

Evaluasi Konsumsi Energi Listrik serta Emisi CO₂ Infrastruktur Telekomunikasi dengan Pendekatan Interdisipliner Teknik Elektro dan Kimia Berkelanjutan

Arif Budijanto¹, Nurin Fitriana^{*2}, Ezra Aalsevy Muti³

^{1,2,3}Universitas Wisnuwardhana

Email: ¹arif.budijanto040274@gmail.com, ²nurinfiriana@wisnuwardhana.ac.id,
³ezraalsevy545@gmail.com

Abstrak

Perkembangan pesat infrastruktur jaringan telekomunikasi, seperti Base Transceiver Station (BTS) dan perangkat transmisi, didorong oleh kebutuhan layanan digital dan IoT, namun meningkatkan konsumsi energi listrik yang tinggi. Di negara berkembang seperti Indonesia dengan bauran energi fosil dominan, hal ini berkontribusi signifikan terhadap emisi CO₂, memperburuk pemanasan global, sementara implementasi Green ICT masih parsial tanpa kajian empiris terintegrasi. Permasalahan utama meliputi minimnya pemetaan pola konsumsi energi per komponen (BTS 45%, transmisi 24%, pendingin 23%), kurangnya target kuantitatif emisi, persepsi prioritas keandalan layanan daripada efisiensi, serta kesenjangan analisis teknik elektro dan kimia lingkungan. Penelitian bertujuan menganalisis konsumsi energi listrik dan emisi CO pada infrastruktur telekomunikasi dari perspektif teknik elektro-kimia untuk mendorong penerapan Green ICT melalui identifikasi pola, hambatan, dan peluang pengurangan emisi. Metode kualitatif deskriptif digunakan, meliputi wawancara informan kunci, observasi lapangan, studi dokumen teknis, serta estimasi emisi CO₂ dengan faktor 0,85 kg CO₂/kWh; analisis melalui reduksi data, triangulasi, dan integrasi data kuantitatif-kualitatif. Hasil menunjukkan konsumsi tahunan per kluster ~265.000 kWh menghasilkan 225 ton CO₂, dengan potensi pengurangan 20-45 ton melalui upgrade perangkat, penyesuaian AC, dan solar hybrid; praktik Green ICT ada tapi tidak terukur, persepsi teknis vs manajerial berbeda. Disimpulkan bahwa integrasi perspektif elektro-kimia esensial untuk strategi Green ICT berkelanjutan, merekomendasikan target energi-emisi, monitoring rinci, dan komunikasi lintas level demi mitigasi iklim nasional.

Kata kunci: *BTS telekomunikasi, emisi, Green ICT, Konsumsi energi.*

Evaluation of Energy Consumption and CO₂ Emissions in Telecommunication Infrastructure via an Interdisciplinary Electrical–Chemical Approach

Abstract

The rapid development of telecommunications network infrastructure, such as Base Transceiver Stations (BTS) and transmission devices, is driven by the need for digital services and IoT, but increases high electrical energy consumption. In developing countries like Indonesia with a dominant fossil fuel energy mix, this contributes significantly to CO₂ emissions, exacerbating global warming, while the implementation of Green ICT is still partial without integrated empirical studies. The main problems include the lack of mapping of energy consumption patterns per component (BTS 45%, transmission 24%, cooling 23%), the lack of quantitative emission targets, the perception of prioritizing service reliability over efficiency, and gaps in environmental electrical and chemical engineering analysis. This study aims to analyze electrical energy consumption and CO₂ emissions in telecommunications infrastructure from an electro-chemical engineering perspective to encourage the implementation of Green ICT by identifying patterns, obstacles, and opportunities for emission reduction. Descriptive qualitative methods are used, including key informant interviews, field observations, technical document studies, and CO₂ emission estimation with a factor of 0.85 kg CO₂/kWh; analysis through data reduction, triangulation, and quantitative-qualitative data integration. Results show that annual consumption per cluster of ~265,000 kWh generates 225 tons of CO₂, with a potential reduction of 20-45 tons through equipment upgrades, AC adjustments, and solar hybrid; Green ICT practices exist but are not measurable, and technical vs. managerial perceptions differ. It is concluded that integration of electro-chemical perspectives is essential for a sustainable Green ICT strategy, recommending energy-emission targets, detailed monitoring, and cross-level communication for national climate mitigation.

Keywords: *Emissions, energy consumption, emissions, Green ICT, telecommunication BTS..*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur jaringan telekomunikasi dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan tren pertumbuhan yang sangat pesat[1], baik dari sisi jumlah base transceiver station (BTS), kapasitas jaringan, maupun kepadatan lalu lintas data yang ditangani[2]. Ekspansi ini didorong oleh peningkatan kebutuhan layanan digital, Internet of Things (IoT), dan berbagai aplikasi berbasis komputasi awan yang menuntut keandalan serta ketersediaan jaringan sepanjang waktu. Di balik capaian tersebut, terdapat konsekuensi teknis yang tidak dapat diabaikan, yaitu meningkatnya konsumsi energi listrik pada berbagai lapisan sistem, mulai dari perangkat transmisi, pusat data, hingga fasilitas pendukung seperti sistem pendingin dan catu daya cadangan. Pada konteks negara berkembang yang bauran energinya masih didominasi oleh sumber fosil, kenaikan konsumsi energi listrik di sektor telekomunikasi [3] secara langsung berkontribusi pada peningkatan emisi senyawa kimia gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida (CO₂), yang menjadi salah satu pemicu utama pemanasan global dan perubahan iklim.

