



Peran Data Science

dalam

Forecasting Kebutuhan Energi Nasional

Oleh: Rudy C Tarumingkeng

Oleh:

[Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD](#)

Professor of Management NUP: 9903252922

Rektor, Universitas Cenderawasih, Papua (1978-1988, dan
Rektor, Kampus AGRO Manokwari sekarang Universitas Papua Manokwari)

Coordinator, CIDA/DIKTI SFU Burnaby BC Canada 1988-1991

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

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

AI - Data Analyst, dan Ketua Senat Akademik, IBM-ASMI, Jakarta 2024-

© RudyCT Academic Series

rudyct75@gmail.com

7 Maret 2026

Makalah Akademik

PERAN DATA SCIENCE DALAM FORECASTING KEBUTUHAN ENERGI NASIONAL

Abstrak

Forecasting kebutuhan energi nasional semakin strategis dalam era elektrifikasi, digitalisasi, urbanisasi, dan transisi energi. Dunia sedang memasuki fase ketika pertumbuhan permintaan listrik bergerak lebih cepat daripada pertumbuhan permintaan energi total. International Energy Agency (IEA) mencatat bahwa permintaan energi global tumbuh 2,2% pada 2024, sedangkan permintaan listrik melonjak 4,3%, didorong oleh suhu ekstrem, elektrifikasi, dan digitalisasi. Di Asia Tenggara, kebutuhan listrik diproyeksikan meningkat sekitar 4% per tahun hingga 2035, dengan pendinginan ruangan, transportasi, dan industri sebagai pendorong utama. Dalam konteks Indonesia, RUPTL 2025–2034 memproyeksikan pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik rata-rata 5,3% per tahun, dengan total tambahan kapasitas sekitar 69,5 GW dan porsi energi baru terbarukan serta storage mencapai 76%. Perubahan skala dan kompleksitas ini menuntut metode forecasting yang lebih canggih daripada sekadar ekstrapolasi tren historis. ([IEA](#))

Makalah ini membahas bagaimana data science berperan dalam meningkatkan akurasi, granularitas, dan kegunaan kebijakan dari

forecasting kebutuhan energi nasional. Data science memungkinkan integrasi data historis beban, data pelanggan, indikator ekonomi, cuaca, data spasial, smart meter, kendaraan listrik, dan pusat data ke dalam model ekonometrik, machine learning, deep learning, hybrid forecasting, dan probabilistic forecasting. Makalah ini juga menunjukkan bahwa konteks Indonesia masih menghadapi masalah fundamental berupa keterbatasan data sisi permintaan dan belum seragamnya standardisasi data energi. Oleh karena itu, peran data science bukan semata teknis, melainkan institusional: membangun tata kelola data, meningkatkan kualitas keputusan investasi, mendukung manajemen beban puncak, dan memperkuat ketahanan energi nasional. ([Kementerian ESDM](#))

Kata kunci: data science, forecasting energi, kebutuhan listrik nasional, machine learning, transisi energi, kebijakan energi, Indonesia.

1. Pendahuluan

Energi adalah infrastruktur dasar pembangunan modern. Hampir seluruh aktivitas ekonomi, sosial, pendidikan, kesehatan, transportasi, dan komunikasi kontemporer bertumpu pada ketersediaan energi yang cukup, andal, dan terjangkau. Dalam beberapa dekade terakhir, perencanaan energi lazim dilakukan dengan pendekatan makro yang relatif stabil: pertumbuhan penduduk naik, PDB naik, kebutuhan energi naik. Namun cara pandang itu kini tidak lagi memadai. Sistem energi abad ke-21 bergerak dalam lingkungan yang jauh lebih dinamis. Permintaan listrik tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah penduduk atau pertumbuhan ekonomi, tetapi juga oleh pola cuaca, intensitas penggunaan pendingin udara, perubahan jam kerja, penetrasi kendaraan listrik, pertumbuhan pusat data, kebijakan efisiensi energi, dan perubahan perilaku digital masyarakat. IEA menunjukkan bahwa listrik menjadi motor utama pertumbuhan energi global pada 2024, dengan

kenaikan 4,3%, jauh lebih cepat dari pertumbuhan energi total sebesar 2,2%. ([IEA](#))

Asia Tenggara menampilkan dinamika yang bahkan lebih menantang. Dalam *Southeast Asia Energy Outlook 2024*, IEA memproyeksikan kebutuhan listrik kawasan naik sekitar 4% per tahun hingga 2035, didorong terutama oleh bangunan, transportasi, dan industri. Dalam laporan lain, IEA juga menegaskan bahwa pertumbuhan permintaan listrik Asia Tenggara merupakan salah satu yang tercepat di dunia, bahkan melebihi 7% pada 2024, sehingga memperkuat urgensi modernisasi jaringan, perencanaan transmisi, dan integrasi energi terbarukan. Artinya, negara-negara di kawasan tidak cukup hanya menambah pembangkit; mereka juga harus mampu memperkirakan kapan, di mana, dan pada profil beban seperti apa energi akan dibutuhkan. ([IEA](#))

Indonesia berada tepat di tengah tantangan tersebut. RUPTL 2025–2034 memproyeksikan rata-rata pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik sebesar 5,3% per tahun. Dalam periode yang sama, pemerintah dan PLN merencanakan tambahan kapasitas pembangkit sekitar 69,5 GW, dengan 76% atau sekitar 52,9 GW berasal dari energi baru terbarukan dan storage. Skala perencanaan seperti ini menunjukkan bahwa forecasting energi bukan lagi urusan administratif, melainkan jantung pengambilan keputusan strategis negara. Ketika proyeksi meleset, yang terancam bukan hanya efisiensi teknis, tetapi juga kredibilitas investasi, ketahanan pasokan, biaya fiskal, dan daya saing ekonomi nasional. ([DJK Official Site](#))

Di sinilah data science menjadi penting. Secara substantif, data science adalah disiplin yang menggabungkan statistika, komputasi, pemodelan, machine learning, visualisasi, dan pengetahuan domain untuk mengekstraksi makna dari data dan menghasilkan prediksi yang berguna. Dalam ranah energi, data science bukan sekadar alat untuk “menghitung masa depan”, melainkan pendekatan untuk memahami

pola, ketidakpastian, dan interaksi kompleks antara permintaan, pasokan, cuaca, perilaku konsumen, serta kebijakan publik. Dengan kata lain, data science mengubah forecasting dari proses linier menjadi proses adaptif.

(MDPI)

Makalah ini bertujuan menjelaskan peran data science dalam forecasting kebutuhan energi nasional dengan fokus pada konteks Indonesia.

Pembahasan akan dimulai dari urgensi kebijakan, kerangka teoretis forecasting energi, jenis data yang diperlukan, metode analitik yang relevan, aplikasi praktis dalam perencanaan nasional, hingga tantangan tata kelola data dan implikasi kebijakan. Argumen utama makalah ini adalah bahwa masa depan perencanaan energi nasional akan sangat ditentukan oleh kemampuan negara membangun ekosistem data yang berkualitas, terintegrasi, dan dapat diolah menjadi keputusan yang presisi.

2. Konteks Strategis Forecasting Energi Nasional

Forecasting kebutuhan energi nasional pada dasarnya adalah upaya memperkirakan berapa banyak energi atau listrik yang akan dibutuhkan suatu negara pada periode tertentu, dalam wilayah tertentu, oleh kelompok pengguna tertentu, dan di bawah skenario tertentu. Tujuan praktisnya luas: merencanakan pembangunan pembangkit, menghitung kebutuhan jaringan transmisi dan distribusi, mengantisipasi beban puncak, menyusun tarif, memperkirakan impor energi primer, hingga merancang program efisiensi energi. Karena itu, forecasting tidak boleh dibatasi hanya pada total konsumsi tahunan. Sistem energi modern memerlukan proyeksi multi-skala: tahunan untuk kebijakan nasional, bulanan untuk penganggaran dan pasokan bahan bakar, harian untuk operasi sistem, dan per jam atau sub-jam untuk dispatching, demand response, dan integrasi energi terbarukan variabel. (MDPI)

Tinjauan akademik terbaru menunjukkan bahwa forecasting listrik lazim dibagi ke dalam empat horizon utama: *very short term*, *short term*, *medium term*, dan *long term*. Masing-masing horizon mempunyai variabel penentu, teknik analitik, dan tujuan kebijakan yang berbeda. Horizon sangat pendek dan pendek lebih terkait dengan operasi sistem, penjadwalan pembangkit, dan stabilitas jaringan. Horizon menengah berguna untuk manajemen pembelian energi, pemeliharaan aset, dan penganggaran. Horizon jangka panjang relevan bagi perencanaan kapasitas, kebijakan investasi, dan strategi transisi energi. Karena itu, ketika sebuah negara berbicara tentang forecasting kebutuhan energi nasional, sesungguhnya ia sedang berbicara tentang sebuah arsitektur prediksi bertingkat, bukan satu model tunggal. ([MDPI](#))

Indonesia memperlihatkan dengan jelas mengapa pendekatan bertingkat ini diperlukan. Rasio elektrifikasi nasional telah mencapai 99,83% pada triwulan IV 2024, sementara konsumsi listrik per kapita pada 2024 mencapai 1.411 kWh/kapita. Di satu sisi, capaian ini menandakan kemajuan akses. Di sisi lain, angka tersebut juga menunjukkan bahwa fase pembangunan energi Indonesia semakin bergeser dari sekadar ekspansi akses menuju pengelolaan pertumbuhan konsumsi yang lebih kompleks. Sistem yang makin dewasa menuntut bukan hanya tambahan listrik, tetapi juga pengelolaan profil beban, kualitas pasokan, efisiensi, dan sinkronisasi investasi jaringan. ([DJK Official Site](#))

