

Evolusi Teknologi Komprehensif Jaringan Komunikasi Nirkabel Pada Sistem 4G Menuju 7G

Yonoriadi ^{1*}, Dira Yatha Bimatha Dharmavid ², Rizaldi Akbar ³

^{1*,3} Program Studi Sistem Informasi, STMIK Indonesia Banda Aceh, Kota Banda Aceh, Provinsi Aceh, Indonesia.

² Program Studi Sistem Komputer, STMIK Indonesia Banda Aceh, Kota Banda Aceh, Provinsi Aceh, Indonesia.

Corresponding Email: yonoriadi@stmiki.ac.id ^{1*}

Histori Artikel:

Dikirim 17 Mei 2026; *Diterima dalam bentuk revisi* 25 Mei 2026; *Diterima* 27 Mei 2026; *Diterbitkan* 28 Mei 2026. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMIK Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Evolusi jaringan komunikasi nirkabel dari 4G hingga 7G menunjukkan transformasi signifikan dalam arsitektur, kapasitas, dan kemampuan sistem menyesuaikan diri dengan kebutuhan digital modern. 4G LTE menyediakan broadband seluler stabil dengan kecepatan hingga 100 Mbps dan latensi moderat, mendukung streaming video, komunikasi suara, transfer data, dan layanan digital yang andal. Peralihan ke 5G membawa lonjakan kapasitas jaringan, latensi ultra-rendah, dan kemampuan koneksi simultan ribuan perangkat melalui teknologi mmWave, massive MIMO, dan network slicing, memungkinkan aplikasi real-time, kendaraan otonom, serta IoT berskala besar. 6G menekankan jaringan adaptif berbasis kecerdasan buatan, edge computing, dan komunikasi terahertz, memproyeksikan kecepatan hingga 1 Tbps dan latensi di bawah 0,1 ms, dengan efisiensi energi dan keamanan yang lebih tinggi. Konsep 7G memadukan jaringan terestrial, satelit, dan komunikasi kuantum, memanfaatkan AI dan machine learning untuk optimasi spektrum dan latensi secara otomatis, mendukung layanan global, kota pintar, otomasi industri, dan perawatan kesehatan jarak jauh. Studi ini menekankan kebutuhan strategi infrastruktur, keamanan, dan regulasi yang selaras, agar jaringan masa depan dapat beroperasi efisien, andal, dan responsif terhadap tuntutan pengguna yang terus meningkat.

Kata Kunci: Jaringan Nirkabel; Kecerdasan Buatan; Mmwave; Komunikasi Terahertz; Iot; Keamanan Jaringan.

Abstract

The evolution of wireless communication networks from 4G to 7G reflects significant transformations in architecture, capacity, and system adaptability to modern digital demands. 4G LTE provides stable mobile broadband with speeds up to 100 Mbps and moderate latency, supporting video streaming, voice communication, data transfer, and reliable digital services. The transition to 5G introduces substantial increases in network capacity, ultra-low latency, and the ability to connect thousands of devices simultaneously through mmWave technology, massive MIMO, and network slicing, enabling real-time applications, autonomous vehicles, and large-scale IoT deployment. 6G emphasizes adaptive networks leveraging artificial intelligence, edge computing, and terahertz communication, projecting speeds up to 1 Tbps with latency below 0.1 ms, alongside improved energy efficiency and security. The 7G concept integrates terrestrial, satellite, and quantum communication networks, utilizing AI and machine learning for automated spectrum management and latency optimization, supporting global services, smart cities, industrial automation, and remote healthcare. This study highlights the need for aligned infrastructure, security, and regulatory strategies to ensure future networks operate efficiently, reliably, and responsively to continuously growing user demands.

Keyword: Wireless Networks; Artificial Intelligence; mmWave; Terahertz Communication; IoT; Network Security.

1. Pendahuluan

Perkembangan jaringan komunikasi nirkabel bergerak sejalan dengan meningkatnya kebutuhan masyarakat terhadap akses data yang cepat, stabil, dan mampu menjangkau berbagai aktivitas digital. Sistem 4G menjadi tahap penting dalam perubahan layanan komunikasi karena mendukung internet berkecepatan tinggi, panggilan berbasis data, video streaming, serta penggunaan aplikasi digital secara luas. Namun, peningkatan jumlah perangkat, pertumbuhan layanan berbasis data, dan tuntutan latensi rendah mendorong perlunya pengembangan jaringan yang lebih adaptif. Peralihan menuju 5G membawa perubahan besar melalui peningkatan kapasitas jaringan, kecepatan transmisi, serta kemampuan menghubungkan banyak perangkat secara bersamaan. Arah perkembangan selanjutnya melalui 6G diperkirakan berkaitan erat dengan pemanfaatan kecerdasan buatan, sistem otomasi, komunikasi realitas virtual, dan jaringan non-terrestrial. Sementara itu, gagasan 7G mulai diarahkan pada integrasi komunikasi bumi, udara, laut, hingga ruang angkasa agar konektivitas dapat berlangsung secara lebih luas dan berkelanjutan. Kajian mengenai evolusi teknologi jaringan komunikasi nirkabel pada sistem 4G menuju 7G diperlukan untuk memahami perubahan karakteristik, peluang penerapan, serta tantangan teknis yang muncul pada setiap generasi. Pembahasan tersebut dapat menjadi dasar untuk menilai kesiapan infrastruktur, kebutuhan regulasi, keamanan data, dan pemerataan akses digital pada masa mendatang.

Perkembangan jaringan komunikasi nirkabel dari 4G menuju 7G perlu dipahami sebagai perubahan bertahap yang dipengaruhi oleh kebutuhan layanan, kesiapan infrastruktur, dan tuntutan pengguna. Al-Obaidi, Ali, dan Alkindy (2022) menjelaskan bahwa setiap generasi komunikasi seluler memiliki arah pengembangan yang berbeda, mulai dari layanan suara, pesan, akses internet, hingga konektivitas berbasis data berkecepatan tinggi. Sistem 4G menjadi dasar penting karena mampu memperluas penggunaan layanan digital dalam aktivitas masyarakat, baik untuk komunikasi, pekerjaan, pendidikan, maupun hiburan. Peralihan menuju 5G membawa harapan besar terhadap peningkatan kapasitas jaringan, latensi rendah, dan koneksi perangkat dalam jumlah besar. Namun, pengembangannya tidak lepas dari persoalan cakupan wilayah, biaya infrastruktur, kepadatan jaringan, serta kesiapan perangkat pendukung. Ahamed dan Faruque (2021) menjelaskan bahwa perencanaan cakupan 5G membutuhkan perhatian serius karena kualitas layanan sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis dan kepadatan infrastruktur. Arah menuju 6G dan 7G menuntut jaringan yang lebih cerdas, aman, dan adaptif. Akhtar *et al.* (2020) menyatakan bahwa 6G membutuhkan arsitektur jaringan yang fleksibel untuk mendukung layanan berbasis kecerdasan buatan. Sejalan dengan itu, Al-Fuqaha *et al.* (2015) menunjukkan bahwa pertumbuhan Internet of Things membutuhkan jaringan yang efisien, stabil, serta mampu menangani koneksi perangkat secara masif.

