan listrik menjadi **jaringan sensorik**:

- Sensor di gardu dan jaringan distribusi memonitor arus, tegangan, suhu, dan status peralatan,
- Perangkat proteksi dan kontrol (recloser, switch) dapat dikendalikan dari jarak jauh,
- Data dikumpulkan ke pusat atau ke edge computing untuk dianalisis AI. ([Scientific Repository](#))

Ini memungkinkan:

- Re-konfigurasi jaringan otomatis saat terjadi gangguan,
- Optimasi aliran daya di jaringan distribusi (misalnya untuk mengakomodasi PLTS atap),
- Implementasi skema **autonomous demand response** di tingkat mikrogrid dan bangunan. ([Scientific Repository](#))

3. IoT di Bangunan, Industri, dan Kota Cerdas

Di bangunan dan kawasan industri, IoT menghubungkan:

- Sensor suhu, kelembapan, cahaya, kehadiran (occupancy),
- HVAC, pencahayaan, lift, motor listrik, dan peralatan produksi.

Dengan integrasi IoT + AI:

- Sistem dapat menyesuaikan pengaturan AC, pencahayaan, dan proses produksi secara otomatis untuk menghemat energi tanpa mengorbankan kenyamanan atau produktivitas,
- Manajer fasilitas dapat memantau konsumsi energi per ruang, per jalur produksi, bahkan per mesin. ([ScienceDirect](#))

Dalam konteks **kota cerdas (smart cities)**, IoT untuk energi terhubung dengan:

- Sistem transportasi (pengisian kendaraan listrik, manajemen lalu lintas),
- Penerangan jalan pintar,
- Infrastruktur pengisian EV yang dioptimalkan berdasarkan status jaringan dan harga energi.

4. IoT untuk Energi Terbarukan dan Mikrogrid

Untuk PLTS dan PLTB, IoT memfasilitasi:

- Monitoring output per panel atau per turbin,
- Deteksi kerusakan dan penurunan performa (soiling, shading, aging),
- Koordinasi operasi di **mikrogrid** yang menggabungkan surya, angin, baterai, dan genset. ([ScienceDirect](#))

Pada skala rumah tangga atau desa:

- IoT memungkinkan “**plug-and-play microgrid**” – sistem kecil yang dapat berdiri sendiri atau terhubung ke jaringan utama, dengan kontrol otomatis atas kapan menyalakan baterai, kapan mengimpor dari jaringan, dan kapan mengekspor.

V. Blockchain dalam Manajemen Energi

Jika IoT menyajikan data dan AI mengolahnya, **blockchain** menyediakan “**lapisan kepercayaan**” – ledger digital terdistribusi yang mencatat transaksi secara transparan dan sulit dimanipulasi.

1. Konsep Dasar Blockchain dalam Energi

Karakteristik penting blockchain:

- **Desentralisasi** – tidak ada satu otoritas tunggal; node jaringan memverifikasi transaksi.
- **Immutability** – catatan transaksi sulit diubah setelah tersimpan.
- **Smart contracts** – program yang berjalan di atas blockchain dan mengeksekusi transaksi/aturan secara otomatis jika kondisi terpenuhi.

Dalam konteks energi, blockchain digunakan untuk:

- Mencatat transaksi jual-beli energi (kWh) antar aktor,
- Menjaga jejak (traceability) asal energi (misal: benar-benar dari surya/angin),
- Mengelola siklus hidup **Renewable Energy Certificates (REC)** dan kredit karbon.[\(Ijesty\)](#)

2. Peer-to-Peer (P2P) Energy Trading

Salah satu aplikasi paling populer adalah **P2P energy trading**:

- Rumah dengan PLTS atap dan baterai dapat menjual surplus energi langsung ke tetangga atau ke pelaku lain dalam mikrogrid,
- Harga dapat ditentukan melalui mekanisme pasar lokal berbasis smart contract,
- Transaksi otomatis dicatat di blockchain tanpa perlu perantara tradisional.[\(ScienceDirect\)](#)

Studi empiris menunjukkan bahwa:

- Blockchain dapat mengelola >90% transaksi energi mikrogrid secara otomatis melalui smart contract,
- Transparansi meningkat, biaya transaksi turun,
- Kepercayaan antar pelaku (prosumers, aggregator, utilitas) dapat diperkuat.[\(ResearchGate\)](#)

3. Sertifikasi Energi Hijau dan Rantai Pasok

Blockchain juga digunakan untuk:

- Melacak asal energi hijau dari pembangkit ke konsumen akhir,
- Mengelola **REC, guarantees of origin**, dan kredit karbon agar tidak terjadi "double counting",
- Memantau rantai pasok **green hydrogen** dan produk energi rendah karbon lainnya.[\(Nature\)](#)

Ini penting bagi perusahaan dan negara yang ingin membuktikan bahwa:

- Listrik yang mereka gunakan benar-benar berasal dari sumber terbarukan,
- Produk ekspor mereka (misalnya baja hijau atau amonia hijau) memenuhi standar hijau internasional.

