

KLASIFIKASI PEMANFAATAN *OPEN SOURCE RESOURCE* PADA *MULTI-EDGE COMPUTING* DENGAN JARINGAN *PRIVATE 5G* YANG BERKUALITAS DAN *LOW LATENCY* MENGGUNAKAN TEKNOLOGI *NETWORK SLICING*

Oka Prasetyo ^{1*}, Yuma Akbar ²

^{1,2} Program Studi Teknik Informatika, Sekolah Tinggi Ilmu Komputer Cipta Karya Informatika, Kota Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta, Indonesia.

Email: okaprasetyo12@gmail.com ^{1*}, yuma.pjj@gmail.com ²

Histori Artikel:

Dikirim 22 Juli 2023; *Diterima dalam bentuk revisi* 13 Agustus 2023; *Diterima* 20 Agustus 2023; *Diterbitkan* 10 September 2023. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMIK Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Multi-edge computing adalah salah satu teknologi yang memungkinkan pengolahan data dilakukan di tepi jaringan, sehingga dapat mengurangi latency dan mempercepat pengolahan data secara keseluruhan. Di sisi lain, jaringan private 5G berkualitas dan low latency memungkinkan pengiriman data yang cepat dan stabil. Namun, dalam mengimplementasikan teknologi multi-edge computing dengan jaringan private 5G, diperlukan penggunaan open source resource yang tepat untuk mendukung keberhasilannya dengan biaya investasi yang lebih hemat. Skripsi ini bertujuan untuk mengklasifikasikan pemanfaatan open source resource pada teknologi multi-edge computing dengan jaringan private 5G berkualitas dan low latency menggunakan teknologi network slicing. Metodologi pengembangan yang dilakukan meliputi studi literatur, pengembangan sistem, pengumpulan data, analisis data, dan evaluasi kinerja sistem yang diimplementasikan diatas virtualisasi hypervisor tipe 2 pada Virtualbox. Hasil dari skripsi ini diharapkan dapat menunjukkan bahwa terdapat beberapa open source resource yang dapat digunakan pada teknologi multi-edge computing dengan jaringan private 5G, seperti Open5gs, Kubernetes, Virtualbox, sehingga terbentuk jaringan dengan latency rendah dan biaya yang murah.

Kata Kunci: 5G; Private 5G; MEC; Open Source 5G.

Abstract

Multi-edge computing is one of the technologies that allows data processing to be performed at the edge of the network, thereby reducing latency and speeding up overall data processing. On the other hand, 5G private networks with high quality and low latency enable fast and stable data transmission. However, in implementing multi-edge computing technology with 5G private networks, it is necessary to use the right open source resources to support its success at a lower investment cost. This thesis aims to classify the utilization of open source resources in multi-edge computing technology with quality and low latency 5G private networks using network slicing technology. The development methodology includes literature study, system development, data collection, data analysis, and system performance evaluation implemented on top of type 2 hypervisor virtualization on Virtualbox. The results of this thesis are expected to show that there are several open source resources that can be used in multi-edge computing technology with 5G private networks, such as Open5gs, Kubernetes, Virtualbox, so as to form a network with low latency and low cost.

Keyword: 5G; Private 5G; MEC; Open Source 5G.

1. Pendahuluan

Pada era digital saat ini, terjadi peningkatan pesat dalam jumlah perangkat yang terhubung ke internet, dari perangkat mobile hingga *Internet of Things* (IoT) seperti kendaraan, peralatan rumah tangga, dan bangunan pintar (smart buildings) [1]. Hal ini menyebabkan ledakan data yang perlu diolah dengan efisien dan cepat. Dalam upaya untuk meningkatkan efisiensi pengolahan data, teknologi *Multi-Edge Computing* (MEC) muncul sebagai solusi dengan memungkinkan pengolahan data dilakukan di tepi jaringan (*edge network*), yang dekat dengan sumber data [2]. Penelitian ini fokus pada penggunaan MEC dengan jaringan private 5G berkualitas dan *low* latency yang menggunakan teknologi Network Slicing [3][4]. Dalam konteks ini, penting untuk mengatasi beberapa keterbatasan yang dimiliki oleh teknologi WiFi dalam penerapan MEC, seperti kualitas jaringan yang tidak konsisten dan *latency* yang tinggi[5]. Oleh karena itu, penggunaan jaringan private 5G yang menawarkan keunggulan dalam kinerja dan keamanan menjadi alternatif yang menarik untuk mengoptimalkan penggunaan teknologi MEC [6][7].

