

Rancangan Monitoring Konsumsi Bahan Bakar Genset dengan Dual Flow Meter di Bandara Ngurah Rai

Sandi Nugroho¹ Yenni Arnas² IGK. Rai Darmaja³

Program Studi Diploma IV Teknik Listrik Bandara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Tangerang, Banten, Indonesia^{1,2,3}

Email: sandusanu@gmail.com¹ yenni.arnas@ppicurug.ac.id² rdarmaja@gmail.com³

Abstrak

Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai Bali mengandalkan 14 unit genset sebagai sumber daya listrik cadangan, tetapi konsumsi bahan bakar minyak (BBM) masih dipantau secara manual melalui pembacaan level tangki yang digunakan bersama oleh beberapa unit. Pada periode November 2025–Februari 2026, estimasi pemakaian BBM sebesar 3.712–4.176 liter/bulan berselisih sekitar 1.700–1.840 liter/bulan terhadap penurunan stok terukur, sehingga konsumsi aktual per unit tidak dapat diketahui. Penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring konsumsi BBM untuk 10 unit genset berkonfigurasi *dual line* di Gedung MPH 2 menggunakan metode *dual flow meter* serta menyusun dokumen *Detail Engineering Design* (DED), *Bill of Quantity* (BOQ), dan Rencana Kerja dan Syarat (RKS). Penelitian menggunakan pendekatan rekayasa (*engineering design*) yang dipilih karena pemasangan langsung pada fasilitas kritis bandara berisiko terhadap kontinuitas kelistrikan. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan, dokumentasi laporan BBM, dan studi literatur, kemudian rancangan diverifikasi melalui perhitungan teoretis serta simulasi OpenPLC Runtime dan Node-RED. Konsumsi aktual dihitung dari selisih debit jalur *supply* dan *return* ($Q_{\text{aktual}} = Q_{\text{supply}} - Q_{\text{return}}$) menggunakan *oval gear flow meter*, dua PLC industri redundan, dan komunikasi Modbus RTU/RS-485. Hasil analisis menunjukkan galat gabungan instrumen 0,71% pada kondisi nominal dan 1,71–2,21% pada kondisi terburuk, estimasi waktu pembaruan data 0,5–0,8 detik, target keandalan komunikasi $\geq 98\%$, serta logika perhitungan dan status sistem yang bekerja sesuai rancangan pada simulasi. Rancangan ini dapat dijadikan dasar implementasi, dengan rekomendasi uji purwarupa pada satu unit genset, kalibrasi *K-factor* berkala, dan kajian integrasi *read-only* dengan SCADA kelistrikan bandara.

Kata Kunci: *Dual Flow Meter*, Genset, Konsumsi Bahan Bakar, Modbus RTU, PLC Redundan



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai Bali beroperasi selama 24 jam sehingga kontinuitas suplai listrik menjadi prasyarat operasional. Suplai utama berasal dari PLN, sedangkan gangguan teknis maupun pemadaman diantisipasi dengan 14 unit genset *standby* yang tersebar di tiga wilayah beban, 11 unit di antaranya berada di Gedung *Main Power House* (MPH) 2 (NFPA 110, 2022). Seluruh unit menjalani *running test* setiap Senin dan Kamis selama 15 menit per sesi, dengan estimasi konsumsi BBM operasi siaga 3.712 liter/bulan pada Desember 2025–Februari 2026 dan 4.176 liter pada November 2025. Pada kondisi berbeban, konsumsi jauh lebih tinggi: saat gangguan penyulang PLN pada 27 Juni 2026, tujuh unit genset Cummins mengonsumsi 1.718 liter selama 1 jam 30 menit atau rata-rata 1.145,3 liter/jam. Ketersediaan BBM dipasok oleh enam kelompok tangki berkapasitas total 167.300 liter, dan satu tangki umumnya melayani beberapa genset sekaligus; tangki 28.000 liter, misalnya, melayani enam unit (Yanmar 1–3 dan Cummins 5–7), sedangkan tangki 114.000 liter melayani Cummins 1–4. Karena monitoring masih mengandalkan indikator level tangki dan pencatatan manual oleh teknisi, penurunan level tidak dapat menunjukkan kontribusi konsumsi setiap unit secara individual. Perbandingan data November 2025–Februari 2026 menunjukkan penurunan stok terukur hanya sekitar 1.872–2.026 liter/bulan, berselisih 1.700–1.840

liter/bulan terhadap estimasi, sehingga rekonsiliasi stok dan perencanaan pengisian BBM belum dapat dilakukan secara optimal.

Digitalisasi fasilitas pendukung merupakan bagian dari konsep *smart airport*, yakni pemanfaatan teknologi digital dan *Internet of Things* (IoT) untuk pengumpulan data, pemantauan kondisi, dan pengambilan keputusan berbasis informasi (Anggraeni & Novianty Z, 2025; Bouyakoub dkk., 2017). Penelitian tentang monitoring bahan bakar genset telah dilakukan, antara lain monitoring konsumsi elektronik pada genset BTS (Kamza & Erlina, 2023), prototipe monitoring level tangki berbasis NodeMCU (Wenas, 2021), rancang bangun *fuel flow meter* (Dianastiti dkk., 2022), kombinasi sensor ultrasonik dan *flow meter* (Sutarna dkk., 2023), serta monitoring konsumsi BBM berbasis IoT (Andhika dkk., 2025). Pada sisi pengukuran, metode *dual flow meter* menghitung konsumsi aktual sebagai selisih aliran jalur *supply* dan *return*, dengan akurasi sistem yang ditentukan oleh gabungan galat kedua instrumen (KRAL GmbH, 2019; Prasetyo dkk., 2023). Pada sisi akuisisi dan penyajian data, Modbus RTU/RS-485 telah terbukti andal pada sistem SCADA industri dengan keberhasilan respons 98,5% (Sahrin dkk., 2025; Tosin, 2021; Zakaria dkk., 2020), Node-RED banyak digunakan sebagai platform dasbor monitoring (Adhe Akbar Azanni & Mulki Indana Zulfa, 2025; Susanto & Pradana, 2022), dan OpenPLC menyediakan lingkungan simulasi PLC yang sesuai standar IEC 61131-3 (Alves & Morris, 2018).