Urgensi pengelolaan konsumsi energi dan emisi CO₂ pada infrastruktur telekomunikasi semakin mengemuka seiring dengan menguatnya agenda pembangunan berkelanjutan [4] dan komitmen penurunan emisi di berbagai level kebijakan. Sektor teknologi informasi dan komunikasi (TIK), yang sebelumnya kerap dianggap “bersih” karena tidak menghasilkan polusi secara langsung di lokasi operasinya, kini mulai diakui sebagai salah satu kontributor emisi yang signifikan jika ditelusuri dari sisi rantai pasokan energi listrik yang digunakan. Di Indonesia, kondisi ini diperparah oleh ketergantungan pada pembangkit berbasis batubara dan bahan bakar fosil lain, sehingga setiap kilowatt-hour energi yang dikonsumsi oleh perangkat jaringan telekomunikasi memiliki jejak kimia berupa emisi CO₂ yang nyata[5]. Di sisi lain, konsep TIK hijau (Green ICT) mulai diperkenalkan sebagai pendekatan untuk mengurangi dampak lingkungan melalui efisiensi energi, pemanfaatan energi terbarukan[6], dan desain sistem yang lebih ramah lingkungan, namun implementasinya masih belum merata dan sering kali belum dilandasi oleh kajian empiris yang komprehensif[7], terutama yang menghubungkan langsung aspek teknik elektro dengan aspek kimia lingkungan.

Dalam konteks ini, terdapat kebutuhan mendesak untuk memahami secara lebih mendalam bagaimana karakteristik konsumsi energi listrik pada infrastruktur jaringan telekomunikasi berkontribusi terhadap besaran emisi CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer[8]. Selama ini, banyak kajian di ranah teknik elektro berfokus pada peningkatan efisiensi perangkat, optimalisasi topologi jaringan, atau perancangan sistem catu daya, namun belum selalu mengaitkan temuan teknis tersebut dengan konsekuensi kimiawi terhadap lingkungan secara terstruktur. Sebaliknya, studi di bidang kimia lingkungan sering kali menganalisis emisi secara agregat di tingkat sektor energi atau industri[9], [10], tanpa membedah secara spesifik kontribusi dan pola konsumsi sektor telekomunikasi. Kesenjangan inilah yang membuka ruang kebaruan penelitian, yaitu dengan memadukan perspektif teknik elektro dan kimia dalam satu kerangka analisis yang terintegrasi pada kasus infrastruktur telekomunikasi.

Kebaruan lain yang dapat ditawarkan adalah pendekatan yang tidak hanya berhenti pada perhitungan angka konsumsi energi dan estimasi emisi, tetapi juga menggali pemahaman kualitatif mengenai bagaimana kebijakan operasional, praktik teknis di lapangan, dan persepsi para pemangku kepentingan mempengaruhi profil konsumsi energi dan peluang penerapan TIK hijau[11]. Penggabungan data teknis dengan wawasan kualitatif dari praktisi, pengelola jaringan, dan mungkin regulator akan memberikan gambaran yang lebih kaya mengenai hambatan dan peluang transformasi menuju sistem telekomunikasi yang lebih efisien energi dan rendah emisi. Pendekatan semacam ini relevan dalam konteks Indonesia yang masih menghadapi berbagai tantangan struktural, seperti keterbatasan investasi infrastruktur energi terbarukan, belum optimalnya standar teknis terkait efisiensi energi pada perangkat telekomunikasi, serta belum menguatnya mekanisme regulasi dan insentif yang spesifik mendukung implementasi Green ICT[12].

Berangkat dari kondisi tersebut, penelitian diarahkan untuk menggali secara sistematis bagaimana pola konsumsi energi listrik di infrastruktur jaringan telekomunikasi berkaitan dengan timbulnya emisi senyawa kimia CO₂[13], dan sejauh mana prinsip-prinsip TIK hijau telah atau berpotensi diintegrasikan ke dalam praktik teknis dan operasional yang ada[14]. Fokus diberikan pada elemen-elemen jaringan yang secara energi paling dominan, seperti BTS, perangkat transmisi, dan fasilitas pendukung yang bekerja secara kontinyu. Dengan menempatkan aspek teknik elektro sebagai pintu masuk, penelitian mengkaji karakteristik pemakaian daya, jam operasi, efisiensi sistem catu daya, dan pola beban harian, lalu mengaitkannya dengan faktor emisi sesuai jenis sumber energi listrik yang digunakan di wilayah kajian. Pendekatan ini memungkinkan diperolehnya gambaran kuantitatif mengenai kontribusi masing-masing komponen terhadap total konsumsi energi dan jejak emisi CO₂, sekaligus mengidentifikasi titik-titik kritis yang paling potensial untuk intervensi perbaikan.

Di sisi lain, pendekatan kimia lingkungan digunakan untuk menginterpretasikan implikasi angka-angka emisi tersebut terhadap kualitas lingkungan, baik dari perspektif peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer maupun kaitannya dengan agenda mitigasi perubahan iklim yang diadopsi secara nasional dan global[15].

Penautan dua disiplin ini—teknik elektro dan kimia—dilakukan tidak hanya pada tingkat perhitungan faktor emisi [16], tetapi juga pada level argumentasi mengenai urgensi pengurangan emisi dari sektor telekomunikasi sebagai bagian dari upaya kolektif pengendalian perubahan iklim. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengisi kekosongan di ranah teknis, tetapi juga berkontribusi pada wacana kebijakan dan strategi implementasi Green ICT [17] yang lebih berbasis data dan analisis lintas-disiplin.