Struktur pelanggan Indonesia juga menunjukkan kebutuhan akan forecasting yang lebih rinci. Data BPS 2024 mencatat pelanggan PLN didominasi rumah tangga sebanyak 84.660.382 pelanggan, disusul bisnis 5.146.548, sosial 2.088.434, dan industri 253.055. Dari sisi listrik yang didistribusikan, rumah tangga juga menyerap porsi terbesar, yakni 130.433,10 GWh pada 2024, disusul bisnis 58.771,13 GWh dan kelompok sosial 12.679,24 GWh. Komposisi ini memberi pelajaran penting: forecasting nasional tidak boleh hanya memakai angka agregat. Negara

perlu mengenali bahwa karakter beban rumah tangga berbeda dari industri; sensitivitas rumah tangga terhadap suhu berbeda dari bisnis; dan respons industri terhadap harga energi berbeda dari pelanggan residensial. ([Badan Pusat Statistik Indonesia](#))

Di sini muncul persoalan klasik dalam banyak negara berkembang, termasuk Indonesia: data permintaan energi sering kali lebih lemah daripada data pasokan. *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2024* secara eksplisit menyebutkan bahwa tantangan utama saat ini adalah kurangnya data energi dari sisi permintaan, sehingga banyak statistik energi masih diturunkan dari sumber sisi penawaran. Dokumen yang sama juga menekankan persoalan standardisasi terminologi dan data, yang dapat berujung pada analisis energi yang kurang akurat. Temuan ini sangat penting. Forecasting yang baik tidak bisa dibangun di atas data yang tidak lengkap, tidak seragam, atau hanya merefleksikan sisi suplai. Di sinilah data science menjadi kebutuhan kelembagaan, bukan sekadar pilihan metodologis. ([Kementerian ESDM](#))

3. Data Science sebagai Kerangka Analitik untuk Forecasting Energi

Secara konseptual, data science menawarkan tiga nilai utama bagi forecasting energi. Pertama, ia memungkinkan integrasi data dari sumber yang beragam. Kedua, ia memungkinkan penemuan pola nonlinier yang sulit ditangkap model tradisional. Ketiga, ia memungkinkan pembaruan model secara lebih adaptif ketika lingkungan berubah. Dalam dunia energi yang ditandai oleh fluktuasi cuaca, perubahan perilaku konsumen, dan penetrasi teknologi baru, ketiga fungsi ini menjadi sangat penting. Sebuah ulasan metode forecasting listrik pada 2025 menunjukkan bahwa pendekatan modern tidak lagi dibatasi pada model statistik klasik, tetapi mencakup artificial

intelligence, machine learning, deep learning, ensemble, dan hybrid architecture. (MDPI)

Literatur juga menunjukkan bahwa determinan permintaan listrik bergantung pada horizon peramalan, tingkat agregasi, iklim, dan aktivitas sosial-ekonomi. Ulasan mengenai negara-negara berpendapatan rendah dan menengah menekankan bahwa model jangka panjang cenderung membutuhkan variabel makro seperti populasi, pendapatan, dan struktur ekonomi, sementara model jangka pendek lebih sensitif terhadap cuaca, kalender, dan pola beban historis. Ulasan lain mengenai model regresi dan machine learning menegaskan bahwa suhu, waktu, musiman, dan variabel ekonomi merupakan prediktor yang paling lazim. Dengan kata lain, kualitas forecasting energi bergantung pada kesesuaian antara horizon analisis, tujuan kebijakan, dan pemilihan fitur data. (MDPI)

Dalam pengertian yang lebih praktis, data science membantu menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut: Apakah kenaikan beban listrik suatu kota terutama disebabkan oleh pertumbuhan rumah tangga atau industri? Apakah lonjakan pemakaian listrik pada bulan tertentu disebabkan suhu panas, hari libur, atau aktivitas ekonomi musiman? Apakah pembangunan pusat data, kendaraan listrik, dan kawasan industri baru akan menambah beban dasar, beban puncak, atau keduanya? Pertanyaan-pertanyaan seperti ini sulit dijawab bila perencana hanya mengandalkan rata-rata pertumbuhan historis. Data science mengubah data yang tersebar menjadi *policy intelligence*.

Kekuatan lain data science adalah kemampuannya mengolah data pada skala yang jauh lebih detail. Dalam sistem konvensional, data sering tersedia dalam bentuk total penjualan listrik tahunan. Dalam sistem berbasis data science, data dapat dipecah menjadi beban per jam, per wilayah, per segmen pelanggan, per kondisi cuaca, bahkan per perilaku penggunaan. Proses ini penting karena sistem tenaga tidak dioperasikan

berdasarkan rata-rata tahunan, melainkan berdasarkan keseimbangan detik demi detik antara pasokan dan permintaan. Oleh sebab itu, semakin halus resolusi data, semakin akurat pula kualitas keputusan operasional dan investasi. ([MDPI](#))

Namun perlu ditekankan bahwa data science bukan sinonim dari "AI yang otomatis benar". Sebuah tinjauan 2025 menegaskan bahwa integrasi metode statistik dan machine learning dapat meningkatkan akurasi, tetapi keberhasilannya tetap bergantung pada kualitas ramalan cuaca, kualitas data makroekonomi, dan otomasi yang terkontrol. Pada saat yang sama, riset tentang *interpretable load forecasting* menunjukkan bahwa masalah akurasi saja tidak cukup; model juga harus dapat dijelaskan agar dapat dipercaya dalam lingkungan jaringan yang makin kompleks dan makin hijau. Ini berarti bahwa forecasting energi nasional yang baik harus menyeimbangkan tiga unsur: akurasi, interpretabilitas, dan kegunaan kebijakan. ([MDPI](#))

4. Infrastruktur Data untuk Forecasting Kebutuhan Energi

Forecasting yang kuat membutuhkan infrastruktur data yang kaya. Dalam konteks energi nasional, setidaknya ada enam kelompok data yang relevan. Pertama, data historis beban dan konsumsi listrik. Kedua, data pelanggan menurut wilayah dan kelas pemakaian. Ketiga, data ekonomi dan demografi seperti PDB sektoral, populasi, urbanisasi, dan pendapatan. Keempat, data cuaca dan iklim seperti suhu, kelembapan, curah hujan, dan gelombang panas. Kelima, data spasial dan infrastruktur seperti lokasi kawasan industri, jalur transmisi, gardu, dan kapasitas pembangkit. Keenam, data teknologi baru seperti kendaraan listrik, smart meter, PLTS atap, storage, dan pusat data. Semua kelompok data ini perlu dipadukan agar forecasting tidak terjebak pada satu dimensi semata. ([ScienceDirect](#))

Peran data pelanggan sangat penting karena permintaan energi tidak homogen. Sebuah rumah tangga di kota besar dengan dua AC, kompor induksi, dan kendaraan listrik akan memiliki profil beban yang sangat berbeda dibanding rumah tangga di kota kecil. Begitu pula industri semen, pabrik tekstil, pusat perbelanjaan, hotel, rumah sakit, dan pusat data memiliki pola beban yang khas. Data science memungkinkan segmentasi pelanggan, klasterisasi pola konsumsi, dan pembangunan model berbeda untuk tiap kelompok. Pendekatan semacam ini makin penting ketika perencana ingin menyusun tarif waktu-pemakaian, program efisiensi, atau intervensi manajemen beban puncak. ([MDPI](#))

Kehadiran smart meter memperbesar potensi itu. PLN menjelaskan bahwa smart meter berbasis *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) memungkinkan pembacaan data meter secara real-time dan jarak jauh, serta mendukung pemantauan penggunaan listrik oleh pelanggan. PLN juga menyebut bahwa AMI membuka kemungkinan tarif dinamis dan interkoneksi yang lebih baik. Dari perspektif data science, AMI sangat berharga karena mengubah data tagihan bulanan menjadi data perilaku konsumsi yang jauh lebih granular. Dengan data semacam itu, model dapat mengenali jam puncak, pola musiman, fleksibilitas beban, hingga potensi demand response. ([PT PLN \(Persero\)](#))

Selain itu, forecasting energi nasional kini harus mulai memasukkan variabel baru yang sebelumnya kurang penting. IEA mencatat bahwa di Asia Tenggara, pendinginan akan menjadi pendorong besar pertumbuhan permintaan listrik; sekitar 16% listrik bangunan saat ini dipakai untuk pendinginan dan porsinya dapat naik menjadi sekitar 30% pada 2035. Lebih spesifik lagi, di Indonesia pangsa rumah tangga yang memiliki AC diproyeksikan naik dari kurang dari 15% saat ini menjadi 50% pada 2035. Ini adalah contoh konkret mengapa variabel gaya hidup dan perubahan teknologi rumah tangga perlu masuk dalam model nasional. ([IEA](#))