Kemajuan jaringan komunikasi nirkabel setelah 4G memperlihatkan bahwa peningkatan teknologi tidak dapat dinilai hanya dari kecepatan data. Bangerter *et al.* (2014) menjelaskan bahwa era 5G membutuhkan rancangan jaringan dan perangkat yang mampu melayani trafik padat, layanan real-time, serta koneksi perangkat dalam jumlah besar. Pandangan tersebut menunjukkan bahwa kemajuan jaringan perlu diimbangi dengan kesiapan perangkat, arsitektur sistem, dan kemampuan operator dalam menjaga kualitas layanan. Arah menuju 6G memperluas tuntutan tersebut melalui kebutuhan jaringan yang lebih cerdas, hemat energi, aman, dan mampu menyesuaikan diri dengan berbagai skenario layanan. Breuer, Mirahsan, dan Kasparick (2020) menyatakan bahwa teknologi dasar 6G berkaitan dengan penggerak utama, teknologi pendukung, serta tantangan teknis yang harus diperhitungkan sejak tahap perancangan. Artinya, pembangunan jaringan masa depan tidak cukup bertumpu pada ambisi inovasi, tetapi juga perlu mempertimbangkan biaya, regulasi, keamanan data, dan kesiapan masyarakat. Giordani *et al.* (2020) menjelaskan bahwa 6G diarahkan untuk mendukung sistem otonom, realitas imersif, komunikasi berlatensi sangat rendah, dan konektivitas lintas jaringan. Sejalan dengan itu, Hossain *et al.* (2017) menunjukkan bahwa pertumbuhan Internet of Things mendorong kebutuhan jaringan yang stabil dan mampu menangani koneksi perangkat secara masif. Oleh karena itu, evolusi dari 4G menuju 7G perlu dikaji secara kritis agar arah teknologi tetap berpihak pada efisiensi, pemerataan akses, dan manfaat nyata bagi pengguna.

Peralihan jaringan komunikasi nirkabel dari 4G menuju generasi berikutnya turut dipengaruhi oleh tuntutan kualitas layanan yang semakin tinggi. Jameel dan Shafiei (2017) menjelaskan bahwa evaluasi QoS pada layanan suara melalui LTE diperlukan untuk menilai kestabilan, latensi, jitter, dan keandalan komunikasi. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa keberhasilan 4G tidak hanya ditentukan oleh kecepatan akses data, tetapi juga oleh kemampuan jaringan menjaga mutu layanan secara konsisten. Pada perkembangan 5G, kebutuhan jaringan mulai berkaitan erat dengan pembangunan kota pintar. Khan dan Salah (2019) menyatakan bahwa 5G dapat mendukung tata kelola perkotaan berkelanjutan melalui konektivitas sensor, transportasi cerdas, layanan publik digital, dan pengelolaan energi. Meski begitu, penerapan 5G dalam kota pintar memerlukan kesiapan infrastruktur, kebijakan data, dan perlindungan privasi agar manfaat teknologi tidak hanya dirasakan oleh wilayah tertentu. Isu keamanan juga menjadi perhatian utama dalam perkembangan jaringan modern. Kim (2020) menjelaskan bahwa jaringan inti 5G memiliki potensi serangan yang berkaitan dengan protokol jaringan, sehingga perlindungan sistem perlu dirancang sejak awal. Sementara itu, Klein (2020) menilai bahwa 6G masih menghadapi tantangan penelitian, terutama pada arsitektur jaringan, spektrum, efisiensi energi, serta keandalan layanan. Oleh sebab itu, arah evolusi dari 4G menuju 7G perlu mempertimbangkan mutu layanan, keamanan, dan pemerataan akses sebagai dasar pengembangan jaringan masa depan.

Evolusi jaringan komunikasi nirkabel dari 4G menuju 7G tidak cukup dinilai dari peningkatan kecepatan data. Perubahan tersebut juga berkaitan dengan mutu layanan, keamanan sistem, efisiensi energi, kesiapan infrastruktur, serta pemerataan akses digital. Sistem 4G menjadi pijakan bagi layanan data modern, sedangkan 5G memperluas kapasitas jaringan melalui latensi rendah dan koneksi perangkat masif. Arah menuju 6G dan 7G menuntut rancangan jaringan yang lebih cerdas, adaptif, aman, dan selaras dengan kebutuhan pengguna. Oleh sebab itu, kajian mengenai evolusi teknologi jaringan komunikasi nirkabel diperlukan untuk menilai peluang, hambatan, serta kesiapan penerapannya agar pembangunan jaringan masa depan tidak hanya maju secara teknis, tetapi juga memberi manfaat nyata bagi masyarakat luas.

2. Metode Penelitian

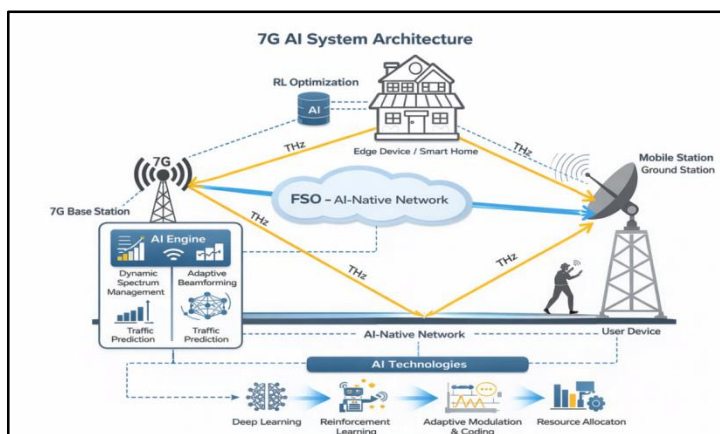
Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian pustaka dengan metode deskriptif-kualitatif untuk menelaah evolusi jaringan komunikasi nirkabel dari 4G menuju 7G. Pendekatan ini dipilih karena fokus penelitian terletak pada analisis perubahan teknologi, kemampuan jaringan, dan tantangan implementasi dari setiap generasi jaringan. Objek kajian mencakup sistem 4G, 5G, 6G, dan rancangan 7G, dengan indikator utama seperti arsitektur jaringan, alokasi spektrum, kecepatan data, throughput, latensi, keandalan, cakupan, efisiensi energi, keamanan, dan potensi aplikasi di berbagai sektor.