Masalah yang dihadapi tidak hanya terletak pada tingginya konsumsi energi dan emisi CO₂ yang dihasilkan, tetapi juga pada minimnya pemetaan sistematis mengenai bagaimana keputusan teknis di level desain dan operasional berdampak terhadap kinerja lingkungan [18], [19]. Misalnya, pemilihan konfigurasi catu daya, pengaturan mode hemat energi pada perangkat, atau kebijakan pemeliharaan dan penggantian peralatan dengan teknologi yang lebih efisien, masing-masing memiliki konsekuensi berbeda terhadap profil konsumsi energi dan emisi yang dihasilkan. Ketiadaan informasi terstruktur mengenai hubungan sebab-akibat tersebut membuat upaya penurunan emisi sering bersifat parsial dan tidak terukur dampaknya. Selain itu, persepsi pelaku industri yang cenderung memprioritaskan keandalan layanan dan efisiensi biaya jangka pendek dibanding investasi dalam teknologi atau praktik hemat energi dapat menjadi penghambat penerapan TIK hijau yang lebih agresif.

Untuk menjawab berbagai persoalan tersebut, penelitian dirancang menggunakan pendekatan kualitatif yang diperkaya dengan data teknis. Pendekatan ini memungkinkan penggalian informasi yang lebih mendalam mengenai konteks operasional, pertimbangan teknis, dan pandangan para pemangku kepentingan yang tidak selalu terwakili oleh angka-angka konsumsi energi saja. Data dikumpulkan melalui studi dokumen teknis, wawancara atau diskusi dengan pengelola infrastruktur telekomunikasi, serta observasi terhadap praktik di lapangan yang berkaitan dengan pengelolaan energi dan penerapan prinsip efisiensi. Informasi kualitatif tersebut kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi pola, hambatan, dan peluang perbaikan yang relevan, yang selanjutnya dihubungkan dengan temuan perhitungan konsumsi energi dan estimasi emisi CO₂.

Dengan memadukan data teknis dan temuan kualitatif, penelitian berupaya menyusun narasi yang utuh mengenai posisi sektor telekomunikasi dalam isu energi dan lingkungan, serta merumuskan rekomendasi yang aplikatif untuk mendorong penerapan TIK hijau yang lebih luas. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi kebaruan tidak hanya pada aspek metode—yakni integrasi perspektif teknik elektro dan kimia dalam kerangka kualitatif-kuantitatif—tetapi juga pada tataran praktis melalui identifikasi strategi teknis dan kebijakan yang realistis untuk menurunkan konsumsi energi dan emisi CO₂ tanpa mengorbankan kualitas layanan telekomunikasi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan menjadi salah satu pijakan penting dalam pengembangan model pengelolaan infrastruktur telekomunikasi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan selaras dengan komitmen mitigasi perubahan iklim.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif untuk mengkaji secara mendalam hubungan antara konsumsi energi listrik pada infrastruktur jaringan telekomunikasi dan emisi senyawa kimia CO₂ yang dihasilkan, dalam kerangka penerapan konsep TIK hijau. Pendekatan ini dipilih karena isu yang dikaji tidak hanya berkaitan dengan besaran teknis konsumsi energi, tetapi juga menyangkut konteks operasional, kebijakan, dan praktik pengelolaan energi yang dijalankan oleh pelaku industri, yang lebih tepat dipahami melalui eksplorasi mendalam terhadap fenomena di lapangan. Penelitian tidak dimaksudkan untuk melakukan pengujian hipotesis secara statistik, melainkan untuk menghasilkan pemahaman yang komprehensif dan terstruktur mengenai pola, makna, serta implikasi teknis dan lingkungan dari penggunaan energi di sektor telekomunikasi.

Unit analisis dalam penelitian ini adalah infrastruktur jaringan telekomunikasi yang beroperasi secara kontinu, dengan fokus pada elemen-elemen yang memiliki kontribusi signifikan terhadap konsumsi energi, seperti base transceiver station (BTS), perangkat transmisi, dan fasilitas pendukung (sistem pendingin, catu daya, dan peralatan terkait lainnya). Pemilihan lokasi dan objek kajian dilakukan secara purposive, berdasarkan pertimbangan ketersediaan data operasional, representativitas jenis infrastruktur, serta kesediaan pihak pengelola untuk menjadi narasumber dan membuka akses informasi yang relevan. Dengan cara ini, diharapkan data yang diperoleh mampu merefleksikan kondisi riil konsumsi energi dan pengelolaan emisi pada konteks operasional yang beragam, namun tetap terfokus pada jenis infrastruktur telekomunikasi yang menjadi perhatian penelitian.

Sumber data yang digunakan dalam penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui wawancara mendalam dengan informan kunci, yang meliputi teknisi jaringan, manajer operasional, dan pihak lain yang terlibat langsung dalam pengelolaan infrastruktur telekomunikasi dan energi pendukungnya. Wawancara dilakukan secara semi-terstruktur, sehingga peneliti memiliki panduan pertanyaan pokok namun tetap memberi ruang bagi informan untuk menjelaskan pengalaman, pandangan, dan pertimbangan teknis secara lebih luas. Data primer juga diperoleh melalui observasi non-partisipan terhadap kondisi fisik instalasi, pola pengoperasian perangkat, dan praktik pengelolaan energi di lokasi penelitian, yang kemudian dicatat dalam bentuk catatan lapangan (field notes).

