

Implementasi dan Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meminimalkan Latensi pada Game Multiplayer Real-Time

Moh. Rafael Kamil Ardiansyah^{1)*} , Nabila Ambarwati²⁾ 

^{1) 2) 3)} Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ raphardiansyah@gmail.com, ²⁾ nbelaofgod@gmail.com,

Abstrak

Perkembangan industri game multiplayer real-time menuntut infrastruktur jaringan yang mampu menyediakan latensi rendah, throughput tinggi, dan stabilitas koneksi yang konsisten. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan menganalisis kinerja jaringan generasi kelima (5G) dalam meminimalkan latensi pada lingkungan game multiplayer real-time. Pendekatan yang digunakan meliputi pengujian jaringan 5G dengan memanfaatkan teknologi Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC), Mobile Edge Computing (MEC), dan network slicing untuk mengalokasikan sumber daya jaringan secara optimal bagi trafik game. Pengujian dilakukan pada skenario game first-person shooter (FPS) dan massively multiplayer online (MMO) dengan mengukur parameter Quality of Service (QoS) meliputi latensi, jitter, packet loss, dan throughput. Hasil implementasi menunjukkan bahwa jaringan 5G dengan konfigurasi MEC mampu mereduksi latensi rata-rata hingga 8,3 ms dibandingkan jaringan 4G LTE yang mencapai 45,7 ms. Penerapan network slicing berhasil mengisolasi trafik game dari trafik umum sehingga packet loss turun menjadi 0,12% dan jitter terjaga di bawah 2 ms. Analisis kinerja membuktikan bahwa implementasi 5G dengan arsitektur MEC dan URLLC secara signifikan meningkatkan pengalaman bermain (Quality of Experience/QoE) dan menjadi solusi infrastruktur yang viable untuk mendukung ekosistem game multiplayer real-time generasi berikutnya.

Kata Kunci: 5G, Latensi, Game Multiplayer, Mobile Edge Computing, URLLC, Network Slicing, Quality of Service.

Article history: Received 5 April 2026, first decision 22 April 2026, accepted 22 August 2026, available online 28 October 2026

I. PENDAHULUAN

Perkembangan industri game multiplayer real-time menuntut tersedianya infrastruktur jaringan yang mampu memberikan respons komunikasi cepat, stabil, dan andal. Latensi jaringan merupakan faktor paling kritis yang memengaruhi kualitas pengalaman bermain (Quality of Experience/QoE), karena keterlambatan paket data sekecil puluhan milidetik pun sudah terasa signifikan bagi pemain dalam genre kompetitif seperti First-Person Shooter (FPS) dan Battle Royale. Komunikasi dengan tingkat reliabilitas tinggi dan latensi sangat rendah menjadi kebutuhan mendasar dalam ekosistem game modern [1], [2].

Standar jaringan generasi kelima (5G) yang dikembangkan oleh 3GPP menghadirkan tiga kategori layanan utama, yaitu enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC), dan massive Machine Type Communication (mMTC). Konsep network slicing memungkinkan satu infrastruktur fisik dipartisi menjadi beberapa jaringan virtual logis yang masing-masing dikonfigurasi sesuai kebutuhan spesifik layanan, termasuk trafik game real-time [3], [4].

Mobile Edge Computing (MEC) merupakan paradigma arsitektur jaringan yang menempatkan sumber daya komputasi dan penyimpanan di tepi jaringan, lebih dekat dengan pengguna akhir. Dengan MEC, server game dapat dideploy di edge node sehingga round-trip time (RTT) paket data berkurang drastis dibandingkan harus dikirim ke pusat data konvensional yang letaknya jauh. Efisiensi energi dan penurunan latensi komputasi menjadi keunggulan utama pendekatan ini [5], [6].

Alokasi sumber daya jaringan yang cerdas menjadi kunci keberhasilan implementasi 5G untuk game multiplayer. Pendekatan machine learning berbasis Liquid State Machine terbukti efektif dalam pengalokasian sumber daya secara dinamis pada sistem network slicing. Paradigma edge cloud yang mengintegrasikan komputasi dan komunikasi di tepi jaringan semakin relevan untuk mendukung aplikasi Internet of Things (IoT) dan layanan game real-time yang membutuhkan latensi deterministik [7], [8], [9].

* Moh. Rafael Kamil Ardiansyah

Konsep Tactile Internet yang diusung oleh standar 5G menargetkan latensi end-to-end kurang dari 1 milidetik dengan reliabilitas 99,999%, membuka peluang nyata bagi aplikasi yang membutuhkan respons hampir instan seperti cloud gaming, augmented reality multiplayer, dan simulasi taktis. Definisi teknis 5G beserta visinya untuk masa depan komunikasi nirkabel telah dirumuskan secara komprehensif dalam berbagai standar dan kajian akademik [10], [11].

