

Analisis *Quality Of Service* (Qos) Protokol Mqtt Pada Sistem *Smart Solar Panel* Berbasis Mikrokontroler Esp32

¹M. Rizal Umami, ²Julian Sahertian, ³Ratih Kumalasari Niswatin

^{1,2,3}Teknik Informatika, Universitas Nusantara PGRI Kediri

E-mail: ¹mrizalumami27@gmail.com, ²juliansahertian@unpkediri.ac.id, ³ratih@unpkediri.ac.id

Penulis Korespondens : M. Rizal Umami

Abstrak— Efisiensi panel surya sering kali menurun akibat penumpukan debu dan fluktuasi suhu. Riset ini merupakan kelanjutan dari program pengabdian masyarakat Greenhouse Kokonat Plant yang telah dipublikasikan di Jurnal Dimastara (Sinta 5). Guna meningkatkan responsivitas kendali otomatis, arsitektur komunikasi berbasis Firebase dialihkan menggunakan protokol MQTT. Kinerja jaringan nirkabel lokal diuji secara eksperimental menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan mengalirkan 527 paket data telemetri. Berdasarkan standar TIPHON dan keandalan sistem terdistribusi, pengujian difokuskan pada enam parameter QoS murni. Hasil menunjukkan rata-rata *latency* sebesar 90,6 ms (Sangat Bagus) dan *jitter* 5,4 ms (Bagus). Nilai *packet loss* mencapai 0,0%, yang menjamin parameter *availability* dan *reliability* mutlak sebesar 100%. Meskipun laju data *throughput* rata-rata berada pada kategori buruk (114,25 bps), karakteristik ini membuktikan bahwa arsitektur MQTT sangat hemat *bandwidth* dan tidak membebani trafik Wi-Fi lokal, sehingga sangat andal untuk otomatisasi pembersihan panel surya.

Kata Kunci— *Internet of Things*, MQTT, *Quality of Service*, ESP32, Panel Surya.

Abstract— Solar panel efficiency often decreases due to dust accumulation and temperature fluctuations. This research extends a community service program at the Greenhouse Kokonat Plant previously published in Jurnal Dimastara (Sinta 5). To improve automated control responsiveness, the Firebase-based communication architecture was migrated to the MQTT protocol. Local wireless network performance was experimentally tested using an ESP32 microcontroller streaming 527 telemetry data packets. Based on TIPHON and distributed system reliability standards, evaluation focused on six pure QoS parameters. Results showed an average latency of 90.6 ms (Very Good) and jitter of 5.4 ms (Good). Packet loss reached 0.0%, guaranteeing 100% absolute availability and reliability. Although the average throughput data rate fell into the poor category (114.25 bps), this characteristic proves the MQTT architecture is highly bandwidth-efficient and avoids overloading local Wi-Fi traffic, ensuring reliable solar panel cleaning automation.

Keywords— *Internet of Things*, MQTT, *Quality of Service*, ESP32, Solar Panel.

This is an open access article under the CC BY-SA License.



I. PENDAHULUAN

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) telah menjadi solusi energi terbarukan yang vital di Indonesia, baik sebagai penunjang mandiri maupun untuk daerah terpencil. Namun, kinerja operasional panel surya di lapangan sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti penumpukan debu dan kotoran yang menghalangi penyerapan radiasi matahari[1].

Pengembangan awal sistem ini telah diimplementasikan dalam program pengabdian masyarakat untuk solusi penghematan listrik di Greenhouse Kokonat Plant, yang mana rekam jejak riset tersebut telah berhasil dipublikasikan pada Jurnal Dimastara (Terakreditasi Sinta 5). Selain itu, secara fungsionalitas rekayasa, prototipe alat ini juga memiliki rekam jejak prestasi yang kuat karena telah diuji dalam ajang perlombaan ilmiah.