4. Tantangan Blockchain dalam Energi

Walaupun menawarkan peluang, adopsi blockchain di sektor energi menghadapi berbagai kendala:

- **Skalabilitas** – kapasitas transaksi per detik vs kebutuhan real-time sistem energi,
- **Konsumsi energi jaringan blockchain** – meski ini semakin teratasi dengan mekanisme konsensus yang lebih efisien,
- **Regulasi** – kerangka hukum P2P trading, tarif, perlindungan konsumen, dan peran utilitas belum seragam, terutama di negara berkembang,
- **Interoperabilitas** – integrasi dengan sistem SCADA, billing, dan platform lain. ([JRC Publications Repository](#))

Di sinilah penelitian dan pilot project memainkan peran penting untuk menguji arsitektur yang tepat, termasuk di Indonesia. ([heca-analitika.com](#))

VI. Sinergi AI, IoT, dan Blockchain: Menuju Smart Energy Management Systems

Penelitian terbaru menekankan bahwa manfaat terbesar muncul ketika **AI, IoT, dan blockchain diintegrasikan** ke dalam satu sistem manajemen energi cerdas, bukannya digunakan terpisah. ([ResearchGate](#))

1. Arsitektur Konseptual

Secara konseptual, arsitektur *Digital Smart Energy Management System* dapat digambarkan sebagai:

1. Lapisan Fisik (Physical Layer)

- Pembangkit (PLTS, PLTB, baterai, genset), beban (rumah, industri, EV), jaringan transmisi dan distribusi.
- 2. **Lapisan IoT dan Penginderaan**
 - Smart meter, sensor, aktuator, perangkat kontrol.
- 3. **Lapisan Data dan AI**
 - Platform data energi, algoritma AI untuk forecasting, optimasi, deteksi anomali, dan demand response.
- 4. **Lapisan Transaksi dan Koordinasi (Blockchain)**
 - Pencatatan P2P energy trading, smart contract untuk tarif dinamis dan pembayaran otomatis, siklus hidup REC.
- 5. **Lapisan Aplikasi dan Layanan**
 - Dashboard utilitas, aplikasi konsumen, platform aggregator, layanan ESCO (energy service company).

Dalam arsitektur ini:

- IoT menyediakan **data berkelanjutan dan kemampuan kontrol**,
- AI menyediakan **otak pengambilan keputusan**,
- Blockchain menyediakan **mekanisme kepercayaan dan transaksi**.

2. Contoh Use Case: Smart Home–Mikrogrid

Bayangkan sebuah **mikrogrid di kawasan perumahan**:

- Setiap rumah memiliki PLTS atap, baterai, dan smart meter (IoT),
- Platform AI memprediksi beban rumah dan produksi PLTS per jam,
- Algoritma optimasi menentukan kapan baterai diisi atau dikosongkan, dan kapan rumah membeli/menjual energi,
- Blockchain mencatat transaksi P2P antar rumah dan ke utilitas, dengan smart contract yang mengeksekusi tarif dan pembayaran otomatis. ([ScienceDirect](#))

Manfaat:

- Penghuni dapat menurunkan tagihan listrik dengan menyesuaikan perilaku konsumsi,
- Sistem secara otomatis menghindari beban puncak dan memaksimalkan pemakaian energi terbarukan lokal,
- Utilitas mendapat sistem yang lebih stabil dan dapat mengurangi investasi pembangkit puncak yang mahal.

3. Use Case Lain: Industri dan Kawasan Ekonomi

Di kawasan industri atau pelabuhan:

- IoT memantau konsumsi mesin produksi, crane, cold storage, dan EV fleet,
- AI mengoptimalkan operasi agar beban puncak turun dan konsumsi selaras dengan output PLTS/PLTB lokal,
- Blockchain digunakan untuk:
 - Mengelola pembagian biaya energi dalam **kawasan industri bersama**,
 - Mencatat pemakaian energi hijau untuk pelaporan ESG dan sertifikasi rantai pasok.[\(ljesty\)](#)

Dalam jangka panjang, integrasi trilogi ini membuka ruang bagi **model bisnis energi baru**: aggregator fleksibilitas, pasar jasa keandalan, koin energi lokal, dan lain-lain.

VII. Perspektif dan Peluang di Indonesia

Bagi Indonesia, digital energy transition dengan AI, IoT, dan blockchain adalah **peluang sekaligus ujian**.

1. Karakteristik Sistem Energi Indonesia

Beberapa ciri penting:

- Sistem kelistrikan **terfragmentasi** dalam banyak subsistem dan pulau,
- Integrasi energi terbarukan masih relatif rendah tapi potensinya besar,
- Kualitas data dan infrastruktur komunikasi di sebagian wilayah masih terbatas,
- Transformasi digital di sektor lain (fintech, e-commerce) berkembang cepat – ini menunjukkan kesiapan talenta dan infrastruktur digital tertentu.[\(Imaleidykla.lt\)](#)

Kondisi ini justru membuat Indonesia menjadi “laboratorium alami” untuk:

- Mikrogrid dan smart grid berbasis IoT–AI di pulau-pulau kecil,

- P2P energy trading berbasis blockchain di kawasan perumahan dan industri,
- Sistem pemeliharaan aset jaringan distribusi yang luas menggunakan AI dan sensor.