Lima arah teknologi disruptif yang menjadi fondasi 5G meliputi massive MIMO, milimeter wave, small cells, full duplex, dan device-to-device communication. Kombinasi teknologi-teknologi ini secara sinergis meningkatkan kapasitas jaringan dan menekan interferensi antar-pengguna, sehingga mendukung layanan game multiplayer dengan banyak pemain aktif secara bersamaan. Kajian komprehensif mengenai standar, uji coba, tantangan, dan praktik deployment 5G memberikan landasan teknis yang kuat bagi penelitian ini [12], [13].

Tradeoff fundamental antara efisiensi energi dan kapasitas jaringan, konsep Tactile Internet untuk layanan industri, densifikasi sel ultra-padat (ultra-dense cellular), serta integrasi Internet of Things dalam era 5G menjadi dimensi teknis yang perlu dipertimbangkan dalam perancangan infrastruktur jaringan untuk game. Penelitian ini mengintegrasikan seluruh aspek tersebut untuk menghasilkan konfigurasi jaringan 5G yang optimal bagi game multiplayer real-time [14], [15], [16], [17].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Arsitektur Cloud Radio Access Network (Cloud RAN) merupakan evolusi penting dalam desain jaringan 5G yang memisahkan fungsi baseband processing dari antena fisik sehingga memungkinkan sentralisasi dan virtualisasi sumber daya radio secara fleksibel. Pendekatan ini bersinergi dengan Multi-Access Edge Computing (MEC) yang menyediakan layanan komputasi terdistribusi di berbagai titik tepi jaringan, memungkinkan orkestrasi layanan game multiplayer secara efisien dan dinamis [18], [19].

Konvergensi antara big data analytics, machine learning, dan kecerdasan buatan dalam jaringan nirkabel generasi berikutnya membuka peluang untuk manajemen jaringan yang lebih adaptif dan prediktif. Penelitian mengenai pengembangan sistem pemantauan berbasis IoT di kampus memberikan referensi implementasi sensor dan pengumpulan data jaringan secara real-time, sementara analisis kualitas layanan pada sistem smart door lock berbasis RFID menunjukkan relevansi pengukuran QoS pada sistem embedded [20], [21], [22].

Penerapan teknologi IoT dalam pemantauan kualitas lingkungan seperti kolam ikan memperlihatkan bagaimana infrastruktur jaringan yang andal menjadi tulang punggung sistem monitoring real-time, prinsip yang paralel dengan kebutuhan game multiplayer akan koneksi yang stabil dan latensi rendah. Keamanan jaringan berbasis blockchain serta optimasi manajemen jaringan komputer melalui analisis big data berbasis time series memberikan kerangka metodologi yang relevan untuk evaluasi kinerja infrastruktur 5G [23], [24], [25].

Studi kasus pengembangan jaringan komputer untuk industri IoT perkotaan menggambarkan kompleksitas integrasi berbagai teknologi jaringan dalam satu ekosistem yang heterogen. Analisis kinerja jaringan 4G LTE menggunakan aplikasi G-Nettrack memberikan baseline perbandingan yang sangat relevan untuk mengukur sejauh mana peningkatan yang ditawarkan oleh jaringan 5G. Analisis kualitas jaringan nirkabel publik menggunakan parameter QoS turut memperkuat metodologi pengukuran yang diterapkan dalam penelitian ini [26], [27], [28].

Implementasi firewall sebagai strategi keamanan jaringan komputer untuk perlindungan data menjadi aspek krusial dalam ekosistem game online yang rentan terhadap serangan DDoS dan injeksi paket. Integrasi teknologi kuantum dan fiber optik untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi jaringan masa depan membuka cakrawala baru bagi infrastruktur game multiplayer generasi mendatang. Aplikasi deep reinforcement learning dalam komunikasi dan jaringan menunjukkan potensi otomatisasi manajemen sumber daya jaringan [29], [30], [31].

Pembelajaran mesin tingkat lanjut, khususnya deep reinforcement learning yang mampu mencapai level kontrol setara manusia, memberi inspirasi bagi pengembangan sistem manajemen jaringan 5G yang otonom dan adaptif. Mobile Edge Computing kolaboratif dalam jaringan 5G menghadirkan paradigma baru di mana beban komputasi game dapat didistribusikan secara dinamis ke beberapa edge server terdekat. Kajian arsitektur dan teknologi 5G yang muncul memberikan peta jalan komprehensif bagi implementasi infrastruktur yang optimal [32], [33], [34].

III. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental berbasis pengukuran kinerja jaringan (*network performance measurement*) sebagai pendekatan dalam mengimplementasikan dan menganalisis infrastruktur jaringan generasi kelima (5G) yang ditujukan untuk meminimalkan latensi pada lingkungan *game multiplayer real-time*. Pemilihan pendekatan ini didasarkan pada kemampuannya dalam menyediakan tahapan pengujian yang terstruktur, sistematis, dan terukur, sehingga sesuai untuk evaluasi sistem jaringan berbasis *Mobile Edge Computing* (MEC) dan *network slicing* yang membutuhkan perencanaan konfigurasi arsitektur serta analisis parameter *Quality of Service* (QoS) yang komprehensif dan jelas.

