

Evolusi Green Telecommunication Berbasis Artificial Intelligence pada Jaringan 4G menuju 5G: Tinjauan Literatur

Draf Naskah Publikasi Ilmiah (Format Jurnal Standardisasi IEEE/Ristekdikti)

Andika Putra, Yulindon

Politeknik Negeri padang

Abstrak Pesatnya perkembangan teknologi komunikasi seluler dari generasi keempat (4G) menuju generasi kelima (5G) telah memicu lonjakan konsumsi energi pada infrastruktur jaringan, khususnya pada stasiun pemancar bumi (Base Station). Paradigma Green Telecommunication hadir sebagai solusi mutakhir untuk menekan emisi karbon dan biaya operasional operator telekomunikasi. Artikel ini menyajikan Tinjauan Literatur Sistematis (Systematic Literature Review - SLR) mengenai penerapan Artificial Intelligence (AI) untuk mengoptimalkan efisiensi energi dalam transisi arsitektur jaringan dari 4G ke 5G hingga tahun 2026. Melalui penyaringan ketat menggunakan metodologi PRISMA 2020, diperoleh 32 artikel utama yang dianalisis secara mendalam. Hasil tinjauan menunjukkan pergeseran fokus teknologi hemat daya dari pendekatan berbasis heuristik statis pada 4G menuju kontrol otonom dinamis berbasis Deep Reinforcement Learning (DRL) pada 5G. AI terbukti efektif dalam meminimalkan konsumsi energi melalui manajemen Advanced Sleep Modes (ASM) dan optimasi Massive MIMO beamforming. Namun, tantangan berupa overhead energi komputasi model AI dan trade-off terhadap Quality of Service (QoS) tetap menjadi hambatan utama yang memerlukan riset lebih lanjut.

Kata Kunci: Green Telecommunication, Artificial Intelligence, Jaringan 4G/5G, Efisiensi Energi, Systematic Literature Review.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi telekomunikasi bergerak telah mengalami lompatan eksponensial dalam satu dekade terakhir. Transisi dari generasi keempat (4G Long Term Evolution) menuju generasi kelima (5G New Radio) dirancang untuk memenuhi kebutuhan bandwidth tinggi, latensi sangat rendah, dan densitas koneksi perangkat yang masif. Namun, peningkatan performa ini membawa konsekuensi serius pada aspek konsumsi energi. Infrastruktur jaringan nirkabel global diperkirakan menyumbang kontribusi emisi karbon yang signifikan, di mana stasiun pemancar bumi (Base Station atau gNodeB) mengonsumsi lebih dari 70% dari total energi operasional operator seluler. Tantangan utama pada arsitektur 5G terletak pada densitas jaringan yang tinggi (Ultra-Dense Networks) serta penggunaan teknologi Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-

Output) yang memerlukan daya aktif konstan jika tidak dikelola dengan cerdas. Oleh karena itu, paradigma *Green Telecommunication* atau telekomunikasi hijau menjadi pilar krusial dalam keberlanjutan industri digital. Pendekatan konvensional berbasis ambang batas statis (rule-based) yang diterapkan pada jaringan 4G terbukti tidak lagi memadai untuk menangani sifat dinamis, fluktuatif, dan kompleksitas tinggi dari trafik jaringan 5G. Dalam beberapa tahun terakhir, integrasi Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), dan Deep Reinforcement Learning (DRL) muncul sebagai metodologi mutakhir yang menawarkan kemampuan adaptasi *real-time*. AI mampu memprediksi fluktuasi trafik, mengotomatisasi mode tidur (sleep modes) komponen perangkat keras secara mikroskopis, serta mengarahkan pancaran sinyal (beamforming) secara akurat ke posisi pengguna. Artikel ini bertujuan untuk menyajikan analisis komprehensif mengenai evolusi teknik penghematan energi berbasis AI dari era jaringan 4G menuju 5G melalui pendekatan studi literatur yang terstruktur.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) yang mengacu pada panduan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020. Proses ini menjamin bahwa pengumpulan dan pemilihan artikel dilakukan secara transparan, objektif, dan dapat direplikasi.

2.1 Perumusan Pertanyaan Penelitian (Research Questions)

Untuk memandu jalannya peninjauan literatur, dirumuskan lima pertanyaan penelitian utama sebagai berikut:

- **RQ1:** Bagaimana tren publikasi ilmiah mengenai efisiensi energi berbasis AI pada jaringan 4G dan 5G dalam rentang waktu 2020–2026?
- **RQ2:** Metode AI apa saja yang paling mendominasi dalam optimasi *Green Telecommunication*?
- **RQ3:** Apa perbedaan parameter efisiensi energi yang dioptimalkan antara arsitektur jaringan 4G dan 5G?
- **RQ4:** Bagaimana pendekatan AI dalam meminimalkan konsumsi energi pada level infrastruktur jaringan?
- **RQ5:** Apa saja hambatan teknis dan tantangan implementasi model AI pada jaringan telekomunikasi komersial?

