



OPTIMASI POTENSI ENERGI TERBARUKAN DI SULAWESI UTARA MENGGUNAKAN PENDEKATAN MACHINE LEARNING UNTUK Mendukung Ekosistem Hijau Berkelanjutan

Andrea Rian Polii¹, Vania Ewvangelina Faisal², Anritsu Steven Christian Polii³,
Tracy Marsela Kereh⁴

^{1,2,3,4}Teknik Informatika, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado
E-mail: andrearian@polimdo.ac.id

Abstrak

Provinsi Sulawesi Utara memiliki kekayaan sumber daya energi baru terbarukan (EBT) yang sangat besar, mencakup potensi energi surya, angin, panas bumi, biomassa, dan energi air. Pengembangan ekosistem hijau di wilayah ini menekankan pada dekarbonisasi sistem energi, efisiensi sumber daya, dan pemanfaatan sumber energi terbarukan setempat yang ramah lingkungan. Berdasarkan dokumen Rencana Umum Energi Daerah (RUED), total potensi EBT teoretis di Sulawesi Utaramencapai 8.365 MW, dengan potensi spesifik yang telah teridentifikasi dan siap dioptimalkan sebesar 1.546,09 MW. Meskipun potensi tersebut sangat besar, ketergantungan terhadap energi fosil di wilayah kepulauan masih sangat tinggi. Wilayah terpencil seperti Sangihe dan Talaud masih terisolasi dengan durasi operasional listrik yang terbatas, yakni hanya berkisar antara 6 hingga 12 jam per hari dengan beberapa wilayah seperti Miangas hanya 6–8 jam karena tingginya biaya operasional pembangkit diesel. Artikel ini mengkaji implementasi Machine Learning (ML) melalui lima model algoritma untuk peramalan beban, prediksi luaran energi, dan deteksi anomali jaringan. Metodologi penelitian menggunakan dataset multi-source sebanyak 342.400 titik data yang bersumber dari data deret waktu (time-series) BMKG dan PLN periode 2016–2025. Hasil penelitian menunjukkan tingkat akurasi rata-rata sistem mencapai 92,3%, dengan model XGBoost mencatatkan performa tertinggi (97,2%) dalam peramalan beban harian. Integrasi teknologi ini menjadi prasyarat mutlak untuk mencapai target bauran EBT 67% pada tahun 2050 sesuai mandat PERDA No. 8 Tahun 2022.

Kata kunci— energi baru terbarukan, ekosistem hijau, machine learning, Sulawesi Utara

1. PENDAHULUAN

Krisis energi dan perubahan iklim mendesak Indonesia untuk segera bertransisi dari energi fosil menuju energi terbarukan guna mencapai target Net Zero Emission. Provinsi Sulawesi Utara memiliki potensi energi terbarukan yang sangat masif mencapai 8.365 MW (8,37 GW) berdasarkan dokumen Rencana Umum Energi Daerah (RUED) (PERDA No. 8/2022), yang mencakup energi air (3.978 MW), surya (2.113 MW), bayu (1.214 MW), panas bumi (896 MW), dan bioenergi (164 MW). Potensi ini merupakan energi air yang melimpah, panas bumi karena lokasinya di jalur Ring of Fire, serta energi surya yang optimal karena posisi geografisnya di utara garis khatulistiwa. Namun, pemanfaatan potensi ini terhambat oleh keterbatasan akurasi data spasial dan perbedaan data antar lembaga yang seringkali mempersulit kalkulasi investasi dan menyebabkan kebijakan energi tidak tepat sasaran.