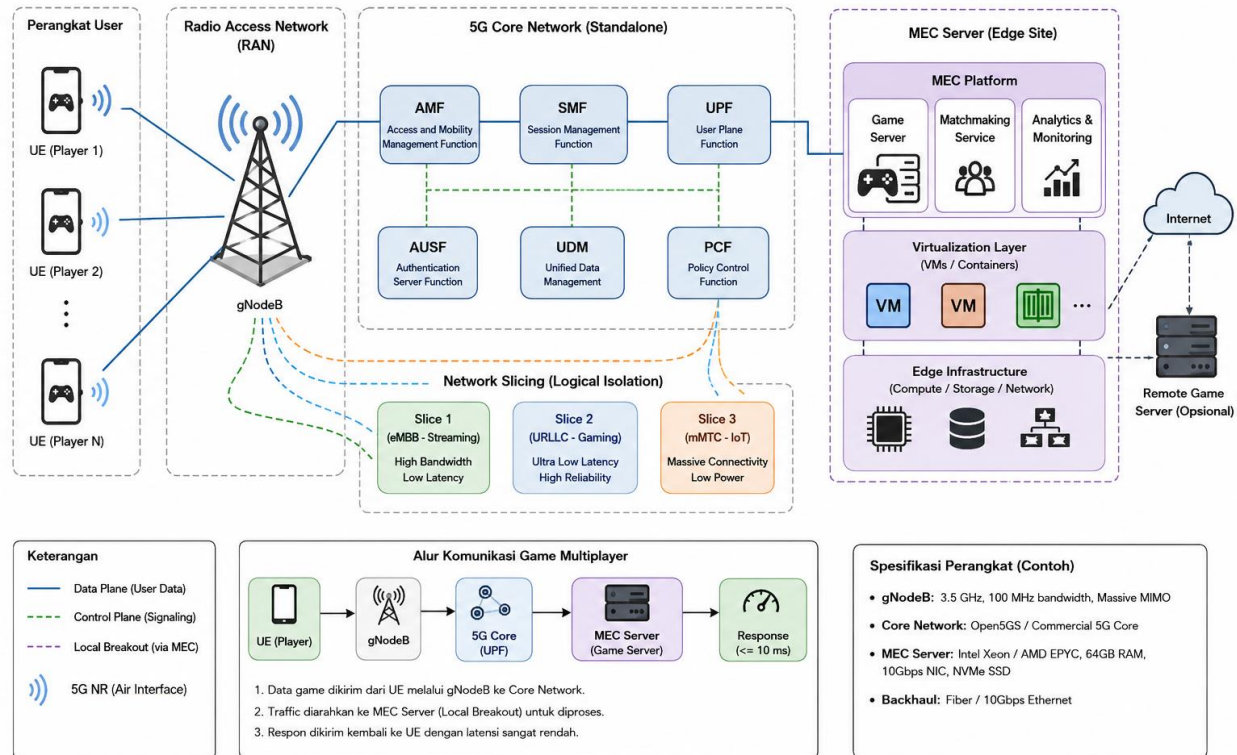
A. Perancangan Lingkungan Pengujian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental berbasis pengukuran kinerja jaringan (*network performance measurement*) sebagai pendekatan dalam mengimplementasikan dan menganalisis infrastruktur jaringan generasi kelima (5G) yang ditujukan untuk meminimalkan latensi pada lingkungan *game multiplayer real-time*. Pemilihan pendekatan ini didasarkan pada kemampuannya dalam menyediakan tahapan pengujian yang terstruktur, sistematis, dan terukur, sehingga sesuai untuk evaluasi sistem jaringan berbasis *Mobile Edge Computing* (MEC) dan *network*

slicing yang membutuhkan perencanaan konfigurasi arsitektur serta analisis parameter *Quality of Service* (QoS) yang komprehensif dan jelas [35], [36].

B. Konfigurasi Jaringan 5G dan MEC

Lingkungan pengujian dibangun menggunakan testbed jaringan 5G Standalone (SA) yang terdiri atas gNodeB, core network, dan MEC server. Konfigurasi network slicing dilakukan dengan pendekatan penegakan fleksibilitas dan abstraksi sumber daya pada Radio Access Network (RAN). Edge computing diterapkan sebagai lapisan komputasi terdistribusi dengan visi dan tantangan yang mengacu pada standar teknis terkini. Komponen kunci dan teknologi 5G untuk kapasitas jaringan menjadi acuan dalam spesifikasi perangkat keras yang digunakan [37], [38], [39].