Pusat data juga semakin relevan. Laporan IEA tentang energi dan AI menunjukkan bahwa konsumsi listrik pusat data global diproyeksikan berlipat ganda hingga sekitar 945 TWh pada 2030. Bahkan untuk Asia Tenggara, IEA menandai kawasan ini sebagai contoh penting di mana kebutuhan listrik pusat data diperkirakan lebih dari dua kali lipat pada 2030, antara lain karena hub regional di Singapura dan Malaysia selatan. Meskipun konteks Indonesia belum selalu muncul sebagai pusat data terbesar di kawasan, tren digitalisasi domestik dan pertumbuhan ekonomi digital menuntut agar variabel ini sudah mulai dimasukkan dalam skenario forecasting nasional. ([IEA](#))

5. Metode Data Science dalam Forecasting Energi

5.1 Pendekatan statistik dan ekonometrik

Metode statistik klasik seperti regresi linier, ARIMA, SARIMA, dan model ekonometrik masih tetap relevan, terutama untuk forecasting jangka menengah dan panjang. Kelebihan model-model ini terletak pada keterbacaan hubungan antarvariabel. Jika pemerintah ingin mengetahui elastisitas kebutuhan listrik terhadap pertumbuhan PDB, harga energi, atau urbanisasi, model ekonometrik sering lebih mudah dijelaskan dibanding model pembelajaran mendalam. Literatur pada negara berpendapatan rendah dan menengah juga menunjukkan bahwa model ekonometrik banyak dipakai untuk perencanaan strategis jangka panjang karena dapat memasukkan variabel demografis dan ekonomi secara eksplisit. ([MDPI](#))

Dalam konteks Indonesia, pendekatan ini tetap penting untuk proyeksi makro. Misalnya, kebutuhan listrik nasional untuk sepuluh tahun ke depan dapat dikaitkan dengan skenario pertumbuhan ekonomi, industrialisasi, urbanisasi, dan peningkatan konsumsi per kapita. Bahkan

studi lokal dari LEMIGAS mengenai pemodelan energi untuk Kalimantan Timur menunjukkan bahwa GRDP dan populasi merupakan variabel yang lazim digunakan untuk menentukan kebutuhan energi, terutama dalam pendekatan *bottom-up*. Hal ini menunjukkan bahwa data science tidak berarti meninggalkan model lama, melainkan menempatkan model klasik sebagai bagian dari portofolio metode yang lebih luas.

(journal.lemigas.esdm.go.id)

5.2 Machine learning

Machine learning menjadi penting ketika hubungan antarvariabel tidak sederhana atau tidak linier. Metode seperti random forest, gradient boosting, support vector machine, dan XGBoost mampu menangkap pola kompleks dari data historis, cuaca, kalender, dan indikator lain. Dalam forecasting energi, keunggulan machine learning terletak pada kemampuannya mengenali interaksi yang tidak mudah diasumsikan sejak awal. Sebagai contoh, dampak suhu terhadap beban listrik mungkin berbeda antara hari kerja dan akhir pekan, berbeda antara kota industri dan kota wisata, atau berbeda antara musim hujan dan musim kemarau. Model machine learning mampu mempelajari perbedaan itu langsung dari data. ([ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com))

Keunggulan lain machine learning adalah kemampuannya bekerja pada data berukuran besar dan granular. Dengan AMI, sensor jaringan, dan data cuaca real-time, perencana energi dapat menyusun model yang memprediksi beban per jam, memetakan lokasi risiko puncak beban, atau mengidentifikasi anomali konsumsi. Dalam beberapa studi terbaru, integrasi fitur temporal, sosial-ekonomi, dan cuaca terbukti meningkatkan akurasi forecasting. Pendekatan ini cocok untuk negara seperti Indonesia yang memiliki keragaman geografis, sosial, dan ekonomi yang tinggi. ([MDPI](https://www.mdpi.com))

5.3 Deep learning

Deep learning, terutama LSTM, GRU, dan arsitektur berbasis attention, banyak digunakan untuk menangani deret waktu yang panjang dan kompleks. Metode ini sangat berguna ketika data bersifat sangat musiman, berfluktuasi, dan memiliki ketergantungan jangka panjang. Berbagai studi 2024–2025 menunjukkan bahwa model deep learning mampu meningkatkan ketepatan prediksi konsumsi listrik dengan memasukkan data historis yang panjang, informasi cuaca, dan faktor temporal. Bahkan studi tentang seasonal forecasting menunjukkan bahwa membedakan model menurut musim dapat meningkatkan akurasi, karena pola beban tidak selalu identik sepanjang tahun. ([Nature](#))

Bagi Indonesia, deep learning relevan terutama untuk kota-kota besar dengan profil beban yang makin rumit. Bayangkan Jakarta, Surabaya, Bandung, atau kawasan metropolitan baru yang memiliki kombinasi rumah tangga, pusat perbelanjaan, industri, perkantoran, rumah sakit, transportasi listrik, dan pusat data. Beban listrik di wilayah semacam ini bukan sekadar fungsi suhu atau jam kerja, tetapi hasil interaksi banyak faktor yang berubah cepat. Dalam konteks seperti itu, deep learning dapat menjadi instrumen yang kuat, selama kualitas data cukup baik dan proses validasi tetap disiplin.

5.4 Hybrid dan probabilistic forecasting

Salah satu tren penting dalam literatur mutakhir adalah penggunaan model hybrid, yaitu kombinasi pendekatan statistik dan machine learning. Tinjauan 2025 menunjukkan bahwa model hybrid dapat meningkatkan akurasi karena mampu menangani horizon waktu yang berbeda sekaligus tetap memberi ruang bagi interpretabilitas. Di sisi lain, berkembang pula *probabilistic forecasting*, yaitu model yang tidak hanya menghasilkan satu angka prediksi, tetapi distribusi kemungkinan. Pendekatan ini sangat penting dalam sistem energi yang makin dipengaruhi ketidakpastian, misalnya karena cuaca ekstrem atau intermitensi energi terbarukan. ([MDPI](#))

Riset terkini di *Nature Communications* menegaskan bahwa perkiraan harian terhadap permintaan listrik dan pembangkitan energi terbarukan sangat penting bagi operator sistem untuk menjaga keandalan dengan biaya rendah. Studi tersebut menunjukkan bahwa joint probabilistic forecasting atas demand dan renewable supply dapat memperbaiki kinerja peramalan sistem secara keseluruhan dan membantu penentuan cadangan operasi. Implikasi bagi Indonesia sangat jelas: ketika pangsa EBT dan storage dalam RUPTL makin besar, forecasting yang hanya fokus pada permintaan saja tidak cukup. Negara memerlukan pendekatan yang sekaligus memproyeksikan beban dan ketersediaan supply yang dipengaruhi cuaca. ([Nature](#))

6. Aplikasi Data Science dalam Forecasting Kebutuhan Energi Nasional

6.1 Perencanaan kapasitas jangka panjang

Aplikasi paling jelas adalah perencanaan pembangkit dan jaringan. Jika proyeksi kebutuhan listrik nasional tumbuh 5,3% per tahun, maka keputusan tentang tambahan kapasitas 69,5 GW harus didasarkan pada model yang mampu memetakan pertumbuhan tersebut menurut wilayah, waktu, dan segmen pengguna. Data science membantu memperhalus angka makro menjadi kebutuhan yang lebih operasional: berapa tambahan kapasitas dibutuhkan di Jawa-Bali, Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, atau kawasan timur; berapa kebutuhan penyimpanan untuk menutup beban puncak; dan kapan proyek harus masuk agar tidak terjadi *undersupply* atau *oversupply*. ([DJK Official Site](#))

Kesalahan dalam forecasting jangka panjang dapat mahal. Jika negara terlalu optimistis, ia berisiko membangun kapasitas dan jaringan yang tidak dimanfaatkan secara penuh, membebani tarif atau fiskal. Jika

terlalu konservatif, hasilnya adalah bottleneck pasokan, penundaan investasi industri, dan turunnya kualitas layanan. Karena itu, nilai utama data science di sini bukan sekadar “lebih akurat”, tetapi “lebih berguna untuk pengambilan keputusan”. Model yang baik membantu mengurutkan proyek, menguji berbagai skenario pertumbuhan ekonomi, dan menilai sensitivitas terhadap perubahan teknologi seperti kendaraan listrik atau kompor induksi.

6.2 Forecasting regional dan spasial

Indonesia adalah negara kepulauan dengan heterogenitas spasial yang tinggi. Pola konsumsi listrik di Jabodetabek berbeda dengan Kalimantan Timur, kawasan industri Morowali, Bali yang bertumpu pada pariwisata, atau kota-kota menengah yang bertumbuh cepat. Karena itu, forecasting nasional harus memiliki dimensi spasial. Data science berbasis geospasial dapat memadukan data populasi, ekonomi daerah, suhu, intensitas bangunan, akses listrik, lokasi industri, dan infrastruktur energi untuk memetakan wilayah yang akan mengalami lonjakan permintaan.

Studi LEMIGAS tentang Kalimantan Timur menarik sebagai ilustrasi. Penelitian tersebut menunjukkan bagaimana pertumbuhan GRDP dan populasi dapat digunakan dalam pendekatan *bottom-up* untuk memodelkan kebutuhan energi jangka panjang sektor rumah tangga. Secara substantif, ini memberi pelajaran bahwa proyeksi energi lebih kuat ketika dibangun dari karakteristik wilayah, bukan hanya dari angka agregat nasional. Dalam konteks Indonesia yang sedang mengembangkan pusat pertumbuhan baru dan IKN di Kalimantan, logika *bottom-up* seperti ini akan semakin relevan.