2. Riset dan Pilot Project

Beberapa kajian dan proposal sudah mulai muncul, misalnya:

- Riset tentang **framework integrasi blockchain dalam P2P energy trading di Indonesia**, yang menyoroti tantangan regulasi, teknis, dan ekonomi, serta mengusulkan pendekatan bertahap: mulai dari pilot, regulatory sandbox, hingga integrasi dengan sistem tarif resmi. (heca-analitika.com)
- Penelitian tentang **demand response dan smart home berbasis IoT**, yang relevan untuk kota-kota besar dengan pertumbuhan beban tinggi. ([Scientific Repository](https://scientificrepository.in))

Jika dihubungkan dengan agenda nasional (transisi energi, pembukaan pasar karbon, inisiatif smart city), trilogi AI–IoT–blockchain dapat:

- Membantu PLN dan pemerintah daerah mengurangi **losses** dan meningkatkan keandalan,
- Memberi peluang bagi **startup energi digital** lokal,
- Menjadi bahan pendidikan dan riset bersama kampus–industri.

3. Tantangan Spesifik Indonesia

Namun ada sejumlah tantangan yang perlu diakui:

1. Kerangka regulasi

- P2P energy trading dan penggunaan blockchain dalam transaksi energi belum memiliki payung regulasi jelas,
- Aturan main PLTS atap, tarif, dan peran prosumer masih dinamis dan kadang berubah. ([ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com))

2. Infrastruktur digital yang belum merata

- Konektivitas internet dan keandalan jaringan komunikasi di daerah luar Jawa masih bervariasi,
- Ini memengaruhi kelayakan IoT skala besar dan integrasi data real-time. ([Imaleidykla.lt](https://maleidykla.lt))

3. Kapasitas SDM dan institusi

- Diperlukan insinyur, data scientist, dan ahli kebijakan yang memahami sekaligus dunia energi dan digital,
- Institusi energi yang terbiasa dengan pola analog–terpusat perlu bertransformasi secara budaya dan organisasi.

4. Pendanaan dan risiko bisnis

- Pilot project digital yang inovatif kadang sulit memperoleh dukungan pendanaan jika belum ada model bisnis yang teruji,
- Perlu skema *blended finance* dan kemitraan publik–swasta untuk mengurangi risiko awal. ([The Times of India](#))

VIII. Isu Tata Kelola, Etika, dan Keamanan

Digital energy transition bukan hanya soal efisiensi teknis, tapi juga soal **tata kelola data dan keadilan**.

1. Data Governance dan Privasi

- Smart meter dan perangkat IoT menghasilkan data sangat detail tentang pola konsumsi rumah tangga dan industri,
- Data ini berharga untuk optimasi sistem, tetapi juga sensitif dari sisi **privasi** dan potensi penyalahgunaan (profiling, iklan yang terlalu invasif, dsb.). ([JRC Publications Repository](#))

Diperlukan:

- Aturan jelas tentang kepemilikan data energi,
- Mekanisme anonimisasi, agregasi, dan akses terbatas,
- Transparansi kepada konsumen tentang bagaimana data digunakan.

2. Keamanan Siber (Cybersecurity)

Integrasi IoT dan blockchain membuka permukaan serangan baru:

- Perangkat IoT yang lemah keamanannya bisa menjadi pintu masuk serangan ke jaringan listrik,
- Smart contract yang cacat bisa dimanfaatkan untuk manipulasi transaksi energi,

- Infrastruktur data AI bisa menjadi target pencurian atau sabotase. ([PAC World](#))

Karena itu, desain digital energy system harus mengintegrasikan:

- Standar keamanan perangkat dan jaringan,
- Audit berkala sistem blockchain dan smart contract,
- Sistem deteksi anomali berbasis AI yang tidak hanya memantau aliran daya, tetapi juga **aliran data**.

3. Transparansi dan Explainable AI

AI sering dianggap “kotak hitam”. Dalam sektor energi yang sangat strategis, muncul tuntutan:

- **Explainable AI (XAI)** – keputusan besar (misal pemadaman beban, penentuan tarif dinamis) perlu dapat dijelaskan secara rasional kepada regulator dan publik,
- Audit algoritma untuk memastikan tidak ada bias yang merugikan kelompok tertentu (misal pelanggan berpenghasilan rendah). ([Imaleidykla.lt](#))

4. Keadilan Digital dan Kesenjangan Teknologi

Digitalisasi energi berpotensi memperlebar kesenjangan jika:

- Hanya kawasan kaya yang mampu memasang PLTS atap, baterai, dan perangkat IoT canggih, sementara daerah miskin tetap menjadi konsumen pasif,
- Keuntungan dari efisiensi dan fleksibilitas hanya dinikmati oleh industri besar yang sanggup berinvestasi dalam sistem AI dan blockchain. ([Imaleidykla.lt](#))

Maka, transisi energi digital perlu disertai:

- Program bantuan teknis dan finansial untuk rumah tangga dan UMKM,
- Desain tarif dan insentif yang tidak diskriminatif,
- Kebijakan afirmatif bagi daerah tertinggal.

IX. Penutup: Digital Energy Transition sebagai Agenda Strategis “Digital Energy Transition: AI, IoT, dan Blockchain dalam Manajemen Energi” mengajak kita melihat sistem energi bukan lagi

sekadar kumpulan kabel, trafo, dan pembangkit, tetapi sebagai

ekosistem siber-fisik yang hidup:

- AI menjadi “otak” untuk merencanakan, meramal, dan mengoptimalkan,
- IoT menjadi “indera dan saraf” yang menghubungkan setiap komponen,
- Blockchain menjadi “buku besar kepercayaan” yang mencatat transaksi dan koordinasi multi-aktor.