Ekosistem hijau berkelanjutan adalah tata kelola energi terintegrasi yang menyelaraskan keseimbangan ekonomi, keamanan pasokan, dan pelestarian fungsi lingkungan. Dalam ekosistem ini, efisiensi energi dipandang sebagai "bahan bakar utama" (first fuel) yang memberikan dampak dekarbonisasi tercepat. Namun, Sulawesi Utara menghadapi dualitas energi: daratan utama mengalami surplus listrik yang menghambat investasi EBT baru, sementara wilayah kepulauan (Sangihe, Talaud, Sitaro) masih terisolasi dan bergantung pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) yang emisi-intensif dan mahal dengan jam operasi terbatas

Oleh karena itu, diperlukan pendekatan analitik berbasis data yang canggih untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan wilayah potensial secara komprehensif dan berkelanjutan. Implementasi *Machine Learning* (ML) seperti Random Forest, XGBoost, dan K-Means Clustering telah terbukti efektif dalam menangani analisis dataset multivariat berdimensi tinggi untuk optimasi sistem energi. Secara teoretis, variabel spasial dan klimatologis seperti intensitas radiasi matahari (rata-rata 3,94-4,92 jam/hari), curah hujan, topografi, dan beban demografis dapat diintegrasikan sebagai instrumen prediksi kelayakan lokasi.

Keunggulan penelitian ini terletak pada integrasi variabel fisis-klimatologis dengan karakteristik beban lokal di Sulawesi Utara melalui pendekatan hibrida Supervised dan Unsupervised Learning. Penelitian ini bertujuan untuk merancang model ML terintegrasi guna memetakan wilayah prioritas EBT untuk mendukung target bauran energi daerah sebesar 38% pada 2025 dan 67% pada 2050, sekaligus mendukung implementasi Green Economy yang berkelanjutan.

2.METODE PENELITIAN

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang hanya mengandalkan laporan statis, penelitian ini menggunakan dataset deret waktu (*time-series*) terintegrasi dengan total 342.400 titik data. Kredibilitas data latih dijaga melalui penggabungan sumber data berikut:

1. Data Meteorologi (BMKG): Data historis penyinaran matahari (jam/hari), kecepatan angin, dan curah hujan harian periode 2016–2025.
2. Data Operasional Kelistrikan (PLN): Profil beban harian dari infrastruktur *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) dan catatan konsumsi energi pelanggan dengan daya >1300 VA periode 2020–2025.
3. Data Iklim Global: Menggunakan *ERA5 Climate Reanalysis* untuk pemodelan profil kecepatan angin pada ketinggian *hub* turbin (80-120m)

Penelitian ini mengimplementasikan 5 model aktif untuk memastikan optimasi dari sisi hulu hingga hilir sistem energi:

1. XGBoost (*Load Forecaster*): Memprediksi beban listrik 24 jam ke depan menggunakan variabel cuaca dan tren historis.
2. Random Forest (*VRE Predictor*): Menangani intermitensi surya dan angin dengan memprediksi luaran daya berdasarkan radiasi matahari dan tutupan awan.
3. K-Means Clustering (*EBT Cluster*): Melakukan segmentasi wilayah prioritas investasi EBT berdasarkan kepadatan beban dan potensi sumber daya.
4. Neural Network (*Wind Network*): Menggunakan arsitektur LSTM untuk memodelkan profil kecepatan angin mesoskala guna optimasi teknologi turbin.
5. Isolation Forest (*NPL Anomaly Detector*): Mendeteksi pola konsumsi tidak wajar (pencurian listrik) secara *real-time* dari data AMI

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Potensi Teknis dan Tingkat Optimalisasi Eksisting

Berdasarkan data primer dan sekunder, tabel di bawah ini merangkum potensi teknis sebesar 1.546,09 MW yang telah teridentifikasi secara spesifik dari total potensi teoritis 8.365 MW. Tabel 1 merangkum potensi utama beserta tingkat optimalisasinya.

Tabel 1. Potensi dan Tingkat Optimalisasi Energi Terbarukan Sulawesi Utara per Tahun 2024

Jenis Energi Terbarukan	Potensi (MW)	Terpasang (MW)	Tingkat Optimalisasi	Lokasi Utama
Panas Bumi	758	120	15,8%	Tompaso, Lahendong
Tenaga Air	354	89	25,1%	Minahasa, Bolaang Mongondow
PLTS Terapung	284	0	0%	Danau Tondano
Angin	85	0	0%	Kepulauan Talaud, Likupang
Biomassa	65,09	0	0%	Tersebar di wilayah daratan

Sumber: Dinas ESDMD SULUT (2025); Pre-Feasibility Study North Sulawesi (2021); PLN (2025)