Meskipun demikian, penelitian terdahulu umumnya berskala prototipe berbasis mikrokontroler, mengukur level tangki atau hanya satu jalur aliran, dan tidak menghasilkan dokumen teknis yang siap dijadikan dasar pengadaan. Belum ditemukan kajian yang menyusun rancangan terperinci sistem monitoring konsumsi BBM genset diesel berkapasitas besar dengan komponen kelas industri, yaitu *oval gear flow meter*, PLC redundan, dan Modbus RTU/RS-485, yang diverifikasi melalui analisis propagasi galat dan simulasi OpenPLC, khususnya pada lingkungan bandar udara dengan tangki yang digunakan bersama. Celah ini penting karena implementasi langsung pada fasilitas kritis tanpa rancangan yang dapat dipertanggungjawabkan berisiko mengganggu kontinuitas kelistrikan bandara (Apdillah dkk., 2026; NFPA 110, 2022). Kebaruan penelitian ini terletak pada rancangan terintegrasi yang menempatkan pengukuran konsumsi per unit, arsitektur kendali redundan, dan penyajian waktu nyata dalam satu paket dokumen DED, BOQ, dan RKS yang siap diimplementasikan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan (1) merancang sistem monitoring konsumsi bahan bakar untuk 10 unit genset berkonfigurasi *dual line* di Gedung MPH 2 menggunakan metode *dual flow meter*, dua PLC industri dalam konfigurasi redundan, dan jaringan Modbus RTU/RS-485; serta (2) menyusun DED, BOQ, dan RKS sebagai dasar implementasi dan pengembangan integrasi dengan SCADA kelistrikan bandara.

Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Penulis/ Tahun	Judul	Tujuan	Metode	Hasil	Kontribusi dan relevansi
1	Kamza & Erlina (2023)	Sistem Monitoring Konsumsi Bahan Bakar Generator Set (Genset) pada Base Transceiver Station (BTS)	Memantau konsumsi BBM genset secara elektronik	Rancang bangun sistem monitoring	Pencatatan manual digantikan monitoring elektronik	Menegaskan kebutuhan monitoring otomatis; belum memakai <i>dual flow meter</i> , komponen industri, maupun DED
2	Wenas (2021)	Prototipe Sistem Monitoring Tangki Bahan Bakar Genset Berbasis Aplikasi Blynk dengan NodeMCU ESP8266	Memantau level stok BBM tangki genset	Prototipe NodeMCU ESP8266 dan Blynk	Level stok tangki terpantau otomatis	Mengukur level, bukan aliran; menjadi pembanding bahwa level tangki tidak memisahkan konsumsi per unit

3	Dianastiti dkk. (2022)	Rancang Bangun Fuel Flow Meter untuk Mengukur Konsumsi Bahan Bakar Mesin Sepeda Motor Empat Langkah	Mengukur konsumsi BBM secara langsung	Rancang bangun <i>fuel flow meter</i>	Konsumsi BBM terukur melalui aliran	Mendukung pengukuran berbasis aliran; skala mesin kecil, bukan <i>flow meter</i> industri
4	Sutarna dkk. (2023)	Implementasi Sensor Ultrasonik dan Flow Meter pada Prototipe Pengisi Bahan Bakar Mini	Mengombinasikan sensor level dan <i>flow meter</i>	Prototipe sensor ultrasonik dan <i>flow meter</i>	Data level dan aliran saling melengkapi	Skala prototipe; tidak diterapkan pada genset industri
5	Andhika dkk. (2025)	Sistem Monitoring Konsumsi Bahan Bakar Berbasis IoT	Memantau konsumsi BBM secara otomatis dan terhubung	Sistem monitoring berbasis IoT	Konsumsi BBM terpantau tanpa pencatatan manual	Topik paling dekat; belum memakai <i>dual flow meter</i> , PLC industri, dan DED
6	Sahrin dkk. (2025)	Implementasi SCADA pada Sistem Monitoring Mikrogrid Menggunakan Protokol Modbus	Menerapkan SCADA berbasis Modbus	Implementasi SCADA dengan Modbus RTU/RS-485	Keberhasilan respons 98,5%, latensi rata-rata 210 ms	Acuan target keandalan komunikasi $\geq 98\%$; domain mikrogrid, bukan konsumsi BBM
7	Alves & Morris (2018)	OpenPLC: An IEC 61131-3 Compliant Open Source Industrial Controller for Cyber Security Research	Mengembangkan PLC <i>open-source</i> sesuai IEC 61131-3	Pengembangan perangkat lunak PLC	OpenPLC mendukung IEC 61131-3 dan Modbus secara <i>native</i>	Dasar penggunaan OpenPLC sebagai alat verifikasi logika kendali

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa (*engineering design*) dengan pendekatan deskriptif kuantitatif. Luaran penelitian berupa rancangan sistem beserta dokumen DED, BOQ, dan RKS, bukan purwarupa fisik. Pendekatan ini dipilih karena pemasangan instrumen secara langsung pada genset yang beroperasi di fasilitas kritis berisiko terhadap kontinuitas kelistrikan bandara, sedangkan perangkat keras PLC dan jaringan RS-485 fisik tidak tersedia pada tahap penelitian. Kelayakan rancangan karena itu diverifikasi melalui perhitungan matematis dan simulasi perangkat lunak.