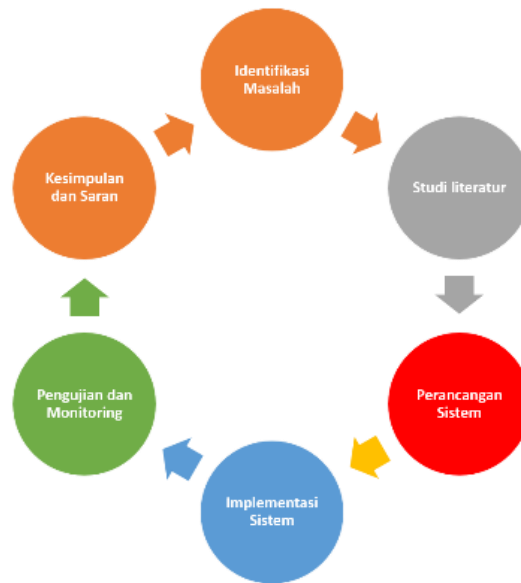
Multi-Edge Computing (MEC) Ini adalah paradigma komputasi terdistribusi di mana pemrosesan dan komputasi dilakukan terutama pada node perangkat rahasia yang dikenal sebagai perangkat pintar atau perangkat edge sebagai lawan dari pemrosesan di lingkungan cloud terpusat atau pusat data [8]. Ini membantu untuk menyediakan sumber daya server, analisis data, dan kecerdasan buatan untuk sumber pengumpulan data dan sumber *cyber*-fisik seperti sensor cerdas dan aktuator. Apakah edge computing dianggap perlu?. Dalam realisasi komputasi fisik, kota pintar, komputasi, aplikasi multimedia seperti augmented reality dan cloud gaming, serta *Internet of Things* (IoT).

Jaringan *Private* 5G adalah jaringan area lokal berbasis teknologi 5G New Radio (NR) untuk konektivitas nirkabel khusus di wilayah tertentu[9]. Perlu ditekankan bahwa tidak semua jaringan 5G lokal adalah jaringan privat[10]. Jaringan akses radio (RAN) bagian dari konfigurasi privat terdiri dari satu atau beberapa stasiun pemancar, yang dapat ditingkatkan sesuai dengan kapasitas dan persyaratan cakupan [11][12]. GTP adalah kepanjangan dari GPRS Tunneling Protocol, Protokol Tunneling GPRS untuk *User Plane* (GTP U) adalah protokol yang mendukung tunneling data pengguna melalui N3 (yaitu antara node 5G-AN dan UPF) menurut Ikhtisar Sistem 5G oleh 3GPP [13]-[14]. Protokol GTP U digunakan untuk membawa data pengguna di antara elemen jaringan. Protokol ini merupakan bagian dari bidang pengguna dan bertanggung jawab untuk mentransmisikan paket antara perangkat dan aplikasi.

Penelitian ini melibatkan implementasi teknologi MEC dengan jaringan *private* 5G menggunakan perangkat lunak hypervisor VirtualBox dan teknologi simulasi 5G. Selain itu, client dan aplikasi juga dapat dijalankan di atas container Docker, memberikan fleksibilitas dan efisiensi dalam percobaan. Teknologi 5G memiliki keunggulan dalam menangani lalu lintas data yang besar dengan latency rendah, serta fitur seperti network slicing untuk menjamin kualitas jaringan yang konsisten[15][16]. Selain itu, jaringan private 5G memiliki kemampuan autentikasi yang kuat dan enkripsi data untuk mengamankan pengiriman data sensitif. Meskipun demikian, biaya investasi dalam membangun jaringan private 5G dapat menjadi kendala bagi beberapa perusahaan atau organisasi. Dalam penelitian ini, solusi open *source* digunakan untuk memenuhi kebutuhan beberapa elemen dalam 5G, sehingga dapat memberikan alternatif yang lebih terjangkau dan memungkinkan penyesuaian dengan kebutuhan spesifik. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat memberikan rekomendasi dan arahan bagi perusahaan atau organisasi dalam mengoptimalkan penggunaan teknologi MEC dengan jaringan private 5G dan teknologi open *source*, untuk meningkatkan produktivitas, efisiensi, keamanan, dan daya saing bisnis di era digital saat ini.