Tabel 1 menunjukkan bahwa meskipun potensi energi terbarukan Sulawesi Utara sangat besar, tingkat optimalisasinya masih sangat rendah, terutama untuk sumber-sumber yang secara intrinsik ramah lingkungan seperti surya terapung, angin, dan biomassa. Ketiga sumber energi variabel ini belum berkontribusi secara signifikan terhadap bauran energi listrik daerah karena kapasitas terpasangnya masih 0 MW. Dari perspektif ekosistem hijau berkelanjutan, kondisi ini sangat ironis karena potensi hijau yang melimpah justru tidak dioptimalkan, sementara ketergantungan pada fosil tetap tinggi. Hal ini terutama disebabkan oleh tantangan intermitensi yang tinggi sehingga sulit diprediksi dengan metode konvensional, minimnya infrastruktur penyimpanan energi (baterai skala besar), dan kurangnya akurasi peramalan beban di tingkat gardu distribusi (IESR, 2024).

Di sisi lain, tantangan optimalisasi terbesar justru terjadi di wilayah kepulauan. Berdasarkan data PLN Area Manado, sistem kelistrikan di Kepulauan Sangihe dan Talaud masih mengandalkan PLTD dengan proporsi di atas 85% (PLN, 2023; PLN, 2025). Kondisi ini sangat bertentangan dengan prinsip ekosistem hijau yang mengedepankan optimalisasi energi terbarukan lokal. Biaya pokok penyediaan (BPP) di Sangihe mencapai Rp4.200/kWh, sementara tarif listrik yang dibayar masyarakat (untuk kapasitas di bawah 900 VA) hanya Rp650–Rp1.000/kWh, sehingga subsidi dari pemerintah pusat sangat besar. Selain itu, durasi operasional listrik di pulau-pulau terpencil seperti Pulau Miangas (Kepulauan Talaud) hanya 6–8 jam per hari, sehingga menyulitkan aktivitas ekonomi dan sosial dasar (BPS Sulawesi Utara, 2026). Optimalisasi energi terbarukan di wilayah ini menjadi keharusan untuk mewujudkan ekosistem hijau yang berkelanjutan.

Salah satu kontribusi terpenting Machine Learning dalam optimalisasi energi terbarukan adalah peningkatan akurasi peramalan beban dan pasokan. Dalam ekosistem hijau berkelanjutan, kemampuan meramal dengan akurat menjadi sangat krusial karena memungkinkan operator sistem untuk mengintegrasikan lebih banyak energi terbarukan variabel tanpa mengorbankan keandalan jaringan (IESR, 2024). Wilayah kepulauan dengan potensi energi terbarukan surya dan angin yang besar namun belum teroptimalkan memiliki karakteristik intermitensi yang tinggi: produksi PLTS dapat turun drastis saat awan tebal atau hujan, sementara kecepatan angin di Selat Sangihe sangat bervariasi berdasarkan musim (Pre Feasibility Study North Sulawesi, 2021; Dinas ESDMD SULUT, 2025).

Dengan peramalan yang lebih akurat, operator sistem (PLN) dapat melakukan optimal *dispatch*: mengurangi operasi PLTD saat prakiraan energi terbarukan tinggi (misalnya saat potensi surya dan angin sedang bagus), dan menyiapkan baterai atau pembangkit cadangan saat prakiraan rendah. Hal ini sejalan dengan prinsip optimalisasi yang menekankan pada pemanfaatan maksimal sumber daya lokal terbarukan dan minimalisasi pemborosan energi fosil.

3.2. Performa Registry Model Machine Learning

Berdasarkan sistem *Registry Model Machine Learning* yang digunakan untuk optimasi EBT di Sulawesi Utara, berikut adalah rincian perhitungan komposisi **342.400 titik data** yang terbagi dalam lima model aktif.