Data penelitian berasal dari literatur ilmiah sekunder berupa artikel jurnal dan buku yang relevan. Koi-Akrofi *et al.* (2023) digunakan untuk memahami perbedaan teknologi antar-generasi dan pemicu evolusi jaringan nirkabel. Kumar (2022) memberikan dasar konsep komunikasi nirkabel dari prinsip fundamental hingga pengembangan lanjutan. Liu dan Springer (2014) menjadi rujukan pada komunikasi frekuensi tinggi mmWave untuk meningkatkan kecepatan data 5G, sedangkan Liu dan Chen (2024) membahas prinsip desain serta tantangan sistem 7G. Miao *et al.* (2021) digunakan untuk menganalisis efisiensi energi dan keberlanjutan, sementara Mihret dan Haile (2021) memberikan perspektif perbandingan 4G hingga 7G secara umum. Park dan Kwon (2011) membahas faktor keberhasilan layanan 4G, Rappaport *et al.* (2013) menjadi acuan komunikasi mmWave pada 5G, dan Park, Lee, & Kim (2023) menekankan persyaratan dan tantangan 6G. Rao, Mole, & Raju (2023) digunakan untuk mendukung kajian prediktif 7G.

Tahap analisis dilakukan dengan membandingkan karakteristik teknis, keunggulan, dan hambatan antar-generasi. Sistem 4G dianalisis sebagai fondasi layanan data modern; 5G dikaji melalui peningkatan kapasitas, latensi rendah, massive MIMO, mmWave, dan network slicing; 6G diperlakukan sebagai jaringan cerdas berbasis AI, terahertz, edge computing, serta realitas imersif;

sedangkan 7G dianalisis sebagai rancangan masa depan dengan integrasi satelit, komunikasi kuantum, dan AI tingkat lanjut. Hasil telaah disusun dalam bentuk uraian naratif dan tabel perbandingan untuk menggambarkan perubahan teknis dari 4G hingga 7G. Analisis difokuskan pada kesiapan jaringan, keamanan, efisiensi energi, cakupan, dan manfaat nyata bagi pengguna, dengan tujuan memberikan pemahaman yang kritis dan membangun terhadap evolusi teknologi komunikasi nirkabel.

Karakteristik Utama Arsitektur Jaringan Komunikasi 7G, disusun berdasarkan proyeksi arah penelitian dan tantangan yang dihadapi generasi jaringan komunikasi mendatang. Arsitektur Jaringan 7G dirancang untuk mengatasi keterbatasan 6G dan memenuhi permintaan konektivitas yang belum pernah ada sebelumnya, ditandai dengan Integrasi Total, Kecerdasan Penuh, dan Kinerja Ekstrem. Integrasi total ini memfasilitasi konvergensi mulus antara infrastruktur darat, ruang angkasa, dan bawah laut dalam satu ekosistem yang terpadu. Komponen kecerdasan penuh diimplementasikan melalui lapisan manajemen terdistribusi yang mampu melakukan optimasi prediktif dan korektif secara *real-time* di seluruh segmen jaringan.



Gambar 1. Ilustrasi Arsitektur AI Sistem Komunikasi 7G

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil

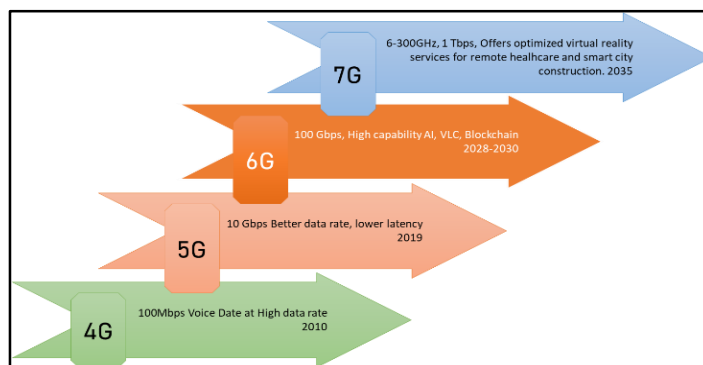
Analisis menunjukkan bahwa evolusi jaringan komunikasi nirkabel dari 4G menuju 7G tidak hanya melibatkan peningkatan kecepatan dan kapasitas, tetapi juga mencakup latensi, keandalan, efisiensi energi, keamanan, dan kemampuan mendukung layanan cerdas. Generasi 6G menekankan penggunaan pita terahertz, penerapan protokol jaringan cerdas, dan integrasi IoT yang lebih luas. Aspek seperti alokasi spektrum, efisiensi energi, dan keamanan memengaruhi kesiapan jaringan dalam mendukung aplikasi real-time, kendaraan otonom, otomasi industri, dan komunikasi misi kritis. Sementara itu, 7G diproyeksikan menjadi jaringan yang lebih adaptif, cerdas, dan terintegrasi. Integrasi jaringan terestrial, satelit, dan udara, bersama pemanfaatan AI dan pembelajaran mesin, memungkinkan optimasi otomatis, menurunkan latensi, meningkatkan keandalan, dan mendukung konektivitas skala besar secara aman. Pendekatan ini menekankan kebutuhan jaringan yang tangguh, fleksibel, dan efisien, serta mampu mengikuti tuntutan layanan digital di masa depan.

Tabel 1. Karakteristik dan Tantangan Evolusi Jaringan Nirkabel

| No. | Fokus Analisis | Kemajuan Teknologi & Pergeseran Paradigma | Tantangan, Peluang & Kolaborasi |
|-----|---------------------------|--|--|
| 1 | Tinjauan Evolusi Jaringan | Menelusuri lintasan teknologi dari 4G hingga 7G; pencatatan tonggak penting; | Memahami fondasi teknis untuk meminimalkan risiko dalam standarisasi generasi baru |

| | | | |
|---|-----------------------------------|---|--|
| 2 | Analisis Tren dan Inovasi | perubahan arsitektur jaringan Penerapan frekuensi mmWave; pemanfaatan pita terahertz; optimasi jaringan berbasis AI; integrasi IoT | Peluang: lonjakan kapasitas data, efisiensi spektrum, dukungan layanan real-time. Tantangan: hambatan propagasi, kompleksitas komputasi, kebutuhan infrastruktur baru |
| 3 | Batasan Penelitian dan Kolaborasi | Penyusunan peta jalan riset, standar teknis adaptif, desain jaringan 7G | Kolaborasi antardisiplin, pengembangan standar global, inovasi untuk mendorong performa jaringan lebih tinggi |

Hasil kajian menegaskan bahwa setiap generasi jaringan membentuk perubahan teknis dan paradigma berbeda. Dari fondasi 4G hingga rancangan prediktif 7G, jaringan harus adaptif, aman, efisien, dan mampu mendukung aplikasi digital cerdas dengan skala dan kompleksitas yang meningkat.