2. Metode Penelitian

Metode yang diterapkan dalam penelitian ini adalah *Network Development Life Cycle* (NDLC). Metode *NDLC* terdiri dari beberapa tahapan yang mencakup langkah-langkah berikut:



Gambar 1. Metode Penelitian NDLC

2.1 Identifikasi Masalah

Pada tahap ini, penulis melakukan analisis untuk mengidentifikasi masalah yang dihadapi dalam penggunaan jaringan. Analisis yang dilakukan untuk mengidentifikasi masalah adalah menggunakan referensi data informasi yang diperoleh dari jurnal, buku, konferensi, dan website yang terkait dengan Latar belakang penerapan *Multi Edge Computing*, dan hasil yang dicapai. Dalam beberapa penelitian Implementasi *Multi-Edge Computing* dilakukan pada jaringan Wifi. Sehingga masih menimbulkan masalah dari sisi kehandalan. Oleh karena itu, diperlukan jaringan dengan performa tinggi, seperti performa jaringan dan *latency* yang rendah dalam pengolahan data di tepi jaringan MEC menggunakan jaringan private 5G dan teknologi *Network Slicing*, serta dengan menghemat biaya investasi jaringan [17][18]. Berdasarkan data sekunder, kebutuhan jaringan MEC dapat berbeda beda sesuai dengan case, selain itu penerapan MEC diharapkan sangat dekat dengan Pengguna.

2.2 Studi Literature

Melakukan studi literatur terkait dengan jaringan MEC, jaringan *private* 5G, teknologi *Network Slicing*, dan solusi-solusi yang telah ada untuk meningkatkan performa jaringan dan mengatasi keterbatasan infrastruktur serta biaya investasi. Sumber data informasi diperoleh dari jurnal, buku, konferensi, dan website yang terkait dengan pokok bahasan masalah yang diteliti. Berdasarkan Data Sekunder yang diperoleh secara tidak langsung dalam sebuah penelitian Antonio Matencio Escolar, Jose M. Alcaraz-Calero, Pablo Salva-Garcia, Jorge Bernal Bernabe, Qi Wang dengan judul Adaptive Network Slicing in Multi-Tenant 5G IoT Networks, terdapat 3 Kategori Layanan dalam 5G yaitu eMBB, mMTC, dan URLLC [19].

2.3 Perancangan Sistem

Setelah masalah diidentifikasi dan membaca beberapa studi literatur, Selanjutnya penulis Merancang sistem jaringan MEC yang mencakup desain arsitektur jaringan MEC yang mencakup tata letak dan struktur jaringan. Arsitektur ini mencakup penempatan MEC server, user plane function (UPF), dan *control plane function* (CPF) untuk mendukung fungsi dan layanan yang diinginkan. Selain itu, penulis juga mempertimbangkan distribusi sumber daya komputasi dan jaringan secara efisien di tepi jaringan untuk mengoptimalkan pengolahan data dan meminimalkan latensi. Penulis memilih teknologi yang tepat untuk implementasi jaringan MEC. Pemilihan teknologi melibatkan evaluasi berbagai opsi teknologi *open source* yang sesuai dengan kebutuhan penelitian dan dapat berintegrasi dengan infrastruktur yang sudah ada dan agar mengurangi biaya investasi penerapan MEC. Teknologi yang dipilih harus dapat mendukung kecepatan tinggi dan kehandalan jaringan untuk memenuhi

kebutuhan layanan berbasis 5G. Selain itu, penulis juga membuat alokasi *Network Slicing* berdasarkan contoh referensi Case pada 5G. Hal ini dilakukan demi memisahkan tipe layanan dan mengalokasikan resource jaringan sesuai dengan kebutuhannya. Rancangan sistem yang dihasilkan dari tahap perancangan ini akan menjadi panduan dalam tahap implementasi selanjutnya. Dengan perincian dan strategi yang telah dirancang dengan cermat, diharapkan implementasi jaringan MEC dapat dilakukan dengan efisien dan berhasil mencapai tujuan penelitian yang telah ditetapkan.

2.4 Implementasi Sistem

Tahap implementasi melibatkan penerapan rancangan sistem yang telah dirancang, termasuk konfigurasi perangkat keras dan perangkat lunak yang diperlukan untuk mendukung jaringan *Multi-Edge Computing* (MEC) dengan menggunakan jaringan private 5G dan teknologi *Network Slicing*. Pada tahap ini, desain jaringan diwujudkan menjadi sebuah sistem jaringan yang berfungsi secara operasional. Implementasi dilakukan dalam lingkungan virtualisasi VirtualBox, yang memungkinkan pembentukan topologi jaringan secara virtual untuk menciptakan lingkungan yang lebih efektif dan efisien.