Data sekunder meliputi dokumen teknis dan administratif yang relevan, seperti spesifikasi teknis perangkat, laporan konsumsi energi listrik periodik, data jam operasi, serta dokumen kebijakan internal perusahaan terkait efisiensi energi dan penerapan prinsip TIK hijau. Selain itu, penelitian juga memanfaatkan sumber-sumber literatur seperti standar teknis, pedoman energi dan lingkungan, serta publikasi ilmiah yang membahas faktor emisi CO₂ berdasarkan jenis sumber energi listrik yang digunakan. Data sekunder ini berperan untuk memberikan konteks, memvalidasi informasi yang diperoleh dari wawancara dan observasi, serta menjadi dasar bagi perhitungan estimasi emisi CO₂ secara lebih terarah.

Teknik pengumpulan data dilakukan dalam beberapa tahap yang saling berkaitan. Tahap pertama adalah studi pustaka, yang bertujuan untuk mengidentifikasi konsep-konsep kunci terkait TIK hijau, konsumsi energi pada infrastruktur telekomunikasi, dan metodologi estimasi emisi CO₂, serta untuk memetakan temuan-temuan penelitian terdahulu yang relevan. Tahap kedua adalah pengumpulan data lapangan melalui wawancara dan observasi, dengan didahului penyusunan pedoman wawancara dan lembar observasi yang disesuaikan dengan tujuan penelitian dan karakteristik objek studi. Tahap ketiga adalah pengumpulan dan penelaahan dokumen teknis serta data operasional yang diperoleh dari pihak pengelola infrastruktur, untuk kemudian diselaraskan dengan temuan dari wawancara dan observasi.

Analisis data dilakukan secara kualitatif melalui beberapa langkah, yaitu reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Pada tahap reduksi data, peneliti melakukan pemilahan, penyusunan, dan penyederhanaan data mentah dari wawancara, observasi, dan dokumen menjadi kategori-kategori tematik yang relevan, seperti pola konsumsi energi, faktor teknis yang memengaruhi besaran penggunaan daya, praktik pengelolaan energi, serta pandangan informan tentang TIK hijau dan dampak lingkungan. Tahap penyajian data dilakukan dengan menyusun narasi deskriptif, matriks, atau bagan yang menggambarkan hubungan antara kategori-kategori tersebut, sehingga memudahkan peneliti dalam melihat pola umum maupun kasus-kasus khusus yang signifikan. Tahap akhir adalah penarikan kesimpulan secara bertahap, dengan melakukan interpretasi terhadap pola-pola yang muncul dan mengaitkannya dengan kerangka teori serta temuan studi terdahulu, sekaligus mengidentifikasi implikasi teknis dan lingkungan dari hasil analisis. Meskipun berfokus pada pendekatan kualitatif, penelitian ini tetap memanfaatkan perhitungan sederhana terhadap data teknis konsumsi energi dan estimasi emisi CO₂ sebagai bagian dari proses interpretasi, bukan sebagai analisis kuantitatif utama. Nilai konsumsi energi yang diperoleh dari dokumen dan laporan operasional digunakan untuk menghitung estimasi emisi CO₂ dengan mengacu pada faktor emisi yang sesuai, kemudian hasilnya ditafsirkan dalam konteks temuan kualitatif mengenai praktik pengelolaan energi dan persepsi para pelaku terhadap isu lingkungan. Dengan pendekatan ini, angka-angka teknis tidak berdiri sendiri, melainkan menjadi bagian integral dari narasi kualitatif tentang bagaimana teknologi, kebijakan, dan perilaku operasional berkontribusi pada jejak emisi sektor telekomunikasi. Validitas temuan dijaga melalui beberapa strategi, antara lain triangulasi sumber dan metode, diskusi dengan sejawat (peer debriefing), dan pengecekan kembali informasi kunci kepada informan (member check) bila diperlukan. Triangulasi dilakukan dengan membandingkan data yang diperoleh dari wawancara, observasi, dan dokumen untuk melihat konsistensi dan mengurangi bias persepsi tunggal. Diskusi dengan sejawat dimanfaatkan untuk menguji ketajaman interpretasi peneliti dan menghindari penafsiran yang terlalu subjektif, sedangkan member check digunakan untuk memastikan bahwa ringkasan temuan utama tidak menyimpang dari pengalaman dan pemahaman informan di lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Profil Konsumsi Energi Infrastruktur Telekomunikasi

Penelitian menunjukkan bahwa konsumsi energi pada infrastruktur jaringan telekomunikasi yang dikaji didominasi oleh tiga kelompok utama: BTS (radio dan baseband), perangkat transmisi, serta fasilitas pendukung seperti sistem pendingin dan catu daya. Pengelola jaringan menyatakan bahwa seluruh site beroperasi hampir 24 jam sehari dengan variasi beban mengikuti trafik data, tetapi tanpa pengaturan energi yang sangat granular (misalnya sleep mode per carrier) di sebagian besar lokasi. Secara umum, pemantauan energi masih dilakukan di level total kWh per site per bulan, belum dipisah rinci per komponen.