Gambar 2. Usulan Evolusi Fitur Teknis dari 4G ke 7G

Pakalah ini disusun untuk memberikan analisis runtut mengenai evolusi jaringan komunikasi nirkabel. Bagian 2 membahas alokasi dan pemanfaatan spektrum, termasuk distribusi pita frekuensi, manajemen spektrum, dan strategi peningkatan kapasitas. Bagian 3 menelaah arsitektur dan infrastruktur jaringan, mencakup desain sel, teknologi MIMO, network slicing, serta kesiapan infrastruktur dari 4G hingga 7G. Bagian 4 fokus pada aplikasi lanjutan, mulai dari IoT dan kendaraan otonom hingga realitas imersif, dengan menekankan tantangan teknis dan peluang penerapan. Akhirnya, Bagian 5 merangkum temuan, menilai kesiapan jaringan masa depan, dan memberikan arahan untuk penelitian serta inovasi selanjutnya.

Tabel 2. Karakteristik Utama Sistem Komunikasi Seluler

| Aspek | 4G (LTE/WiMAX) | 5G (NR) | 6G (Hipotetis) | 7G (Murni Hipotetis) |
|------------|---|---|---|---|
| Peluncuran | Tahun 2010-an | 2020 | 2028–2030 | |
| Teknologi | LTE dan WiMAX | Seluler generasi berikutnya (NR) | Masih hipotetis dan dalam tahap penelitian serta pengembangan | Murni spekulatif, melampaui tahap penelitian |
| Aplikasi | Internet seluler, TV mobile, pembayaran digital, video HD, dan komunikasi suara | VR/AR, video 360°, video UHD, perangkat wearable, V2X, kota pintar, telemedicine, dan IoT | Wisata luar angkasa, internet, robotik, IoBNT | Komunikasi kuantum, pengobatan holografik, otomatisasi kehidupan penuh, dan |

| | | | | | |
|----------------|---|--|---|---|--|
| | | | | | eksplorasi laut dalam |
| Kecepatan Data | 100 Mbps (LTE Advanced) | 20 Gbps | | 1 Tbps | Diperkirakan melebihi Tbps |
| Fitur | Carrier aggregation, Turbo code, MIMO, OFDM, komunikasi D2D, ICIC, dan HetNet | Cloud/Fog/Edge Computing, LDPC dan komunikasi gelombang milimeter, Massive MIMO, NOMA, struktur fleksibel, dan SDN/NFC | kode Polar, komunikasi milimeter, MIMO, RSMA, frame dan | QAM Mux, SM-MIMO, komunikasi THz, Machine Learning, AI, Blockchain, dan RIS | QAM Mux, SM-MIMO, komunikasi kuantum, layanan VR teroptimasi, layanan kesehatan jarak jauh, dan kota pintar terintegrasi |
| Keamanan | Protokol keamanan yang ditingkatkan | Keamanan lebih baik dengan enkripsi dan autentikasi | | Diperkirakan memiliki sistem keamanan tingkat lanjut | Diperkirakan memiliki sistem keamanan sangat canggih |
| Pita Frekuensi | 2500–2700 MHz | 37–40 GHz | | 6–100 GHz | 6–300 GHz |
| Infrastruktur | All-IP, packet switching, dan ultra-bandwidth | Packet switching, cloud computing, virtualisasi, network slicing, dan wireless WWV | | Intelligence network, edge computing, dan virtualisasi penuh | Diperkirakan memiliki infrastruktur yang sangat canggih |
| Fokus Utama | Kecepatan data dan kapasitas lebih besar untuk layanan kompleks dan intensif data | Kecepatan sangat tinggi dan latensi ultra-rendah | | Pemanfaatan frekuensi sub-terahertz dan terahertz untuk transmisi data tercepat | Peningkatan performa signifikan dengan aplikasi dan kasus penggunaan baru |
| Latensi | Lebih baik dibanding generasi sebelumnya | Latensi ultra-rendah sekitar 1 milidetik | | Latensi rendah karena penggunaan frekuensi lebih tinggi | Memenuhi kebutuhan komunikasi kritis dengan latensi sangat rendah |

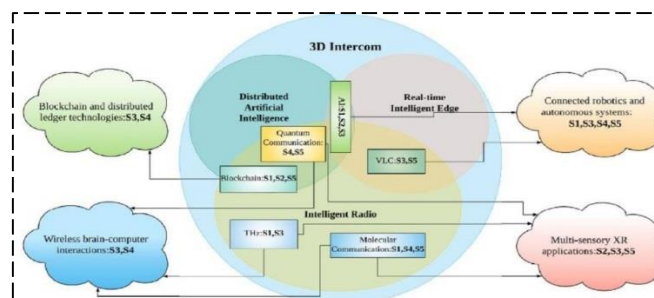
Dalam implementasi sistem komunikasi nirkabel, spektrum frekuensi radio (RF) merupakan sumber daya utama untuk mentransmisikan informasi. Setiap generasi sistem komunikasi nirkabel dicirikan oleh pita frekuensi yang berbeda yang digunakan untuk transmisi data. Tabel 3 merangkum spektrum yang digunakan beserta tantangan utamanya. Setiap generasi menghadirkan tantangan khusus terkait alokasi, pemanfaatan, dan efisiensi spektrum. Penanganan tantangan ini menjadi kunci untuk memaksimalkan potensi sistem komunikasi nirkabel dan menjamin konektivitas yang stabil serta lancar pada jaringan masa depan.

Tabel 3. Rentang Frekuensi, Penggunaan Utama, dan Pertimbangan

| Rentang Frekuensi | Penggunaan Utama | Tantangan dan Pertimbangan |
|-------------------|------------------|---|
| 2500 – 2700 MHz | Sistem 4G | Mendukung akses broadband yang lebih baik dan transmisi data berkecepatan tinggi. |
| 3,2 – 3,5 | Jaringan | Meningkatkan cakupan dan penetrasi sinyal di daerah pedesaan, |

| | | |
|------------------|--|---|
| GHz | komunikasi seluler generasi lanjut | namun menghadapi tantangan pada lingkungan perkotaan yang padat. |
| 27,5 – 28,35 GHz | 5G: layanan broadband masif di wilayah perkotaan | Tingkat penyerapan sinyal yang tinggi akibat faktor atmosfer serta tantangan dalam menjaga integritas sinyal. |
| 37 – 40 GHz | 5G: layanan broadband masif di wilayah suburban | Tingkat penyerapan sinyal yang tinggi akibat faktor atmosfer serta tantangan dalam menjaga kualitas sinyal. |
| 6 – 100 GHz | Sistem 6G | Mengatasi keterbatasan teknologi elektronik terahertz untuk komunikasi yang andal. Mengatasi rugi-rugi propagasi tinggi dan variasi bandwidth akibat hambatan objek. Mengembangkan perangkat keras dan infrastruktur yang kompatibel untuk komunikasi terahertz. Memastikan kepatuhan regulasi dan pengembangan standar spektrum terahertz. Integrasi dengan sistem dan jaringan nirkabel yang sudah ada. |
| 57 – 64 GHz | 7G: aplikasi global | Tantangan dalam penetrasi atmosfer dan potensi kecepatan data sangat tinggi dengan teknologi antena inovatif. |
| 6 – 100 GHz | 7G: skenario perkotaan dan outdoor macro | Menjamin cakupan dan kapasitas yang mulus serta mengelola interferensi pada area dengan kepadatan tinggi. |
| Di atas 100 GHz | Skenario indoor dan potensi sistem 7G ke atas | Membutuhkan manajemen spektrum yang ketat, pemanfaatan sumber daya yang efisien, serta pengembangan teknik baru untuk berbagi dan pengelolaan spektrum. |
| 6 – 300 GHz | 7G: memenuhi kebutuhan cakupan dan kapasitas | Memenuhi kebutuhan tingkat tinggi seperti kecepatan data puncak, latensi rendah, konektivitas IoT masif, dan efisiensi penggunaan spektrum. |