Namun, pada program pengabdian masyarakat mekanisme pelaporan performa daya masih memanfaatkan arsitektur basis data *cloud* Firebase[2]. Meskipun memadai untuk pelaporan data statis, Firebase memiliki karakteristik yang cenderung condong sebagai penyimpanan data ketimbang sebagai protokol kendali dua arah (*closed-loop control*) yang responsif untuk menggerakkan perangkat aktuator[3]. Pengguna masih harus memantau data secara manual dan menekan tombol eksekusi pada aplikasi, yang memicu keterlambatan tindakan perawatan saat performa daya panel mulai menurun[4].

Sebagai langkah penyempurnaan, penelitian ini menerapkan protokol komunikasi MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). MQTT merupakan protokol berbasis standar ISO yang bekerja pada lapisan aplikasi dan dirancang khusus untuk komunikasi mesin-ke-mesin (M2M) pada kondisi jaringan dengan lebar pita (*bandwidth*) terbatas[5].

Tujuan utama dari artikel ini adalah menganalisis dan membedah secara langsung performansi jaringan protokol MQTT saat mentransmisikan pada sistem *Smart Solar Panel*. Evaluasi kualitas komunikasi data ini diukur secara kuantitatif mengacu pada standar internasional TIPHON dengan berfokus pada nilai *Throughput* dan *Latency*. Melalui analisis ini, diharapkan keandalan komunikasi data *real-time* dapat divalidasi guna mendukung otomasi pembersihan panel surya secara mandiri.

II. METODE

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimental berbasis metode *Research and Development* (R&D)[6]. Menggunakan objek fisik berupa prototipe mesin pembersih panel surya otomatis. Pusat kendali utama sistem menggunakan mikrokontroler berbasis *System on Chip* (SoC) ESP32. ESP32 bertugas mengumpulkan data parameter lingkungan dari blok masukan yang terdiri atas tiga sensor utama: sensor intensitas cahaya BH-1750 (satuan Lux)[7], sensor suhu DHT-11 (satuan °C)[8], dan *Voltage Sensor* (satuan Volt)[9].

Data yang telah diakuisisi oleh sensor kemudian dikemas ke dalam format *JavaScript Object Notation* (JSON) dengan kapasitas paket data konisten sebesar 128 Byte (1.024 bit)[10]. ESP32 bertindak sebagai *Publisher* yang mengirimkan data JSON ini menuju server MQTT Broker lokal di Ruang Robot Kota Kediri melalui jalur nirkabel dengan nama topik *smartsolar/panel/data*. Di sisi penerima, sebuah aplikasi *dashboard monitoring* komputer berbasis Python bertindak sebagai *Subscriber* yang menangkap aliran paket data secara terus-menerus[11].

Evaluasi kualitas jaringan dilakukan mengacu pada standar *Quality of Service* (QoS) menurut ketentuan TIPHON (*Telecommunications and Internet Protocol Harmonization Over Networks*)[5].

A. Setup Environment Jaringan

Arsitektur sistem diatur secara detail pada jaringan lokal tanpa enkripsi SSL tambahan untuk meminimalkan beban komputasi mikro. Konfigurasi detail *setup environment* disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Jaringan

Komponen Jaringan	Spesifikasi
Node Publisher (ESP32)	NodeMCU ESP32, Frekuensi 2.4 GHz, Framework Arduino IDE v2.3, Library PubSubClient v2.8, Jeda sampling sensor: 10000 ms
MQTT Broker Server	Eclipse Mosquitto MQTT Broker v2.0.15, Port 1883 (Non-SSL), QoS Level 0 (<i>At most once</i>).
Node Subscriber (Dashboard)	PC Desktop, Intel Core i5, RAM 16GB, OS Windows 11, Python v3.10, Library Paho-MQTT v1.6.1, GUI berbasis Tkinter.
Network Gateway	Wireless Router IEEE 802.11b/g/n, Jarak node ke gateway ± 5 meter tanpa penghalang fisik (<i>Line of Sight</i>).

B. Parameter Evaluasi Kinerja Jaringan (QoS)

Evaluasi kualitas komunikasi data diukur secara kuantitatif mengacu pada standar *Quality of Service* (QoS) menurut ketentuan TIPPHON dengan berfokus pada enam metrik utama:

1. Latency

Waktu yang dibutuhkan untuk mentransmisikan paket data dari *publisher* menuju *subscriber*.