Dalam skala global, kombinasi tiga teknologi ini:

- Mempercepat integrasi energi terbarukan,
- Meningkatkan efisiensi dan keandalan grid,
- Melahirkan model bisnis baru seperti P2P trading dan layanan fleksibilitas.[\(ICG\)](#)

Bagi Indonesia, digital energy transition membuka:

- **Peluang** untuk melompati beberapa tahapan teknologi dan langsung membangun sistem energi yang lebih cerdas, bersih, dan adaptif di tengah geografi kepulauan,
- **Tantangan** untuk membenahi regulasi, membangun kapasitas SDM, memperkuat infrastruktur digital, dan memastikan transisi ini berjalan adil secara sosial.[\(heca-analitika.com\)](#)

Ke depan, arah strategis yang dapat dirumuskan antara lain:

1. Menempatkan digitalisasi energi (AI, IoT, blockchain) sebagai **komponen eksplisit** dalam kebijakan energi nasional dan peta jalan transisi energi.
2. Mendorong **pilot project** yang mengintegrasikan ketiga teknologi di konteks nyata: mikrogrid desa, kawasan industri hijau, kota cerdas – dengan desain *regulatory sandbox*.
3. Mengembangkan **ekosistem pengetahuan** di perguruan tinggi dan lembaga riset untuk melatih generasi baru insinyur dan ilmuwan data yang memahami energi dan teknologi digital sekaligus.

4. Menjadikan keadilan sosial, keamanan siber, dan tata kelola data sebagai **pilar utama**, bukan isu tambahan, dalam setiap inisiatif digitalisasi energi.

Dengan pendekatan demikian, digital energy transition bukan hanya akan mengubah cara kita menghasilkan dan mengkonsumsi energi, tetapi juga ikut membentuk **arah pembangunan ekonomi, sosial, dan ekologis** Indonesia di abad ke-21.

Jika Bapak menghendaki, pada langkah berikutnya saya bisa membantu menyusun **outline bab per bab** atau menambahkan **glosarium & daftar pustaka** khusus untuk artikel ini, seperti pada artikel-artikel sebelumnya.

REFLEKSI DAN DISKUSI

“Digital Energy Transition: AI, IoT, dan Blockchain dalam Manajemen Energi”

Bagian ini dimaksudkan sebagai ruang jeda: berhenti sejenak dari detail teknis dan melihat **apa makna transisi energi digital** bagi manusia, organisasi, dan masa depan pembangunan. Dapat digunakan sebagai bahan renungan pribadi, diskusi kelas, maupun FGD lintas disiplin.

1. Dari “Membangun Pembangkit” ke “Membangun Sistem Cerdas”

Selama puluhan tahun, manajemen energi identik dengan:

- menambah kapasitas pembangkit,
- memperkuat jaringan transmisi,
- menjaga pasokan listrik agar tidak padam.

Kini, narasinya bergeser:

- **AI** mengatur kapan pembangkit dinyalakan atau dimatikan, dan bagaimana beban dibagi;
- **IoT** membuat setiap meter, sensor, dan peralatan rumah tangga ikut “berbicara” ke sistem;
- **Blockchain** mulai mengatur transaksi energi antar rumah, antar perusahaan, bahkan antar negara.

Pertanyaannya:

Apakah kita sudah siap beralih dari “engineering fisik” ke “**engineering sistem cerdas**”, yang menuntut integrasi teknologi, data, perilaku manusia, dan tata kelola?

Bagi banyak lembaga energi tradisional, ini bukan hanya soal upgrade perangkat, tetapi **perubahan identitas**:

dari operator jaringan analog → menjadi orkestrator ekosistem digital.

2. Siapa Mengendalikan, Siapa Dikendalikan?

Dengan jutaan sensor IoT dan algoritma AI yang mengatur beban, muncul pertanyaan etis dan politis:

1. **Siapa yang memegang kendali utama atas data energi?**
 - Perusahaan utilitas?
 - Penyedia platform digital global?
 - Pemerintah?
 - Atau pengguna sendiri?
2. **Bagaimana keseimbangan antara efisiensi dan otonomi individu?**
 - Algoritma bisa saja memutuskan untuk menaikkan suhu AC, menunda pengisian mobil listrik, atau mengurangi beban industri pada jam tertentu demi stabilitas sistem.
 - Di satu sisi, ini baik untuk jaringan dan lingkungan. Di sisi lain, ada **pengurangan ruang pilihan** bagi pengguna.

Digital energy transition, dengan demikian, bukan hanya cerita tentang teknologi, tetapi juga tentang **redistribusi kekuasaan**:

- dari operator tunggal ke platform digital,

- dari negara ke jaringan pelaku baru (startup, penyedia cloud, penyedia blockchain),
- dan, jika dirancang dengan baik, dari pusat ke komunitas.

Refleksi penting:

Apakah arsitektur AI–IoT–Blockchain yang kita bangun memperbesar atau justru memperkecil kedaulatan energi dan kedaulatan data?

3. Antara Efisiensi dan Keadilan: Risiko “Digital Divide” dalam Energi

Teknologi digital cenderung **lebih cepat diadopsi** oleh kelompok yang:

- berpendidikan tinggi,
- tinggal di kota besar,
- memiliki akses modal untuk memasang PLTS atap, baterai, smart meter, dan perangkat IoT.

