

TEKNOLOGI HIJAU PADA JARINGAN 5G: TINJAUAN SINGKAT DARI LITERATUR TERPILIH

Hartuti Mistialustina¹, Nina Lestari², Kusmadi³, Ivany Sarief⁴, A. Andini Radisya Pratiwi⁵,
Nurwathi⁶, Muhammad Yusron Amriadi⁷

^{1, 2, 3, 4} Teknik Elektro, Universitas Sangga Buana

⁵ Magister Teknik Sipil, Universitas Sangga Buana

⁶ Teknik Industri, Universitas Sangga Buana

⁷ Enterprise Platform, IoT and Network Infrastructure Management, PT. Telkomsel Indonesia Tbk

¹ korespondensi: hartuti.mistialustina@usbykp.ac.id

ABSTRACT

The use of green technology in 5G networks is a crucial focus in efforts to reduce carbon footprints and enhance energy efficiency. This article provides a brief review of selected literature on the implementation of green technology in 5G networks. Broadly, energy efficiency as part of green technology is divided into two key areas: conventional energy savings and exploration of green energy. In addition, the discussion in this article includes innovations in key technologies that have been developed to support energy efficiency in 5G networks. The challenges and opportunities of the implementations that have been carried out and some follow-up research that supports the development of green technology in 5G networks are also briefly presented. Furthermore, the review also highlights the initiatives of several global telecommunications operators, including BT Group, Telefónica, Vodafone, and Telkomsel, in implementing green technology to achieve sustainability targets and enhance corporate reputation. However, the implementation of green technology in 5G networks also faces various challenges. The main challenges include high investment costs, the complexity of integrating new technologies into existing infrastructure, security and privacy issues, regulations and policies, spectrum waves, and small cells. Additionally, there are challenges related to the need to ensure that the implementation of these technologies does not reduce service quality. Further research is needed to overcome these obstacles and explore more efficient and effective solutions. This article is expected to provide an informative brief compilation of insights into the importance of green technology in the development of sustainable and environmentally friendly 5G networks.

Keywords: Green technology, Energy efficiency, Energy Harvesting, 5G, Literature review.

ABSTRAK

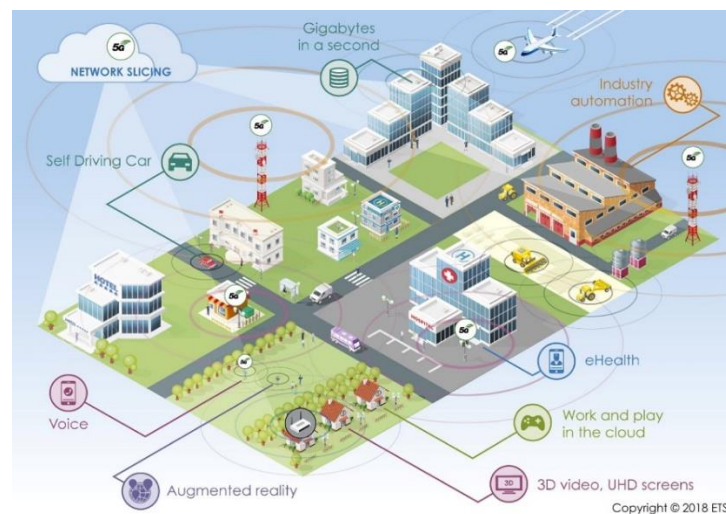
Penggunaan teknologi hijau dalam jaringan 5G menjadi fokus penting dalam upaya mengurangi jejak karbon dan meningkatkan efisiensi energi. Artikel ini memberikan tinjauan singkat dari literatur terpilih mengenai implementasi teknologi hijau pada jaringan 5G. Secara garis besar efisiensi energi yang menjadi bagian dari teknologi hijau, terbagi ke dalam dua bagian penting, yaitu penghematan energi konvensional dan eksplorasi terhadap energi hijau. Selain itu pembahasan dalam artikel ini mencakup inovasi dalam teknologi-teknologi utama yang berkembang untuk mendukung efisiensi energi pada jaringan 5G. Tantangan dan peluang yang membahas implementasi yang sudah dilakukan dan beberapa penelitian lanjutan yang mendukung pengembangan teknologi hijau dalam jaringan 5G juga disampaikan secara singkat. Selain itu, tinjauan juga dilakukan untuk menyoroti inisiatif beberapa operator telekomunikasi global, diantaranya BT Group, Telefónica, Vodafone, dan Telkomsel, dalam menerapkan teknologi hijau untuk mencapai target keberlanjutan dan meningkatkan reputasi perusahaan. Namun, penerapan teknologi hijau dalam jaringan 5G juga menghadapi berbagai tantangan. Tantangan utama meliputi biaya investasi yang tinggi, kompleksitas integrasi teknologi baru ke dalam infrastruktur yang ada, isu keamanan dan privasi, regulasi dan kebijakan, spektrum gelombang, dan small cell. Selain itu tentu saja tantangan terkait kebutuhan untuk memastikan bahwa penerapan teknologi ini tidak mengurangi kualitas layanan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi hambatan ini dan mengeksplorasi solusi yang lebih efisien dan efektif. Artikel ini diharapkan dapat memberikan kompilasi singkat yang informatif terkait wawasan mengenai pentingnya teknologi hijau dalam pengembangan jaringan 5G yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: Teknologi hijau, Efisiensi energi, Pemanenan energi, 5G, Tinjauan literatur.