Analisis ini menelusuri evolusi teknologi komunikasi nirkabel dari 4G yang stabil hingga rancangan 7G, dengan fokus pada peningkatan arsitektur jaringan, fitur utama, keandalan, latensi, dan pemanfaatan spektrum. Setiap generasi menyempurnakan kemampuan jaringan untuk memenuhi kebutuhan pengguna yang terus meningkat sekaligus mendukung kemunculan teknologi dan aplikasi baru. Gambar 2 memperlihatkan aspek keamanan dan privasi pada jaringan 6G, menekankan bahwa perlindungan data dan integritas sistem menjadi faktor kritis dalam merancang jaringan masa depan yang adaptif dan tangguh.



Gambar 3. Jaringan 6G untuk Subjek Keamanan dan Privasi

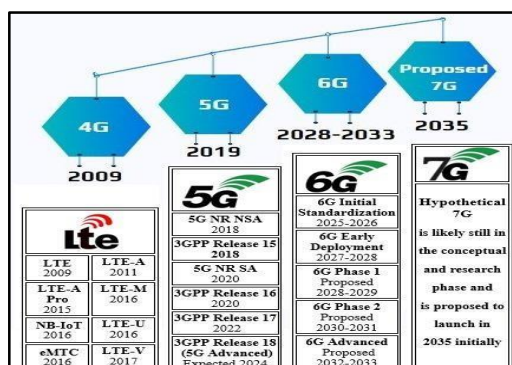
Dalam sistem keamanan jaringan, beberapa aspek utama menjadi fokus, termasuk S1: Otentikasi, S2: Kontrol Akses, S3: Deteksi Perilaku Berbahaya, S4: Enkripsi, dan S5: Keamanan Komunikasi. Aspek-aspek ini berperan dalam menjaga integritas jaringan dan perlindungan data pengguna di setiap generasi komunikasi nirkabel. Tabel 3 menampilkan perbandingan arsitektur jaringan dan karakteristik utama dari evolusi teknologi nirkabel, memperlihatkan perubahan strategi, fitur teknis, dan mekanisme keamanan yang diterapkan dari 4G hingga rancangan 7G.

Penggunaan sistem MIMO besar dan bandwidth lebar pada jaringan 5G memungkinkan desain yang meningkatkan throughput dan kapasitas jaringan secara signifikan. Setiap generasi jaringan sejak 4G mendorong batas kecepatan data dan kapasitas, membentuk fondasi bagi internet seluler dan layanan multimedia berkecepatan tinggi. Konektivitas 4G telah merevolusi pengalaman pengguna dengan streaming lancar dan unduhan lebih cepat. Dengan meningkatnya kebutuhan konektivitas cepat dan andal, 5G menghadirkan era baru performa tinggi, mendukung pengkodean canggih untuk layanan seperti augmented reality, kendaraan otonom, IoT skala besar, dan teknik modulasi. Melampaui 6G, penelitian menargetkan kecepatan data terabit per detik dan latensi ultra-rendah, membuka batas baru kemampuan komunikasi nirkabel. Tabel 3 merangkum kecepatan data dan throughput tiap generasi.

Tabel 4. Laju Data dan Kapasitas Generasi yang Ditargetkan

| Generasi | Kecepatan Data | Throughput | Tantangan dan Pertimbangan |
|----------|--|-----------------|--|
| 4G | Hingga 1 Gbps (downlink) | Hingga 500 Mbps | Dicapai menggunakan teknologi LTE Advanced, WiMAX, atau HSPA+. |
| 5G | Hingga 20 Gbps (downlink) | Hingga 10 Gbps | Menggunakan teknik pengkodean dan modulasi canggih seperti 256-QAM dan MIMO. Tantangan meliputi keterbatasan spektrum, |
| 6G | Diperkirakan mendekati 1 Tbps | Hingga 500 Gbps | perluasan spektrum frekuensi, serta pengembangan skema modulasi dan pengkodean yang efisien. |
| 7G | Berpotensi 100 kali lebih cepat dibanding 5G | Hingga 1 Tbps | Tantangan meliputi pengembangan Massive MIMO, integrasi Machine Learning, dan pencapaian latensi yang sangat rendah. |

Kapasitas throughput 6G telah diperkirakan, meskipun batas teknisnya belum pasti, sementara kecepatan data 7G masih bersifat spekulatif, bergantung pada kemajuan dari 5G dan 6G. Proyeksi ini menunjukkan arah peningkatan performa dan efisiensi jaringan di masa depan. Gambar 3 memperlihatkan evolusi sub-generasi sistem nirkabel serta target kemampuan yang diantisipasi.



Gambar 4. Sub-Generasi dan Perkiraan Tanggal Peluncuran

Kemajuan latensi dan keandalan menjadi faktor utama dalam menilai efektivitas jaringan komunikasi nirkabel. Pada 5G, layanan komunikasi latensi rendah ultra-andal (URLLC) memungkinkan kontrol waktu nyata yang presisi, mendukung aplikasi seperti kendaraan otonom

dan proses industri yang sensitif terhadap waktu. Keandalan diukur sebagai konsistensi kinerja meski terjadi gangguan atau fluktuasi jaringan. Sementara 4G menawarkan tingkat keandalan moderat untuk layanan konvensional seperti streaming dan unduhan, 5G memperkenalkan kelas keandalan yang dapat disesuaikan untuk komunikasi mesin skala besar dan skenario misi kritis, menciptakan jaringan yang lebih tangguh dan adaptif.

Latensi, durasi sinyal dari sumber ke penerima, menjadi fokus utama peningkatan jaringan. Transisi dari 4G ke 5G menurunkan latensi secara signifikan, memungkinkan kinerja real-time. 6G diproyeksikan mencapai latensi ultra-rendah melalui perombakan protokol komunikasi, tanpa mengurangi stabilitas jaringan. Rancangan 7G menggabungkan komunikasi dan komputasi, sistem antena skala besar, kecerdasan buatan, dan pembelajaran mesin untuk menetapkan standar baru latensi rendah dan keandalan tinggi. Konvergensi teknologi ini membuka peluang bagi jaringan yang lebih responsif, adaptif, dan mampu mendukung aplikasi kompleks di masa depan. Karakteristik latensi dan keandalan tiap generasi diuraikan pada Tabel 4.