2.5 Pengujian dan Monitoring

Setelah tahapan Implementasi Selesai, maka dilanjutkan dengan Melakukan pengujian terhadap sistem jaringan MEC yang telah diimplementasikan untuk mengukur performa jaringan dan *latency* yang rendah dalam pengolahan data, Sementara tahapan monitoring terhadap jaringan MEC, dilakukan secara berkala untuk memastikan kinerjanya sesuai dengan yang diharapkan.

2.6 Kesimpulan dan Saran

Pada tahap akhir ini, penulis Menganalisis hasil pengujian dan pemantauan yang telah dilakukan, kemudian menyimpulkan apakah tujuan penelitian tercapai. Kesimpulan berisi ringkasan temuan-temuan yang ditemukan selama penelitian. Selanjutnya saran untuk pengembangan dan pengoptimalan jaringan MEC yang menggunakan jaringan private 5G dan teknologi *Network slicing* menggunakan *open source* berdasarkan temuan dan hasil penelitian.

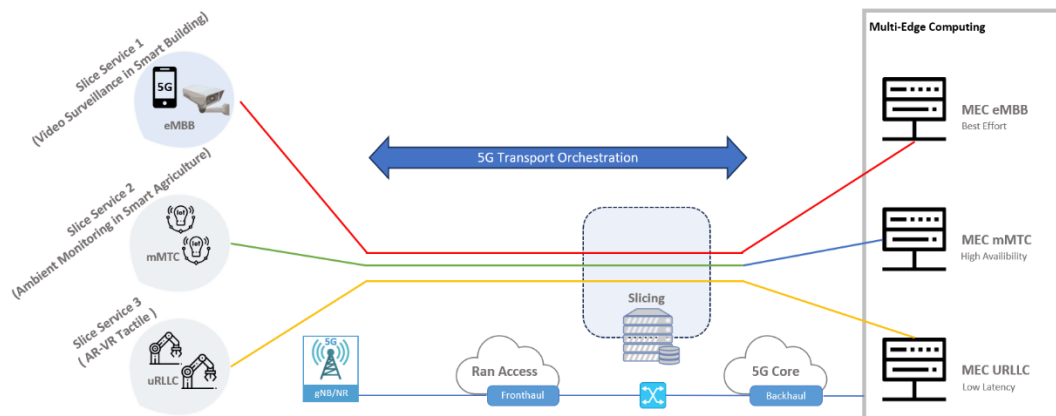
3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian Klasifikasi Pemanfaatan *Open Source Resource* Pada *Multi-Edge Computing* Dengan Jaringan *Private* 5g Yang Berkualitas Dan Low Latency Menggunakan Teknologi *Network Slicing*, penulis mendapatkan sumber data tipe pembagian traffik jaringan berdasarkan kategori layanan. Berdasarkan penelitian Antonio Matencio Escolar, Jose M. Alcaraz-Calero, Pablo Salva-Garcia, Jorge Bernal Bernabe, Qi Wang dengan judul Adaptive Network Slicing in Multi-Tenant 5G IoT Networks [19]. Berdasarkan jurnal penelitian, terdapat 3 Kategori Layanan dalam 5G yaitu, *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Massive Machine Type Communications* (mMTC), dan *Ultra-Reliable and Low Latency Communications* (URLLC). Berikut adalah kebutuhan jaringan berdasarkan tipe layanan tersebut.

Topik	Use Case 1	Use Case 2	Use Case 3
Case Name	Video Surveillance in Smart Building	Ambient Monitoring in Smart Agriculture	AR-VR Tactile Application in Manufacturing Industry
IOT Vertical Role	Smart Building	Smart Farm	Smart Manufacturing Factory
Category	eMBB	mMTC	URLLC
Latency	High (± 100ms)	High (± 1s)	High (± 1ms)
Reliability	Medium	Low	High
Paket Size transmitted by Devices (Bytes)	1396	128	1396
Device TX Bandwith	4.8 Mbps	1.86 kbps	39.6 Mbps

Gambar 2. Tabel Use Case MEC 5G IOT

Berdasarkan hasil pengamatan dari data yang dipublikasi pada jurnal tersebut, selanjutnya dibuat analisa rancangan sistem untuk kebutuhan tersebut, skema jaringan dibuat untuk dapat mengklasifikasikan masing masing layanan menggunakan *network slicing*, seperti pada desain solusi *slicing* berikut [20].