(journal.lemigas.esdm.go.id)

6.3 Manajemen beban puncak dan operasi sistem

Forecasting jangka pendek dan sangat pendek berperan penting dalam operasi sistem tenaga. Ketepatan prediksi beban per jam menentukan

penjadwalan pembangkit, kebutuhan cadangan, pengelolaan gangguan, dan efisiensi dispatch. Peningkatan penggunaan pendingin udara membuat aspek ini makin penting. IEA menegaskan bahwa di Asia Tenggara, pendinginan akan menjadi salah satu sumber utama pertumbuhan penggunaan listrik, dan di Indonesia kepemilikan AC rumah tangga dapat mencapai 50% pada 2035. Kenaikan ini bukan hanya menaikkan konsumsi total, tetapi juga berpotensi mendorong lonjakan beban puncak pada jam tertentu, terutama saat cuaca panas. ([IEA](#))

Dalam situasi seperti itu, data science memungkinkan operator membangun model beban puncak yang sensitif terhadap suhu, kelembapan, kalender, dan perilaku pelanggan. Bahkan model *peak demand forecasting* terbaru menekankan bahwa prediksi puncak yang akurat membantu meminimalkan biaya sistem. Bagi Indonesia, manfaat praktisnya nyata: operator dapat mengurangi kebutuhan pembangkitan cadangan yang mahal, memperbaiki *load factor*, dan meningkatkan keandalan sistem tanpa selalu menambah kapasitas baru. ([Nature](#))

6.4 Demand response, tarif, dan efisiensi energi

Forecasting tidak hanya berguna untuk sisi pasokan, tetapi juga untuk mengelola sisi permintaan. Dengan data granular dari AMI, perencana dapat mengenali pelanggan atau wilayah yang paling berkontribusi pada beban puncak, lalu merancang tarif waktu-pemakaian, insentif efisiensi, atau program demand response. Pendekatan ini penting karena menambah pasokan sering lebih mahal daripada menggeser beban ke waktu yang lebih aman. Literatur forecasting dan demand response 2025 juga menegaskan bahwa pemodelan permintaan merupakan fondasi bagi penjadwalan ekonomi yang lebih efisien. ([PT PLN \(Persero\)](#))

Di Indonesia, pendekatan ini bisa digunakan misalnya untuk gedung komersial, pusat belanja, hotel, dan rumah tangga urban berpendapatan menengah-atas yang memiliki fleksibilitas konsumsi lebih tinggi. Dalam

narasi kebijakan, negara tidak perlu selalu memandang kenaikan permintaan listrik sebagai ancaman yang harus dijawab dengan pembangkit baru. Sebagian kenaikan itu bisa dikelola melalui efisiensi peralatan, tarif dinamis, desain bangunan yang lebih baik, dan perilaku penggunaan yang lebih cerdas. Data science membuat strategi semacam ini lebih terukur.

6.5 Integrasi energi terbarukan dan storage

Semakin besar porsi EBT dan storage, semakin penting forecasting yang menghubungkan demand dengan supply. RUPTL 2025–2034 memberi sinyal kuat ke arah itu dengan porsi 76% tambahan kapasitas berasal dari EBT dan storage. Dalam sistem yang lebih hijau, ketidakpastian tidak hanya datang dari permintaan, tetapi juga dari pasokan berbasis matahari dan angin. Karena itu, forecasting kebutuhan energi nasional perlu dihubungkan dengan forecasting output pembangkit variabel, kapasitas storage, dan fleksibilitas jaringan. ([PT PLN \(Persero\)](#))

Bagi Indonesia, persoalan ini sangat relevan terutama pada sistem dengan penetrasi PLTS yang meningkat. Jika beban puncak terjadi setelah matahari terbenam, maka keandalan sistem akan ditentukan oleh ketepatan prediksi beban malam, ketersediaan storage, dan kemampuan jaringan. Inilah alasan mengapa pendekatan probabilistik dan *joint forecasting* menjadi penting. Data science dalam konteks ini bukan hanya alat permintaan, tetapi perangkat orkestrasi sistem tenaga.

7. Narasi Kasus dan Ilustrasi Indonesia

Untuk memahami arti praktis data science, bayangkan sebuah kawasan ekonomi baru yang berkembang cepat di Indonesia timur. Dalam lima tahun, masuk pabrik pengolahan, perumahan pekerja, pusat logistik, rumah sakit, dan sekolah. Penduduk bertambah, kendaraan listrik mulai

digunakan, dan suhu kota meningkat akibat urban heat island. Jika perencana hanya memakai tren historis penjualan listrik daerah itu, kenaikan permintaan bisa tampak moderat. Namun bila model memasukkan data investasi industri, migrasi penduduk, suhu, pola hunian, dan adopsi AC, hasilnya bisa menunjukkan lonjakan beban yang jauh lebih tinggi—dan terutama pada jam malam. Inilah jenis wawasan yang hanya mungkin muncul ketika forecasting dikerjakan dengan pendekatan data science.

Konteks semacam ini tidak hipotetis sepenuhnya. Studi LEMIGAS pada Kalimantan Timur memperlihatkan bahwa pertumbuhan GRDP dan populasi berkorelasi dengan peningkatan konsumsi energi, dan pendekatan *bottom-up* dapat digunakan untuk memodelkan kebutuhan masa depan. Jika logika ini diperluas ke wilayah-wilayah yang sedang mengalami percepatan pertumbuhan, maka forecasting dapat menjadi alat deteksi dini terhadap kebutuhan infrastruktur listrik sebelum keterlambatan pasokan terjadi. (journal.lemigas.esdm.go.id)

Ilustrasi lain datang dari sektor rumah tangga. Indonesia saat ini masih berada pada tahap ketika kepemilikan AC rumah tangga relatif rendah dibanding potensi iklim tropisnya, tetapi IEA memperkirakan angkanya bisa naik menjadi 50% pada 2035. Secara naratif, ini berarti bahwa jutaan rumah tangga urban yang sebelumnya hanya memakai listrik untuk penerangan dan alat dasar akan bergeser menjadi konsumen pendinginan aktif. Kenaikan konsumsi total mungkin penting, tetapi yang lebih penting adalah konsekuensinya pada puncak beban siang atau malam hari. Forecasting yang mengabaikan variabel pendinginan akan cenderung meremehkan kebutuhan sistem. (IEA)

Ekonomi digital menambah lapisan tantangan baru. Ketika pusat data tumbuh, profil bebannya berbeda dari rumah tangga atau industri manufaktur. Pusat data cenderung menambah beban dasar yang stabil namun besar, serta menuntut reliabilitas sangat tinggi. Laporan IEA

menunjukkan bahwa konsumsi listrik pusat data global diperkirakan berlipat ganda pada 2030 dan di Asia Tenggara meningkat lebih dari dua kali lipat. Jika Indonesia ingin menjadi pemain penting dalam ekonomi digital regional, maka perencanaan energinya harus mulai membaca kebutuhan jenis pengguna baru ini, bukan hanya pelanggan konvensional. ([IEA](#))

8. Tantangan Implementasi

Meskipun potensinya besar, implementasi data science dalam forecasting energi nasional menghadapi sejumlah hambatan. Hambatan pertama adalah kualitas data. Ketika data sisi permintaan belum lengkap, standardisasi istilah belum seragam, atau data antar-instansi tidak mudah dihubungkan, maka model paling canggih sekalipun akan menghasilkan keluaran yang rapuh. Prinsip klasik *garbage in, garbage out* berlaku penuh di sini. Tantangan Indonesia sebagaimana tercatat dalam handbook resmi ESDM menunjukkan bahwa reformasi data harus menjadi agenda inti, bukan pelengkap. ([Kementerian ESDM](#))

Hambatan kedua adalah silo kelembagaan. Data energi tersebar pada kementerian, PLN, operator sistem, BPS, pemerintah daerah, pelaku industri, dan penyedia data cuaca atau spasial. Tanpa interoperabilitas, data science akan tersendat. Forecasting nasional memerlukan arsitektur data bersama, metadata yang jelas, protokol pertukaran data, dan tata kelola akses yang aman. Dalam istilah manajemen, masalah terbesar sering kali bukan kurangnya algoritma, melainkan kurangnya integrasi organisasi.

Hambatan ketiga adalah kapasitas SDM. Forecasting energi modern membutuhkan kombinasi kompetensi yang jarang berada dalam satu meja: ahli energi, ekonom, insinyur sistem tenaga, data scientist, ahli GIS,

dan pembuat kebijakan. Karena itu, negara perlu membangun tim lintas disiplin. Tanpa pemahaman domain, model bisa akurat tetapi tidak relevan. Sebaliknya, tanpa kecakapan analitik, intuisi kebijakan bisa tertinggal dari realitas data.

Hambatan keempat berkaitan dengan interpretabilitas dan kepercayaan. Dalam ranah publik, keputusan investasi energi bernilai sangat besar dan berdampak luas. Karena itu, model yang dipakai tidak boleh hanya akurat; ia juga harus dapat dijelaskan. Penelitian mengenai *interpretable load forecasting* dan ulasan XAI di sektor energi menunjukkan bahwa kebutuhan akan model yang dapat dijelaskan makin mendesak, terutama pada sistem yang lebih hijau dan lebih kompleks. Bagi kebijakan publik, interpretabilitas penting untuk audit, legitimasi, dan akuntabilitas. ([MDPI](#))

9. Implikasi Kebijakan dan Agenda Penguatan Nasional

Pertama, Indonesia perlu membangun **arsitektur data energi nasional** yang terintegrasi. Langkah ini mencakup standardisasi definisi, sinkronisasi antar-instansi, dan penguatan data sisi permintaan hingga level wilayah dan segmen pelanggan. Tanpa fondasi ini, forecasting nasional akan tetap terlalu bergantung pada estimasi makro.