Penelitian dilaksanakan di Gedung MPH 2 Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai Bali yang dikelola PT Angkasa Pura Indonesia, dengan pengumpulan data pada November 2025 sampai Juni 2026. Tahap desain, simulasi, dan penyusunan dasbor dilakukan di Politeknik Penerbangan Indonesia Curug pada semester VIII tahun akademik 2025/2026. Objek rancangan adalah 10 unit genset bersistem bahan bakar bertekanan dengan jalur *supply* dan *return* terpisah (Tabel 1). Genset *Mobile* Perkins 500 kVA di Gedung MPH 2 serta genset di Area Selatan dan Gedung Wisti Sabha Lama tidak termasuk objek karena konfigurasi sistem bahan bakarnya berbeda.

Tabel 1. Objek Penelitian: Genset Berkonfigurasi Dual Line di Gedung MPH 2

No	Merek/Tipe Genset	Kapasitas (kVA)	Jumlah Unit
1	Cummins	2.750	3
2	Yanmar	2.000	3
3	Cummins	2.000	2
4	Cummins (AFL)	1.250	1
5	Cummins (Hotel)	1.250	1
	Total		10

Data dikumpulkan melalui tiga teknik. Observasi lapangan dilakukan pada ruang genset, tangki BBM, serta jalur pipa *supply* dan *return* untuk menentukan titik dan ukuran pemasangan *flow meter*. Dokumentasi mencakup rekapitulasi pemakaian BBM bulanan November 2025–Februari 2026, pencatatan stok tangki mingguan pada periode yang sama, serta rekap harian stok dan operasi genset Juni 2026. Studi literatur digunakan untuk menetapkan dasar teknis, meliputi klasifikasi genset ISO 8528-1 (Kaderbhai, 2014), spesifikasi Modbus (Modbus Organization, 2012; Modbus.org, 2006), standar RS-485, dan pedoman ketidakpastian pengukuran (Joint Committee for Guides in Metrology, 2026). Tahapan penelitian terdiri atas identifikasi kebutuhan dan studi literatur, perancangan perangkat keras (instalasi *flow meter*, PLC redundan, dan jaringan komunikasi) dan perangkat lunak (program PLC dan dasbor), verifikasi melalui perhitungan dan simulasi, serta penyusunan DED, BOQ, dan RKS (Gambar 1). Konsumsi aktual, akumulasi volume, galat gabungan, dan waktu siklus pembaruan data dihitung dengan persamaan berikut.

$$Q_{\text{aktual}} = Q_{\text{supply}} - Q_{\text{return}} \quad (1)$$

$$V_{\text{total}} = \sum (Q_{\text{aktual},i} \times \Delta t) \quad (2)$$

$$\delta Q = \sqrt{(\delta_1^2 + \delta_2^2)} \quad (3)$$

$$T_{\text{siklus}} = N \times (L_{\text{frame}} / \text{baud rate} + t_{\text{respons}}) \quad (4)$$

Q_{supply} dan Q_{return} adalah debit bahan bakar pada jalur *supply* dan *return* (L/jam), V_{total} adalah volume terakumulasi selama sesi operasi (liter), Δt adalah interval pencuplikan (jam), δ_1 dan δ_2 adalah galat instrumen masing-masing *flow meter* (%), dan N adalah jumlah *node* pada bus komunikasi. Persamaan (3) merupakan metode akar jumlah kuadrat (*root-sum-square*) untuk variabel independen yang galatnya tidak saling berkorelasi (Joint Committee for Guides in Metrology, 2026; Prasetyo dkk., 2023).

Verifikasi logika menggunakan OpenPLC Runtime v3 dengan program *Structured Text* sesuai IEC 61131-3, sedangkan dasbor dibangun dengan Node-RED Dashboard 2.0 dan *node-red-contrib-modbus* dengan interval *polling* 1 detik. Karena jaringan RS-485 fisik tidak tersedia, OpenPLC dikonfigurasi sebagai *server* Modbus TCP dengan pemetaan register yang identik dengan rancangan. Tiga skenario diuji, yaitu *standby* (tanpa aliran), beban parsial, dan beban penuh. Keberhasilan rancangan dinilai terhadap enam kriteria: akurasi, waktu pembaruan data, keandalan komunikasi, kapasitas data, ketersediaan nilai konsumsi per unit, dan kompatibilitas SCADA/HMI. Hasil simulasi dimaknai sebagai verifikasi fungsi logika, bukan bukti performa perangkat keras.



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi Perancangan Sistem

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Kondisi awal monitoring konsumsi BBM

Penelitian ini dilakukan pada 10 unit genset di Gedung MPH 2 Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai Bali. Rekapitulasi data operasional menunjukkan bahwa estimasi pemakaian BBM berbasis asumsi beban tidak sesuai dengan penurunan stok hasil pencatatan tangki, sebagaimana diringkas pada Tabel 2.