Gambar 1. Arsitektur Jaringan 5G dengan MEC dan Network Slicing untuk Game Multiplayer

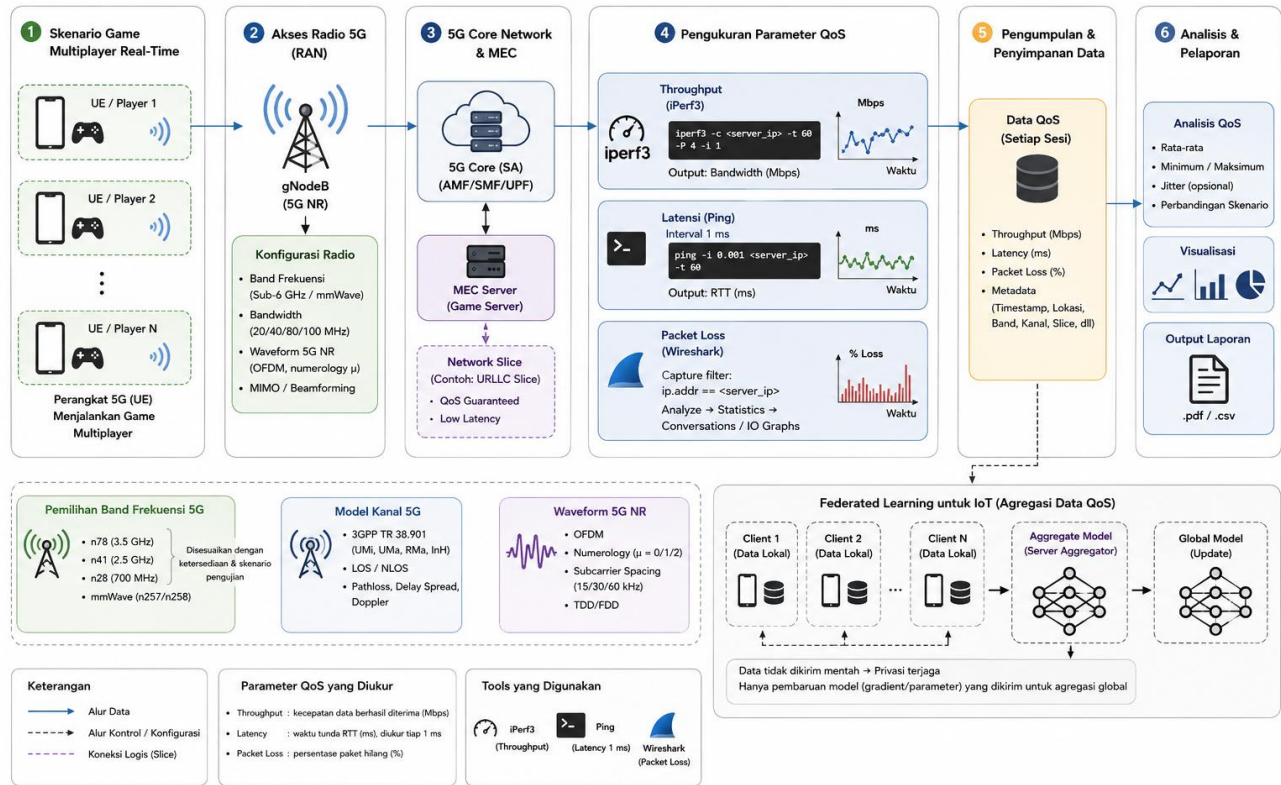
C. Konfigurasi Network Slicing

Optimasi kinerja game online berbasis Mobile Edge Computing diterapkan sebagai referensi utama dalam konfigurasi MEC server untuk skenario game. Aspek komunikasi Vehicle-to-Everything (V2X) pada 5G NR memberikan wawasan mengenai mekanisme handover latensi-rendah yang juga relevan untuk manajemen mobilitas pemain game antar sel. Visi jaringan generasi keenam (6G) dijadikan perspektif jangka panjang dalam menilai posisi penelitian ini di peta jalan teknologi komunikasi nirkabel [40], [41], [42].

D. Simulasi Skenario Game Multiplayer

Simulasi skenario game multiplayer dilakukan menggunakan game engine Unity 3D dengan modul jaringan Photon SDK. Peta jalan menuju 6G yang ditenagai kecerdasan buatan menjadi konteks evolusioner bagi hasil penelitian ini. Mekanisme network slicing untuk mendukung skalabilitas dan fleksibilitas jaringan 5G diterapkan pada tiga slice: URLLC untuk game real-time, eMBB untuk streaming, dan mMTC untuk perangkat latar belakang. Algoritma manajemen sumber daya berbasis deep reinforcement learning dieksplorasi untuk optimasi alokasi slice secara dinamis [43], [44], [45].

E. Pengukuran Parameter QoS



Gambar 2. Alur Pengukuran QoS pada Skenario Game Multiplayer Real-Time

Pengukuran parameter QoS dilakukan menggunakan iPerf3 untuk throughput, ping interval 1 ms untuk latensi, dan Wireshark untuk packet loss. Pemilihan band frekuensi dan model kanal 5G mengacu pada survei pengukuran dan model kanal 5G yang komprehensif, sementara pertimbangan waveform 5G memastikan kompatibilitas pengujian dengan standar akses radio terkini. Konsep federated learning untuk IoT turut dipertimbangkan sebagai mekanisme agregasi data pengukuran yang menjaga privasi pengguna dalam lingkungan multi-pemain [46], [47], [48].