PENDAHULUAN

Sebagai evolusi terbaru dari jaringan telekomunikasi, teknologi 5G menawarkan potensi luar biasa untuk mengubah berbagai aspek kehidupan manusia. Selain menyediakan kecepatan data yang lebih tinggi dan latensi yang lebih rendah, 5G juga memungkinkan munculnya aplikasi-aplikasi baru dalam bidang *internet of things* (IoT),

augmented reality (AR), kendaraan otonom, *smart cities*, telemedicine/*e-health*, automasi industri, dan *gaming* seperti ilustrasi kasus penggunaan jaringan 5G yang dapat di lihat pada **Gambar 1** (1, 2). Namun, seiring dengan peningkatan kemampuan ini, muncul tantangan baru terkait efisiensi energi dan dampak lingkungan.



Gambar 1: Ilustrasi Berbagai Penggunaan 5G (1).

Isu efisiensi energi menjadi semakin penting mengingat kontribusi besar industri telekomunikasi terhadap jejak karbon global. Jaringan telekomunikasi tradisional sering kali dirancang untuk memaksimalkan *throughput* pengguna tanpa mempertimbangkan efisiensi energi, yang mengakibatkan konsumsi daya yang besar dan emisi karbon yang signifikan. Dalam konteks ini, teknologi hijau pada jaringan 5G muncul sebagai solusi potensial untuk mengurangi dampak lingkungan.

Sebuah artikel di tahun 2019 telah menjadi salah satu dasar dalam perkembangan penelitian tentang teknologi-teknologi yang

mendukung jaringan 5G yang ramah terhadap lingkungan (3). Sesuai dengan berjalannya waktu, perkembangan terkini dalam teknologi hijau pada jaringan 5G selalu menjadi suatu hal yang menarik untuk diteliti.

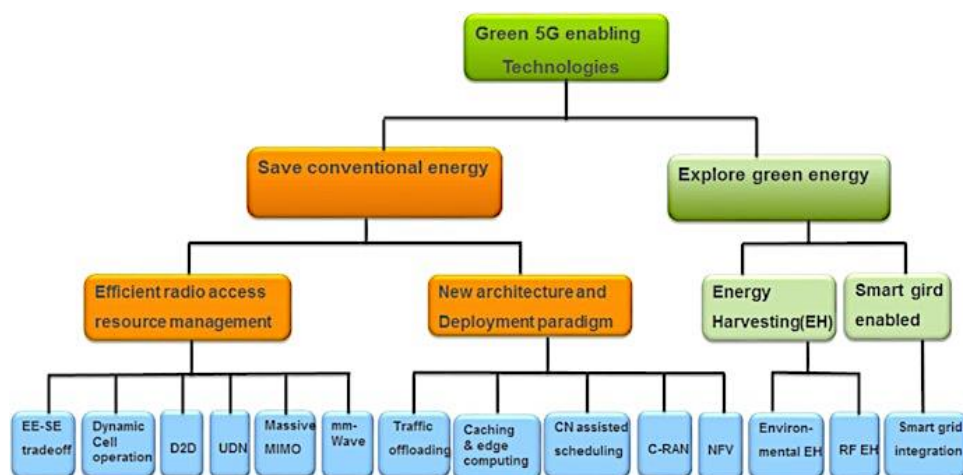
Karena hal tersebut, artikel yang disusun dalam bentuk tinjauan singkat ini memaparkan tentang hasil peninjauan beberapa literatur terpilih, yang membahas konsep, manfaat, dan tantangan dan peluang penelitian dan penerapan teknologi hijau pada jaringan 5G, inisiasi global implementasi teknologi hijau pada jaringan 5G, dan kesimpulan. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang

komprehensif mengenai upaya dan strategi yang telah berkembang dalam menciptakan jaringan telekomunikasi yang lebih berkelanjutan. Dalam artikel ini juga disampaikan berbagai aspek teknologi hijau yang mendukung efisiensi energi dalam jaringan 5G, seperti Massive MIMO, komunikasi gelombang milimeter, *edge computing*, dan *network slicing*. Studi kasus dari beberapa operator telekomunikasi global menunjukkan bahwa implementasi teknologi hijau dapat mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon, namun tetap memenuhi kebutuhan pengguna akan layanan data yang berkualitas tinggi.