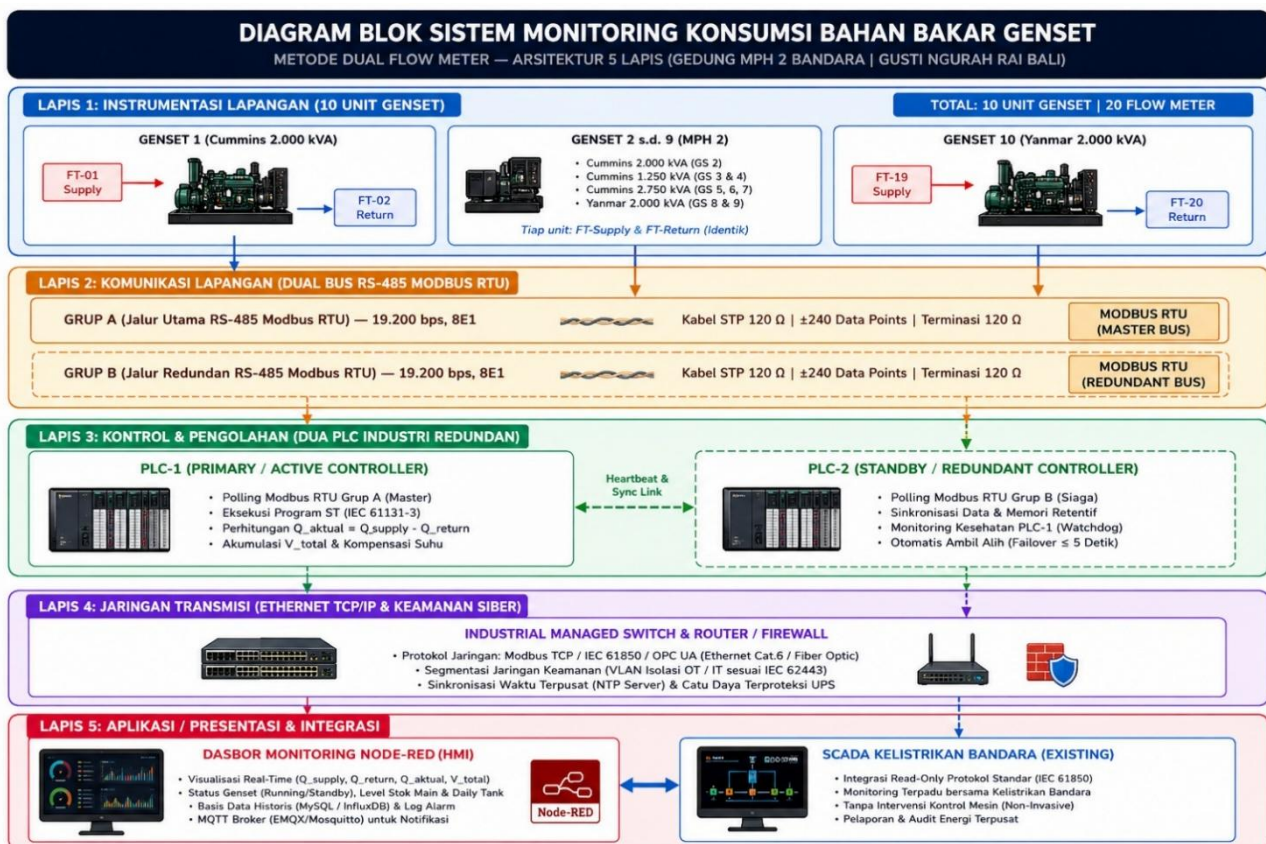
Tabel 2. Perbandingan Estimasi Pemakaian dan Pencatatan Stok BBM

No	Parameter	Nilai
1	Estimasi pemakaian BBM operasi siaga 14 genset, November 2025	4.176 liter/bulan
2	Estimasi pemakaian BBM operasi siaga 14 genset, Desember 2025–Februari 2026	3.712 liter/bulan
3	Penurunan stok terukur (pencatatan mingguan)	±468 liter/minggu (1.872–2.026 liter/bulan)
4	Selisih estimasi terhadap stok terukur	±1.700–1.840 liter/bulan
5	Konsumsi 7 genset Cummins saat gangguan PLN, 27 Juni 2026	1.718 liter dalam 1,5 jam (1.145,3 liter/jam)

Selisih pada Tabel 2 menunjukkan bahwa metode estimasi belum menggambarkan konsumsi pada kondisi operasi nyata. Data 27 Juni 2026 juga hanya tersedia sebagai konsumsi gabungan tujuh unit, sehingga konsumsi setiap unit tidak dapat dipisahkan. Kondisi ini menjadi dasar kebutuhan pengukuran konsumsi aktual per unit.

Arsitektur sistem hasil rancangan

Sistem dirancang dalam lima lapis (Gambar 2). Lapis 1 adalah instrumentasi lapangan berupa sepasang *oval gear flow meter* pada setiap genset, yaitu FT-01 pada jalur *supply* dan FT-02 pada jalur *return*, sehingga total terdapat 20 *flow meter* berukuran DN15/DN20 untuk rentang aliran 5–20 L/menit, masing-masing dilengkapi *strainer* di hulu dan *isolating valve* di hulu-hilir. Lapis 2 adalah komunikasi lapangan Modbus RTU/RS-485 topologi *multidrop* yang dibagi menjadi dua grup independen: Grup A menuju PLC-1 (*primary*) dan Grup B menuju PLC-2 (*redundant*), sehingga kedua PLC dapat mengakses data seluruh 10 pasang *flow meter*. Lapis 3 adalah dua PLC industri dalam konfigurasi *warm standby* dengan mekanisme *heartbeat* dan target waktu pengalihan ≤ 5 detik; PLC membaca Q_{supply} dan Q_{return} , menghitung Q_{aktual} , mengakumulasi V_{total} , dan menyimpan data penting pada memori retentif. Lapis 4 adalah jaringan Ethernet (Modbus TCP, IEC 61850, atau OPC UA) menuju *managed switch* industri, *router/firewall* untuk segmentasi OT/IT, dan *server* NTP. Lapis 5 adalah dasbor Node-RED sebagai HMI yang dilengkapi basis data historis (MySQL/InfluxDB) dan *broker* MQTT untuk notifikasi. Kapasitas rancangan ditetapkan sekitar 240 titik data, yaitu 20 titik untuk setiap genset ditambah 40 titik sistem. Seluruh arsitektur hanya menjalankan fungsi monitoring dan tidak mengirim perintah kendali ke genset.