Gambar 3. Alokasi Network Slicing

Pada tahap implementasi, disimulasikan 3 UE (*Client*) Berdasarkan, setiap UE akan melakukan proses *Initial Context*, Pencocokkan *Uplink Downlink Transport*, dan pembentukan PDU *Session Resource Context*, *Slicing* pada ue akan diberikan pada pesan *Session Resource*. Alokasi slicing yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

Use Case	IMSI	Slice	UE Maximum Bandwith	Guarantee Speed	QoS Class	ARP
Video Surveillance in Smart Building	510100000000001	SST : 000001 SD : 000001	30 Mbps	5 Mbps	9	10
Ambient Monitoring in Smart Agriculture	510100000000002	SST : 000002 SD : 000001	1 Mbps	1.86 Kbps	79	15
AR-VR Tactile Application in Manufacturing Industry	510100000000003	SST : 000003 SD : 000001	100 Mbps	40 Mbps	1	1

Gambar 4. Tabel Profil user untuk masing masing UE

3.1 Uji klasifikasi layanan

Pengujian ini dilakukan dengan membuat Koneksi PDU dari UE Simulator ke 5G *Network*, pada hasil pengujian, ditunjukkan status UE berhasil terhubung ke 5G sesuai dengan alokasi Slice yang diberikan. Seperti pada output berikut menggunakan sample UE Imsi 510100000000001.

```

root@d649f140ce3f:/UERANSIM# ./build/nr-cli imsi-510100000000001
-----
$ status
cm-state: CM-CONNECTED
rm-state: RM-REGISTERED
mm-state: MM-REGISTERED/NORMAL-SERVICE
5u-state: 5U1-UPDATED
sim-inserted: true
selected-plmn: 510/10
current-cell: 3
current-plmn: 510/10
current-tac: 1
last-tai: PLMN[510/10] TAC[1]
stored-suci: no-identity
stored-guti:
plmn: 510/10
amf-region-id: 0x02
amf-set-id: 1
amf-pointer: 0
tmsi: 0xe2004b81
has-emergency: false
-----

```

Gambar 5. Status Sesssion UE terhubung ke 5G Core

```

    s-NSSAI
      SST: 01
      SD: 000001
    pDUSessionResourceSetupRequestTransfer: 0000040082000a0c01e000003001e0000008b000a01f00a...
      PDUProtocolIE-Field
        protocolIEs: 4 items
          Item 0: id-PDUSessionAggregateMaximumBitRate
            ProtocolIE-Field
              id: id-PDUSessionAggregateMaximumBitRate (130)
              criticality: reject (0)
              value
                PDUSessionAggregateMaximumBitRate
                  pDUSessionAggregateMaximumBitRateDL: 31457280bits/s
                  pDUSessionAggregateMaximumBitRateUL: 31457280bits/s
          Item 1: id-UL-NGU-UP-TNLIInformation
            PDUProtocolIE-Field
          Item 2: id-PDUSessionType
            ProtocolIE-Field
          Item 3: id-QoSFlowSetupRequestList
            ProtocolIE-Field
              id: id-QoSFlowSetupRequestList (136)
              criticality: reject (0)
              value
                QoSFlowSetupRequestList: 1 item
                  Item 0
                    QoSFlowSetupRequestItem
                      qosFlowIdentifier: 1
                      qosFlowLevelQoSParameters
                        qosCharacteristics: nonDynamic5QI (0)
                          nonDynamic5QI
                            fiveQI: 9
                        allocationAndRetentionPriority
                          priorityLevelARP: 10
                          pre-emptionCapability: shall-not-trigger-pre-emption (0)
                          pre-emptionVulnerability: not-pre-emptable (0)
          Item 3: id-UEAggregateMaximumBitRate
            ProtocolIE-Field
              id: id-UEAggregateMaximumBitRate (110)
              criticality: ignore (1)
              value
                UEAggregateMaximumBitRate
                  uEAggregateMaximumBitRateDL: 31457280bits/s
                  uEAggregateMaximumBitRateUL: 31457280bits/s
  
```

Gambar 6. Analisa Paket pada jaringan 5G untuk melihat alokasi profil

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, 5G Core berhasil mendeteksi koneksi *session* yang berasal dari UE eMBB imsi 510100000000001 dialokasikan ke slice SST: 01 , SD:000001. Setelah berhasil menentukan slice, 5G memberi kan profil pada UE bahwa maksimal Bandwith yang bisa digunakan ada 30Mbps, dengan Level QoS *Clasification Identifier* 9 (Medium).