Konsep Teknologi Hijau pada Jaringan 5G

Teknologi hijau atau teknologi ramah lingkungan adalah inovasi yang dirancang untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan mempromosikan keberlanjutan. Isu teknologi hijau dalam

industri telekomunikasi telah menjadi perhatian sejak awal 2000-an. Pada tahun 2007, Greenpeace memperkenalkan kampanye "*Green My Phone*" yang menyoroti dampak lingkungan dari perangkat telekomunikasi (4). Sejak itu, banyak perusahaan telekomunikasi mulai mengembangkan dan menerapkan teknologi yang lebih efisien dalam penggunaan energi dan ramah lingkungan. Pada tahun 2010-an, peningkatan kesadaran akan perubahan iklim dan tekanan dari masyarakat serta pemerintah dalam upaya pengurangan emisi karbon pada semua sektor, mendorong industri telekomunikasi untuk lebih serius dalam mengadopsi praktik-praktik berkelanjutan. Pentingnya adopsi teknologi hijau antara lain yaitu teknologi hijau membantu mengurangi emisi karbon yang dihasilkan oleh infrastruktur telekomunikasi, keuntungan ekonomi, meningkatkan reputasi perusahaan dan kepercayaan pelanggan.



Gambar 2: Teknologi yang Mendukung Efisiensi Energi pada Jaringan 5G (1).

Dalam konteks jaringan 5G, teknologi hijau adalah semua teknologi yang menjadi bagian dari upaya meningkatkan efisiensi energi,

mengurangi emisi karbon, dan meminimalkan jejak ekologis dari infrastruktur dan operasional jaringan. Jaringan 5G, sebagai

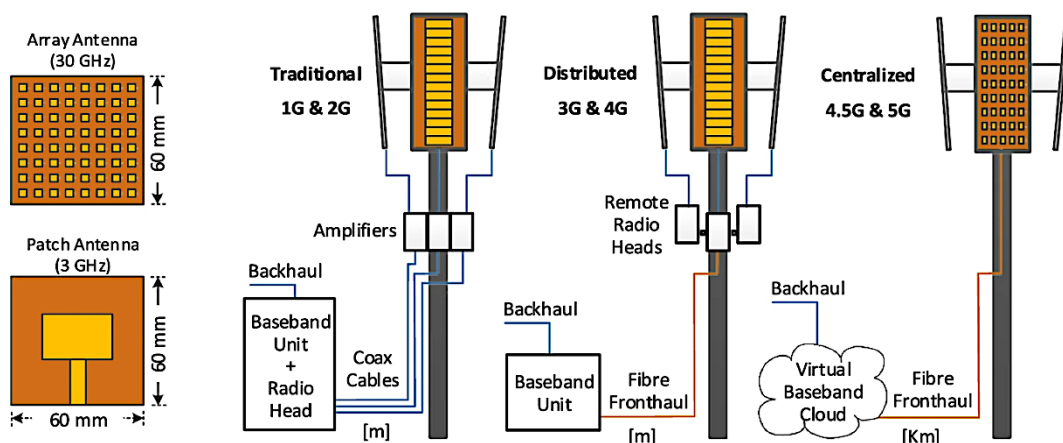
generasi terbaru dari telekomunikasi seluler, tidak hanya menawarkan peningkatan signifikan dalam kecepatan dan kapasitas data, tetapi juga membawa potensi besar untuk meningkatkan keberlanjutan lingkungan. Teknologi 5G dirancang dengan mempertimbangkan efisiensi energi, melalui penggunaan berbagai inovasi dan teknik yang ramah lingkungan.

Ilustrasi teknologi yang mendukung efisiensi energi pada jaringan 5G, dapat dilihat pada **Gambar 2**. Secara garis besar upaya efisiensi energi terbagi ke dalam dua bagian, yaitu penghematan energi konvensional dan eksplorasi terhadap energi hijau. Adapun pembahasan pada artikel ini fokus pada perkembangan beberapa bidang saja baik dalam hal penelitian atau implementasinya.

Dalam upaya untuk menciptakan jaringan 5G yang lebih efisien dalam penggunaan energi, berbagai teknologi telah diimplementasikan. Teknologi-teknologi ini tidak hanya

meningkatkan kinerja jaringan, tetapi juga secara signifikan mengurangi konsumsi energi. Berikut adalah beberapa teknologi yang berkembang untuk mendukung efisiensi energi pada 5G (2):

1. **Massive MIMO** (Multiple-Input Multiple-Output). *Massive MIMO* seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 3**, menggunakan sejumlah besar antenna pada *Base Transceiver Station* (BTS) untuk meningkatkan kapasitas dan efisiensi spektral jaringan. Dengan menggunakan lebih banyak antenna, teknologi ini dapat mengarahkan sinyal secara lebih tepat ke perangkat pengguna, sehingga mengurangi interferensi dan meningkatkan efisiensi energi per bit data yang ditransmisikan. *Massive MIMO* dapat dikembangkan dengan biaya yang murah dan menggunakan komponen yang rendah konsumsi dayanya, *Massive MIMO* memungkinkan pengurangan signifikan dari latensi pada *air interface* (5-9).