Gambar 2. Arsitektur Lima Lapis Sistem Monitoring Konsumsi BBM Genset

Sistem mengevaluasi tiga kondisi operasi. Pada kondisi Normal, kedua *flow meter* mengukur aliran secara simultan dan Q_{aktual} ditampilkan dengan indikator hijau berkedip. Pada kondisi *Standby*, Q_{supply} , Q_{return} , dan Q_{aktual} bernilai nol, indikator berwarna abu-abu, dan V_{total} tidak bertambah. Kondisi Alarm aktif apabila komunikasi Modbus terputus atau pembacaan tidak wajar, misalnya Q_{return} lebih besar daripada Q_{supply} . Data setiap genset dipetakan pada register Modbus sebagaimana Tabel 3.

Tabel 3. Pemetaan Register Modbus PLC per Unit Genset

Alamat Register	Type	Variabel	Satuan	Keterangan
40001–40002	Holding (32-bit)	Q_{supply}	0,01 L/menit	Laju aliran jalur <i>supply</i> (FT-01)
40003–40004	Holding (32-bit)	Q_{return}	0,01 L/menit	Laju aliran jalur <i>return</i> (FT-02)
40005–40006	Holding (32-bit)	Q_{aktual}	0,01 L/menit	Konsumsi aktual = FT-01 – FT-02
40007–40008	Holding (32-bit)	V_{total}	0,01 liter	Akumulasi konsumsi sesi berjalan
40009	Holding (16-bit)	Status genset	–	0 = OFF; 1 = ON ($Q_{\text{aktual}} > \text{ambang}$)
40010	Holding (16-bit)	Status Modbus	–	<i>Heartbeat counter</i> setiap siklus <i>scan</i>

Catatan: pembacaan menggunakan *Function Code 03 (Read Holding Registers)* dengan pengalamatan 1-based.

Analisis performa dan hasil simulasi

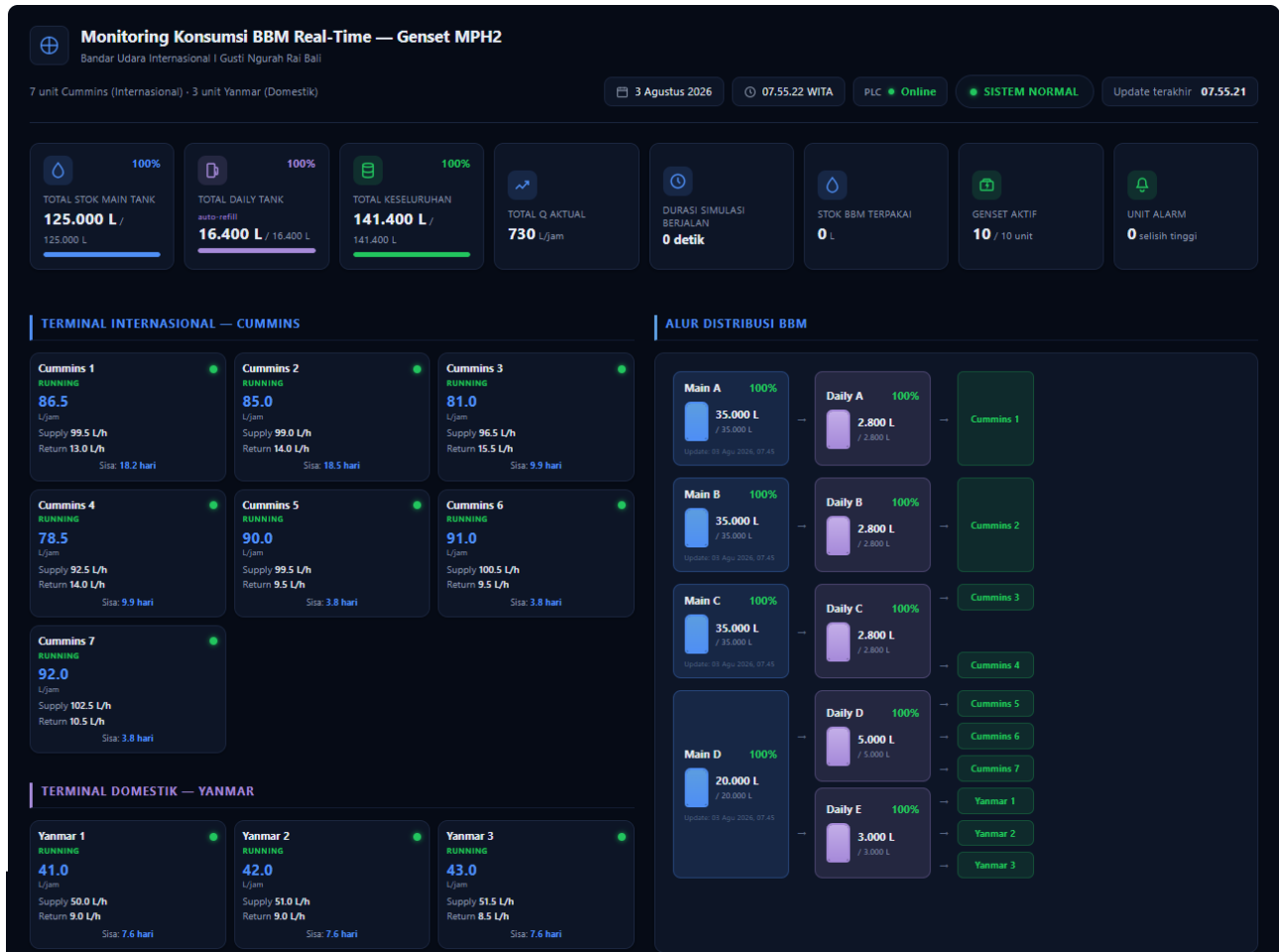
Dengan akurasi *oval gear flow meter* $\pm 0,5\%$ untuk setiap jalur, persamaan (3) menghasilkan galat gabungan $\delta Q = \sqrt{(0,5^2 + 0,5^2)} \approx 0,71\%$ pada kondisi nominal. Variasi *K-factor* antarunit dan gelembung udara pada jalur bahan bakar berpotensi menambah galat 1–1,5%, sehingga galat pada kondisi terburuk diestimasi 1,71–2,21%. Waktu pembaruan data diestimasi 0,5–0,8 detik berdasarkan konfigurasi register dasar. Beban PLC tergolong ringan karena fungsi utamanya terbatas pada pembacaan register, perhitungan selisih, akumulasi, dan pengelolaan status. Rekapitulasi pencapaian terhadap enam kriteria keberhasilan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kriteria Keberhasilan dan Hasil Evaluasi Rancangan