Tabel 5. Perbandingan Latensi dan Keandalan dari 4G ke 7G

| Parameter | 4G | 5G | 6G | 7G |
|--------------|---|---|--|---|
| Latency (ms) | 30 | <20 | <0.1 | <0.01 |
| Reliability | Moderate | High | Targeted | Ultra-reliable |
| Description | Cocok untuk unduhan file yang andal serta aplikasi streaming audio/video. | Mendukung layanan komunikasi latensi rendah ultra-andal (URLLC) dengan kelas keandalan tinggi untuk komunikasi misi kritis. | Tingkat latensi dapat mencapai 100 mikrodetik untuk komunikasi kritis dan 1 milidetik untuk aplikasi umum. | Menawarkan era baru komunikasi ultra-latensi rendah dan ultra-andal melalui konvergensi komunikasi dan komputasi, sistem antena skala besar, serta AI/ML. |



Gambar 5. Spesifikasi Teknis untuk Latensi, Jitter, dan Kecepatan Data dari 4G ke 7G Hipotetis

Jaringan komunikasi nirkabel telah mengalami transformasi signifikan, dengan setiap generasi memperkenalkan kemampuan dan aplikasi baru yang mengubah cara layanan digital dijalankan. Jaringan 4G memperluas kapasitas broadband seluler, mendukung layanan seperti TV seluler dan komunikasi suara yang andal. Peralihan ke 5G menghadirkan potensi transformasi di sektor industri, termasuk energi, transportasi, keselamatan publik, dan layanan kesehatan, dengan kemampuan latensi rendah dan konektivitas tinggi. Khususnya, sistem transportasi cerdas di industri otomotif dapat beroperasi lebih responsif dan aman. Generasi 6G diarahkan untuk integrasi teknologi canggih, termasuk realitas tertambah, kecerdasan buatan yang tersebar luas, dan komunikasi yang aman, sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan. Sementara 7G, meski

masih konseptual, diproyeksikan menawarkan jangkauan luas, latensi ultra-rendah, dan reliabilitas tinggi. Teknologi ini berpotensi mentransformasi perawatan kesehatan melalui pemantauan jarak jauh dan diagnostik cerdas, mendukung otomatisasi industri, meningkatkan efisiensi kota pintar, serta memperkuat transportasi cerdas dengan manajemen lalu lintas yang lebih efisien dan hemat energi. Tabel 5 merangkum implikasi teknologi seluler di berbagai generasi, termasuk aplikasi utama, fitur yang diantisipasi, dan dampak potensial bagi berbagai sektor, menunjukkan bagaimana evolusi jaringan membentuk masa depan konektivitas digital.

Tabel 5. Aplikasi Utama, Area Dampak, dan Dampak Sistem 4G hingga 7G

| Aspek | Sistem 4G | Teknologi 5G | Sistem 6G | Sistem 7G |
|-------------------------|---|---|---|---|
| Aplikasi Utama | Mobile broadband, TV mobile, layanan suara dan data mission-critical, serta komunikasi machine-to-machine untuk sistem siber-fisik. | Mobile broadband, energi, transportasi, keselamatan publik, layanan kesehatan, sistem transportasi cerdas, dan berbagai aplikasi IoT. | Extended Reality (XR), kecerdasan buatan yang tersebar luas, replika digital (<i>digital twin</i>), konektivitas aman, dan inisiatif pembangunan berkelanjutan. | Smart healthcare, otomasi industri, kota pintar, dan sistem transportasi cerdas. |
| Area Dampak | Kesehatan, keselamatan publik, otomasi industri, dan komunikasi mobile. | Kesehatan, otomotif, energi, transportasi, keselamatan publik, otomasi industri, dan IoT. | Kesehatan, kota pintar, otomasi industri, pemantauan lingkungan, dan sistem transportasi cerdas. | Kesehatan, manufaktur pintar, kota pintar, dan sistem transportasi cerdas. |
| Fitur yang Diperkirakan | Perluasan kapasitas jaringan, akses broadband, dan komunikasi mission-critical. | Kecepatan data ultra-cepat, latensi rendah, konektivitas masif, network slicing, dukungan IoT, dan enhanced mobile broadband. | Kecepatan ultra-tinggi, latensi rendah, konektivitas di mana saja, keamanan tingkat lanjut, integrasi AI, dan inisiatif keberlanjutan. | Konektivitas ultra-masif, latensi ultra-rendah, cakupan tanpa batas, reliabilitas tinggi, keamanan canggih, dan kemampuan pintar berbasis AI. |
| Dampak Potensial | Peningkatan layanan kesehatan pasien, diagnosis jarak jauh, dan kemajuan IoT di sektor industri. | Peningkatan internet mobile, perkembangan IoT, sistem transportasi cerdas, kota pintar, dan otomasi industri yang lebih baik. | Pengalaman pengguna yang lebih baik, pembangunan berkelanjutan, peningkatan efisiensi industri, dan solusi kota pintar yang transformatif. | Revolusi layanan kesehatan, otomasi industri tingkat lanjut, kota pintar modern, dan sistem transportasi cerdas yang terintegrasi penuh. |

3.2 Pembahasan

Perkembangan jaringan komunikasi nirkabel dari 4G hingga 7G menandai perubahan fundamental dalam cara sistem beradaptasi terhadap kebutuhan pengguna dan tuntutan teknologi baru. Sistem 4G LTE awalnya dirancang untuk menyediakan layanan broadband seluler yang stabil

dengan kecepatan hingga 100 Mbps dan latensi moderat, mendukung streaming video, komunikasi suara, serta transfer data secara andal. Evaluasi performa di lapangan menunjukkan bahwa tingkat kesalahan bit (BER) dan tingkat blok error (BLER) tetap terkendali, bahkan ketika trafik meningkat atau terjadi interferensi, yang mencerminkan kestabilan dan ketahanan jaringan (Siva, Gajendran, & Asha, 2017; Seraji, Ahmed, & Al Muntasir, 2023; Ray *et al.*, 2023). Transisi ke 5G membawa peningkatan kapasitas, latensi ultra-rendah, dan kemampuan menghubungkan perangkat dalam jumlah besar melalui teknologi mmWave, massive MIMO, dan network slicing. Rancangan ini membuka peluang untuk layanan real-time, kendaraan otonom, dan sistem IoT skala besar. Generasi 6G dan 7G semakin menekankan jaringan adaptif, cerdas, dan global dengan integrasi AI, komunikasi terahertz, dan satelit, memaksimalkan reliabilitas, efisiensi energi, dan kapasitas operasional untuk memenuhi ekspektasi pengguna yang terus berkembang.