Gambar 3: Skema *massive MIMO*, Antena array untuk frekuensi mmWave dan evolusi infrastruktur seluler (5).

2. **Komunikasi Gelombang Milimeter (mmWave).** Komunikasi gelombang

milimeter memanfaatkan spektrum frekuensi tinggi untuk memungkinkan transmisi data

dengan kecepatan tinggi dan latensi rendah. Alokasi spektrum dapat dilihat pada **Gambar 4**. Teknologi komunikasi mmWave meningkatkan efisiensi energi dengan mengurangi interferensi dan memungkinkan

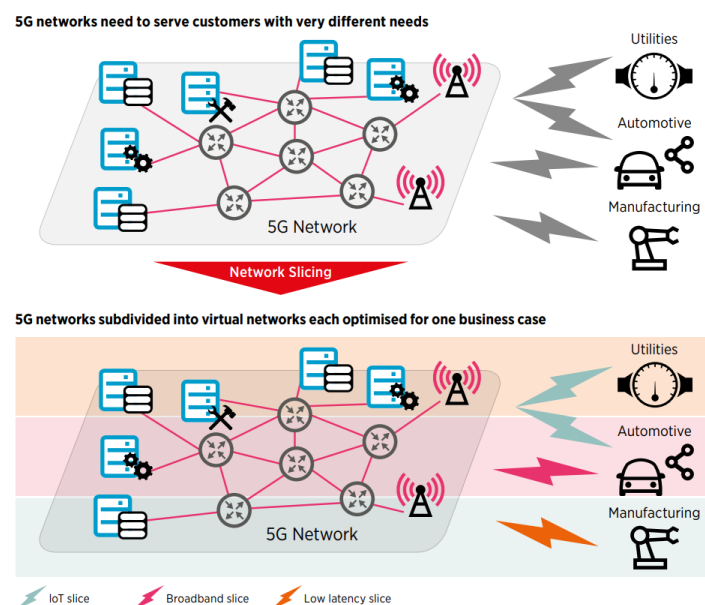
penggunaan kembali spektrum yang lebih fleksibel. Penggunaan antenna *array* dalam komunikasi mmWave juga membantu dalam mengarahkan sinyal secara efisien ke perangkat pengguna (2).



Gambar 4: Spektrum gelombang elektromagnetik, 5G mmWave (10).

3. **Network Slicing.** Teknologi *Network slicing* memungkinkan operator untuk membagi jaringan fisik menjadi beberapa jaringan virtual yang dioptimalkan untuk berbagai jenis layanan, dengan ilustrasi seperti pada **Gambar 5**. Dengan memisahkan layanan sesuai kebutuhan kinerja yang

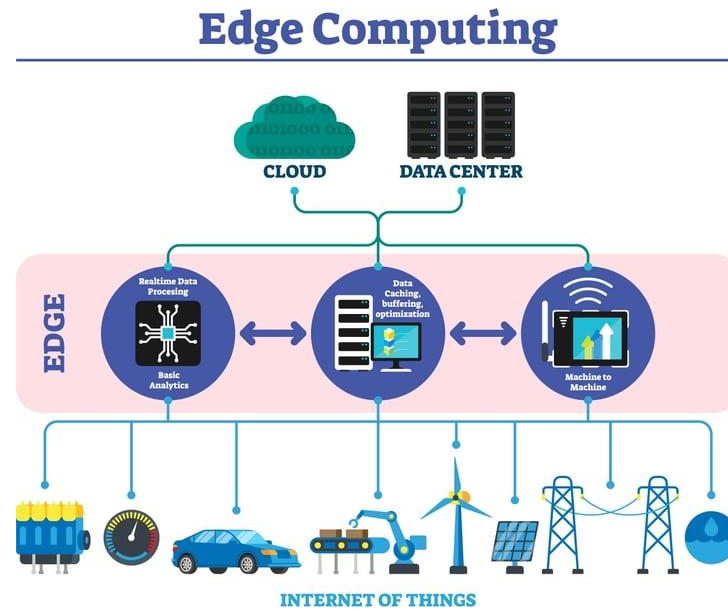
berbeda, *network slicing* memungkinkan alokasi sumber daya yang lebih efisien dan penggunaan energi yang lebih hemat. Setiap potongan jaringan dapat diatur untuk memaksimalkan efisiensi energi sesuai dengan tuntutan layanannya (12).



Gambar 5: Ilustrasi *Network Slicing* (11).