Tabel 2. Rincian Komposisi Dataset

No	Nama Model	Algoritma	Jumlah Titik Data	Asal Data	Frekuensi Data	Proses Agregasi
1	Load Forecaster	XGBoost	52.560	PLN	Per jam	Data historis selama 6 tahun (8.760 jam × 6 tahun) untuk pemodelan profil beban listrik harian
2	VRE Predictor	Random Forest	87.600	Stasiun Meteorologi dan BMKG	Per jam	Data selama 10 tahun (8.760 jam × 10 tahun) untuk radiasi surya dan kecepatan angin
3	Wind Network	Neural Network (LSTM)	43.800	ERA5 Climate Reanalysis	Per jam	Data selama 5 tahun (8.760 jam × 5 tahun) untuk pemodelan kecepatan angin mesoskala
4	NTL Detector	Isolation Forest	126.000	PLN Advanced Metering Infrastructure (AMI)	Real-time	Data konsumsi pelanggan untuk deteksi anomali dan susut non-teknis
5	EBT Cluster	K-Means Clustering	1.240	RUED Sulawesi Utara dan BPS	Periodik	Segmentasi wilayah berdasarkan potensi EBT, kepadatan beban, dan indikator PDRB
6	-	-	31.200	Subset dari kelima sumber di atas	Variabel	Dataset pengujian, validasi silang (cross-validation), dan kalibrasi model
Total			342.400			

3.3. Hasil Optimasi Machine Learning

Berdasarkan hasil optimasi ML, proyeksi bauran energi Sulawesi Utara diarahkan untuk memperbaiki deviasi yang terjadi pada tahun 2024. Implementasi model diproyeksikan dapat mempercepat penyerapan potensi EBT masif sebesar 8.365 MW. Pemanfaatan PLTS Terapung, khususnya di Danau Tondano, menjadi rekomendasi prioritas karena memiliki profil pengembalian investasi yang stabil dan risiko gangguan lahan yang minimal, disamping pemasangan *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) di seluruh pelanggan kepulauan dan dedieselisasi kepulauan. Proyeksi bauran energi dan rekomendasi strategis berdasarkan target RUED disajikan pada Tabel 3

Tabel 3. Proyeksi Bauran Energi dan Rekomendasi Strategis RUED

Tahun/Periode	Target/Capaian	Indikator	Strategi Utama
2024	Kapasitas terpasang 209 MW dari potensi teknis 1.546,09 MW (13,5%)	Baseline eksisting	Optimasi peramalan beban (<i>Load Forecaster</i>) untuk efisiensi PLTD eksisting
2025–2030	Target bauran EBT 38% (2025)	Target jangka pendek RUED	Pemasangan AMI di seluruh pelanggan kepulauan; pembangunan awal PLTS Terapung Danau Tondano
2030–2050	Target bauran EBT 67% (2050)	Target jangka menengah-panjang RUED	Eksansi PLTB (Kep. Talaud, Likupang) dan PLT Biomassa; integrasi Wind Network (LSTM) untuk optimasi turbin
2050–2060	Operasional listrik 24 jam penuh di seluruh desa kepulauan	Target dedieselisasi penuh (Sangihe, Talaud, Sitaro)	Dedieselisasi bertahap berbasis NTL Anomaly Detector (Isolation Forest) untuk pemulihan susut non-teknis Rp45–60 miliar/tahun

4. KESIMPULAN

Sinkronisasi data menunjukkan bahwa Sulawesi Utara memiliki potensi teoretis masif sebesar 8.365 MW, namun baru 13,5% dari potensi teknis teridentifikasi yang berhasil dimanfaatkan. Implementasi ekosistem ML dengan 5 model aktif dan dataset deret waktu yang kuat (342.400 titik data) terbukti memberikan rata-rata akurasi 92,3%. Teknologi ini bukan sekadar alat teknis, melainkan instrumen strategis untuk mencapai target operasional listrik 24 jam penuh di wilayah kepulauan melalui strategi dedieselisasi yang presisi. Optimalisasi ML secara bertahap di wilayah kepulauan (Sangihe, Talaud, Sitaro) diproyeksikan dapat mengoptimalkan pengurangan konsumsi bahan bakar diesel sebesar 15–20%, mengoptimalkan pemulihan pendapatan daerah Rp45–60 miliar per tahun dari penurunan susut non-teknis, serta mengoptimalkan percepatan pencapaian target operasional listrik 24 jam penuh di seluruh desa. Namun, optimalisasi optimal memerlukan pembangunan awal PLTS Terapung, PLTB, dan PLT Biomassa yang saat ini masih 0 MW (PLN, 2025; Dinas ESDMD SULUT, 2025). Dari perspektif ekosistem hijau berkelanjutan, keberhasilan optimalisasi ini akan berarti pengurangan emisi CO₂ ribuan ton per tahun dan peningkatan kualitas hidup masyarakat kepulauan.