Kedua, Indonesia perlu mengembangkan **forecasting multi-horizon**. Pemerintah tidak cukup memiliki satu proyeksi tahunan untuk dokumen perencanaan. Yang dibutuhkan adalah ekosistem model: jangka panjang untuk kebijakan kapasitas, jangka menengah untuk investasi jaringan, jangka pendek untuk operasi sistem, dan probabilistik untuk integrasi EBT serta cadangan operasi. Literatur mutakhir jelas menunjukkan bahwa kebutuhan forecasting berbeda menurut horizon dan tujuan. ([MDPI](#))

Ketiga, diperlukan **investasi pada smart metering dan digitalisasi distribusi**. AMI bukan sekadar alat penagihan modern, melainkan

fondasi observabilitas sistem. Semakin luas cakupan smart meter, semakin kaya data perilaku konsumsi yang dapat dipakai untuk forecasting, demand response, efisiensi, dan perlindungan pelanggan. ([PT PLN \(Persero\)](#))

Keempat, Indonesia perlu membangun **pusat analitik energi nasional** yang mempertemukan pemerintah, PLN, universitas, BPS, BMKG, dan pelaku industri. Pusat semacam ini dapat mengembangkan model, menguji skenario, dan menghasilkan dashboard kebijakan yang diperbarui berkala. Dalam jangka panjang, pusat ini dapat berkembang menjadi *digital twin* sistem energi nasional.

Kelima, forecasting energi perlu dihubungkan dengan **agenda transisi energi dan ekonomi digital**. Data science harus membaca beban baru dari pendinginan, kendaraan listrik, kompor listrik, storage, dan pusat data, bukan sekadar beban lama. Jika tidak, sistem akan selalu tertinggal satu langkah dari perubahan struktur permintaan. ([IEA](#))

Keenam, pemerintah perlu menerapkan prinsip **explainable and accountable forecasting**. Model yang dipakai untuk justifikasi proyek besar sebaiknya dapat diaudit, dijelaskan, dan dibandingkan lintas skenario. Dalam konteks tata kelola publik, transparansi model akan memperkuat kepercayaan, menurunkan risiko bias, dan membantu evaluasi kebijakan di masa depan. ([MDPI](#))

10. Kesimpulan

Peran data science dalam forecasting kebutuhan energi nasional semakin sentral karena sistem energi modern tidak lagi bergerak dalam pola sederhana. Pertumbuhan permintaan listrik global yang melebihi pertumbuhan energi total, lonjakan pendinginan, pertumbuhan pusat data, elektrifikasi transportasi, dan integrasi EBT membuat forecasting

berbasis tren historis semata menjadi tidak memadai. Indonesia, dengan proyeksi pertumbuhan kebutuhan listrik 5,3% per tahun dalam RUPTL 2025–2034 serta tambahan kapasitas 69,5 GW yang didominasi EBT dan storage, berada pada titik ketika kualitas forecasting akan sangat menentukan kualitas transisi energinya. ([IEA](#))

Dalam kerangka itu, data science berperan pada sedikitnya lima level. Pertama, mengintegrasikan data yang tersebar. Kedua, membangun model prediksi yang lebih akurat dan lebih kaya skenario. Ketiga, memetakan kebutuhan energi secara spasial dan temporal. Keempat, membantu operasi sistem dan manajemen beban puncak. Kelima, mendukung pengambilan keputusan investasi, tarif, efisiensi, dan transisi energi. Dengan kata lain, data science bukan hanya alat teknis, melainkan infrastruktur intelektual bagi ketahanan energi nasional.

Namun manfaat itu hanya akan terwujud jika Indonesia membenahi fondasi datanya. Tantangan demand-side data, standardisasi, interoperabilitas, kapasitas SDM, dan interpretabilitas model harus dijawab secara kelembagaan. Energi masa depan bukan hanya soal berapa banyak pembangkit dibangun, melainkan seberapa cerdas negara membaca pola kebutuhannya. Oleh sebab itu, masa depan forecasting energi nasional akan sangat ditentukan oleh keberhasilan Indonesia membangun ekosistem data yang akurat, adaptif, transparan, dan terhubung dengan kebijakan. Pada titik itulah data science menjadi bukan sekadar teknologi, melainkan strategi kenegaraan.

Glosarium

AMI (Advanced Metering Infrastructure)

Sistem meter pintar yang memungkinkan pembacaan meter,

pemantauan konsumsi, dan komunikasi data secara real-time atau mendekati real-time.

Beban dasar (base load)

Tingkat permintaan listrik minimum yang relatif stabil dalam suatu sistem selama periode tertentu.

Beban puncak (peak demand)

Tingkat tertinggi permintaan listrik pada waktu tertentu yang biasanya menentukan kebutuhan kapasitas cadangan.

Bottom-up modeling

Pendekatan pemodelan yang membangun proyeksi dari unit-unit kecil, sektor, atau wilayah, lalu mengagregasikannya ke tingkat yang lebih besar.

Data science

Disiplin interdisipliner yang menggabungkan statistik, komputasi, machine learning, dan pengetahuan domain untuk mengolah data menjadi wawasan dan prediksi.

Deep learning

Cabang machine learning berbasis jaringan saraf berlapis banyak yang efektif untuk pola kompleks, termasuk deret waktu energi.

Demand response

Strategi mengubah atau menggeser konsumsi energi pelanggan sebagai respons terhadap sinyal harga, insentif, atau kebutuhan sistem.

Digital twin

Representasi digital dari sistem fisik yang diperbarui secara dinamis dengan data nyata untuk analisis, simulasi, dan pengambilan keputusan.

Elektrifikasi

Peningkatan penggunaan energi listrik untuk aktivitas yang sebelumnya menggunakan energi non-listrik.

Energi Baru Terbarukan (EBT)

Kelompok sumber energi yang terbarukan atau dikembangkan sebagai alternatif yang lebih bersih terhadap energi fosil.

Ensemble model

Model gabungan dari beberapa model berbeda untuk meningkatkan akurasi prediksi.

Explainable AI (XAI)

Pendekatan AI yang menekankan keterjelasan alasan di balik keluaran model sehingga lebih mudah diaudit dan dipercaya.

Forecasting probabilistik

Peramalan yang menghasilkan rentang kemungkinan atau distribusi probabilitas, bukan satu angka tunggal.

Geospatial analytics

Analisis data berbasis lokasi untuk memahami pola ruang dan distribusi fenomena.

GRDP/PDRB

Produk Domestik Regional Bruto, indikator nilai tambah ekonomi suatu wilayah.

Hybrid forecasting

Pendekatan yang menggabungkan dua atau lebih metode, misalnya statistik dan machine learning, dalam satu sistem peramalan.

Interoperabilitas data

Kemampuan berbagai sistem data untuk saling bertukar, membaca, dan menggunakan data secara konsisten.

Load forecasting

Peramalan beban listrik atau permintaan listrik pada berbagai horizon waktu.

Machine learning

Metode komputasional yang memungkinkan sistem belajar dari data untuk mengenali pola dan membuat prediksi.

Storage

Teknologi penyimpanan energi, seperti baterai atau pumped storage, untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan.

Time series

Rangkaian data yang disusun menurut urutan waktu dan dianalisis untuk menangkap pola tren, musiman, atau siklus.

Very short-term forecasting

Peramalan untuk horizon sangat pendek, biasanya menit hingga beberapa jam, penting bagi operasi sistem real-time.

Berikut **versi jurnal yang lebih formal** dengan **abstrak Inggris**, **subjudul bernomor lebih ketat**, dan **daftar pustaka gaya APA 7**.

Peran Data Science dalam Forecasting Kebutuhan Energi Nasional

Rudy C. Tarumingkeng

Abstrak

Forecasting kebutuhan energi nasional merupakan fungsi strategis dalam perencanaan pembangunan, investasi infrastruktur, dan

ketahanan energi. Tantangan utama abad ke-21 adalah bahwa pertumbuhan kebutuhan listrik tidak lagi mengikuti pola linier sederhana, tetapi dipengaruhi oleh elektrifikasi, urbanisasi, perubahan iklim, digitalisasi, pertumbuhan pendinginan ruangan, kendaraan listrik, dan pusat data. Secara global, permintaan energi meningkat 2,2% pada 2024, sedangkan permintaan listrik tumbuh 4,3%, yang menunjukkan semakin besarnya peran listrik dalam sistem energi modern. Di Asia Tenggara, kebutuhan listrik diproyeksikan tumbuh sekitar 4% per tahun hingga 2035, sementara di Indonesia RUPTL 2025–2034 memproyeksikan pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik rata-rata 5,3% per tahun dengan total tambahan kapasitas sekitar 69,5 GW, di mana sekitar 76% berasal dari energi baru terbarukan dan storage. ([IEA](#))

Makalah ini bertujuan menganalisis peran data science dalam forecasting kebutuhan energi nasional melalui pendekatan studi pustaka konseptual. Artikel ini berargumen bahwa data science memperkuat forecasting energi melalui lima fungsi utama, yaitu integrasi data multisumber, peningkatan akurasi prediksi, pemetaan spasial-temporal permintaan, pengelolaan ketidakpastian sistem, dan dukungan terhadap pengambilan keputusan kebijakan. Dalam konteks Indonesia, urgensi pendekatan ini meningkat karena masih terdapat persoalan mendasar berupa keterbatasan data sisi permintaan dan belum seragamnya standardisasi data energi. Dengan demikian, data science tidak hanya berfungsi sebagai alat analitik, tetapi juga sebagai fondasi kelembagaan untuk perencanaan energi nasional yang lebih presisi, adaptif, dan akuntabel. ([Kementerian ESDM](#))

Kata kunci: data science, forecasting energi, kebutuhan listrik nasional, machine learning, ketahanan energi, kebijakan energi.