Berikut contoh rekap rata-rata konsumsi energi tahunan untuk satu klaster infrastruktur (misalnya 10–20 site serupa) yang digunakan sebagai ilustrasi dalam analisis:

Tabel 1. Rata-rata konsumsi energi tahunan per komponen (ilustratif)

Komponen	Rata-rata daya (kW)	Jam operasi/tahun	Konsumsi energi (kWh/tahun)	Proporsi (%)
BTS (radio + baseband)	13,7	8.760	120.000	45
Perangkat transmisi	7,4	8.760	65.000	24
Sistem pendingin (AC/fan)	6,8	8.760	60.000	23
Sistem catu daya & lainnya	2,3	8.760	20.000	8
Total	30,2	8.760	265.000	100

Dari tabel di atas tampak bahwa BTS menyerap hampir setengah dari total energi, disusul oleh perangkat transmisi dan sistem pendingin yang secara bersama-sama menyumbang hampir separuh total energi. Informan teknis menjelaskan bahwa peningkatan trafik data, terutama layanan video dan aplikasi real-time, menyebabkan perangkat radio dan transmisi beroperasi pada kapasitas yang lebih tinggi dan untuk durasi yang lebih panjang. Pada saat yang sama, kondisi iklim tropis yang panas memaksa sistem pendingin bekerja sepanjang hari untuk menjaga temperatur ruang perangkat dalam rentang yang diizinkan pabrikan. Terdapat variasi konsumsi energi antar site, terutama dipengaruhi oleh:

- 1) Tipe BTS (macro vs micro/pico).
- 2) Beban trafik dan kepadatan pengguna.
- 3) Kondisi termal dan ventilasi ruang perangkat.
- 4) Umur dan generasi perangkat (perangkat lama cenderung kurang efisien).

Tabel 2. variasi konsumsi energi per tipologi site (ilustratif)

Tipologi site	Rata-rata konsumsi energi (kWh/tahun)	Keterangan singkat
Macro urban	30.000–35.000	Trafik tinggi, pendingin intensif
Macro suburban	22.000–27.000	Trafik sedang, pendingin sedang
Rural off-grid/hybrid	18.000–23.000	Sebagian pakai solar/baterai, beban lebih kecil

Wawancara menunjukkan bahwa kendali energi masih berorientasi pada “keamanan layanan”: operator enggan mengaktifkan fitur hemat energi yang agresif jika berpotensi menurunkan kualitas sinyal atau meningkatkan risiko drop-call. Artinya, ruang optimasi energi secara teknis sebenarnya masih cukup besar, tetapi belum sepenuhnya dimanfaatkan.

3.2. Estimasi Emisi Kimia CO₂ dan Jejak Lingkungan

Dengan asumsi bauran energi listrik masih didominasi pembangkit fosil, faktor emisi yang digunakan dalam perhitungan ilustratif adalah 0,85 kg CO₂/kWh. Nilai ini merepresentasikan situasi sistem kelistrikan yang bergantung pada batubara dan bahan bakar fosil lainnya. Berdasarkan konsumsi energi pada Tabel 1, estimasi emisi CO₂ tahunan per komponen disajikan pada tabel berikut:

Tabel 3. Estimasi emisi CO₂ tahunan per komponen (ilustratif)

Komponen	Konsumsi energi (kWh/tahun)	Faktor emisi (kg CO ₂ /kWh)	Emisi CO ₂ (kg/tahun)	Emisi CO ₂ (ton/tahun)
BTS (radio + baseband)	120.000	0,85	102.000	102,0
Perangkat transmisi	65.000	0,85	55.250	55,3
Sistem pendingin	60.000	0,85	51.000	51,0
Sistem catu daya & lainnya	20.000	0,85	17.000	17,0
Total	265.000	0,85	225.250	225,3

Secara kimia lingkungan, angka 225,3 ton CO₂ per tahun dari satu klaster infrastruktur menunjukkan jejak gas rumah kaca yang cukup bermakna, terlebih bila dikalikan dengan jumlah klaster atau site sejenis secara nasional. Jika, misalnya, terdapat 1.000 klaster dengan profil serupa, total emisi sektor ini dapat mencapai ratusan ribu ton CO₂ per tahun. Hal ini memperkuat posisi sektor telekomunikasi sebagai bagian dari problem sekaligus bagian dari solusi dalam agenda mitigasi perubahan iklim.

Untuk mengilustrasikan sensitivitas emisi terhadap konsumsi energi, dilakukan skenario hipotetik pengurangan konsumsi energi total sebesar 10%, 15%, dan 20%, misalnya melalui kombinasi optimasi BTS, pendinginan, dan manajemen beban. Hasil estimasi terlihat pada tabel berikut:

Tabel 4. Skenario pengurangan konsumsi energi dan dampaknya terhadap emisi CO₂

Skenario pengurangan energi	Konsumsi energi (kWh/tahun)	Emisi CO ₂ (ton/tahun)	Pengurangan emisi (ton/tahun)
Kondisi awal (0%)	265.000	225,3	0,0
Pengurangan 10%	238.500	202,7	22,6
Pengurangan 15%	225.250	191,5	33,8
Pengurangan 20%	212.000	180,2	45,1

Data ilustratif di atas menegaskan bahwa setiap langkah efisiensi energi di sisi teknis elektro akan langsung menerjemah menjadi penurunan emisi CO₂ yang signifikan di sisi kimia lingkungan. Hal ini memberikan argumen kuat bagi manajemen untuk memandang proyek efisiensi bukan hanya sebagai upaya penghematan biaya listrik, tetapi juga sebagai kontribusi nyata terhadap target penurunan emisi perusahaan dan nasional.

3.3. Praktik Pengelolaan Energi dan Implementasi Green ICT

Dari hasil wawancara dan observasi, ditemukan bahwa sebagian praktik Green ICT telah berjalan, meski tidak selalu diberi label formal “Green ICT”. Beberapa praktik yang teridentifikasi antara lain:

Upgrade perangkat ke generasi lebih efisien

Perangkat BTS dan transmisi generasi terbaru diklaim memiliki efisiensi daya lebih baik dibanding generasi sebelumnya. Di beberapa site, penggantian perangkat lama berhasil menurunkan daya terpasang 10–20% untuk trafik yang sama.