4. **Edge Computing.** Teknologi *Edge computing* memindahkan sebagian besar proses pengolahan data lebih dekat ke pengguna akhir. Dengan memproses data di tepi jaringan, *edge computing* mengurangi kebutuhan transmisi data jarak jauh ke pusat

data, sehingga mengurangi konsumsi energi, seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 6**. Selain itu, *edge computing* memungkinkan respon yang lebih cepat terhadap permintaan pengguna, yang juga meningkatkan efisiensi operasional (14,15).



Gambar 6: Ilustrasi *Edge Computing* (13).

5. **Teknologi Tidur dan Bangun (*Sleep and Wake Technologies*):** Teknologi ini memungkinkan stasiun BTS dan elemen jaringan lainnya untuk memasuki mode tidur ketika tidak ada aktivitas pengguna, dan bangun kembali saat diperlukan. Dengan cara ini, jaringan dapat mengurangi konsumsi energi secara signifikan selama periode *low traffic* tanpa mengorbankan kualitas layanan (16-18).

Implementasi teknologi-teknologi ini menunjukkan komitmen industri telekomunikasi terhadap keberlanjutan energi dan pengurangan jejak karbon. Dengan mengadopsi pendekatan yang lebih efisien dalam penggunaan energi, jaringan 5G tidak

hanya dapat memenuhi permintaan yang terus meningkat akan layanan data, tetapi juga berkontribusi pada upaya global untuk mengurangi dampak lingkungan.

Tantangan dan Peluang Penelitian dan Implementasi

Teknologi hijau pada jaringan 5G menawarkan sejumlah manfaat signifikan yang dapat berdampak positif pada efisiensi energi, keberlanjutan lingkungan, dan kinerja jaringan secara keseluruhan. Beberapa manfaat utama meliputi pengurangan konsumsi energi, peningkatan efisiensi spektral, dukungan untuk sumber energi terbarukan, peningkatan kualitas layanan

(QoS), serta peningkatan reputasi perusahaan (19,20).

Meskipun memiliki berbagai manfaat, penerapan teknologi hijau pada jaringan 5G juga menghadapi sejumlah tantangan yang perlu diatasi:

1. **Biaya dan Investasi:** Implementasi teknologi hijau pada 5G sering kali memerlukan investasi awal yang signifikan. Biaya untuk mengadopsi teknologi baru, meningkatkan kualitas infrastruktur yang ada, dan mengintegrasikan sumber energi terbarukan bisa menjadi tantangan bagi operator jaringan (21-23).

2. **Kompleksitas Teknis:** Teknologi hijau pada 5G sering kali melibatkan kompleksitas teknis yang tinggi. Integrasi berbagai teknologi baru seperti *Massive MIMO*, *edge computing*, dan *network slicing* memerlukan keahlian teknis yang mendalam dan perencanaan yang cermat untuk memastikan kinerja optimal dan meningkatnya efisiensi energi (24-26). Selain hal-hal tersebut, *energy harvesting* juga merupakan upaya yang penuh dengan tantangan (27-29).

3. **Isu Keamanan dan Privasi:** Penerapan teknologi hijau pada 5G juga menimbulkan tantangan terkait keamanan dan privasi. Dengan peningkatan konektivitas dan integrasi berbagai perangkat IoT, risiko keamanan siber juga meningkat. Operator jaringan perlu mengadopsi langkah-langkah keamanan yang lebih ketat untuk melindungi data pengguna dan mencegah ancaman keamanan (30-33).

4. **Integrasi Energi Terbarukan:**

Memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin untuk mengoperasikan infrastruktur jaringan melibatkan tantangan dalam penyimpanan, distribusi, dan manajemen energi. Memastikan pasokan daya yang andal dan konsisten sambil meminimalkan jejak karbon memerlukan sistem yang kuat dan solusi yang inovatif (33-36).

5. **Regulasi dan Kebijakan:** Pengembangan dan penerapan teknologi hijau pada 5G juga dipengaruhi oleh regulasi dan kebijakan pemerintah. Operator jaringan perlu menyesuaikan strateginya dengan peraturan yang berlaku dan bekerja sama dengan regulator untuk memastikan kepatuhan implementasi dan dukungan terhadap inisiasi keberlanjutan (37-39).

6. **Spektrum Gelombang:** Tujuan pengembangan teknologi 5G adalah untuk menyediakan *bandwidth* yang diperlukan bagi setiap pengguna dengan perangkat yang mampu menyediakan kecepatan data yang lebih tinggi. Jaringan dapat menyediakan *bandwidth* ini dengan menggunakan spektrum frekuensi di atas 6 GHz. Meskipun militer telah menggunakan frekuensi di atas 6 GHz, jaringan komersial kini juga menggunakannya untuk pertama kali. Di seluruh dunia, para peneliti sedang mengeksplorasi kemungkinan baru dari spektrum dan saluran frekuensi untuk komunikasi 5G yang difokuskan pada rentang frekuensi antara 25 GHz hingga 86 GHz (33).