Abstract

Forecasting national energy demand has become a strategic function in development planning, infrastructure investment, and energy security. The major challenge in the twenty-first century is that electricity demand no longer follows a simple linear pattern; instead, it is increasingly shaped by electrification, urbanization, climate change, digitalization, cooling demand, electric vehicles, and data centers. At the global level, total energy demand increased by 2.2% in 2024, while electricity demand grew by 4.3%, indicating the rising centrality of electricity in modern energy systems. In Southeast Asia, electricity demand is projected to grow by around 4% annually through 2035. In Indonesia, the 2025–2034 Electricity Supply Business Plan projects average electricity demand growth of 5.3% per year, alongside an additional generation capacity plan of about 69.5 GW, of which roughly 76% comes from renewables and storage. ([IEA](#))

This paper analyzes the role of data science in forecasting national energy demand through a conceptual literature review. It argues that data science strengthens energy forecasting through five major functions: multisource data integration, improved predictive accuracy, spatial-temporal demand mapping, uncertainty management, and policy decision support. In the Indonesian context, this approach is increasingly urgent because national energy planning still faces structural constraints, particularly the lack of demand-side data and inconsistent data standardization. Therefore, data science should be understood not merely as an analytical tool, but as an institutional foundation for more precise, adaptive, and accountable national energy planning. ([Kementerian ESDM](#))

Keywords: data science, energy forecasting, national electricity demand, machine learning, energy security, energy policy.

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan prasyarat fundamental bagi pertumbuhan ekonomi, industrialisasi, mobilitas sosial, dan kualitas hidup masyarakat. Dalam negara berkembang seperti Indonesia, energi tidak hanya berfungsi sebagai input produksi, melainkan juga sebagai instrumen pemerataan pembangunan. Namun, perencanaan energi nasional dewasa ini menghadapi tantangan yang jauh lebih kompleks daripada masa lalu. Kebutuhan energi tidak lagi semata-mata ditentukan oleh pertumbuhan penduduk dan ekspansi ekonomi, melainkan juga oleh intensitas elektrifikasi, penetrasi teknologi baru, perubahan pola konsumsi rumah tangga, suhu ekstrem, dan digitalisasi ekonomi. Secara global, IEA mencatat bahwa pertumbuhan permintaan energi pada 2024 mencapai 2,2%, sedangkan permintaan listrik meningkat 4,3%, atau tumbuh jauh lebih cepat daripada permintaan energi total. ([IEA](#))

Perubahan itu juga tampak jelas di Asia Tenggara. IEA memproyeksikan bahwa kebutuhan listrik di kawasan ini akan meningkat sekitar 4% per tahun hingga 2035. Salah satu pendorong utamanya adalah pendinginan ruangan. Saat ini sekitar 16% listrik gedung di Asia Tenggara digunakan untuk pendinginan, dan pangsaanya dapat meningkat menjadi sekitar 30% pada 2035. Untuk Indonesia, kepemilikan AC rumah tangga yang saat ini masih di bawah 15% diproyeksikan naik menjadi sekitar 50% pada 2035. Fakta ini menunjukkan bahwa sistem energi di kawasan tropis tidak dapat lagi direncanakan hanya dengan asumsi konsumsi rata-rata tahunan. Profil beban harian, puncak musiman, dan perilaku rumah tangga menjadi semakin menentukan. ([IEA](#))

Dalam konteks Indonesia, urgensi forecasting terlihat dari dokumen resmi RUPTL 2025–2034. Pemerintah memproyeksikan rata-rata pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik sebesar 5,3% per tahun. Pada saat yang sama, direncanakan total penambahan kapasitas pembangkit

sekitar 69,5 GW hingga 2034, dan sekitar 76% dari tambahan itu berasal dari energi baru terbarukan dan storage. Besarnya skala investasi ini berarti bahwa kesalahan peramalan tidak lagi bersifat teknis semata, tetapi dapat berdampak pada efisiensi pembiayaan, stabilitas sistem, struktur tarif, dan daya saing ekonomi nasional. ([DJK Official Site](#))

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, pertanyaan utama dalam artikel ini adalah: bagaimana data science dapat memperkuat forecasting kebutuhan energi nasional dalam konteks sistem energi yang semakin kompleks, terdigitalisasi, dan terdorong oleh transisi energi?

1.3 Tujuan Penulisan

Artikel ini bertujuan untuk:

- (1) menjelaskan urgensi forecasting energi nasional dalam konteks Indonesia dan global;
 - (2) menguraikan kontribusi data science terhadap peningkatan akurasi dan relevansi forecasting;
 - (3) mengidentifikasi tantangan implementasi data science dalam sistem energi nasional; dan
 - (4) merumuskan implikasi kebijakan bagi penguatan tata kelola data dan perencanaan energi di Indonesia.
-

2. Metode Penulisan

Artikel ini menggunakan pendekatan **studi pustaka konseptual** dengan menelaah dokumen kebijakan resmi, laporan lembaga internasional, data statistik pemerintah, dan artikel ilmiah tentang forecasting energi dan data science. Sumber utama meliputi laporan IEA, dokumen Kementerian ESDM dan Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, publikasi PLN, data BPS, serta artikel ilmiah mutakhir mengenai metode forecasting listrik,

machine learning, deep learning, dan probabilistic forecasting. Pendekatan ini dipilih karena tujuan artikel bukan menguji model empiris tertentu, melainkan membangun sintesis teoretis dan kebijakan mengenai kontribusi data science dalam forecasting kebutuhan energi nasional. ([IEA](#))

3. Tinjauan Pustaka dan Kerangka Konseptual

3.1 Forecasting Kebutuhan Energi sebagai Fungsi Strategis

Forecasting kebutuhan energi adalah proses memperkirakan konsumsi energi atau listrik di masa depan berdasarkan pola historis, variabel struktural, dan asumsi perubahan sistem. Dalam praktik kebijakan, forecasting berfungsi sebagai dasar bagi pembangunan pembangkit, jaringan transmisi-distribusi, penyediaan bahan bakar, pengaturan tarif, dan strategi efisiensi energi. Literatur mutakhir menunjukkan bahwa forecasting listrik umumnya dibedakan ke dalam empat horizon: *very short-term*, *short-term*, *medium-term*, dan *long-term*. Masing-masing horizon melayani kebutuhan yang berbeda, mulai dari operasi sistem real-time hingga investasi kapasitas jangka panjang. ([MDPI](#))

Di negara berkembang dan menengah, karakter forecasting bahkan lebih kompleks karena struktur ekonomi masih berubah cepat, data permintaan sering tidak lengkap, dan faktor iklim semakin dominan. Ulasan Mir dkk. menunjukkan bahwa determinan permintaan listrik sangat bergantung pada horizon ramalan, tingkat agregasi beban, iklim, dan aktivitas sosial-ekonomi. Ini berarti bahwa pendekatan seragam untuk seluruh jenis kebutuhan energi akan menghasilkan model yang miskin sensitivitas. ([MDPI](#))

3.2 Konsep Data Science dalam Sistem Energi

Data science dapat dipahami sebagai disiplin yang menggabungkan statistika, ilmu komputer, machine learning, pengolahan data besar, dan pengetahuan domain untuk menghasilkan prediksi serta wawasan yang dapat dipakai dalam pengambilan keputusan. Dalam sistem energi, data science menjadi relevan karena permintaan listrik bersifat dinamis, berjenjang waktu, dan dipengaruhi interaksi banyak variabel yang tidak selalu linier. Tinjauan metode forecasting listrik menunjukkan bahwa perkembangan mutakhir bergerak dari model statistik klasik ke arah machine learning, deep learning, ensemble, dan hybrid modeling. (MDPI)

Dari sudut pandang manajerial, data science tidak hanya meningkatkan akurasi prediksi, tetapi juga mengubah forecasting dari aktivitas administratif menjadi aktivitas strategis. Ia memungkinkan integrasi data historis beban, cuaca, kalender, PDB sektoral, perilaku pelanggan, dan data spasial ke dalam suatu kerangka analitik yang dapat memetakan ketidakpastian dan skenario alternatif. Oleh sebab itu, data science layak diposisikan sebagai infrastruktur intelektual bagi tata kelola energi modern. (MDPI)

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Urgensi Forecasting Energi dalam Konteks Indonesia