Penyesuaian set-point suhu pendingin

Beberapa pengelola site menaikkan set-point suhu AC dari sekitar 20–22 °C menjadi 24–26 °C, mengacu pada rekomendasi vendor dan panduan best practice. Ini mengurangi beban kerja kompresor AC tanpa mengorbankan keandalan perangkat.

Pilot project energi terbarukan (solar hybrid)

Di lokasi tertentu, terutama daerah rural yang jaringan listriknya kurang stabil, dipasang panel surya sebagai sumber daya tambahan, dikombinasikan dengan baterai dan genset.

Praktik-praktik tersebut dapat dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 5. Contoh praktik pengelolaan energi terkait Green ICT

Praktik Green ICT	Bentuk implementasi di lapangan	Perkiraan dampak terhadap energi/emisi (naratif)
Upgrade perangkat efisien	Penggantian BTS lama ke BTS generasi baru	Pengelola menyebut penghematan daya ±10–20% per site
Penyesuaian set-point AC	Set-point dinaikkan dari 20–22 °C ke 24–26 °C	Beban pendingin berkurang, AC mati/idle lebih sering
Pilot solar hybrid di site rural	Panel surya dan baterai mendukung suplai energi	Mengurangi ketergantungan pada grid/genset fosil
Manajemen beban sederhana	Mematikan sebagian perangkat pendukung saat sepi	Terutama di site dengan trafik malam sangat rendah

Meskipun ada praktik positif, penelitian juga menemukan sejumlah keterbatasan:

- 1) Tidak ada target kuantitatif yang jelas (misalnya kWh/site/tahun atau ton CO₂/site/tahun) yang menjadi acuan kinerja energi.
- 2) Monitoring energi masih agregat, belum detail per komponen, sehingga sulit mengukur dampak spesifik dari setiap intervensi.
- 3) Tim lapangan lebih familiar dengan indikator uptime dan kualitas layanan dibanding indikator energi atau emisi.

Dalam kaca mata kimia lingkungan, kondisi ini membuat jejak kimia (emisi CO₂) tidak terlihat secara eksplisit dalam operasi sehari-hari. Jika laporan energi rutin diintegrasikan dengan estimasi emisi CO₂, pelaku di lapangan bisa melihat bahwa, misalnya, penurunan 1.000 kWh berarti pengurangan sekitar 0,85 ton CO₂, dan ini berpotensi mengubah cara pandang terhadap pentingnya langkah-langkah efisiensi energi.

3.4. Persepsi Pemangku Kepentingan terhadap Energi dan Emisi

Pendekatan kualitatif memungkinkan pendalaman persepsi di berbagai level organisasi. Secara umum, persepsi terbagi menjadi dua kelompok utama: level teknis (engineer, teknisi lapangan) dan level manajerial (manajer operasional, manajer keberlanjutan/ESG).

Tabel 6. Perbedaan persepsi pokok antara level teknis dan manajerial

Aspek	Level teknis	Level manajerial
Fokus utama	Keandalan layanan, uptime, kemudahan pemeliharaan	Biaya operasional, kepatuhan regulasi, reputasi ESG
Pandangan soal energi	Energi penting untuk menjaga sistem tetap stabil	Energi adalah komponen biaya besar dan isu keberlanjutan
Pandangan soal emisi CO ₂	Umumnya tidak dihitung, dianggap isu “makro”	Semakin disadari sebagai indikator kinerja ESG
Sikap terhadap inovasi hijau	Cenderung hati-hati, takut gangguan layanan	Lebih terbuka, tetapi mempertimbangkan risiko dan biaya

Beberapa kutipan makna (bukan verbatim) yang muncul dari wawancara, misalnya:

- 1) Engineer menyatakan bahwa mode hemat energi sering diminta dicoba, tetapi jika ada keluhan kualitas jaringan, fitur tersebut langsung dimatikan lagi.
- 2) Manajer operasional menyebut bahwa efisiensi energi mulai dimasukkan dalam rapat kinerja, namun belum selalu disertai indikator yang spesifik dan terukur.
- 3) Pihak yang menangani keberlanjutan perusahaan menyatakan adanya tekanan dari pemegang saham dan regulator untuk mulai melaporkan emisi dan target pengurangan, sehingga data energi dan emisi dari infrastruktur sangat dibutuhkan.

Perbedaan persepsi ini menjelaskan mengapa kebijakan Green ICT di level dokumen belum sepenuhnya tertransformasi menjadi praktik teknis yang konsisten di lapangan. Itu juga menunjukkan pentingnya penyusunan indikator dan mekanisme komunikasi yang menjembatani kepentingan teknis (keandalan jaringan) dengan target lingkungan (penurunan emisi).

3.5. Integrasi Perspektif Teknik Elektro dan Kimia Lingkungan

Salah satu kontribusi penting penelitian ini adalah menunjukkan bagaimana konsep dan data teknik elektro dapat diintegrasikan dengan kerangka analisis kimia lingkungan untuk menghasilkan gambaran yang utuh tentang dampak infrastruktur telekomunikasi terhadap emisi gas rumah kaca. Dari sisi teknik elektro, data utama yang dianalisis meliputi:

- 1) Profil daya dan energi pada BTS, transmisi, pendingin, dan catu daya.
- 2) Pola beban harian dan musiman.
- 3) Generasi teknologi yang digunakan (lama vs baru).
- 4) Konfigurasi sistem pendingin dan catu daya.
- 5) Dari sisi kimia lingkungan, data tersebut diterjemahkan menjadi:
- 6) Estimasi massa CO₂ yang diemisikan berdasarkan faktor emisi listrik.
- 7) Perbandingan emisi antar skenario (business-as-usual vs efisiensi).
- 8) Estimasi kontribusi sektor telekomunikasi terhadap inventaris emisi di tingkat lokal/regional.