No	Kriteria	Target	Hasil Analisis/Simulasi	Status
1	Akurasi Q_{aktual}	$\leq 2\%$	0,71% (nominal); 1,71–2,21% (terburuk)	Terpenuhi pada kondisi nominal
2	Waktu pembaruan data 10 genset	≤ 5 detik	Estimasi 0,5–0,8 detik	Terpenuhi (teoretis)
3	Keandalan komunikasi	$\geq 98\%$	Mengacu praktik instalasi RS-485 dengan keberhasilan respons 98,5%	Diperkirakan terpenuhi
4	Kapasitas data	≈ 240 titik	$(10 \times 20) + 40$ titik dimasukkan dalam DED	Terpenuhi pada rancangan
5	Nilai konsumsi per unit	Q_{aktual} dan V_{total} tersedia	Tersedia dan terakumulasi pada simulasi	Terpenuhi (simulasi)
6	Kompatibilitas SCADA/HMI	<i>Read-only</i> , tanpa intervensi kendali	Subsistem monitoring terpisah dari fungsi kendali	Terpenuhi pada rancangan

Pada simulasi, program *Structured Text* yang dijalankan di OpenPLC Runtime menghasilkan nilai Q_{aktual} dan V_{total} yang sesuai dengan persamaan (1) dan (2) untuk seluruh

skenario masukan. Node-RED sebagai *client* Modbus membaca register setiap 1 detik dan menampilkan nilai yang konsisten dengan hasil perhitungan PLC. Dasbor menampilkan kartu status setiap genset (Q_{supply} , Q_{return} , Q_{aktual}), ringkasan total konsumsi, unit aktif, unit alarm, stok *main tank* dan *daily tank*, serta log alarm (Gambar 3). Saat skenario *standby*, Q_{supply} dan Q_{return} bernilai nol dan status tampil *Standby*; ketika beban diaktifkan, Q_{aktual} terhitung sesuai selisih kedua debit dan status berubah menjadi Normal.



Gambar 3. Dasbor Node-RED Monitoring Konsumsi BBM Seluruh Unit Genset

Dokumen DED, BOQ, dan RKS

DED disusun dalam lima gambar teknik (DED-01 sampai DED-05) yang mengikuti lima lapis arsitektur dan mengacu pada identifikasi instrumen ISA-5.1: DED-01 instrumentasi lapangan, DED-02 komunikasi RS-485/Modbus RTU dua grup, DED-03 kontrol dan pengolahan data PLC redundan, DED-04 arsitektur jaringan, dan DED-05 aplikasi monitoring Node-RED. BOQ memuat kebutuhan instrumentasi, perangkat kendali, jaringan, perangkat lunak, instalasi, dan komisioning untuk 10 unit genset tanpa menetapkan merek. RKS memuat syarat umum, persyaratan material, instalasi, sistem kendali dan komunikasi, jadwal, perangkat lunak, pengujian dan komisioning, kriteria penerimaan, K3, serta dokumentasi serah terima.

Pembahasan

Hasil pada Tabel 2 menegaskan keterbatasan monitoring berbasis level tangki. Karena satu tangki melayani hingga enam unit, penurunan level hanya mencerminkan konsumsi gabungan, dan pembacaannya dipengaruhi getaran mesin, kemiringan permukaan bahan

bakar, serta geometri tangki. Temuan ini sejalan dengan Kamza & Erlina (2023) dan Wenas (2021) yang menyatakan bahwa pencatatan manual rawan kesalahan dan tidak dapat dilakukan secara waktu nyata. Rancangan ini menjawab masalah tersebut dengan memindahkan titik ukur dari tangki ke jalur bahan bakar setiap unit, sehingga konsumsi dapat diatribusikan per genset. Metode *single flow meter* tidak memadai karena genset objek penelitian mengembalikan sebagian bahan bakar ke tangki melalui jalur *return*; pengukuran hanya pada jalur *supply* akan menghasilkan nilai yang lebih besar daripada konsumsi aktual.