Indonesia memasuki fase ketika pertumbuhan permintaan listrik harus dibaca dalam kerangka yang lebih kompleks daripada sekadar kenaikan pelanggan. Data BPS menunjukkan bahwa pada 2024 pelanggan PLN didominasi rumah tangga sebanyak 84.660.382 pelanggan, disusul bisnis 5.146.548, sosial 2.088.434, dan industri 253.055. Dari sisi distribusi listrik, rumah tangga juga menjadi pengguna terbesar dengan 130.433,10 GWh, diikuti bisnis 58.771,13 GWh dan sosial 12.679,24 GWh. Struktur ini menegaskan bahwa perubahan perilaku rumah tangga dan bangunan

komersial akan sangat menentukan profil kebutuhan listrik nasional ke depan. ([Badan Pusat Statistik Indonesia](#))

Dari sisi indikator makro, Buku Statistik Ketenagalistrikan 2024 mencatat konsumsi listrik per kapita Indonesia mencapai 1.411 kWh/kapita. Sementara itu, Ditjen Ketenagalistrikan menetapkan rasio elektrifikasi nasional triwulan III 2024 sebesar 99,82%. Kedua indikator ini menunjukkan bahwa Indonesia telah memasuki tahap pembangunan kelistrikan yang makin matang: bukan hanya memperluas akses, tetapi juga mengelola pertumbuhan konsumsi, reliabilitas sistem, dan kualitas layanan secara lebih canggih. ([DJK Official Site](#))

Dalam fase ini, forecasting energi nasional harus menjawab pertanyaan yang lebih rinci: di wilayah mana beban tumbuh paling cepat, pada jam berapa puncak permintaan terjadi, sektor mana yang paling sensitif terhadap cuaca, dan bagaimana listrik untuk industri, rumah tangga, kendaraan listrik, serta ekonomi digital akan berinteraksi. Dengan kata lain, total permintaan nasional hanyalah satu lapis dari persoalan. Yang lebih penting adalah distribusi spasial dan temporal dari kebutuhan tersebut. ([MDPI](#))

4.2 Masalah Struktural Data Energi Nasional

Salah satu hambatan paling mendasar dalam forecasting energi Indonesia adalah kualitas dan struktur data. *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2024* secara tegas menyatakan bahwa tantangan utama saat ini adalah kurangnya data energi sisi permintaan, sementara banyak data yang tersedia justru masih diturunkan dari sisi pasokan. Dokumen tersebut juga menyoroti belum seragamnya terminologi dan standardisasi data energi-ekonomi, yang berpotensi menghasilkan analisis yang kurang akurat. ([Kementerian ESDM](#))

Dari sudut pandang data science, kelemahan ini sangat penting. Model canggih tidak akan menghasilkan prediksi yang kuat bila data dasar

tidak lengkap, terlambat, bias, atau tidak interoperabel. Dalam sistem energi, data yang lemah akan membuat negara cenderung merespons krisis setelah terjadi, bukan mengantisipasinya. Oleh sebab itu, prasyarat pertama forecasting yang berkualitas bukanlah algoritma paling mutakhir, melainkan ekosistem data yang dapat dipercaya. ([Kementerian ESDM](#))

4.3 Peran Data Science dalam Integrasi Data Multisumber

Kontribusi pertama data science adalah kemampuannya mengintegrasikan data dari berbagai sumber yang sebelumnya berdiri sendiri. Dalam forecasting energi, data yang relevan tidak terbatas pada histori konsumsi listrik. Variabel penting lain mencakup suhu, kelembapan, curah hujan, kalender hari kerja dan hari libur, pertumbuhan ekonomi sektoral, kepadatan penduduk, urbanisasi, lokasi industri, penetrasi kendaraan listrik, penyebaran pendingin ruangan, dan perkembangan pusat data. Ulasan ilmiah tentang forecasting listrik menegaskan bahwa kinerja model sangat dipengaruhi oleh kualitas pemilihan fitur dan kemampuan menggabungkan faktor-faktor penentu yang berbeda menurut horizon waktu. ([MDPI](#))

Dalam praktik Indonesia, data science dapat menghubungkan data pelanggan PLN, data BPS, data BMKG, data investasi industri, serta informasi kebijakan elektrifikasi ke dalam satu model terintegrasi. Dengan pendekatan ini, lonjakan beban di suatu provinsi tidak semata dibaca sebagai akibat pertumbuhan penduduk, tetapi mungkin juga sebagai dampak masuknya industri baru, peningkatan suhu, atau perubahan perilaku rumah tangga urban. Nilai tambah data science terletak pada kemampuannya mengubah data yang tersebar menjadi wawasan kebijakan yang dapat ditindaklanjuti. ([Badan Pusat Statistik Indonesia](#))

4.4 Peran Data Science dalam Peningkatan Akurasi Prediksi

Literatur terbaru menunjukkan bahwa forecasting listrik telah berkembang dari metode statistik tradisional menuju integrasi dengan machine learning dan deep learning. Tinjauan Misiurek dkk. menegaskan bahwa forecasting listrik saat ini mencakup model statistik klasik, pendekatan berbasis kecerdasan buatan, serta arsitektur hybrid yang menggabungkan keduanya. Sementara itu, Klyuev dkk. menekankan bahwa akurasi forecasting merupakan syarat penting untuk meningkatkan validitas keputusan manajerial dalam penyediaan listrik.

([MDPI](#))

Model statistik klasik seperti regresi, ARIMA, dan SARIMA tetap berguna untuk memahami hubungan antarvariabel secara eksplisit, terutama pada horizon menengah dan panjang. Namun, ketika hubungan antara permintaan listrik, cuaca, kalender, dan perilaku pelanggan menjadi semakin nonlinier, machine learning seperti random forest, gradient boosting, dan support vector machine menawarkan keunggulan karena mampu menangkap pola kompleks dari data. Pada level yang lebih tinggi, deep learning seperti LSTM dan GRU efektif untuk menangani deret waktu yang panjang dan fluktuatif. ([MDPI](#))

Bagi Indonesia, kombinasi metode tersebut sangat relevan. Forecasting jangka panjang untuk RUPTL atau RUKN dapat tetap memanfaatkan model ekonometrik berbasis pertumbuhan ekonomi, populasi, dan elektrifikasi. Namun forecasting operasional untuk sistem perkotaan, kawasan industri, atau wilayah dengan penetrasi pendinginan tinggi akan lebih efektif bila menggunakan machine learning atau deep learning yang memasukkan variabel suhu, waktu, dan pola penggunaan pelanggan. Dengan demikian, data science sebaiknya dipahami bukan sebagai pengganti total metode klasik, melainkan sebagai perluasan portofolio metodologis. ([DJK Official Site](#))

4.5 Peran Data Science dalam Pemetaan Spasial dan Temporal

Forecasting energi nasional tidak cukup akurat bila hanya menghasilkan angka tahunan agregat. Sistem tenaga listrik beroperasi berdasarkan profil beban per waktu dan per lokasi. Karena itu, data science sangat penting untuk membangun peta permintaan yang bersifat spasial dan temporal. Pendekatan ini membantu negara mengetahui wilayah mana yang akan menghadapi pertumbuhan permintaan paling cepat, kapan puncak beban terjadi, dan apakah sistem lokal memiliki kapasitas pembangkit serta jaringan yang memadai. ([MDPI](#))

Relevansi pemetaan semacam ini meningkat ketika faktor pendinginan dan urbanisasi makin dominan. IEA memperkirakan bahwa di Indonesia kepemilikan AC rumah tangga akan meningkat dari kurang dari 15% saat ini menjadi 50% pada 2035. Kenaikan tersebut tidak hanya meningkatkan konsumsi total, tetapi juga berpotensi mendorong lonjakan beban pada jam-jam tertentu. Bagi operator sistem, informasi semacam ini lebih berharga daripada rata-rata pertumbuhan tahunan, karena menyangkut kebutuhan cadangan, distribusi lokal, dan investasi storage. ([IEA](#))

4.6 Peran Data Science dalam Smart Metering dan Demand-Side Intelligence

Digitalisasi pengukuran konsumsi menjadi fondasi penting bagi forecasting modern. PLN menjelaskan bahwa smart meter berbasis *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) memungkinkan pembacaan meter secara real-time, dilakukan dari jarak jauh, dan mendukung monitoring serta kontrol penggunaan listrik oleh pelanggan dan perusahaan. Teknologi ini juga membuka ruang bagi tarif dinamis, transparansi tagihan, dan pengenalan profil beban yang lebih rinci. ([PT PLN \(Persero\)](#))

Dalam kerangka data science, AMI mengubah data bulanan menjadi data perilaku konsumsi yang jauh lebih kaya. Dengan data granular tersebut, model dapat membedakan pola rumah tangga, bisnis, dan

industri; mengidentifikasi jam puncak; mendeteksi anomali; serta mendukung program demand response. Di tingkat kebijakan, hal ini berarti bahwa negara dapat mengelola sisi permintaan secara lebih aktif, bukan semata menambah pasokan. Demand-side intelligence seperti ini akan sangat berharga pada masa ketika biaya pembangunan kapasitas baru semakin besar dan kebutuhan fleksibilitas sistem semakin tinggi.