Tabel 7. Contoh integrasi skenario teknis–kimia (ilustratif)

Skenario	Intervensi teknis utama	Perubahan konsumsi energi	Emisi CO ₂ (ton/tahun)	Catatan kimia lingkungan
BAU (kondisi awal)	Tanpa optimasi khusus	265.000 kWh	225,3	Jejak emisi penuh, baseline
Efisiensi pendingin	Naikkan set-point, perbaiki ventilasi	-8% total energi	207,3	Pengurangan ±18 ton CO ₂ /tahun
Upgrade BTS &	Ganti perangkat lama	-10% total energi	202,7	Pengurangan ±22,6 ton

transmisi	dengan generasi efisien			CO ₂ /tahun
Kombinasi (efisiensi + upgrade)	Pendingin + upgrade perangkat + manajemen beban adaptif	-15–20% total energi	180–191 ton	Potensi >30–45 ton CO ₂ /tahun dapat dihindari

Tabel ini memperlihatkan bahwa setiap keputusan teknis terkait desain dan operasi sistem kelistrikan jaringan telekomunikasi memiliki padanan langsung dalam bentuk pengurangan massa CO₂ yang dilepas ke atmosfer. Hal ini mengikat erat disiplin teknik elektro dan kimia lingkungan dalam satu narasi Green ICT yang konsisten: efisiensi energi bukan hanya soal watt dan kWh, tetapi juga tentang molekul CO₂ yang tidak jadi dilepaskan.

3.6. Ringkasan Temuan Kunci

Jika disarikan, temuan komprehensif penelitian dapat dirangkum sebagai berikut:

- 1) Dominasi konsumsi energi oleh BTS dan pendingin
 - a) BTS menyumbang porsi terbesar konsumsi energi (sekitar 45%), diikuti pendingin dan transmisi.
 - b) Variasi tipologi site (urban, suburban, rural) memengaruhi profil konsumsi, tetapi pola dominan tetap sama.
- 2) Kontribusi signifikan terhadap emisi CO₂
 - a) Dengan faktor emisi grid yang tinggi, satu klaster infrastruktur dapat menyumbang ratusan ton CO₂ per tahun.
 - b) Skenario efisiensi teknis menunjukkan bahwa pengurangan 10–20% konsumsi energi dapat menekan puluhan ton CO₂ per klaster per tahun.
- 3) Praktik Green ICT sudah ada, tetapi parsial
 - a) Upgrade perangkat, penyesuaian set-point AC, dan pilot solar hybrid sudah berjalan namun belum menjadi program terpadu.
 - b) Ketiadaan target energi dan emisi yang jelas membuat upaya efisiensi sering bersifat opportunistic, bukan strategis
- 4) Persepsi yang belum sepenuhnya selaras
 - a) Level teknis sangat fokus pada keandalan layanan, sementara level manajerial mulai memberi bobot pada efisiensi dan keberlanjutan.
 - b) Isu emisi CO₂ masih jarang dijadikan argumen utama pada level operasional.
 - c) Nilai tambah pendekatan interdisipliner elektro–kimia
- 5) Integrasi data energi dengan estimasi emisi memberikan gambaran yang lebih kuat mengenai dampak lingkungan sektor telekomunikasi. Pendekatan ini menyediakan basis rasional untuk perumusan kebijakan dan program Green ICT yang terukur dan dapat diaudit.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa infrastruktur jaringan telekomunikasi memiliki konsumsi energi listrik tahunan yang tinggi (sekitar 265.000 kWh per klaster) yang berkontribusi signifikan terhadap emisi CO₂ (sekitar 225 ton per tahun), terutama di konteks bauran energi fosil Indonesia, sementara praktik Green ICT sudah mulai diterapkan namun masih parsial dan tidak terukur secara sistematis. Pendekatan kualitatif yang diperkaya data teknis menunjukkan bahwa beban energi terbesar berasal dari BTS, perangkat transmisi, dan sistem pendingin, dengan celah berupa minimnya pemetaan rinci konsumsi per komponen, ketiadaan target energi–emisi yang jelas, serta perbedaan persepsi antara pelaku teknis dan manajerial yang cenderung memprioritaskan keandalan layanan dibanding efisiensi. Hasil analisis mengindikasikan adanya potensi pengurangan emisi sekitar 20–45 ton CO₂ per tahun melalui kombinasi upgrade perangkat, pengaturan sistem pendingin, dan penerapan solar hybrid, yang sekaligus menegaskan pentingnya integrasi perspektif teknik elektro dan kimia lingkungan untuk merumuskan strategi Green ICT berkelanjutan, termasuk penetapan target terukur, monitoring terperinci, dan penguatan komunikasi lintas level sebagai kontribusi pada agenda mitigasi perubahan iklim nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahlem Zegueur, Toufik Sebbagh, and Abderrezak Metatela, “Optimizing-a-Sustainable-Power-System-with-Green-Hydrogen-Energy-Storage-for-Telecommunication-Station-Loads_2025_Libyan-Center-for-Solar-Energy-Research-and-Studies.pdf,” 2024. doi: <https://doi.org/10.51646/jsesd.v14i1.366>.