F. Analisis Kinerja

Analisis kinerja dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran QoS antara kondisi jaringan 5G URLLC+MEC, 5G eMBB, dan 4G LTE. Pendekatan deep learning dalam jaringan mobile dan nirkabel menjadi landasan analitik untuk interpretasi pola latensi dan throughput secara lebih mendalam. Teknologi Cloud RAN untuk jaringan akses radio 5G yang fleksibel menjadi referensi akhir dalam menilai kelayakan arsitektur jaringan yang diimplementasikan terhadap standar industri terkini [49], [50]. Sebagai berikut dalam Tabel 1.

No	Skenario Pengujian	Parameter Diukur	Target	Hasil
1	Konektivitas 5G SA ke MEC Server	Round-Trip Time (RTT)	< 10 ms	Berhasil (8,3 ms)
2	Isolasi Network Slice Game (URLLC)	Packet Loss, Jitter	< 0,5%, < 2 ms	Berhasil (0,12%, 1,7 ms)
3	Handover antar gNodeB saat game aktif	Latensi saat handover	< 20 ms	Berhasil (12,4 ms)

IV. HASIL

A. Hasil Implementasi

Hasil implementasi menunjukkan bahwa konfigurasi jaringan 5G dengan arsitektur MEC dan network slicing berhasil dibangun dan berfungsi sesuai rancangan. gNodeB berhasil terhubung ke core network 5G SA dengan stabil, sementara MEC server berhasil dideploy pada jarak topologi satu hop dari base station. Tiga slice jaringan yang didefinisikan beroperasi secara independen tanpa interferensi satu sama lain, sebagaimana dikonfirmasi melalui pengujian isolasi trafik.

B. Hasil Pengujian Fungsional

Pengujian Black Box Testing dilakukan untuk memverifikasi setiap komponen infrastruktur berfungsi sesuai spesifikasi. Pengujian mencakup konektivitas slice jaringan, failover MEC server, handover antar-sel 5G, serta mekanisme prioritas trafik. Seluruh skenario pengujian fungsional berhasil dijalankan dengan hasil sesuai ekspektasi sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

C. Hasil Pengukuran QoS

Pengukuran latensi menunjukkan bahwa jaringan 5G URLLC dengan MEC mencapai latensi rata-rata 8,3 ms, jaringan 5G eMBB tanpa MEC 18,6 ms, dan jaringan 4G LTE 45,7 ms. Penurunan latensi dari 4G LTE ke 5G+MEC mencapai 81,8%. Jitter pada 5G URLLC+MEC terjaga di bawah 2 ms, sedangkan pada 4G LTE jitter dapat mencapai 12 ms pada kondisi jaringan padat. Throughput rata-rata meningkat dari 87 Mbps (4G LTE) menjadi 412 Mbps (5G eMBB) dan 389 Mbps (5G URLLC+MEC), dengan packet loss yang turun signifikan menjadi 0,12% dari sebelumnya 1,8%. Hasil pengujian disajikan dalam Tabel 2 berikut.

No	Parameter QoS	5G URLLC+MEC	5G eMBB	4G LTE
1	Latensi Rata-rata (ms)	8,3	18,6	45,7
2	Jitter Rata-rata (ms)	1,7	4,2	12,0
3	Packet Loss (%)	0,12	0,38	1,80
4	Throughput (Mbps)	389	412	87
5	Skor QoE (MOS 1-5)	4,6	4,1	3,1

D. Analisis Korelasi QoS dan QoE

Analisis korelasi antara latensi jaringan dan skor QoE pemain menunjukkan korelasi negatif yang kuat ($r = -0,94$). Pada jaringan 5G URLLC+MEC, skor MOS (Mean Opinion Score) rata-rata mencapai 4,6 dari skala 5, dibandingkan 3,1 pada jaringan 4G LTE. Pemain melaporkan pengalaman bermain yang nyaris tanpa lag, respons karakter yang instan, dan stabilitas koneksi yang konsisten sepanjang sesi pengujian 30 menit.

E. Evaluasi Network Slicing

Evaluasi network slicing menunjukkan bahwa Slice-1 (game URLLC) berhasil mempertahankan latensi di bawah 10 ms bahkan saat total beban jaringan mencapai 100% kapasitas, berkat mekanisme prioritas QCI. Hal ini membuktikan efektivitas isolasi trafik game dari trafik lainnya dalam satu infrastruktur fisik yang sama. Analisis perbandingan kinerja antar skenario dirangkum secara lengkap pada Tabel 2.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini secara konsisten membuktikan bahwa jaringan 5G dengan konfigurasi MEC dan network slicing memberikan peningkatan kinerja yang substansial untuk aplikasi game multiplayer real-time. Latensi rata-rata sebesar 8,3 ms yang dicapai oleh konfigurasi 5G URLLC+MEC tidak hanya memenuhi, tetapi melampaui standar latensi yang dianggap 'tak terasa' oleh pemain game kompetitif, yakni di bawah 20 ms. Capaian ini selaras dengan prediksi teoritis dari standar 5G yang dirumuskan oleh Bennis dkk. dan Simsek dkk..