([PT PLN \(Persero\)](#))

4.7 Peran Data Science dalam Integrasi Energi Terbarukan dan Storage

RUPTL 2025–2034 menunjukkan arah strategis bahwa tambahan kapasitas pembangkit Indonesia akan makin didominasi oleh energi baru terbarukan dan storage. Komposisi sekitar 76% dari total tambahan kapasitas menandakan bahwa forecasting permintaan tidak dapat dipisahkan dari forecasting pasokan yang bersifat variabel, khususnya surya dan angin. Dalam sistem seperti ini, ketidakpastian tidak hanya datang dari sisi demand, tetapi juga dari profil pembangkitan yang bergantung pada kondisi cuaca. ([DJK Official Site](#))

Riset terkini di *Nature Communications* menunjukkan bahwa *joint probabilistic forecasting* atas permintaan listrik dan pasokan energi terbarukan dapat memperbaiki kinerja peramalan sistem secara keseluruhan. Dengan pendekatan probabilistik, sistem tidak hanya memperoleh satu angka ramalan, melainkan rentang kemungkinan yang lebih berguna bagi pengelolaan cadangan dan fleksibilitas operasi. Ini sangat relevan bagi Indonesia yang sedang bergerak menuju sistem energi yang lebih hijau dan lebih kompleks. ([Nature](#))

4.8 Peran Data Science dalam Membaca Beban Baru: Pendinginan, Kendaraan Listrik, dan Pusat Data

Sistem energi masa depan akan dipengaruhi oleh jenis beban baru yang tidak dominan pada dekade sebelumnya. Pendinginan ruangan adalah

salah satu yang paling jelas di Asia Tenggara. Selain itu, ekonomi digital dan pusat data juga mulai menjadi pendorong pertumbuhan listrik. Laporan IEA tentang energi dan AI menunjukkan bahwa konsumsi listrik pusat data global diperkirakan meningkat tajam menuju 2030, dan Asia Tenggara termasuk kawasan yang mengalami percepatan kebutuhan listrik dari pusat data. Implikasinya, forecasting energi nasional harus mulai memasukkan beban digital sebagai variabel struktural, bukan lagi komponen marginal. ([IEA](#))

Dalam konteks Indonesia, hal ini berarti bahwa model forecasting ke depan perlu memisahkan setidaknya tiga klaster pertumbuhan permintaan: rumah tangga urban yang makin intensif pendinginan, transportasi yang makin terelektifikasi, dan ekonomi digital yang menambah beban dasar berskala besar. Tanpa pemisahan seperti itu, angka rata-rata nasional akan menutupi perubahan struktural yang justru paling menentukan bagi ketahanan sistem. ([MDPI](#))

4.9 Tantangan Implementasi

Meskipun potensinya besar, penerapan data science dalam forecasting energi nasional menghadapi beberapa tantangan. Pertama, masalah kualitas data masih menjadi hambatan utama, terutama pada sisi permintaan. Kedua, data energi masih tersebar dalam silo kelembagaan, sehingga sulit diintegrasikan. Ketiga, kapasitas SDM yang menguasai energi, statistika, dan komputasi secara bersamaan masih terbatas. Keempat, model yang semakin canggih menimbulkan tuntutan baru atas transparansi dan interpretabilitas. ([Kementerian ESDM](#))

Isu interpretabilitas menjadi sangat penting dalam kebijakan publik. Studi Li dkk. menekankan pentingnya model peramalan beban yang tidak hanya akurat, tetapi juga dapat dijelaskan, terutama dalam skenario sistem yang semakin dipengaruhi energi terbarukan. Dalam konteks investasi energi nasional yang bernilai besar, model "kotak hitam" yang tidak dapat diaudit akan sulit memperoleh legitimasi kelembagaan. Oleh

sebab itu, agenda ke depan bukan sekadar membangun model yang canggih, tetapi juga model yang akuntabel. ([MDPI](#))

4.10 Implikasi Kebijakan

Dari pembahasan di atas, ada beberapa implikasi kebijakan yang menonjol. Pertama, Indonesia memerlukan arsitektur data energi nasional yang terintegrasi, dengan perhatian khusus pada data sisi permintaan. Kedua, forecasting nasional perlu dibangun secara multi-horizon: jangka panjang untuk investasi kapasitas, jangka menengah untuk perencanaan regional, dan jangka pendek untuk operasi sistem. Ketiga, digitalisasi distribusi dan smart metering perlu dipercepat karena merupakan fondasi bagi demand-side intelligence. Keempat, model forecasting yang digunakan dalam kebijakan publik perlu memenuhi prinsip akurasi, interpretabilitas, dan auditabilitas. ([Kementerian ESDM](#))

Dalam kerangka yang lebih luas, data science perlu diposisikan sebagai bagian dari strategi ketahanan energi nasional. Ia bukan hanya membantu negara mengetahui berapa besar listrik dibutuhkan, tetapi juga memahami kapan, di mana, oleh siapa, dan dalam kondisi apa listrik itu akan digunakan. Dengan demikian, data science mempertemukan analisis, perencanaan, dan tata kelola dalam satu ekosistem kebijakan energi yang lebih cerdas. ([MDPI](#))

5. Kesimpulan

Forecasting kebutuhan energi nasional telah berubah dari aktivitas proyeksi linier menjadi aktivitas strategis yang harus membaca sistem energi yang semakin kompleks. Pertumbuhan listrik global yang lebih cepat daripada pertumbuhan energi total, proyeksi lonjakan pendinginan di Asia Tenggara, serta arah kebijakan Indonesia dalam RUPTL 2025–2034 menegaskan bahwa kebutuhan energi masa depan

akan sangat ditentukan oleh elektrifikasi, perubahan gaya hidup, digitalisasi, dan integrasi energi terbarukan. ([IEA](#))

Dalam konteks tersebut, data science memainkan peran sentral melalui integrasi data multisumber, peningkatan akurasi prediksi, pemetaan spasial-temporal, pengelolaan ketidakpastian, dan dukungan terhadap kebijakan berbasis bukti. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada kualitas data, interoperabilitas kelembagaan, kapasitas SDM, dan transparansi model. Karena itu, tantangan Indonesia ke depan bukan hanya mengadopsi algoritma yang lebih maju, tetapi membangun tata kelola data energi nasional yang kokoh. Jika fondasi tersebut diperkuat, data science dapat menjadi salah satu instrumen terpenting untuk mewujudkan sistem energi nasional yang andal, efisien, adaptif, dan berkelanjutan. ([Kementerian ESDM](#))

Daftar Pustaka (APA 7)

Badan Pusat Statistik. (2024). *Listrik yang didistribusikan kepada pelanggan (GWh), 2024*. Badan Pusat Statistik. ([Badan Pusat Statistik Indonesia](#))

Badan Pusat Statistik. (2024). *Pelanggan perusahaan listrik negara, 2024*. Badan Pusat Statistik. ([Badan Pusat Statistik Indonesia](#))

International Energy Agency. (2024). *Southeast Asia energy outlook 2024*. International Energy Agency. ([IEA](#))

International Energy Agency. (2025). *Energy and AI*. International Energy Agency. ([Nature](#))

International Energy Agency. (2025). *Global energy review 2025*.
International Energy Agency. ([IEA](#))

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2024). *Handbook of energy & economic statistics of Indonesia 2024*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. ([Kementerian ESDM](#))

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. (2024). *Buku statistik ketenagalistrikan 2024*. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. ([DJK Official Site](#))

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. (2024, November 6). *Meningkat, rasio desa berlistrik dan rasio elektrifikasi triwulan III 2024 ditetapkan*. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. ([DJK Official Site](#))

Li, S., Zhang, Y., Dong, Z., Li, X., & Xiong, F. (2025). A study on interpretable electric load forecasting model in renewable energy grid-connected scenario. *Technologies*, 13(6), Article 219. doi:10.3390/technologies13060219 ([MDPI](#))

Mir, A. A., Alghassab, M., Ullah, K., Khan, Z. A., Lu, Y., & Imran, M. (2020). A review of electricity demand forecasting in low and middle income countries: The demand determinants and horizons. *Sustainability*, 12(15), Article 5931. doi:10.3390/su12155931 ([MDPI](#))

Misiurek, K., Sołtysiak, A., Kijowska, P., & Gaska, D. (2025). Review of methods and models for forecasting electricity consumption. *Energies*, 18(15), Article 4032. doi:10.3390/en18154032 ([MDPI](#))

Klyuev, R. V., Bosikov, I. I., Gavrina, O. A., Madaeva, M. Z., & Sokolov, A. A. (2022). Methods of forecasting electric energy consumption. *Energies*, 15(23), Article 8919. doi:10.3390/en15238919 ([MDPI](#))

Perusahaan Listrik Negara. (2023, June 12). *Meteran listrik AMI, cara baru PLN manjakan pelanggan*. PT PLN (Persero). ([PT PLN \(Persero\)](#))

Perusahaan Listrik Negara. (2023, June 6). *PLN hadirkan meteran canggih AMI*. PT PLN (Persero). ([PT PLN \(Persero\)](#))

Perusahaan Listrik Negara. (2023, November 7). *Terbukti lebih akurat dan layanan lebih optimal, PLN terus kebut pemasangan meteran AMI di 8 provinsi*. PT PLN (Persero). ([PT PLN \(Persero\)](#))

Republik Indonesia. (2025). *Rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) 2025–2034*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. ([DJK Official Site](#))

Terrén-Serrano, G., Dai, W., Li, J., You, J., & Characklis, G. (2026). Probabilistic day-ahead forecasting of system-level electricity demand and renewable generation. *Nature Communications*, 17, Article 69015. ([Nature](#))

Copilot for this article - Chatgpt 5.2 Thinking. Access date: 7 Maret 2026
Prompting on Writer's account ([Rudy C Tarumingkeng](#))

<https://chatgpt.com/c/69ab86d4-0360-839b-849c-20887e9b3029>