Pemilihan komponen didasarkan pada kebutuhan lingkungan industri. *Oval gear flow meter* dipilih karena akurasi tetap tinggi pada rentang 5–20 L/menit dan tidak memerlukan pipa lurus panjang, sedangkan *turbine flow meter* kehilangan linearitas pada aliran rendah yang sering terjadi saat beban parsial dan *Coriolis flow meter* sulit dibenarkan secara biaya untuk 20 unit. PLC industri dipilih dibandingkan mikrokontroler seperti ESP8266 atau ESP32 yang digunakan pada Wenas (2021) dan Andhika dkk. (2025), karena ketahanannya terhadap gangguan elektromagnetik di ruang genset, dukungan Modbus RTU sebagai *master*, dan kepatuhan pada IEC 61131-3. Konfigurasi dua PLC redundan mengikuti praktik sistem kendali kritis yang menghindari titik kegagalan tunggal (Josephlal dkk., 2021; Simion & Bira, 2023). Modbus RTU/RS-485 dipilih menggantikan rencana awal Ethernet/IP karena Gedung MPH 2 belum memiliki jaringan Ethernet industri permanen ke setiap genset, sementara RS-485 *multidrop* dapat melayani hingga 32 *node* sejauh 1.200 meter pada satu jalur kabel.

Dari sisi akurasi, galat 0,71% pada kondisi nominal berada jauh di bawah target 2%, tetapi batas atas 2,21% pada kondisi terburuk melampaui target. Hal ini sejalan dengan kajian *dual flow meter* yang menekankan bahwa akurasi sistem ditentukan oleh gabungan galat kedua meter dan kondisi instalasi (KRAL GmbH, 2019; Prasetyo dkk., 2023). Perlu dicatat pula bahwa galat relatif terhadap Q_{aktual} akan membesar apabila Q_{return} mendekati Q_{supply} , karena konsumsi diperoleh dari selisih dua besaran yang hampir sama. Dengan demikian, kalibrasi *K-factor* berkala, pemasangan *air separator*, dan pemilihan meter dengan akurasi sesuai rasio aliran *return* menjadi syarat implementasi agar target akurasi terjaga.

Dari sisi komunikasi, estimasi waktu pembaruan 0,5–0,8 detik jauh lebih cepat daripada target 5 detik dan setara dengan interval *polling* 1 detik yang lazim pada dasbor Node-RED berbasis RS-485 (Adhe Akbar Azanni & Mulki Indana Zulfa, 2025; Susanto & Pradana, 2022). Target keandalan $\geq 98\%$ konsisten dengan Sahrin dkk. (2025) yang melaporkan keberhasilan respons 98,5% dengan latensi rata-rata 210 ms pada instalasi kabel dan *grounding* sesuai EIA/TIA-485, serta dengan penerapan Modbus RTU pada Tosin (2021) dan Zakaria dkk. (2020). Rancangan mengadopsi praktik yang sama, yaitu kabel *shielded twisted pair*, terminasi 120 Ω pada kedua ujung bus, deteksi kesalahan CRC, dan pengaturan *timeout* serta *retry*. Risiko keamanan siber akibat protokol Modbus yang tidak terenkripsi dimitigasi melalui segmentasi jaringan OT/IT dan akses *read-only* mengacu pada prinsip IEC 62443 (Yudhy & Hakim, 2024).

Dibandingkan penelitian terdahulu pada Tabel Penelitian Terdahulu, kontribusi penelitian ini tidak terletak pada komponen tunggal, melainkan pada integrasi pengukuran konsumsi per unit, arsitektur kendali redundan, dan penyajian waktu nyata ke dalam dokumen DED, BOQ, dan RKS yang dapat langsung digunakan sebagai dasar pengadaan. Secara praktis, rancangan ini memungkinkan rekonsiliasi stok yang lebih akuntabel, deteksi dini anomali atau indikasi kebocoran melalui perbandingan Q_{aktual} dengan data HMI genset, serta perencanaan pengisian *daily tank* berbasis konsumsi aktual. Hal ini mendukung penerapan konsep *smart airport* pada fasilitas pendukung kelistrikan (Anggraeni & Novianty Z, 2025). Keterbatasan utama penelitian ini adalah seluruh indikator kinerja masih berupa estimasi teoretis dan simulasi; performa jaringan RS-485 fisik, mekanisme pengalihan PLC, dan akurasi lapangan belum divalidasi melalui pengujian perangkat keras.