Peralihan ke jaringan 5G menandai pergeseran dari sekadar meningkatkan kapasitas data menuju sistem yang mampu menangani konektivitas ribuan perangkat secara simultan dengan latensi sangat rendah. Penerapan teknologi mmWave memungkinkan transmisi data berkecepatan tinggi, sedangkan massive MIMO meningkatkan efisiensi spektrum dan kapasitas jaringan. Network slicing memberikan fleksibilitas dalam mengalokasikan sumber daya sesuai kebutuhan layanan, memungkinkan aplikasi real-time, kendaraan otonom, dan sistem IoT berskala besar beroperasi secara presisi (Rappaport *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2019). Meski menawarkan kemampuan signifikan, pemanfaatan frekuensi tinggi menghadirkan tantangan tersendiri. Penetrasi sinyal cenderung terbatas pada lingkungan padat atau di dalam gedung, sehingga memerlukan infrastruktur tambahan seperti small cell dan repeater. Manajemen interferensi juga menjadi kompleks, karena spektrum mmWave lebih sensitif terhadap hambatan fisik dan kondisi atmosfer. Penanganan tantangan ini menuntut perencanaan jaringan yang matang, integrasi teknologi, dan strategi operasional yang adaptif agar kinerja 5G tetap optimal, handal, dan dapat mendukung layanan kritis secara konsisten.

Jaringan 6G menekankan kemampuan adaptif melalui kecerdasan buatan, komunikasi terahertz, dan edge computing, membentuk sistem yang mampu menyesuaikan operasi dengan kebutuhan pengguna dan kondisi jaringan secara real-time. Kecepatan data diproyeksikan mencapai 1 Tbps dengan latensi di bawah 0,1 ms, memungkinkan pengelolaan trafik masif tanpa mengorbankan stabilitas. Pendekatan ini juga memperhatikan efisiensi energi, karena operasi skala besar dapat menimbulkan beban konsumsi daya yang signifikan. Aspek keamanan menjadi fokus utama, mengingat integrasi IoT yang luas dapat menimbulkan risiko potensial. Strategi mitigasi mencakup enkripsi, kontrol akses, dan deteksi anomali, sehingga layanan kritis seperti kendaraan otonom, sistem industri cerdas, dan pemantauan kesehatan jarak jauh tetap berjalan andal. Penerapan edge computing memungkinkan pemrosesan data lebih dekat ke titik penggunaan, mengurangi latensi sekaligus meringankan beban jaringan inti. Gabungan AI, terahertz, dan edge computing menciptakan jaringan yang cerdas, responsif, dan aman, membuka kemungkinan bagi aplikasi yang menuntut performa tinggi dan reliabilitas ekstrem. Sistem ini menyiapkan fondasi bagi evolusi ke generasi jaringan berikutnya yang lebih terintegrasi dan global (Suyama *et al.*, 2021; Vaigandla *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022).

Jaringan 7G dirancang untuk mengintegrasikan sistem terestrial, satelit, dan komunikasi kuantum, membentuk konektivitas global yang lebih luas dan andal. Pemanfaatan kecerdasan buatan dan machine learning memungkinkan pengelolaan spektrum secara adaptif dan optimasi latensi otomatis, sehingga jaringan dapat menyediakan throughput tinggi dengan reliabilitas yang sangat tinggi (Rao *et al.*, 2023; Solyman & Yahya, 2022). Desain ini diarahkan untuk mendukung layanan kritis dan berskala besar, seperti kota pintar, sistem transportasi cerdas, otomatisasi industri, serta perawatan kesehatan jarak jauh. Jaringan mampu menyesuaikan alokasi sumber daya secara real-time, menjaga efisiensi energi, dan memperkuat keamanan data. Pendekatan adaptif ini memungkinkan pengelolaan infrastruktur secara cerdas, meminimalkan risiko gangguan, dan memastikan performa tinggi di berbagai skenario operasional. Dengan kapabilitas tersebut, 7G membuka peluang bagi inovasi aplikasi kompleks yang menuntut latensi rendah, kapasitas besar, dan keandalan ekstrem.

Perbandingan lintas generasi menegaskan bahwa evolusi jaringan tidak sekadar mempercepat data, tetapi juga meningkatkan kemampuan sistem menyesuaikan diri dengan kebutuhan pengguna dan tantangan operasional. Sehingga hal ini juga diperlukan Sumberdaya manusia yang kompeten dalam pengembangan studi teknologi berbasis komputer informasi, Menurut Sugiyanto (2022), pembelajaran berbasis komputer dapat membantu meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam proses pembelajaran serta mempermudah akses terhadap informasi dan keterampilan baru. Setiap langkah menuntut keselarasan antara desain teknis, kesiapan infrastruktur, dan strategi keamanan, sehingga inovasi dapat diadopsi tanpa mengorbankan kualitas layanan. Kolaborasi antara pengembang, operator, dan regulator menjadi faktor utama agar jaringan baru dapat beroperasi dengan stabil, efisien, dan mendukung transformasi digital yang berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Perkembangan jaringan komunikasi nirkabel dari 4G hingga 7G menunjukkan transformasi signifikan dalam cara sistem mendukung layanan digital dan memenuhi kebutuhan pengguna. Hal ini juga diperlukan studi literatur dengan cara mengembangkan teknologi komunikasi secara berkelanjutan melalui peningkatan pengembang melalui pembelajaran secara menyeluruh dengan metode implementasi langsung, Menurut Clark (2023), pembelajaran berbasis praktik sangat efektif dalam meningkatkan keterampilan teknis karena peserta dapat langsung mencoba dan mengaplikasikan teori yang telah dipelajari. 4G LTE menyediakan broadband stabil, latensi moderat, serta keandalan memadai untuk komunikasi suara, streaming, dan transfer data, membentuk fondasi bagi layanan digital modern. 5G meningkatkan kapasitas jaringan, menurunkan latensi secara drastis, dan memungkinkan koneksi ribuan perangkat melalui teknologi mmWave, massive MIMO, dan network slicing, sehingga mendukung layanan real-time, kendaraan otonom, dan IoT skala besar. 6G menekankan jaringan adaptif berbasis kecerdasan buatan, edge computing, dan komunikasi terahertz, memproyeksikan kecepatan data tinggi, latensi ultra-rendah, efisiensi energi, serta keamanan yang diperkuat. Konsep 7G mengintegrasikan jaringan terestrial, satelit, dan komunikasi kuantum, memanfaatkan AI dan machine learning untuk mengoptimalkan alokasi spektrum dan latensi secara otomatis. Desain ini mendukung layanan global, kota pintar, otomasi industri, dan perawatan kesehatan jarak jauh dengan reliabilitas tinggi. Keberhasilan penerapan generasi jaringan mendatang bergantung pada perencanaan infrastruktur, strategi keamanan, dan kebijakan yang selaras. Setiap generasi menuntut kesiapan operator, perangkat, dan sistem untuk memastikan jaringan beroperasi efisien, responsif, serta mampu mengikuti tuntutan teknologi dan layanan digital yang terus berkembang.