3.2 Uji kualitas layanan

Pada tahap akhir ini, dilakukan uji koneksi dan kecepatan reliabilitas pada Slice eMBB, mMTC, URLLC. Kami telah dengan seksama melaksanakan uji kualitas layanan untuk mengevaluasi dan menganalisis performa jaringan *Multi-Edge* Computing (MEC) dengan teknologi private 5G [13]. Proses pengujian dilakukan dengan menjalankan koneksi end-to-end dari UE Client ke MEC. Alat yang kami gunakan untuk pengujian adalah aplikasi qperf, dan berikut adalah hasil pengujian yang telah kami peroleh.

Tabel 1. Hasil pengujian kualitas layanan

Imsi	Kecepatan	Latensi	Pesan per detik
510100000000001	33.1 Mb/sec	207 us	63.2 /sec
510100000000002	1.1 Mb/sec	213 us	2.1 /sec
510100000000003	111 Mb/sec	238 us	211 /sec

Berdasarkan hasil pengujian, terbukti bahwa hasil yang diperoleh sesuai dengan perencanaan dan profil alokasi yang telah ditetapkan untuk slice tersebut. Uji kualitas menunjukkan tingkat kehandalan yang memadai untuk memenuhi kebutuhan dari setiap user case. Selain itu, tingkat kehandalan dapat ditingkatkan dengan cara menempatkan UPF lebih dekat dengan pengguna dan MEC Server. Penerapan jaringan 5G memungkinkan pemisahan Control Plane dan User Plane, memberikan fleksibilitas yang lebih besar dalam mengelola dan mengoptimalkan koneksi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian yang telah dilakukan pada Penelitian ini, teknologi 5G core dengan *network slicing* untuk mengklasifikasi profil pengguna berdasarkan kebutuhan use case. Hasil uji kecepatan menunjukkan bahwa jaringan 5G mencapai tingkat handal yang memadai untuk memenuhi kebutuhan setiap use case, termasuk layanan yang memerlukan waktu respons rendah seperti URLLC. Tingkat kehandalan dapat ditingkatkan dengan menempatkan UPF lebih dekat dengan pengguna dan MEC Server serta memisahkan *Control Plane* dan *User Plane*. Salah satu keunggulan implementasi teknologi ini adalah dapat dilakukan dengan biaya yang lebih hemat karena memanfaatkan solusi open source. Hal ini memberikan alternatif yang lebih terjangkau dibandingkan solusi-solusi berbayar dan memungkinkan perusahaan atau organisasi untuk mengoptimalkan penggunaan teknologi 5G core dengan *network slicing* guna meningkatkan kualitas layanan di era digital saat ini. Hasil penelitian ini berkontribusi dalam memahami penerapan teknologi 5G core dan *network slicing* serta memberikan panduan bagi industri dalam menghadapi tantangan dan kesempatan dalam mengadopsi teknologi 5G yang inovatif dan efisien.