Persamaan perhitungan *latency* adalah:

$$\text{Latency} = \text{Waktu Terima Paket} - \text{Waktu Kirim Paket} \dots\dots(1)$$

2. Throughput

Persamaan untuk menghitung *throughput* adalah:

Kapasitas lebar pita (*bandwidth*) selama proses pengiriman data paket JSON.

$$\text{Throughput} = \left(\frac{\text{Jumlah Data Diterima (bit)}}{\text{Waktu Terima Paket (s)}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

3. Jitter

Waktu tunda atau fluktuasi delay antar paket data yang diterima secara berurutan.

Persamaan perhitungan jitter adalah:

$$\text{Jitter} = \left(\frac{\text{Variasi Delay}}{\text{Waktu Terima Paket}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

4. Packet Loss

Persentase jumlah paket data yang gagal mencapai tujuan selama proses transmisi nirkabel dibandingkan dengan total seluruh paket yang dikirimkan dari *publisher*.

Persamaan perhitungan *packet loss* adalah:

$$\text{Packet Loss} = \left(\frac{\text{Waktu Terima Paket} - \text{Waktu Kirim Paket}}{\text{Waktu Terima Paket}} \times 100\% \right) \dots\dots\dots (4)$$

Sementara itu, karakteristik komunikasi *Machine-to-Machine* (M2M) pada infrastruktur IoT menuntut jaminan keberlanjutan sistem kontrol tertutup (*closed-loop control*). Oleh karena itu, evaluasi diperluas dengan mengadopsi metrik infrastruktur

berdasarkan Standar Keandalan Sistem Terdistribusi, meliputi Availability dan Reliability.

5. Availability

Metrik yang mengukur persentase kesiapan operasional jalinan koneksi *socket* TCP/IP antara ESP32 dengan MQTT Broker tanpa mengalami *downtime* sepanjang pengujian, di mana *Mean Time Between Failures* (MTBF) adalah rata-rata waktu sistem berjalan normal sebelum terjadi kegagalan koneksi, dan *Mean Time To Repair* (MTTR) adalah rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memulihkan koneksi kembali.

Persamaan perhitungan *Availability* adalah:

$$Availability = \left(\frac{MTBF}{MTBF - MTTR} \times 100\% \right) \dots \dots \dots (5)$$

6. Reliability

Arsitektur jaringan MQTT untuk menjaga stabilitas *session layer* secara kontinu tanpa mengalami *memory leak* atau kegagalan sistem (*crash*).

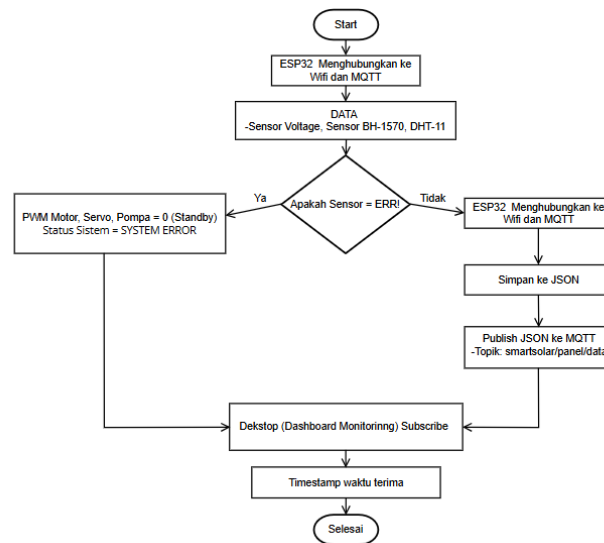
Tabel 2. Kategori Indeks Standardisasi QoS Standar TIPHON

Kategori	Latency (ms)	Throughput (bps)	Jitter (ms)	Packet Loss	Indeks
Sangat Bagus	< 150 ms	>2,1 Mbps	< 0 ms	0%	4
Bagus	150 s.d. 300 ms	700 s.d. 1200 Kbps	0 s.d 20 ms	3%	3
Sedang	300 s.d. 450 ms	338 s.d. 700 Kbps	20 s.d 50 ms	15%	2
Buruk	0 s.d. 450 ms	0 s.d. 338 Kbps	> 50 ms	25%	1