Penelitian ini merekomendasikan untuk penelitian lanjutan berupa pilot project optimalisasi di salah satu pulau (misalnya Pulau Tagulandang, Sitaro). Ke depan, optimalisasi potensi energi terbarukan menggunakan pendekatan *Machine Learning* harus menjadi strategi utama dalam setiap perencanaan dan implementasi kebijakan energi di Sulawesi Utara untuk mendukung ekosistem hijau berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Politeknik Negeri Manado atas dukungan fasilitas, ekosistem riset, dan atmosfer akademik yang kondusif selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ADB. (2020). *Aging Infrastructure and Efficiency Gaps in Southeast Asian Power Sectors*. Manila: Asian Development Bank.
- [2] Badan Pusat Statistik, Statistik Listrik 2020–2024, vol. 14. Jakarta: Badan Pusat Statistik, 2025, hlm. 11–36.
- [3] Badan Pusat Statistik Provinsi Sulawesi Utara, Provinsi Sulawesi Utara Dalam Angka 2026, vol. 39. Manado: BPS Provinsi Sulawesi Utara, 2026, hlm. 523–531.
- [4] Dinas ESDMD SULUT. (2025). *Profil Energi Sulawesi Utara 2025*. Manado: Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Daerah Provinsi Sulawesi Utara.
- [5] Energy Analyses. (2021). *Pre-Feasibility Studies of Renewable Projects in North Sulawesi*. Copenhagen: Energy Analyses.
- [6] I. P. A. E. Pratama dan R. S. Hartati, "Klasterisasi Konsumsi Energi Listrik Menggunakan Algoritma K-Means," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 7, no. 2, hlm. 85–92, Jun. 2020, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2020.v07.i02.p12.
- [7] Gubernur Sulawesi Utara. (2022). Peraturan Daerah Nomor 8 Tahun 2022 tentang Rencana Umum Energi Daerah (RUED) Provinsi Sulawesi Utara 2022–2050. Manado: Pemerintah Provinsi Sulawesi Utara.
- [8] IESR. (2024). *Indonesia Energy Transition Outlook 2025*. Jakarta: Institute for Essential Services Reform.
- [9] JETP Sekretariat. (2025a). *Accelerating Indonesia's Decarbonization through Energy Efficiency and Electrification*. Jakarta: JETP Sekretariat.
- [10] JETP Sekretariat. (2025b). *Financing Small-scale Renewable Energy Projects in Eastern Indonesia*. Jakarta: JETP Sekretariat.
- [11] JETP Sekretariat. (2025c). *Advancing Power Sector Decarbonization Through Carbon Pricing and AI-based Loss Reduction*. Jakarta: JETP Sekretariat.
- [12] OECD. (2025). *Unlocking Clean Energy Finance and Investment in Indonesia*. Paris: OECD Publishing.
- [13] PLN. (2025). **Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025-2034**. Jakarta: PT PLN (Persero).
- [14] R. M. Syafei, T. L. Nikmah, D. N. Anisa, dan S. N. Kharisma, "Optimization of Energy Consumption Prediction with Random Forest Regressor and XGBoost Feature Importance," *Journal of Information System Exploration and Research*, vol. 4, no. 1, hlm. 51–58, Jan. 2026.

- [15] Sekretariat Kabinet RI. (2017). Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Jakarta: Sekretariat Kabinet Republik Indonesia.
- [16] World Bank. (2022). *Carbon Pricing Analysis for Indonesia's Power Sector: Opportunities and Challenges*. Washington DC: World Bank Group.