Jika tidak hati-hati, digital energy transition berisiko menciptakan dua dunia:

1. Dunia “energi cerdas”:

- rumah dengan PLTS, baterai, smart home, kendaraan listrik,
- perusahaan yang memakai AI untuk mengoptimalkan konsumsi,
- bisa ikut P2P trading dan menikmati tarif dinamis yang menguntungkan.

2. Dunia “energi biasa”:

- pelanggan yang hanya punya satu pilihan: bayar tagihan, tanpa kemampuan mengatur atau memproduksi energi,
- kualitas layanan mungkin tidak membaik secara signifikan.

Dari sudut keadilan sosial, ini menimbulkan pertanyaan:

- Bagaimana memastikan bahwa **desa tertinggal, UMKM kecil, dan rumah tangga berpendapatan rendah** juga menjadi bagian dari transformasi, bukan hanya objek?

- Adakah skema subsidi silang, program literasi energi digital, atau proyek percontohan komunitas yang benar-benar memprioritaskan kelompok rentan?

Revolusi digital di sektor energi baru layak disebut “transisi” jika **tidak meninggalkan siapa pun** di belakang.

4. Transparansi, Kepercayaan, dan “Kotak Hitam” Algoritma

AI, IoT, dan blockchain sering dihadirkan sebagai solusi yang “**pintar, cepat, dan objektif**”. Namun, dari sudut pandang tata kelola, muncul beberapa dilema:

1. AI sebagai kotak hitam

- Model yang sangat kompleks (deep learning) sulit dijelaskan kepada regulator dan publik:
 - Mengapa tarif dinamis naik pada jam tertentu?
 - Mengapa beban industri tertentu dipotong lebih dulu saat krisis?
- Tanpa transparansi, kepercayaan publik bisa runtuh, sekalipun keputusan tersebut secara teknis optimal.

2. IoT dan kerentanan keamanan

- Jutaan perangkat yang terhubung bisa menjadi pintu masuk serangan siber.
- Gangguan pada satu node bisa berdampak sistemik pada jaringan listrik.

3. Blockchain dan ilusi netralitas

- Meski bersifat terdistribusi, desain awal smart contract dan aturan main tetap ditentukan oleh sekelompok aktor tertentu.
- “Keadilan” dalam P2P trading sangat bergantung pada cara aturan itu ditulis.

Refleksi yang muncul:

Bagaimana merancang “**AI yang dapat dipertanggungjawabkan**”, “**IoT yang aman**”, dan “**Blockchain yang benar-benar inklusif**” – bukan hanya secara teknis, tetapi juga secara etis dan regulatif?

5. Peran Negara, Kampus, dan Sektor Swasta

Transisi energi digital menyatukan tiga dunia yang biasanya berjalan terpisah: **energi**, **teknologi informasi**, dan **keuangan**.

Karena itu, perlu dilakukan pembagian peran yang sehat:

- **Negara/pemerintah**
 - Menetapkan visi jangka panjang, standar keamanan, regulasi data, dan perlindungan konsumen.
 - Menyediakan ruang eksperimen melalui *regulatory sandbox* untuk P2P trading, mikrogrid, dan model bisnis baru.
- **Kampus dan lembaga riset**
 - Menjadi sumber pengetahuan, kritik, dan gagasan.
 - Mengembangkan SDM lintas disiplin: insinyur listrik yang paham AI, data scientist yang mengerti sistem tenaga, ahli kebijakan yang memahami blockchain.
- **Sektor swasta dan startup**
 - Menawarkan inovasi, solusi praktis, dan model bisnis yang lincah.
 - Bekerja sama dengan utilitas dan pemerintah daerah untuk proyek percontohan.

Pertanyaan pentingnya:

Apakah ekosistem ini sedang bergerak ke arah **kolaborasi** yang sehat atau justru ke arah **fragmentasi** dan kompetisi yang tidak produktif?

6. Dimensi Spiritual dan Filosofis: Energi, Data, dan Martabat Manusia

Pada dimensi yang lebih dalam, digital energy transition juga menyentuh pertanyaan eksistensial:

- Ketika setiap aktivitas rumah tangga terekam sebagai data (jam menyalakan lampu, kapan AC dinyalakan, kapan mobil diisi), bagaimana kita menjaga **martabat dan privasi manusia** di tengah obsesi efisiensi?

- Apakah kita sedang membangun dunia di mana **manusia melayani algoritma** (menyesuaikan hidup hanya demi mengoptimalkan kurva beban), atau algoritma justru dirancang untuk **melayani kesejahteraan manusia secara utuh** – termasuk waktu istirahat, relasi sosial, dan kesehatan mental?

Refleksi ini mengajak kita untuk tidak terjebak pada logika “semakin otomatis semakin baik”.

Transisi energi digital yang sehat adalah transisi yang:

- Mengurangi emisi,
- Menghemat sumber daya,
- **Namun juga** menghormati kebebasan, keadilan, dan martabat manusia.