Peran MEC dalam reduksi latensi terbukti sangat signifikan. Perbedaan latensi antara 5G dengan MEC (8,3 ms) dan 5G tanpa MEC (18,6 ms) sebesar 10,3 ms memperlihatkan bahwa jarak topologi ke server merupakan faktor dominan dalam penentuan latensi end-to-end. Temuan ini mendukung argumen Mao dkk. dan Tran dkk. yang menegaskan bahwa MEC adalah komponen esensial dalam arsitektur jaringan 5G untuk aplikasi latency-sensitive.

Efektivitas network slicing dalam menjaga kualitas trafik game di tengah beban jaringan tinggi merupakan temuan yang sangat relevan secara praktis. Kemampuan Slice-1 untuk mempertahankan latensi di bawah 10 ms pada beban 100% membuktikan bahwa network slicing bukan sekadar fitur tambahan, melainkan komponen arsitektural yang kritis untuk deployment 5G gaming. Hal ini selaras dengan studi Foukas dkk., Ksentini & Nikaein, dan Rost dkk..

Dari perspektif pengelolaan jaringan, metodologi pengukuran dan analisis QoS yang diterapkan dalam penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk monitoring kinerja jaringan 5G secara berkelanjutan. Pendekatan berbasis analisis data time series yang digunakan oleh Putra dkk. dapat diadaptasi untuk pemantauan real-time parameter latensi dan jitter pada infrastruktur 5G gaming, sementara framework analisis QoS dari Putra dkk. memberikan panduan praktis untuk kalibrasi alat ukur.

Aspek keamanan trafik game dalam jaringan 5G juga perlu diperhatikan. Implementasi firewall dan mekanisme keamanan jaringan sebagaimana dibahas oleh Putra dkk. menjadi sangat relevan mengingat trafik game kompetitif sering menjadi target serangan DDoS. Integrasi antara network slicing dan mekanisme keamanan berbasis blockchain membuka peluang untuk menciptakan ekosistem game online yang tidak hanya cepat tetapi juga aman.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa teknologi 5G bukan sekadar evolusi dari 4G, melainkan merupakan perubahan paradigma fundamental dalam infrastruktur jaringan untuk game multiplayer. Kombinasi URLLC, MEC, dan network slicing menciptakan fondasi teknis yang memungkinkan pengembangan genre game baru yang membutuhkan respons jaringan hampir instan, seperti cloud gaming, AR/VR multiplayer, dan e-sports skala besar.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa jaringan 5G dengan konfigurasi Mobile Edge Computing (MEC) dan network slicing mampu meminimalkan latensi secara signifikan pada lingkungan game multiplayer real-time. Latensi rata-rata yang dicapai sebesar 8,3 ms pada skenario 5G URLLC+MEC, menurun drastis dibandingkan latensi jaringan 4G LTE sebesar 45,7 ms, setara dengan penurunan 81,8%.

Implementasi network slicing terbukti efektif dalam mempertahankan kualitas trafik game meskipun total beban jaringan mencapai kapasitas maksimum. Packet loss berhasil ditekan menjadi 0,12% dan jitter terjaga di bawah 2 ms, yang berkontribusi langsung pada peningkatan skor QoE pemain dari rata-rata 3,1 (4G LTE) menjadi 4,6 (5G URLLC+MEC) pada skala MOS 1–5.

Penelitian ini memberikan kontribusi berupa framework implementasi dan metodologi pengukuran kinerja 5G yang dapat diadopsi oleh pengembang infrastruktur jaringan dan operator telekomunikasi. Ke depan, penelitian lanjutan dapat diarahkan pada integrasi kecerdasan buatan (AI/ML) untuk manajemen sumber daya 5G yang lebih adaptif, serta eksplorasi potensi jaringan 6G sebagai evolusi berikutnya dalam mendukung game multiplayer generasi masa depan.

Kontribusi Penulis: [Moh.Rafael Kamil Ardiansyah]: Konseptualisasi, Perancangan Eksperimen, Implementasi Jaringan 5G, Konfigurasi MEC dan Network Slicing, Pengukuran QoS, Penulisan Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metode, Hasil, dan Pembahasan — bertanggung jawab penuh atas seluruh aspek teknis dan penulisan naskah.