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Arsitektur Aliran Data Jaringan

Proses pengiriman pesan informasi, tahapan perhitungan metrik performa jaringan, hingga mekanisme penanganan kondisi pengecualian (*fail-safe*) dikembangkan melalui rancangan sistematis. Jalur alur komunikasi dan pengolahan data kontrol tersebut divisualisasikan melalui diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Data Jaringan

B. Implementasi Prototipe Smart Solar Panel

Pengujian eksperimental ini menggunakan objek fisik berupa prototipe mesin pembersih panel surya otomatis yang telah diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 dan blok sensor lingkungan. Bentuk fisik dari prototipe *Smart Solar Panel* yang diuji di Ruang Robot Kota Kediri ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Prototipe Smart Solar Panel

Pada Gambar 2 dirancang dengan mengintegrasikan aktuator berupa motor DC dan pompa air pembersih yang dikendalikan secara otomatis berdasarkan parameter ambang batas fisis luaran sensor lingkungan. Komunikasi telemetry data nirkabel direkam secara kontinu selama pengoperasian alat untuk menguji performa pengiriman data.

C. Hasil Pengujian Parameter Jaringan

Pengujian performansi sistem dilaksanakan melalui simulasi kontinu dengan mengalirkan data *riil* hasil rekaman parameter lingkungan di lapangan. Penyajian data hasil pengujian jaringan dan pengujian fungsional sistem kontrol diringkas menggunakan metode sampel representatif (*representative sampling*).

Tabel 3 Hasil Pengujian Kinerja Komunikasi MQTT

Waktu	No. Paket	Tegangan (V)	Suhu (°C)	Cahaya (Lux)	Latency (ms)	Throughput (bps)	Jitter (ms)	Packet Loss
Sore	Pkt_385	16.4	31.8	20.875.8	101	114.17	4.5	0.0%
	Pkt_386	16.9	32.1	20.186.7	96	114.17	5.0	0.0%
	Pkt_387	20.17	32.5	19.995.8	73	114.17	23.0	0.0%
Siang	Pkt_490	14.37	31	1.345.8	87	114.07	14.0	0.0%
	Pkt_491	22.89	31	54.612.5	66	114.07	21.0	0.0%
	Pkt_492	22.85	31.6	54.612.5	91	114.07	25.0	0.0%
Pagi	Pkt_543	20.07	27.7	1.495.8	103	114.03	12.0	0.0%
	Pkt_544	20.42	27.8	1.665.8	68	114.03	35.0	0.0%
	Pkt_545	21.83	27.8	38.547.5	70	114.03	2.0	0.0%
Rata-rata					90,6	114,25	5,4	0,0%

D. Sampel Perhitungan Metrik QoS

1. Perhitungan Latency (Sampel Paket 385)

Diketahui data *timestamp* pengiriman dari ESP32 menuju *Subscriber* Python mencatatkan selisih waktu bersih sebesar 101 ms.

$$\text{Latency} = \text{Waktu Terima Paket} - \text{Waktu Kirim Paket}$$

$$\text{Latency} = 2566101 - 2566000$$

$$\text{Latency} = 101$$

2. Perhitungan Jitter (Sampel Paket 385 s.d 387)

Jitter dihitung berdasarkan variasi delay dari paket-paket yang berurutan. Berdasarkan Tabel 3, diperoleh data penundaan yaitu:

$$\text{Jitter} = \left(\frac{\text{Variasi Delay}}{\text{Waktu Terima Paket}} \right)$$

$$\text{Jitter} = \left(\frac{28}{2} \right)$$

$$\text{Jitter} = 14$$

3. Perhitungan Throughput

Kapasitas data payload JSON yang dikirimkan secara konsisten adalah 128 Byte (1.024 bit). Laju hantaran data rata-rata riil (*Throughput*) yang tercatat pada aplikasi adalah 114,25 bps. Jika kapasitas alokasi bandwidth fungsional minimum jaringan Wi-Fi lokal diatur pada batas bawah sebesar 150 bps untuk mencegah pemborosan jalur, maka persentase efisiensinya adalah:

$$\text{Throughput} = \left(\frac{\text{Jumlah Data Diterima (bit)}}{\text{Waktu Terima Paket (s)}} \right)$$

$$\text{Throughput} = \left(\frac{539,648}{0,25} \right)$$

$$\text{Throughput} = 2.158.592$$

$$\text{Throughput} = 2.15$$

4. Perhitungan Packet Loss (Sampel Total Pengujian)

$$\text{Packet Loss} = \left(\frac{\text{Waktu Terima Paket} - \text{Waktu Kirim Paket}}{\text{Waktu Terima Paket}} \times 100\% \right)$$

$$\text{Packet Loss} = \frac{527 - 527}{527} 100\%$$
$$\text{Packet Loss} = 0,0\%$$

E. Analisis Performansi Jaringan

Data pada Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian parameter jaringan yang dianalisis menggunakan dua koridor standar. Berdasarkan standarisasi TIPHON, parameter *Latency* dengan rata-rata 90,6 ms masuk ke dalam kategori Sangat Bagus (Indeks 4) karena berada di bawah ambang batas 150 ms. Metrik *Jitter* dengan nilai rata-rata 5,4 ms diklasifikasikan ke dalam kategori Bagus (Indeks 3) karena berada di bawah batas fluktuasi 20 ms. Selain itu, keandalan pengiriman data diperkuat oleh nilai *Packet Loss* sebesar 0,0% yang menempati indeks tertinggi (Sangat Bagus), mengonfirmasi bahwa alokasi payload JSON berukuran ringkas (128 Byte) sangat optimal bagi performa transmisi nirkabel lokal di Ruang Robot Kota Kediri.

Evaluasi perluasan terhadap parameter Sistem Terdistribusi menunjukkan tingkat ketersediaan (*Availability*) jaringan yang mutlak. Melalui substitusi rekaman log data aktual yang mencatatkan 0 kali kegagalan koneksi (*zero failure rate*), nilai *Mean Time Between Failures* (MTBF) setara dengan durasi total pengujian dan nilai *Mean Time To Repair* (MTTR) bernilai 0 ms, sehingga menghasilkan nilai *Availability* sebesar 100,0%.

Capaian *Availability* yang sempurna dan didukung oleh *Packet Loss* 0,0% menjadi bukti empiris atas tingginya tingkat keandalan (*Reliability*) arsitektur IoT berbasis protokol MQTT ini. Keandalan ini menjamin bahwa sistem kontrol otomatisasi motor servo dan pompa air pembersih pada panel surya dapat mengeksekusi instruksi perawatan secara *real-time* tanpa risiko kegagalan fungsional akibat interupsi jaringan lokal.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa implementasi protokol MQTT pada sistem *Smart Solar Panel* berbasis ESP32 memenuhi kriteria keandalan komunikasi data secara *real-time*. Pengujian terhadap 527 paket data menunjukkan performa jaringan yang sangat responsif dengan rata-rata nilai latency sebesar 90,6 ms (Kategori Sangat Bagus). Integrasi metrik pengujian baru membuktikan kualitas transmisi yang sangat stabil dengan rata-rata Jitter sebesar 5,4 ms (Kategori Bagus) dan Packet Loss sebesar 0,0%, yang mengonfirmasi parameter *Availability* dan *Reliability* tingkat tertinggi (100%) pada jaringan lokal.