7. Pertanyaan Diskusi

Berikut beberapa pertanyaan yang dapat digunakan dalam kelas, seminar, atau diskusi kebijakan:

A. Kebijakan dan Strategi

1. Jika Anda menjadi pengambil kebijakan energi nasional, **tiga prioritas utama** apa yang akan Anda tetapkan untuk mendorong digital energy transition (AI–IoT–Blockchain) dalam 10 tahun ke depan?
2. Bagaimana sebaiknya **PLN dan regulator** merespons munculnya P2P energy trading dan mikrogrid berbasis blockchain: dilihat sebagai ancaman, mitra, atau keduanya?

B. Keadilan Sosial dan Kesenjangan Digital

3. Program konkret apa yang dapat memastikan bahwa **rumah tangga miskin dan daerah terpencil** juga mendapatkan manfaat dari digitalisasi energi?
4. Apakah boleh memberikan **insentif lebih besar** hanya kepada mereka yang mampu memasang PLTS atap dan perangkat IoT? Bagaimana dampaknya terhadap kesenjangan energi?

C. Tata Kelola Data dan Keamanan

5. Menurut Anda, **siapa yang paling berhak** atas data konsumsi energi rumah tangga: pelanggan, utilitas, pemerintah, atau penyedia platform AI? Mengapa?
6. Strategi apa yang perlu dibangun untuk menghadapi risiko **serangan siber** terhadap jaringan listrik yang sudah sangat terhubung IoT?

D. Etika dan Filsafat Teknologi

7. Dalam situasi tertentu, AI mungkin menyarankan **pemadaman terencana (rolling blackout)** di wilayah tertentu demi menyelamatkan sistem secara keseluruhan. Bagaimana seharusnya keputusan seperti ini dikomunikasikan kepada publik agar tetap etis dan dapat dipercaya?
8. Apakah digital energy transition akan membuat manusia **semakin bergantung** pada teknologi, atau justru memberi lebih banyak **kedaulatan dan pilihan** dalam mengelola energi? Jelaskan argumen Anda.

8. Penutup Reflektif

Digital energy transition menghadirkan janji besar: sistem energi yang **lebih efisien, lebih bersih, lebih pintar**. Namun, di balik janji itu ada pertanyaan-pertanyaan mendalam tentang **siapa yang memegang kendali, siapa yang diuntungkan, dan nilai-nilai apa yang kita bawa** dalam proses transformasi ini.

Pada akhirnya, AI, IoT, dan blockchain hanyalah alat.

Yang menentukan arah adalah **niat, kebijakan, dan karakter moral** para aktor yang menggunakannya.

Jika digunakan dengan bijak, trilogi teknologi ini dapat menjadi **jembatan** menuju masa depan energi yang rendah karbon, inklusif, dan manusiawi. Jika tidak, ia bisa menjadi **cermin baru** bagi ketimpangan dan ketidakadilan lama, hanya dengan kemasan yang lebih canggih.

Di titik inilah refleksi dan diskusi menjadi sangat penting—agar transisi energi digital tidak berjalan secara otomatis oleh logika pasar dan

teknokrasi, tetapi diarahkan secara sadar oleh **visi bersama tentang masa depan yang adil dan berkelanjutan**.

GLOSARIUM

(untuk artikel “Digital Energy Transition: AI, IoT, dan Blockchain dalam Manajemen Energi”)

1. Transisi Energi Digital (*digital energy transition*)

Proses integrasi teknologi digital—seperti AI, IoT, dan blockchain—ke dalam seluruh rantai nilai sistem energi (pembangkit, transmisi, distribusi, hingga konsumen) dengan tujuan meningkatkan efisiensi, keandalan, dan integrasi energi terbarukan.[\(IEA\)](#)

2. Digitalisasi energi (*digitalisation of energy*)

Penggunaan perangkat dan platform digital (sensor, jaringan komunikasi, komputasi awan, analitik data) untuk memonitor, menganalisis, dan mengendalikan sistem energi secara real time. Digitalisasi dipandang sebagai faktor transformasional bagi sistem energi global.[\(IEA\)](#)

3. Smart grid

Jaringan tenaga listrik yang dilengkapi teknologi sensor, komunikasi dua arah, dan sistem kontrol cerdas sehingga mampu memonitor kondisi jaringan, menyeimbangkan suplai–permintaan, mengintegrasikan energi terbarukan, dan merespons gangguan secara dinamis.[\(Taylor & Francis\)](#)

4. Artificial Intelligence (AI) dalam energi

Penerapan metode komputasional (machine learning, deep learning, reinforcement learning, dsb.) untuk tugas seperti peramalan beban, prediksi output energi terbarukan, optimasi operasi jaringan, deteksi anomali, dan pemeliharaan prediktif.[\(journalwjaets.com\)](#)

5. Machine Learning (ML)

Cabang AI yang mengembangkan model matematis dari data historis untuk melakukan prediksi atau klasifikasi tanpa diprogram secara eksplisit. Dalam energi, ML digunakan untuk forecasting beban, prediksi produksi PLTS/PLTB, dan deteksi kegagalan peralatan. (journalwjaets.com)

6. Generative AI dalam energi

Subbidang AI yang menghasilkan data atau skenario baru (misalnya pola cuaca sintetis, profil beban, atau simulasi sistem) menggunakan model seperti GAN atau transformer. Digunakan untuk meningkatkan peramalan surya–angin dan perencanaan skenario sistem tenaga. (ScienceDirect)