5. Daftar Pustaka

- [1] Hassan, N., Yau, K. L. A., & Wu, C. (2019). Edge computing in 5G: A review. *IEEE Access*, 7, 127276-127289. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2938534.
- [2] Joshi, S., Rashidi-Tabrizi, A., Kour, S., Abuibaid, M., & Huang, J. S. (2022, October). 5G Deployment and Simulation Using Firecracker for Medical Application. In *International Conference on Computer Engineering and Networks* (pp. 1250-1259). Singapore: Springer Nature Singapore. DOI: 10.1007/978-981-19-6901-0_131.
- [3] Kourtis, M. A., Sarlas, T., Anagnostopoulos, T., Kukliński, S., Tomaszewski, L., Wierzbicki, M., ... & Koumaras, H. (2021). Network slicing for 5G edge services. *Internet Technology Letters*, 4(6), e289. DOI: 10.1002/itl2.289.
- [4] Barakabitze, A. A., Ahmad, A., Mijumbi, R., & Hines, A. (2020). 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges. *Computer Networks*, 167, 106984.
- [5] Shorov, A. (2019, January). 5G testbed development for network slicing evaluation. In *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)* (pp. 39-44). IEEE. DOI: 10.1109/EIconRus.2019.8656861.
- [6] Baktayan, A., AlGabri, M., & Alhomdy, S. (2018). Fog computing for network slicing in 5G networks: an overview. *Journal of Telecommunications System & Management*, 172, 2167-0919. DOI: 10.4172/2167-0919.1000172.
- [7] Shinde, S. S., Marabissi, D., & Tarchi, D. (2021). A network operator-biased approach for multi-service network function placement in a 5G network slicing architecture. *Computer Networks*, 201, 108598. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108598.
- [8] Han'guk T'ongsin Hakhoe, IEEE Communications Society, Denshi Johō Tsūshin Gakkai (Japan). Tsūshin Sosaieti, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, "ICTC 2019: the 10th International Conference on ICT Convergence: 'ICT Convergence Leading the Autonomous Future': October 16-18, 2019, Ramada Plaza Hotel, Jeju Island, Korea," in *Multi-access Edge Computing in 5G Network Slicing: Opportunities and Challenges*, 2019, pp. 1–30.

- [9] Su, R., Zhang, D., Venkatesan, R., Gong, Z., Li, C., Ding, F., ... & Zhu, Z. (2019). Resource allocation for network slicing in 5G telecommunication networks: A survey of principles and models. *IEEE Network*, 33(6), 172-179. DOI: 10.1109/MNET.2019.1900024.
- [10] CNahum, C. V., Pinto, L. D. N. M., Tavares, V. B., Batista, P., Lins, S., Linder, N., & Klautau, A. (2020). Testbed for 5G connected artificial intelligence on virtualized networks. *IEEE Access*, 8, 223202-223213. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043876.
- [11] Kim, K. J., Liu, H., Wen, M., Tsiftsis, T. A., Orlik, P. V., & Poor, H. V. (2022). QR decomposition-based cyclic prefixed single-carrier transmissions for cooperative communications: Concepts and research landscape. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. DOI: 10.1109/JSTSP.2021.3137669.
- [12] Maman, M., Calvanese-Strinati, E., Dinh, L. N., Hausteijn, T., Keusgen, W., Wittig, S., ... & Wang, T. Y. (2021). Beyond private 5G networks: applications, architectures, operator models and technological enablers. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021(1), 1-46. DOI: 10.1186/s13638-021-02067-2.
- [13] Abbas, K., Khan, T. A., Afaq, M., & Song, W. C. (2021). Network slice lifecycle management for 5g mobile networks: An intent-based networking approach. *IEEE Access*, 9, 80128-80146. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3084834.
- [14] "ETSI - Third Generation Partnership Project (3GPP) | 3GPP Standards." <https://www.etsi.org/committee/1418-3gpp> (accessed May 18, 2023).
- [15] Mu, N., Gong, S., Sun, W., & Gan, Q. (2020, October). The 5G MEC applications in smart manufacturing. In *2020 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE)* (pp. 45-48). IEEE. DOI: 10.1109/EDGE50951.2020.00014.
- [16] Arteaga, C. H. T., Ordoñez, A., & Rendon, O. M. C. (2020). Scalability and performance analysis in 5G core network slicing. *Ieee Access*, 8, 142086-142100. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3013597.
- [17] Pham, Q. V., Fang, F., Ha, V. N., Piran, M. J., Le, M., Le, L. B., ... & Ding, Z. (2020). A survey of multi-access edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art. *IEEE access*, 8, 116974-117017. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001277.
- [18] Filali, A., Abouaomar, A., Cherkaoui, S., Kobbane, A., & Guizani, M. (2020). Multi-access edge computing: A survey. *IEEE Access*, 8, 197017-197046. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3034136.
- [19] Escolar, A. M., Alcaraz-Calero, J. M., Salva-Garcia, P., Bernabe, J. B., & Wang, Q. (2021). Adaptive network slicing in multi-tenant 5G IoT networks. *IEEE Access*, 9, 14048-14069. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3051940.
- [20] IEEE Communications Society, "ICT for 4th Industrial Revolution! the 21st International Conference on Advanced Communications Technology : Phoenix Park, Pyeongchang, Korea (South), Feb. 17-20, 2019," in *How to Create a Network Slice? - A 5G Core Network Perspective*, 2019.