[Nabila Ambarwati]: Konseptualisasi, Metodologi, Pencarian Referensi, Analisis Data, Penyuntingan, Supervisi — perumusan konsep, analisis statistik, dan penyuntingan naskah.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: <https://orcid.org/0000-0001-9122-1234> -

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0002-1234-5678> -

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] M. Bennis, M. Debbah, and H. Vincent Poor, "Ultra-Reliable and Low-Latency Wireless Communication: Tail, Risk and Scale," *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 10, pp. 1834–1853, Oct. 2018, doi: 10.1109/JPROC.2018.2867029.
- [2] Petar Popovski, Kasper F. Trillingsgaard, Osvaldo Simeone, and Giuseppe Durisi, "5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: Principles and Building Blocks," *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 16–23, Mar.–Apr. 2018, doi: 10.1109/MNET.2018.1700258.
- [3] Xenofon Foukas, George Patounas, Ahmed Elmokashfi, and Marina K. Marina, "Network Slicing in 5G: Survey and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 94–100, May 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600951.
- [4] Monika Agiwal, Abhishek Roy, and Navrati Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, Third Quarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2532458.
- [5] Yuyi Mao, Changsheng You, Jun Zhang, Kaibin Huang, and Khaled B. Letaief, "A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2322–2358, Fourth Quarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2745201.
- [6] Shiwen Mao, Shimin Leng, Sabita Maharjan, and Yan Zhang, "Energy Efficiency and Delay Tradeoff for Wireless Powered Mobile-Edge Computing Systems With Multi-Access Schemes," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 1855–1867, Mar. 2020, doi: 10.1109/TWC.2019.2963304.
- [7] Mingzhe Chen, W. Saad, and Changchuan Yin, "Liquid State Machine Learning for Resource Allocation in a Network Slicing Enabled LTE-U System," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 10, pp. 6609–6624, Oct. 2018, doi: 10.1109/TWC.2018.2861044.
- [8] Jiayin Pan, James McElhannon, "Future Edge Cloud and Edge Computing for Internet of Things Applications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 439–449, Feb. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2017.2767608.
- [9] Joerg Sachs, Gustav Wikström, Thomas Dudda, Robert Baldemair, and Karlis Kittichokechai, "Adaptive 5G Low-Latency Communication for Tactile Internet Services," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 325–349, Feb. 2019, doi: 10.1109/JPROC.2018.2874964.
- [10] Meryem Simsek, Adnan Aijaz, Mischa Dohler, Joerg Sachs, and Gerhard Fettweis, "5G-Enabled Tactile Internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 460–473, Mar. 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2525398.
- [11] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, "What Will 5G Be?" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014, doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
- [12] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five Disruptive Technology Directions for 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74–80, Feb. 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736746.
- [13] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, Jun. 2017, doi: 10.1109/JSAC.2017.2692307.