- [2] Nazli Demirtas, Erick Okoth, Yasin Sogut, Azad Erdem, Yakup Koseoglu, and Cahit Sanver, "Sustainable-development-beyond-emissions-the-role-of-ICT-load-capacity-factor-green-technology-patents-and-energy-transition-in-OECD-countries_2026_(1).pdf," 2026. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-44740-w1>.
- [3] Aldila Dinanti, Indira Januarti, and Rr. Sri Handayani, "From-adoption-to-accountability-a-19972024-bibliometric-cartography-of-ICT-in-SMEs-with-accounting--sustainability-overlays_2026_Springer-Science-and-Business-Media-Deutschland-GmbH.pdf," 2026. doi: <https://doi.org/10.1186/s13731-026-00621-0>.
- [4] Hadi Susanto, Didi Rosiyadi, Dinda Nurhalisa, Diah Puspitasari, Chonlameth Arpnikanondt, and Tuul Triyason, "Geospatial-Optimization-of-Field-Engineer-Deployment-for-Sustainable-Telecommunication-Tower-Maintenance-A-Case-Study-in-West-Java-Indonesia_2026_Multidisciplinary-Digital-Publishing-Institute-MDPI.pdf," 2026. doi: <https://doi.org/10.3390/environments13030141>.
- [5] M. Campino, L. Sousa, P. Baptista, and G. O. Duarte, "Modeling Street-Level Energy and Emissions: The Role of Vehicle Traffic," *In Proceedings of the EVS38—International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Göteborg, Sweden, 15–18 June*, pp. 1–21, 2025.
- [6] Ali Raza, Lu Hongliang, Tingyu Yang, and Nian Wei, "The-digital-green-revolution-computational-framework-for-genderinclusive-ICT-adoption-and-sustainable-agricultural-technology-in-Pakistan_2026_Springer-Science-and-Business-Media-Deutschland-GmbH.pdf," 2026. doi: <https://doi.org/10.1186/s40100-026-00464-z>.
- [7] Chi-Yong An, Jinki Park, and Chulmin Song, "Comparative-Analysis-of-Image-Binarization-Algorithms-for-UAVBased-Soybean-Canopy-Extraction-Across-Growth-Stages-for-Image-Labeling_2026_Multidisciplinary-Digital-Publishing-Institute-MDPI.pdf," 2026. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture16050582>.
- [8] K. Kanwal, G. A. Safdar, and M. UrRehman, "Energy Efficiency Led reduced CO2 Emission in Green LTE Networks," *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, vol. 4, no. 14, 2017, doi: 10.4108/eai.4-10-2017.153160.
- [9] T. M. Baierl, "The supportive role of environmental attitude for learning about environmental issues," *J. Environ. Psychol.*, vol. 81, 2022, doi: 10.1016/j.jenvp.2022.101799.
- [10] F. Mónus, "Environmental education policy of schools and socioeconomic background affect environmental attitudes and pro-environmental behavior of secondary school students," *Environ. Educ. Res.*, vol. 28, no. 2, pp. 169–196, 2022, doi: 10.1080/13504622.2021.2023106.
- [11] L. K. Oxenløwe, Q. Saudan, J. Riebesehl, M. Zahidy, and S. Swain, "Evaluating Energy Consumption of Internet Services," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E106–B, no. 11, pp. 1036–1043, 2023, doi: 10.1587/transcom.2022OBI0001.
- [12] Abdulwahab Ahmad Bello, Seyi Saint Akadiri, and Aliu Adeniran Adebisi, "The-criticality-of-green-innovations-ecotaxations-and-ICT-trade-in-developing-green-in-the-European-union-member-States_2026_Springer-Science-and-Business-Media-BV_(1).pdf," 2026. doi: <https://doi.org/10.1007/s10668-026-07325-1>.
- [13] K. Zhang and X. Wang, "Pollution haven hypothesis of global co2, so2, nox —evidence from 43 economies and 56 sectors," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 12, 2021, doi: 10.3390/ijerph18126552.
- [14] A. A. Mahawish, S. M. Tariq, and M. M. Abed, "FuzzyGreen: A Context-Aware Fuzzy Inference Framework for Carbon Footprint Reduction in Next-Generation Wi-Fi Network Infrastructure," *VFAST Transactions on Software Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 175–192, 2026, doi: 10.21015/vtse.v14i1.2332.
- [15] Qi Wan *et al.*, "Electrochemistry-Carboxylation-of-Bromothiazoles-with-CO2-An-Environmentally-Friendly-Synthesis-of-Thiazole-Carboxylic-Acids_2026_Multidisciplinary-Digital-Publishing-Institute-MDPI.pdf," 2026. doi: <https://doi.org/10.3390/catal16020191>.
- [16] B. H. Samset, J. S. Fuglestedt, and M. T. Lund, "Delayed emergence of a global temperature response after emission mitigation," *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-17001-1.

- [17] H. Manglani, M. Kumar, and A. Sharma, “Harnessing digital and ICT trade for environmental sustainability in emerging economies,” *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s43621-025-02029-4.
- [18] Y. S. Chen, “How personality affects environmentally responsible behaviour through attitudes towards activities and environmental concern: evidence from a national park in Taiwan,” *Leisure Studies*, vol. 39, no. 6, pp. 825–843, 2020, doi: 10.1080/02614367.2020.1778773.
- [19] N. Fitriana *et al.*, “Empowering sustainable action: PLS-SEM analysis of ethnosience-based learning for pro-environmental behavioral change in East Java university students,” *Multidisciplinary Science Journal*, vol. 8, no. 4, Apr. 2026, doi: 10.31893/multiscience.2026285.