5. Daftar Pustaka

- Ahamed, M. M., & Faruque, S. (2021). Perencanaan cakupan jaringan 5G dan analisis tantangan penyebaran. *Sensors*, 21(19), 6608. <https://doi.org/10.3390/s21196608>
- Akhtar, M. W., Hassan, S. A., Ghaffar, R., Jung, H., Garg, S., & Hossain, M. S. (2020). Pergeseran ke komunikasi 6G: Visi dan persyaratan. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 10, 53. <https://doi.org/10.1186/s13673-020-00258-2>
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376.

- Al-Obaidi, M. A. M., Ali, B. J., & Alkindy, B. (2022). A comparative study of the evolution different mobile generations for wireless communication. *Journal of the College of Basic Education*, 26(109), 488–497. <https://doi.org/10.35950/cbej.v26i109.5352>
- Bangerter, B., Talwar, S., Arefi, R., & Stewart, K. (2014). Jaringan dan perangkat untuk era 5G. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 90–96. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736741>
- Breuer, D., Mirahsan, F., & Kasparick, M. (2020). Teknologi fundamental 6G: Penggerak utama, teknologi pendukung, dan tantangan. *IEEE Communications Magazine*, 58(3), 33–39. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900497>
- Clark, R. (2023). *Developing Practical Learning Strategies*. Boston: Pearson Education
- Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., & Zorzi, M. (2020). Menuju jaringan 6G: Kasus penggunaan dan teknologi. *IEEE Communications Magazine*, 58(3), 55–61.
- Hossain, M. S., Islam, S. H., Ahammad, T., & Rahman, A. (2017). Aplikasi Internet of Things (IoT): Tinjauan sistematis. *Future Generation Computer Systems*, 87, 661–675.
- Jameel, A., & Shafiei, M. M. (2017). Evaluasi kinerja QoS jaringan suara melalui LTE. *Jurnal Sistem Listrik dan Elektronik*, 6(1), 1–10.
- Khan, M. S., & Salah, K. (2019). Kota pintar dan 5G: Teknologi komplementer untuk pembangunan perkotaan berkelanjutan. *Kota dan Masyarakat Berkelanjutan*, 45, 577–586.
- Kim, H. (2020). Isu keamanan jaringan inti 5G dan klasifikasi serangan dari perspektif protokol jaringan. *Jurnal Layanan Internet dan Keamanan Informasi*, 10(2), 1–15.
- Klein, A. E. (2020). Tantangan penelitian 6G. *Jurnal IEEE tentang Area Terpilih dalam Komunikasi*, 38(4), 680–688. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.2984769>
- Koi-Akrofi, G. Y., Kuuboore, M., Odai, D. A., & Kotey, A. N. (2023). Generasi nirkabel telekomunikasi: Tinjauan umum, perbedaan teknologi, pemicu evolusi, dan masa depan. *Jurnal Internasional Elektronika dan Telekomunikasi*, 69(1), 105–114. <https://doi.org/10.24425/ijet.2023.144338>
- Kumar, S. (2022). *Komunikasi nirkabel: Konsep fundamental dan lanjutan*. River Publishers.
- Liu, P., & Springer, A. (2014). Penggeseran kunci ruang untuk komunikasi LOS pada frekuensi mmWave. *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(2), 121–124. <https://doi.org/10.1109/lwc.2014.2381671>
- Liu, Z., & Chen, S. (2024). Prinsip desain dan tantangan sistem komunikasi nirkabel 7G: Sebuah tinjauan. *Jurnal IEEE tentang Area Terpilih dalam Komunikasi*, 42(5), 1124–1138.
- Miao, G., Zhang, Y., Li, D., & Cui, Q. (2021). Desain ramah lingkungan dan hemat energi untuk jaringan nirkabel 5G dan seterusnya: Teknik, tantangan, dan prospek. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 5(1), 2–19.
- Mihret, E., & Haile, G. (2021). 4G, 5G, 6G, 7G dan teknologi seluler masa depan. *Jurnal Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi Amerika*, 9(2), 75.

- Park, J., & Kwon, T. (2011). Faktor-faktor keberhasilan layanan komunikasi seluler 4G: Studi kasus LTE. *Jurnal Institut Ilmu Komunikasi Korea*, 29(4), 69–78.
- Park, K., Lee, J., & Kim, S. (2023). Menuju sistem komunikasi nirkabel 6G: Persyaratan, tantangan, dan peluang. *IEEE Communications Magazine*, 61(2), 98–105.
- Rao, A. S., Mole, S. S. S., & Raju, D. V. R. (2023). Melampaui 5G dan 6G: Tinjauan teknologi komunikasi nirkabel 7G. *Buletin Kimia Eropa*, 12(4), 9725–9739.
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., & Gutierrez, F. (2013). Komunikasi seluler gelombang milimeter untuk seluler 5G: Ini akan berhasil! *IEEE Access*, 1, 335–349.
- Ray, J. K., Bera, R., Sil, S., Alfred, Q. M., Mondal, S. A., & Pit, M. (2023). Estimasi keandalan, BER, BLER, dan throughput selama koeksistensi 4G LTE dan 5G NR. Dalam *Konferensi Internasional tentang Komunikasi Lanjutan dan Sistem Cerdas* (pp. 179–195).
- Seraji, N., Ahmed, T., & Al Muntasir, F. (2023). Analisis kinerja lapisan fisik evolusi jangka panjang LTE. *Jurnal Teknik dan Teknologi Inovatif Australia*, 72–93. <https://doi.org/10.34104/ajeit.023.072093>
- Siva, R., Gajendran, P., & Asha, M. (2017). A study on 4G technology. Dalam *IEEE International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies* (pp. 301–304). <https://doi.org/10.1109/ICICICT1.2017.7975321>
- Solyman, A. A. A., & Yahya, K. (2022). Evolution of wireless communication networks: From 1G to 6G and future perspective. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(4), 3943–3950.
- Sun, S., Li, X., Zhang, S., Wang, W., & Wang, X. (2019). Key technologies for 5G wireless communications: Machine learning, IoT, MAC layer, and RANs. *IEEE Wireless Communications*, 26(2), 153–159. <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800103>
- Sugiyanto, S. (2022). *Efisiensi Pembelajaran Berbasis Komputer di Era Digital*. Jakarta: Gramedia.
- Suyama, S., Okuyama, T., Kishiyama, Y., Nagata, S., & Asai, T. (2021). A study on extreme wideband 6G radio access technologies for achieving 100Gbps data rate in higher frequency bands. *IEICE Transactions on Communications*, 104(9), 992–999.
- Vaigandla, K. K., Azmi, N., Podila, R., & Karne, R. K. (2021). A survey on wireless communications: 6G and 7G. *International Journal of Science, Technology & Management*, 2(6), 2018–2025.
- Wang, C., Zhang, P., Kumar, N., Liu, L., & Yang, T. (2022). GCWCN: 6G-based global coverage wireless communication network architecture. *IEEE Network*, 37(3), 218–223.