Berdasarkan hasil konversi ke tabel standarisasi, laju data rata-rata *throughput* sistem yang berada di angka 114,25 bps ini secara tekstual memang masuk ke dalam kategori Buruk karena berada jauh di bawah ambang batas 338 Kbps. Meskipun hasilnya sekilas terlihat jelek untuk ukuran jaringan komputer umum, namun dalam implementasi perangkat *Internet of Things* (IoT) berbasis telemetri mikro, hasil ini justru memiliki interpretasi fungsional yang positif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, khususnya Program Studi Teknik Informatika Universitas Nusantara PGRI Kediri, yang telah menyediakan fasilitas laboratorium serta ruang robotika sehingga penelitian prototipe *Smart Solar Panel* ini dapat diselesaikan dengan baik. Apresiasi dan rasa terima kasih juga penulis tujukan kepada Bapak/Ibu dosen pembimbing yang senantiasa memberikan arahan,

bimbingan, serta saran konstruktif dari tahap perancangan arsitektur jaringan hingga evaluasi performansi sistem komunikasi MQTT ini selesai diuji. Tidak lupa, penulis berterima kasih kepada rekan-rekan tim riset dan semua pihak di Ruang Robot Kota Kediri yang telah meluangkan waktu serta tenaga untuk membantu proses akuisisi dan perekaman data sensor aktual di lapangan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. T. Afif and A. Martin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," *Spark J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 64–70, 2022, doi: 10.47080/spark.v13i2.2356.
- [2] R. Helilintar, I. N. Farida, J. Sahertian, I. K. Ramadhanu, M. C. Anwar, and M. R. Umami, "Pemanfaatan Sistem Panel Surya Berbasis Iot Sebagai Solusi Alternatif Penghematan Listrik Di Green House Kokonat Plant," *J. Pengabd. Masy. Nusantara*, vol. 5, no. 1, pp. 277–289, Dec. 2025, doi: 10.29407/dimastara.v5i1.27673.
- [3] A. Khairunnisah, A. D. Tarigan, and Rahmaniari, "Analisis Pelaksanaan Penertiban Pemakaian Tenaga Listrik (P2TL) Sebagai Upaya Penekanan Susut Non Teknis Di PT PLN (Persero) ULP Koba," *Elkom J. Elektron. dan Komput.*, vol. 17, no. 2, pp. 426–430, Dec. 2024, doi: 10.51903/elkom.v17i2.1971.
- [4] A. S. K. Reddy, Z. Jahnavi, V. V. V. Reddy, P. G. Reddy, and E. Raviteja, "IOT Based DC Motor Speed and Direction Control," *Int. J. Sci. Res. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 707–714, Apr. 2024, doi: 10.32628/IJSRST24112110.
- [5] B. Mishra and A. Kertesz, "The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 201071–201086, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035849.
- [6] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta, 2022.
- [7] D. M. Rahma *et al.*, "Aplikasi Sensor Cahaya (BH1750) pada Tanaman Anggrek menggunakan ESP 32 Berbasis IoT," *Telekontran J. Ilm. Telekomun. Kendali dan Elektron. Terap.*, vol. 13, no. 1, pp. 10–18, Apr. 2025, doi: 10.34010/telekontran.v13i1.14476.
- [8] A. Y. Setiawati and M. Haryanti, "Evaluasi Akurasi Sensor Suhu Digital untuk Aplikasi Pemantauan Suhu Ruangan Penyimpanan: Studi Indoor dan Outdoor," *J. Teknol. Ind.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–6, Dec. 2025, doi: 10.35968/jti.v14i1.1712.
- [9] U. Achlison, J. T. Santoso, K. Rozikin, and F. Diapoldo, "Analisis Hasil Ukur Sensor Arus dan Tegangan untuk Memantau Daya Listrik berbasis Microcontroller," *J. Ilm. Elektron. Komput.*, vol. 16, no. 1, pp. 225–229, 2023, doi: 10.51903/elkom.v16i1.1193.
- [10] R. F. Pratama, R. S. R. Wicaksono, and A. N. Pramudhita, "Perancangan Dan Implementasi Protokol Mqtt Pada Sistem Parkir Cerdas Berbasis Iot," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 11, no. 3, pp. 475–483, 2023, doi: 10.23960/jitet.v11i3.3191.
- [11] M. Ilham, A. Avorizano, S. Kom, and M. Kom, "Real-Time Computer Performance Monitoring and Computer Information Systems Through Python-Based Gui".