8. **Small Cell:** *Small cell* merupakan salah satu solusi untuk memenuhi permintaan kapasitas data yang jauh lebih tinggi pada jaringan 5G. Saat operator seluler berusaha untuk memperpadat jaringannya, penelitian *small cell* menjadi solusi utama. *Small cell* adalah titik akses radio berdaya rendah yang menggantikan sistem transmisi nirkabel tradisional atau BTS. Dengan memanfaatkan transmisi berdaya rendah dan jangkauan pendek di area geografis kecil, *small cell* sangat cocok untuk peluncuran 5G frekuensi tinggi (33).

Dapat dilihat meskipun tantangan-tantangan tersebut signifikan, potensi peluang yang ditawarkan oleh teknologi hijau pada 5G sangat menarik. Dengan kolaborasi antara dunia akademik, dunia industri, pemerintah, dan komunitas, teknologi hijau pada 5G dapat diadopsi secara luas untuk mendukung masa depan yang lebih berkelanjutan.

Inisiasi Global Implementasi Teknologi Hijau pada Jaringan 5G

Implementasi teknologi hijau dalam jaringan 5G telah menjadi fokus utama bagi banyak operator telekomunikasi di seluruh dunia. Studi kasus berikut ini menggambarkan beberapa contoh upaya-upaya dari perusahaan yang telah menerapkan teknologi ramah lingkungan dalam jaringan 5G mereka.

1. **BT Group** (40,41): BT Group adalah salah satu operator telekomunikasi terkemuka di Inggris, telah mengadopsi berbagai inisiatif teknologi hijau dalam jaringan 5G mereka. Salah satu upaya utama mereka adalah penggunaan energi terbarukan untuk

mengoperasikan infrastruktur jaringan, seperti panel surya dan turbin angin. Selain itu, BT Group telah mengimplementasikan teknologi *edge computing* untuk mengurangi kebutuhan transmisi data jarak jauh, yang secara signifikan mengurangi konsumsi energi. Hasilnya, BT Group telah berhasil mengurangi emisi karbon dan meningkatkan efisiensi energi pada jaringannya.

2. **Telefónica** (42,43): Telefónica adalah operator telekomunikasi global yang berbasis di Spanyol, telah berkomitmen untuk mencapai netralitas karbon pada tahun 2030. Sebagai bagian dari inisiatif ini, Telefónica telah mengintegrasikan teknologi *Massive MIMO* dan komunikasi gelombang milimeter dalam jaringan 5G mereka. Teknologi ini memungkinkan peningkatan efisiensi spektral dan penurunan konsumsi energi per bit data yang ditransmisikan. Telefónica juga telah menggunakan *network slicing* untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya jaringan dan mengurangi konsumsi energi. Upaya ini telah membantu Telefónica mengurangi jejak karbon dan mendukung keberlanjutan.

3. **Vodafone** (44-46): Vodafone adalah operator telekomunikasi multinasional yang berpusat Inggris, telah menerapkan berbagai inisiatif teknologi hijau dalam jaringan 5G mereka untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon. Vodafone menggunakan teknologi tidur dan bangun (*sleep and wake technologies*) pada BTS mereka. Selain itu, Vodafone telah mengadopsi *edge computing* dan penggunaan energi terbarukan untuk

mengoperasikan jaringan mereka. Hasilnya, Vodafone telah berhasil meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan dari operasi jaringan mereka.

4. **Telkomsel (47-49):** Telkomsel adalah operator telekomunikasi terbesar di Indonesia, juga telah mengimplementasikan teknologi hijau dalam jaringan 5G mereka. Telkomsel menggunakan solusi pendinginan cair untuk mengurangi konsumsi energi pada BTS. Selain itu, Telkomsel telah memasang panel surya di beberapa situs BTS untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan. Telkomsel juga telah menggunakan teknologi *Massive MIMO* untuk meningkatkan efisiensi spektral dan mengurangi konsumsi energi per bit data yang ditransmisikan. Langkah-langkah ini telah membantu Telkomsel mencapai efisiensi energi yang lebih baik dan mengurangi jejak karbon mereka.

Beberapa studi kasus ini menunjukkan bahwa implementasi teknologi hijau pada jaringan 5G telah berjalan dan dapat memberikan manfaat signifikan dalam hal pengurangan konsumsi energi dan emisi karbon, namun tetap memenuhi kebutuhan pengguna akan layanan data yang berkualitas tinggi. Upaya ini tidak hanya mendukung keberlanjutan lingkungan, tetapi juga meningkatkan reputasi perusahaan sebagai pelaku industri yang bertanggung jawab terhadap lingkungan.

KESIMPULAN

Adopsi teknologi hijau dalam industri telekomunikasi merupakan langkah krusial dalam menghadapi tantangan lingkungan dan

memenuhi tuntutan regulasi yang semakin ketat. Melalui berbagai inisiatif global dan strategi implementasi, perusahaan telekomunikasi terkemuka seperti BT Group, Telefónica, Vodafone, dan Telkomsel telah menunjukkan komitmen mereka untuk mengurangi jejak karbon dan meningkatkan efisiensi operasional.