7. Internet of Things (IoT)

Jaringan perangkat fisik (sensor, meter, aktuator, peralatan rumah, mesin industri) yang terhubung ke internet dan dapat mengirim serta menerima data. Di sektor energi, IoT memungkinkan pemantauan dan pengendalian konsumsi serta kondisi jaringan secara real time. (ScienceDirect)

8. Smart meter

Meter listrik digital yang mampu mengukur konsumsi energi secara lebih rinci (misalnya per 15 menit), menyimpan, dan mengirim data tersebut ke utilitas atau pengguna melalui jaringan komunikasi. Menjadi basis program tarif dinamis dan demand response. (Taylor & Francis)

9. Sistem Manajemen Energi (*Energy Management System / EMS*)

Platform perangkat keras dan/atau perangkat lunak yang memonitor, menganalisis, dan mengoptimalkan penggunaan energi pada bangunan, kawasan industri, atau jaringan listrik. Integrasi IoT dan respons jaringan terbukti meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya energi. (wsj.westscience-press.com)

10. Demand Response (DR)

Mekanisme di mana konsumen listrik menyesuaikan pola konsumsi (mengurangi, memindahkan waktu pemakaian, atau mengizinkan

kontrol otomatis) sebagai respons terhadap sinyal harga atau instruksi operator, untuk membantu menyeimbangkan sistem dan mengurangi beban puncak. ([Taylor & Francis](#))

11. Virtual Power Plant (VPP)

Sekumpulan sumber daya energi terdistribusi (PLTS atap, baterai, beban yang dapat dikendalikan, kendaraan listrik) yang dikoordinasikan secara digital seolah-olah satu pembangkit besar untuk memberikan layanan ke sistem tenaga (daya, cadangan, fleksibilitas).

12. Microgrid

Sistem kelistrikan lokal yang terdiri dari pembangkit, beban, dan seringkali penyimpanan energi, yang dapat beroperasi terhubung dengan jaringan utama atau secara terisolasi (islanded). Mikrogrid berbasis IoT-AI banyak dikembangkan di kawasan terpencil atau kawasan industri. ([Frontiers](#))

13. Predictive Maintenance (pemeliharaan prediktif)

Pendekatan pemeliharaan peralatan berdasarkan prediksi kegagalan yang diperoleh dari analisis data sensor (getaran, suhu, arus, tegangan) menggunakan AI/ML. Tujuannya mengurangi downtime tak terencana dan mengoptimalkan jadwal perawatan. ([Energy Efficiency Hub](#))

14. Edge Computing

Arsitektur komputasi di mana pemrosesan data dilakukan dekat dengan sumber data (misalnya di perangkat lokal, gateway, atau substation), bukan sepenuhnya di pusat data atau cloud. Penting untuk aplikasi energi real time yang sensitif terhadap latensi. ([UPCommons](#))

15. Blockchain

Teknologi buku besar terdistribusi di mana transaksi dicatat dalam blok yang saling terhubung dan sulit diubah. Dalam energi, blockchain digunakan untuk mencatat transaksi energi, pengelolaan sertifikat energi terbarukan, dan koordinasi rantai pasok energi hijau. ([Nature](#))

16. Smart Contract

Program komputer yang berjalan di atas blockchain yang secara otomatis mengeksekusi aturan atau perjanjian (misalnya harga, volume, waktu pengiriman energi) ketika kondisi tertentu terpenuhi, tanpa perlu perantara tradisional. ([Nature](#))

17. Peer-to-Peer (P2P) Energy Trading

Skema perdagangan energi di mana produsen kecil (misalnya rumah dengan PLTS atap) dapat menjual energi langsung ke konsumen lain dalam mikrogrid atau jaringan lokal, sering kali menggunakan blockchain dan smart contract untuk pencatatan dan penyelesaian transaksi. ([ScienceDirect](#))

18. Renewable Energy Certificate (REC)

Instrumen yang mewakili bukti bahwa sejumlah listrik tertentu dihasilkan dari sumber energi terbarukan. Blockchain increasingly digunakan untuk melacak penerbitan, perpindahan, dan penebusan REC secara transparan dan menghindari double counting. ([Nature](#))

19. Keamanan Siber (cybersecurity) dalam sistem energi

Upaya melindungi infrastruktur digital energi (IoT, sistem SCADA, platform AI, blockchain) dari serangan atau akses tidak sah yang dapat menyebabkan gangguan layanan, kebocoran data, atau kerusakan fisik. Tantangan ini kian besar seiring meningkatnya konektivitas perangkat. ([Scribd](#))

20. Tata Kelola Data (data governance)

Kebijakan, proses, dan standar yang mengatur bagaimana data energi dikumpulkan, disimpan, diakses, dan digunakan, termasuk aspek kepemilikan, privasi, keamanan, dan etika penggunaan algoritma AI berbasis data konsumsi energi. ([Energy Efficiency Hub](#))

21. Just (Digital) Energy Transition

Pendekatan transisi energi yang memastikan bahwa digitalisasi (AI, IoT, blockchain) tidak memperlebar kesenjangan sosial, tetapi justru mendukung akses energi yang lebih adil bagi kelompok rentan, daerah terpencil, dan rumah tangga berpendapatan rendah. ([Energy Efficiency Hub](#))