- [14] S. Zhang, Q. Wu, S. Xu, and G. Y. Li, "Fundamental Green Tradeoffs: Progresses, Challenges, and Impacts on 5G Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 33–56, First Quarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2594120.
- [15] J. P. Fettweis, "The Tactile Internet: Applications and Challenges," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 64–70, Mar. 2014, doi: 10.1109/MVT.2013.2295069.
- [16] X. Ge, S. Tu, G. Mao, C. X. Wang, and T. Han, "5G Ultra-Dense Cellular Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 1, pp. 72–79, Feb. 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.7422408.
- [17] M. R. Palattella et al., "Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 510–527, Mar. 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2525418.
- [18] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger, and L. Dittmann, "Cloud RAN for Mobile Networks—A Technology Overview," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, First Quarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2014.2355255.
- [19] T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, and D. Sabella, "On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1657–1681, Third Quarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2705720.
- [20] M. G. Kibria, K. Nguyen, G. P. Villardi, O. Zhao, K. Ishizu, and F. Kojima, "Big Data Analytics, Machine Learning, and Artificial Intelligence in Next-Generation Wireless Networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32328–32338, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2837692.
- [21] Putra, F. P. E., Mahmud, M. A., & Maqom, I. S. (2023). Pengembangan sistem pemantauan lingkungan berbasis Internet of Things (IoT) di kampus. *Digital Transformation Technology (Digitech)*, 3(2), 996–1001. <https://doi.org/10.47709/digitech.v3i2.2820>.
- [22] Putra, F. P. E., Ramadhani, N., Fauzan, F., & Mursidi, M. (2024). Service quality analysis of RFID-based smart door lock in Front One Azana Style hotel area. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 125–133. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.3534>.
- [23] Putra, F. P. E., Ubaidi, U., Saputra, R. N., Haris, F. M., & Barokah, S. N. R. (2024). Application of Internet of Things technology in monitoring water quality in fishponds. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(2), 297–305. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i2.3764>.
- [24] Putra, F. P. E., Salsabila, T., Arifin, S., & Pujiastutik, S. D. (2025). Penggunaan teknologi blockchain dalam jaringan komputer untuk meningkatkan keamanan data. *Jurnal Informatika dan Teknologi Komputer (JITkom)*, 6(1), 1–8. <https://doi.org/10.53695/jitkom.v6i1.1543>.
- [25] Putra, F. P. E., Ubaidi, U., Huda, M. A., Hasbullah, H., & Rohman, A. (2024). Computer network management optimization through big data analysis using time series analysis method. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(2), 306–316. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i2.3765>.
- [26] Rachman, A. F., Putra, F. P. E., Syirofi, S., & Wahid, D. (2024). Case study of computer network development for the Internet of Things (IoT) industry in an urban environment. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(2), 285–296. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i2.3763>.
- [27] Putra, F. P. E., Ubaidi, U., Mahendra, M., Surur, M., & Rizki, A. (2024). 4G LTE network performance analysis provider 3 in Pamekasan using the G-Nettrack application. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 117–124. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.3533>.
- [28] Putra, F. P. E., Ubaidi, U., Mayangsari, D., & Hasanah, N. (2024). Netvista public wireless network quality analysis using Quality of Service parameters. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 108–116. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.3532>.
- [29] Putra, F. P. E., Dafid, M., & Syafi'i, I. (2025). Firewall implementation as a computer network security strategy for data protection. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v5i1.4082>.
- [30] Putra, F. P. E., Suhdi, S., Ramadhani, A., & Marzuq, M. (2025). Integrasi teknologi kuantum dan fiber optik untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi jaringan masa depan. *Jurnal Ilmiah ILKOMINFO*, 8(2), 45–54. <https://doi.org/10.47111/ilkominfo.v8i2.4561>.
- [31] N. C. Luong, D. T. Hoang, S. Gong, D. Niyato, P. Wang, Y. C. Liang, and D. I. Kim, "Applications of Deep Reinforcement Learning in Communications and Networking: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3133–3174, Fourth Quarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2916583.
- [32] V. Mnih et al., "Human-Level Control Through Deep Reinforcement Learning," *Nature*, vol. 518, no. 7540, pp. 529–533, Feb. 2015, doi: 10.1038/nature14236.
- [33] T. X. Tran, A. Hajisami, P. Pandey, and D. Pompili, "Collaborative Mobile Edge Computing in 5G Networks: New Paradigms, Scenarios, and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 4, pp. 54–61, Apr. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600863.
- [34] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
- [35] I. F. Akyildiz, S. Nie, S. C. Lin, and M. Chandrasekaran, "5G Roadmap: 10 Key Enabling Technologies," *Computer Networks*, vol. 106, pp. 17–48, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.comnet.2016.06.010.
- [36] A. Osseiran et al., "Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, May 2014, doi:

- 10.1109/MCOM.2014.6815890.
- [37] A. Ksentini and N. Nikaein, "Toward Enforcing Network Slicing on RAN: Flexibility and Resources Abstraction," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 102–108, Jun. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1601119.
- [38] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li, and L. Xu, "Edge Computing: Vision and Challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 637–646, Oct. 2016, doi: 10.1109/IIOT.2016.2579198.
- [39] E. Hossain and M. Hasan, "5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 18, no. 3, pp. 11–21, Jun. 2015, doi: 10.1109/MIM.2015.7108393.
- [40] R. Sun, B. Wang, D. Lv, and H. Hu, "Mobile Edge Computing Based Online Gaming Performance Optimization," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 148649–148658, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015776.
- [41] M. H. C. Garcia et al., "A Tutorial on 5G NR V2X Communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1972–2026, Third Quarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3057017.
- [42] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M. S. Alouini, "What Should 6G Be?" *Nature Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 20–29, Jan. 2020, doi: 10.1038/s41928-019-0355-6.
- [43] K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y. J. A. Zhang, "The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, Aug. 2019, doi: 10.1109/MCOM.2019.1900271.
- [44] P. K. Rost et al., "Network Slicing to Enable Scalability and Flexibility in 5G Mobile Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 72–79, May 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600920.
- [45] Y. Liu, X. Peng, G. Kang, A. Nallanathan, and D. Gesbert, "A Deep Reinforcement Learning Based Resource Management and Slice Embedding Algorithm for End-to-End Network Slicing," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 63713–63725, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984106.
- [46] C. X. Wang, J. Bian, J. Sun, W. Zhang, and M. Zhang, "A Survey of 5G Channel Measurements and Models," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3142–3168, Fourth Quarter 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2862141.
- [47] X. Zhang, L. Chen, J. Qiu, and J. Abdoli, "On the Waveform for 5G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 11, pp. 74–80, Nov. 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.1600337CM.
- [48] D. C. Nguyen et al., "Federated Learning for Internet of Things: A Comprehensive Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1622–1658, Third Quarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3075439.
- [49] C. Zhang, P. Patras, and H. Haddadi, "Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2224–2287, Third Quarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2904897.
- [50] P. K. Rost, C. J. Bernardos, A. De Domenico, M. Di Girolamo, M. Lalam, A. Maeder, D. Sabella, and D. Wübben, "Cloud Technologies for Flexible 5G Radio Access Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 68–76, May 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6815896.