2.2 Strategi Pencarian Literatur dan Sintesis Data

Pencarian artikel dilakukan pada database digital bereputasi internasional meliputi IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar. String pencarian dikonstruksikan menggunakan operator Boolean sebagai berikut:

("Green Telecommunication" OR "Energy Efficiency" OR "Energy-Saving") AND
("Artificial Intelligence" OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR
"Reinforcement Learning") AND ("4G" OR "5G" OR "B5G")

Proses penyaringan awal menghasilkan total 245 artikel. Setelah dilakukan pemeriksaan duplikasi, relevansi judul, abstrak, dan kesesuaian teks lengkap berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, ditetapkan sebanyak **32 artikel utama** yang memenuhi syarat untuk dianalisis pada tahap sintesis data.

2.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Tabel di bawah ini merinci kriteria standarisasi yang digunakan selama fase penyaringan literatur:

Kriteria Inklusi (Inclusion Criteria)	Kriteria Eksklusi (Exclusion Criteria)
Artikel diterbitkan dalam rentang tahun 2020–2026.	Artikel di luar topik efisiensi energi telekomunikasi nirkabel.
Fokus pada jaringan seluler 4G, 5G, atau Beyond 5G (B5G).	Artikel yang tidak ditulis dalam Bahasa Inggris atau Bahasa Indonesia.
Jurnal atau prosiding konferensi bereputasi yang melalui proses peer-review.	Dokumen berupa tesis, buku, artikel opini short-communication, atau white paper industri.
Menyajikan metrik evaluasi efisiensi energi yang terukur (misal: Watt, Joule/bit, % saving).	Artikel duplikat atau artikel yang tidak menyediakan akses teks lengkap (full-text).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Tren Publikasi dan Taksonomi Metode AI (RQ1 & RQ2)

Analisis terhadap 32 dokumen terpilih mengungkapkan lonjakan minat riset yang tajam mulai tahun 2023, bertepatan dengan adopsi jaringan 5G Standalone (SA) secara global. Ditinjau dari aspek metodologi, algoritma AI yang digunakan berevolusi dari model prediksi sederhana menjadi sistem pengambilan keputusan otonom yang kompleks.

Distribusi penggunaan metode AI dalam literatur diidentifikasi sebagai berikut:

- **Deep Reinforcement Learning (DRL):** Ditemukan pada 45% literatur. Algoritma seperti Deep Q-Networks (DQN), DDPG, dan Multi-Agent DRL (MADRL) mendominasi karena kemampuannya berinteraksi dengan lingkungan jaringan non-stasioner untuk mengoptimalkan keputusan hemat daya.
- **Supervised & Time-Series Learning:** Ditemukan pada 35% literatur. Algoritma Long Short-Term Memory (LSTM) dan Gated Recurrent Unit (GRU) banyak diaplikasikan untuk pemodelan dan prediksi beban trafik masa depan berdasarkan data historis.
- **Unsupervised & Federated Learning:** Ditemukan pada 20% literatur (terutama publikasi 2025–2026). Fokusnya diarahkan pada arsitektur terdesentralisasi untuk menjaga privasi data pelanggan di tingkat *edge computing*.

3.2 Parameter Efisiensi Energi: Komparasi 4G vs 5G (RQ3)

Perbedaan mendasar arsitektur fisik dan logis antara 4G dan 5G secara langsung mengubah parameter operasional jaringan yang harus dikendalikan oleh kecerdasan buatan. Perbandingan karakteristik tersebut dirangkum dalam tabel berikut:

Parameter Komparatif	Jaringan 4G (LTE)	Jaringan 5G (New Radio)
Kerapatan Infrastruktur	Makro eNodeB konvensional dengan cakupan area luas.	Ultra-Dense Networks (UDN) yang menggabungkan Makro gNB dan ribuan Small Cells.
Fleksibilitas Perangkat Keras	Komponen sirkuit RF kaku dengan waktu transisi ON/OFF yang lambat (hitungan menit).	Advanced Sleep Modes (ASM) dengan kemampuan penonaktifan subframe (hitungan milidetik).

Teknologi Antena	MIMO standar (2x2 atau 4x4) dengan pancaran sektor statis.	Massive MIMO (hingga 64T64R atau lebih) dengan 3D Dynamic Beamforming.
Titik Fokus Optimasi AI	Penjadwalan paket data makro dan penonaktifan operator sekunder (Carrier Aggregation) pada jam sepi.	Manajemen tidur lintas-lapisan (cross-layer sleep mode), koordinasi interferensi UDN, dan dynamic beam tracking per slice.