22. Smart City Energi

Kota yang memanfaatkan jaringan sensor, sistem manajemen energi, kendaraan listrik, dan infrastruktur pengisian cerdas, semuanya terhubung dengan platform digital untuk mengoptimalkan konsumsi energi, transportasi, dan layanan publik. ([Frontiers](#))

REFERENSI

Laporan dan kajian lembaga internasional

1. International Energy Agency (IEA). (2017). *Digitalisation and Energy*. Paris: IEA. ([IEA](#))
 2. IEA. (2017). *Digitalisation set to transform global energy system with profound implications for all energy actors* (news article). ([IEA](#))
 3. IEA. (2011). *Technology Roadmap: Smart Grids*. Paris: IEA. (dirujuk dalam Cannata, 2023). ([UPCommons](#))
-

AI dalam energi dan sistem tenaga

4. Razak, T. R., et al. (2025). *Artificial Intelligence in Renewable Energy: A Systematic Review*. *Sustainability Journal*. (PDF). ([Research and Reviews in Sustainability](#))
5. Mamat, R., et al. (2025). *Emerging role of generative AI in renewable energy systems*. *Energy AI*. ([ScienceDirect](#))
6. "Artificial Intelligence (AI) in renewable energy forecasting and optimisation" (2025). *World Journal of Advanced Engineering & Technology Sciences* – membahas peran reinforcement learning, deep learning, dan ML dalam forecasting dan optimasi jaringan. ([journalwjaets.com](#))
7. Razak, T. R., et al. (2025). *Review: Artificial Intelligence Applications in Renewable Energy Systems Integration*. (Preprint / article). ([ResearchGate](#))
8. Business Insider. (2025, Juli). *Utilities are tiptoeing into AI as climate change and data center growth add stress to the energy grid*. (Studi

kasus penggunaan AI untuk predictive maintenance dan forecasting di utilitas AS).([Business Insider](#))

IoT, smart grid, dan manajemen energi

9. Rao, C. K., et al. (2025). *A review of IoT-enabled intelligent smart energy management systems*. *Energy Nexus*.([ScienceDirect](#))
10. Vritti, V., et al. (2024). *Energy Management in IoT-Enabled Smart Grid: A Review*. Dalam *IoT and Smart Technologies for Power Systems*. CRC Press. ([Taylor & Francis](#))
11. "Effect of IoT Integration in Energy Management System and Grid Responsiveness" (2024). *West Science Journal of Information Systems*.([wsj.westscience-press.com](#))
12. Frontiers Research Topic. (2025). *IoT-Based Smart Monitoring Systems for Energy Management in Microgrids*. Frontiers. ([Frontiers](#))
13. Anonymous. (2025). *IoT-Based Smart Energy Management for Smart Grids Applied in a Home*. (Studi IoT-based SEMS untuk pemantauan real time).([ResearchGate](#))
14. TechRadar Pro. (2025, Oktober). *Is IoT infrastructure ready for extreme weather?* – membahas risiko dan kebutuhan ketahanan IoT di sektor energi. ([TechRadar](#))

Blockchain, P2P energy trading, dan sertifikasi energi hijau

15. Bhavana, G. B., et al. (2024). *Applications of blockchain technology in peer-to-peer energy markets and green hydrogen supply chains: a topical review*. *Scientific Reports* 14. ([Nature](#))
16. Shen, T., et al. (2025). *Blockchain-based peer-to-peer energy trading with local generation*. *Computers & Electrical Engineering*. ([ScienceDirect](#))
17. Tanis, Z., et al. (2025). *A Comprehensive Review on Peer-to-Peer Energy Trading*. *IET Renewable Power Generation*. ([IET Research Journals](#))

18. Sivianes, M., et al. (2021). *Application of Blockchain to Peer-to-Peer Energy Trading in Microgrids*. Dalam *Lecture Notes in Networks and Systems* (Springer).([SpringerLink](#))

Digitalisasi sistem listrik dan perspektif umum

19. Cannata, M. (2023). *The Digitalization of the Electricity System*. (Working paper, mengulas transformasi digital grid, smart meter, dan kebijakan terkait).([UPCommons](#))
20. IEA. (2017). *Workshop on Digitalisation and Energy Systems – Summary* (news & workshop report).([IEA](#))
21. “Smart grids and IoT: Energy Management in Smart Cities and Buildings” – berbagai bab dan artikel yang dirujuk dalam Taylor & Francis dan Frontiers pada 2023–2025. ([Taylor & Francis](#))

Referensi di atas dapat Bapak lengkapi dengan:

- Dokumen kebijakan nasional (RUPTL, regulasi smart meter/PLTS atap, strategi digital nasional),
- Laporan lembaga Indonesia (PLN, BPPT/BRIN, Kementerian ESDM),
- Serta artikel jurnal tambahan terkait studi kasus Indonesia (misalnya mikrogrid di pulau terpencil, smart building di kampus/universitas).

Ini akan memperkuat landasan teoritis sekaligus kontekstual untuk artikel “Digital Energy Transition: AI, IoT, dan Blockchain dalam Manajemen Energi”

Copilot for this article - Chatgpt 5.1 Thinking, Access date: 10 December 2025. Prompting on Writer’s account ([Rudy C Tarumingkeng](#))
<https://chatgpt.com/c/693959ef-0c6c-8321-9172-cc699cdb634d>