Penerapan teknologi hijau dalam jaringan 5G merupakan langkah penting menuju keberlanjutan lingkungan di era digital. Teknologi 5G menawarkan berbagai keunggulan, termasuk peningkatan kecepatan data, latensi rendah, dan kapasitas jaringan yang lebih besar. Namun, tanpa pendekatan yang ramah lingkungan, jaringan ini dapat berkontribusi pada peningkatan konsumsi energi dan emisi karbon yang signifikan.

Meskipun terdapat tantangan dalam penerapan teknologi hijau, seperti biaya investasi awal dan kompleksitas teknis, manfaat yang ditawarkan jauh lebih besar. Pengurangan konsumsi energi, peningkatan efisiensi spektral, dan penggunaan sumber energi terbarukan tidak hanya mendukung keberlanjutan lingkungan, tetapi juga meningkatkan reputasi perusahaan sebagai pelaku industri yang bertanggung jawab.

Melihat ke depan, inovasi dan penelitian lebih lanjut akan sangat penting untuk mengatasi tantangan yang ada dan memaksimalkan potensi teknologi hijau dalam jaringan 5G. Dengan kolaborasi antara dunia akademik, dunia industri, pemerintah, dan komunitas, maka jaringan telekomunikasi yang lebih efisien dalam penggunaan energi dan

berkelanjutan dapat diwujudkan, tidak hanya dapat memenuhi kebutuhan komunikasi modern tetapi juga berkontribusi pada upaya global untuk melindungi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

1. ETSI. Technologies: Mobile 5G [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.etsi.org/technologies/mobile/5g?jjj=1733643223801>
2. IEEE Spectrum. Everything you need to know about 5G.
3. Zhang S, Cai X, Zhou W, Wang Y. Green 5G enabling technologies: an overview. IET Commun. 2019;13:135-43. doi: 10.1049/iet-com.2018.5448.
4. Voice and Data. Green telecom: key to a sustainable digital future [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.voicendata.com/green-telecom-key-to-a-sustainable-digital-future/>
5. Khawandah SA, Cosmas JP, Lazaridis PI, Chochliouros IP. Massive MIMO Systems for 5G Communications. Wirel Pers Commun. 2021;120:2101-2115. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08550-9>
6. Ngo HQ, Larsson EG, Marzetta TL. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. IEEE Trans Commun. 2013;61:1436-49.
7. Larsson EG, Edfors O, Tufvesson F, Marzetta TL. Massive MIMO for next generation wireless systems. IEEE Commun Mag. 2014;52(2):186-95. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761.
8. Khawandah SA, Cosmas JP, Lazaridis PI, Zaharis ZD, Chochliouros IP. Massive MIMO systems for 5G communications. Wireless Pers Commun. 2021;120:2101-15.
9. Dreifuerst RM, Heath RW Jr. Massive MIMO in 5G: How beamforming, codebooks, and feedback enable larger arrays. arXiv preprint arXiv:2301.13390. 2023.
10. Qualcomm. 5G mmWave Guide – A Resource for Operators. February 2022. Available from: <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/gsma-5GmmWave-guide-a-resource-for-operators.pdf>
11. GSMA. An Introduction to Network Slicing. Available from: <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/networks/wp-content/uploads/2017/11/GSMA-An-Introduction-to-Network-Slicing.pdf>
12. Intel. 5G end-to-end network slicing [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/guides/5g-network-slicing-paper.pdf>
13. Trenton Systems. What is Edge Computing and Why Does It Matter. Available from: <https://www.trentonsystems.com/en-us/resource-hub/blog/what-is-edge-computing-why-does-it-matter>
14. Hu YC, Patel M, Sabella D, Sprecher N, Young V. Mobile edge computing: a key technology towards 5G. ETSI White Paper No. 11.
15. IEEE. Edge computing in 5G: a review [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/xxxx>
16. Shen P, Shao Y, Cao Q, Lu L. Dynamic gNodeB sleep control for energy-conserving 5G radio access network. IEEE Access. 2023.
17. Rostami S, Kela P, Leppanen K, Valkama M. Wake-up radio-based 5G mobile access: Methods, benefits and challenges. IEEE Access. 2023.