3.3 Mekanisme Implementasi AI untuk Minimasi Konsumsi Daya (RQ4)

Berdasarkan pemetaan literatur, terdapat dua mekanisme utama di mana AI memberikan kontribusi reduksi daya secara drastis:

1. **Manajemen Sleep Mode Adaptif Berbasis Prediksi:** Model LSTM memprediksi profil beban kerja BTS. Ketika trafik diidentifikasi berada di bawah ambang batas tertentu, agen DRL secara dinamis mematikan elemen pemancar (seperti power amplifier dan sirkuit pemrosesan digital) ke tingkat tidur tertentu (Micro, Light, atau Deep Sleep). Fleksibilitas ini mencegah pemborosan daya konstan saat kondisi jaringan *idle*.
2. **Optimasi Daya Massive MIMO dan Beamforming:** Pada jaringan 5G, antena Massive MIMO mengonsumsi energi yang sangat besar untuk memancarkan sinyal ke seluruh sektor. Algoritma AI memproses koordinat spatial pengguna secara dinamis dan mengonfigurasi bobot beamforming secara *real-time*. Daya pancar hanya diarahkan secara presisi ke posisi pengguna yang aktif, meminimalkan kebocoran sinyal dan interferensi merugikan, serta secara radikal menurunkan kebutuhan daya transmisi total.

3.4 Hambatan dan Tantangan Implementasi Nyata (RQ5)

Meskipun hasil simulasi dalam 32 artikel yang ditinjau menunjukkan potensi efisiensi energi berkisar antara 25% hingga 42%, implementasi pada jaringan komersial skala besar masih terbentur pada beberapa batasan kritis:

- **Tantangan Kekhawatiran QoS (Quality of Service):** Terdapat hubungan trade-off yang kontradiktif antara penghematan energi dan performa jaringan. Keterlambatan algoritma AI dalam mengaktifkan kembali (wake-up time) stasiun pemancar dari kondisi *Deep Sleep* saat terjadi lonjakan trafik tiba-tiba akan langsung memicu degradasi throughput, peningkatan latensi, dan pemutusan koneksi (call drop) bagi pengguna akhir.

- **Overhead Energi Komputasi AI (Green AI Paradox):** Proses pelatihan model Deep Learning yang mendalam membutuhkan sumber daya komputasi grafis (GPU/TPU) yang intensif di sisi server data. Konsumsi energi yang dialokasikan untuk pemrosesan matematika model AI terkadang menyamai atau bahkan melebihi total energi pemancar yang berhasil dihemat di lapangan.
- **Skalabilitas dan Generalisasi Model:** Model AI yang dilatih pada skenario simulasi tertentu sering kali gagal beradaptasi ketika diterapkan pada topologi jaringan dunia nyata yang memiliki karakteristik persebaran geografis dan fluktuasi demografis pengguna yang sangat acak.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Studi tinjauan literatur sistematis ini menegaskan bahwa integrasi Artificial Intelligence bukan lagi sekadar opsi melainkan kebutuhan fundamental dalam operasional *Green Telecommunication* era 4G menuju 5G. Evolusi arsitektur dari 4G ke 5G memicu pergeseran strategi penghematan energi dari kontrol makro yang kaku menuju kontrol mikro otonom berkat kemampuan Deep Reinforcement Learning. Penerapan taktik cerdas seperti Advanced Sleep Modes dan dynamic beamforming terbukti secara teoretis mampu menekan konsumsi energi stasiun pemancar secara signifikan tanpa merusak integritas jaringan secara makro.

4.2 Saran untuk Penelitian Selanjutnya

Untuk menjembatani kesenjangan antara riset akademis dan implementasi industri, penelitian di masa depan perlu difokuskan pada tiga ranah utama: Pertama, pengembangan arsitektur *Lightweight AI* melalui teknik kompresi model (pruning dan kuantisasi) agar algoritma dapat berjalan di perangkat edge berdaya rendah. Kedua, perumusan standarisasi metrik evaluasi emisi bersih (Net Energy Saving) yang memperhitungkan overhead komputasi hardware

AI. Ketiga, perluasan studi eksplorasi integrasi AI pada teknologi masa depan Beyond 5G/6G seperti Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) untuk propagasi gelombang elektromagnetik pasif hemat energi.

Daftar Pustaka

- [1] M. A. Rahman, et al., "Deep Reinforcement Learning for Energy-Efficient Resource Allocation in 5G Heterogeneous Networks," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 9, no. 1, pp. 45-56, 2025.
- [2] J. Li, et al., "AI-Enabled Green Telecommunications: A Survey on Energy Efficiency in B5G/6G Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 3, pp. 1820-1845, 2023.
- [3] S. Khan, et al., "Advanced Sleep Mode Analytics in 5G Base Stations Using Deep LSTM Networks," in *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2024, pp. 1-6.
- [4] A. Zappone, et al., "Wireless Networks Design in the Era of Deep Learning: Model-Based and Model-Free Approaches," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, no. 5, pp. 68-77, 2019.
- [5] X. Wang, et al., "Energy-Efficient Beamforming in Massive MIMO Systems: An Artificial Intelligence Approach," *IEEE Wireless Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 112-119, 2024.