18. Guvenc I, Masrur S, Lopez-Perez D. Energy-efficient sleep mode optimization of 5G mmWave networks using deep contextual MAB. IEEE Access. 2023.
19. Attaran M. The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization. J Ambient Intell Human Comput. 2023;14:5977-93. doi: 10.1007/s12652-020-02521-x.
20. GSMA. Green is good for business: the reputational case in telecoms [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://data.gsmainelligence.com/api-web/v2/research-file-download?id=79790690>
21. Al-Dunainawi Y, Alhumaima RS, Al-Raweshidy HS. Green network costs of 5G and beyond, expectations vs reality. IEEE Access. 2018;6:60206-13. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2875891.
22. McKinsey & Company. The road to 5G: The inevitable growth of infrastructure cost [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/the-road-to-5g-the-inevitable-growth-of-infrastructure-cost>
23. GSMA Intelligence. 5G energy efficiencies: Green is the new black [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://data.gsmainelligence.com/api-web/v2/research-file-download?id=54165956>
24. Guidotti A, Vanelli-Coralli A, Conti M, et al. Architectures and key technical challenges for 5G systems incorporating satellites. IEEE Access. 2018;6:10969-84.
25. 3GPP. 5G system overview. 3rd Generation Partnership Project (3GPP). 2020.
26. Mao Z, Sun S. Network slicing for 5G: A survey. IEEE Commun Surv Tutor. 2019;21(3):3093-116.
27. Imran M, Khan LU, Yaqoob I, et al. Energy harvesting in 5G networks: Taxonomy, requirements, challenges, and future directions. IEEE Access. 2019;7:176671-88.
28. Maso M. Energy harvesting-oriented transceiver design for 5G networks. In: Energy Management in Wireless Cellular and Ad-hoc Networks. Springer; 2018. p. 67-95.
29. Dwivedi N, Kumar S, Tanwar S, Tyagi S. Energy harvesting in fifth-generation wireless network: Upcoming challenges and future directions. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Computing, Communications, and Cyber-Security. Springer; 2023. p. 51-67.
30. Nokia. Privacy challenges and security solutions for 5G networks. Nokia Thought Leadership. 2024.
31. ISACA. The impact of 5G: Unpacking security and privacy concerns. ISACA J. 2024;6.
32. ISACA. 5G privacy implications. ISACA Now Blog. 2022.
33. IEEE Future Networks. Research areas in 5G technology [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://futurenetworks.ieee.org/topics/research-areas-in-5g-technology>
34. Strielkowski W, Dvořák M, Rovný P, Tarkhanova E, Baburina N. 5G wireless networks in the future renewable energy systems. Front Energy Res. 2021;9:714803.
35. European Commission. Scavenging renewable energy for 5G networks. Research and Innovation. 2017.
36. Beyene TD, Tsao YC. Sustainable and 5G enhanced power distribution network design considering renewable

- energy generation and dynamic electricity pricing. *Energy Ecol Environ*. 2024;9:404-18.
37. Wiley. 5G and government: A regulator roadmap. Wiley. 2020.
 38. CMS. CMS expert guide to 5G regulation and law. CMS International Law Firm. 2023.
 39. TeckNexus. Regulatory and policy considerations for 5G non-terrestrial networks (NTN). 5G Magazine. November 2023 Edition.
 40. BT Group. BT launches next phase of its Green TIP [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://newsroom.bt.com/bt-pushes-ahead-with-new-sustainable-digital-solutions-through-its-green-tech-innovation-platform>
 41. BT Group. BT expands green tech platform to target scale-ups to help manufacturers reach Net Zero [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://newsroom.bt.com/bt-expands-green-tech-platform-to-target-scale-ups-to-help-manufacturers-reach-net-zero>
 42. Telefónica. Telefónica brings its zero emissions target forward to 2030 [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.telefonica.com/en/communication-room/press-room/telefonica-brings-its-zero-emissions-target-forward-to-2030>
 43. Telefónica. Telefónica commits to a 90% reduction of its operational emissions by 2030 [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.telefonica.com/en/communication-room/press-room/telefonica-commits-to-a-90-reduction-of-its-operational-emissions-by-2030>
 44. Vodafone. Vodafone technology: Advances for a greener telco network [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://careers.vodafone.com/life-at-vodafone/projects-stories/vodafone-technology-advances-for-a-greener-telco-network>
 45. Vodafone. Vodafone's European network 100% powered from renewables [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.vodafone.com/news/technology-news/100percent-renewables>
 46. Vodafone. Together we can accelerate the green digital transformation [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.vodafone.com/news/digital-society/together-we-can-accelerate-green-digital-transformation>
 47. Telkomsel. Telkomsel and Ericsson partner up for Net Zero target and 5G evolution journey in Indonesia [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.telkomsel.com/en/about-us/news/telkomsel-and-ericsson-partner-net-zero-target-and-5g-evolution-journey-indonesia>
 48. Telkomsel. Telkomsel expands 5G network across Greater Jakarta Area with Hyper AI Autonomous Network [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://finance.yahoo.com/news/telkomsel-expands-5g-network-across-091200049.html>
 49. Ericsson. Telkomsel and Ericsson strengthen partnership to expand 4G/5G networks in Indonesia [Internet]. [cited 2024 Dec 10]. Available from: <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2/2023/8/telkomsel-and-ericsson-strengthen-partnership-to-expand-4g5g-networks-in-indonesia>