KESIMPULAN

Rancangan sistem monitoring konsumsi bahan bakar genset menggunakan metode *dual flow meter* telah disusun untuk 10 unit genset berkonfigurasi *dual line* di Gedung MPH 2 Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai Bali. Rancangan terdiri atas lima lapis arsitektur, yaitu 20 *oval gear flow meter*, komunikasi Modbus RTU/RS-485 dua grup, dua PLC industri redundan, jaringan Ethernet tersegmentasi, dan dasbor Node-RED, dengan kapasitas sekitar 240 titik data. Rancangan ini memungkinkan konsumsi BBM aktual diketahui per unit genset, sesuatu yang tidak dapat dicapai melalui pembacaan level tangki bersama. Analisis teoretis menunjukkan galat gabungan 0,71% pada kondisi nominal, waktu pembaruan data 0,5–0,8 detik, dan target keandalan komunikasi $\geq 98\%$, sedangkan simulasi OpenPLC dan Node-RED membuktikan logika perhitungan dan penentuan status bekerja sesuai rancangan. Dokumen DED, BOQ, dan RKS telah disusun sebagai dasar implementasi tanpa mengikat pada satu merek.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena belum melibatkan pengujian perangkat keras, sehingga akurasi pada kondisi terburuk (hingga 2,21%) belum terjamin memenuhi target 2%. Penelitian selanjutnya disarankan merealisasikan rancangan pada satu unit genset sebagai purwarupa untuk memvalidasi akurasi, mekanisme redundansi PLC, dan kinerja RS-485; melakukan survei harga dan penawaran resmi sesuai spesifikasi DED; memperkuat keamanan siber jaringan Modbus; mengkaji integrasi *read-only* dengan SCADA kelistrikan bandara; serta memperluas cakupan ke lokasi genset lain setelah konfigurasi jalur bahan bakarnya diverifikasi.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, para pembimbing, serta PT Angkasa Pura Indonesia (InJourney Airports) Bandar Udara Internasional I Gusti Ngurah Rai Bali atas dukungan data lapangan selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhe Akbar Azanni, & Mulki Indana Zulfa. (2025). Pengembangan sistem monitoring distribusi power berbasis Flask dan Node-RED menggunakan protokol komunikasi serial RS-485 dan TCP/IP. *Jurnal SINTA: Sistem Informasi dan Teknologi Komputasi*, 2(2). <https://doi.org/10.61124/sinta.v2i2.41>
- Alves, T., & Morris, T. (2018). OpenPLC: An IEC 61131-3 compliant open source industrial controller for cyber security research. *Computers & Security*, 78, 364–379. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.07.007>
- Andhika, Y. F., Tohir, A., & Faidar, M. A. S. (2025). Sistem monitoring konsumsi bahan bakar berbasis IoT. *SENTER 2025: Seminar Nasional Teknik Elektro 2025*, 203–207.
- Anggraeni, I., & Novianty Z, R. F. (2025). Implementasi konsep smart airport dalam menunjang fasilitas bandara di Terminal 2 Bandara Soekarno-Hatta. *Jurnal Manajemen Dirgantara*, 18(2), 276–283. <https://doi.org/10.56521/manajemen-dirgantara.v18i2.1450>
- Apdillah, D., Saputra, M. Y., Sari, Y., & Nabila. (2026). Sistem monitoring status operasional PLN dan genset berbasis IoT melalui perangkat mobile. *Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset Pendidikan*, 4(4), 22677–22682. <https://doi.org/10.31004/jerkin.v4i4.5334>
- Bouyakoub, S., Belkhir, A., Guebli, W., & Bouyakoub, F. M. (2017). Smart airport: An IoT-based airport management system. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3102304.3105572>
- Dianastiti, Y., Ardiyanta, A., Cahyadi, W., Warju, W., & Pratama, M. (2022). Rancang bangun fuel flow meter untuk mengukur konsumsi bahan bakar mesin sepeda motor empat langkah. *Otopro*, 18(1), 13–17. <https://doi.org/10.26740/otopro.v18n1.p13-17>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2026). *JCGM GUM-5:2026 Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 5: Examples*. BIPM.



- Josephlal, E., Adepu, S., Yang, Z., & Zhou, J. (2021). Enabling isolation and recovery in PLC redundancy framework of metro train systems. *International Journal of Information Security*, 20. <https://doi.org/10.1007/s10207-020-00529-0>
- Kaderbhai, M. (2014). *Understanding ISO 8528-1 generator set ratings*. Cummins Inc.
- Kamza, F., & Erlina, T. (2023). *Sistem monitoring konsumsi bahan bakar generator set (genset) pada base transceiver station (BTS)* [Tugas akhir]. Universitas Andalas.
- KRAL GmbH. (2019). *System accuracy of a fuel consumption measurement*. KRAL GmbH.
- Modbus Organization. (2012). *MODBUS application protocol specification V1.1b3*. Modbus Organization.
- Modbus.org. (2006). *MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.02*. Modbus Organization.
- NFPA 110. (2022). *Standard for emergency and standby power systems*. National Fire Protection Association.
- Prasetyo, A. B., Yunianto, R. H., & Wibowo, M. A. (2023). Evaluasi ketidakpastian pengukuran dan akurasi dual flow meter pada sistem pemantauan bahan bakar mesin diesel. *Jurnal Otomasi, Kontrol & Instrumentasi*, 19(2), 45–56.
- Sahrin, A., Utami, E., & Musyafa, A. (2025). Implementasi SCADA pada sistem monitoring mikrogrid menggunakan protokol Modbus. *Prosiding SNTEM*, 5.
- Simion, A., & Bira, C. (2023). A review of redundancy in PLC-based systems. *Proceedings of SPIE*. <https://doi.org/10.1117/12.2644462>
- Susanto, & Pradana. (2022). Dashboard monitoring distribusi daya berbasis Node-RED, Modbus, dan RS-485. *Jurnal Teknologi Rekayasa Komputer dan Otomasi*.
- Sutarna, N., Mawardi, L., Azmi, Z. I., Ramadhany, N., & Dhany, A. R. (2023). Implementasi sensor ultrasonik dan flow meter pada prototipe pengisi bahan bakar mini. *Electrices*, 5(2), 63–69.
- Tosin, T. (2021). Perancangan dan implementasi komunikasi RS-485 menggunakan protokol Modbus RTU dan Modbus TCP pada sistem pick-by-light. *Komputika: Jurnal Sistem Komputer*, 10(1), 85–91. <https://doi.org/10.34010/komputika.v10i1.3557>
- Wenas, V. G. D. (2021). Prototipe sistem monitoring tangki bahan bakar genset berbasis aplikasi Blynk dengan NodeMCU ESP8266. *Jurnal Fakultas Teknik Elektro Universitas Tama Jagakarsa*, 1852–1871.
- Yudhy, M. R. A., & Hakim, I. (2024). Safeguarding the interconnected control system – A review of IEC 62443 standard integrating cybersecurity risk assessments into process safety management work process for industrial automation and control systems. *Jurnal IAFMI*, (15), 76–90.
- Zakaria, M. C., Kurniawan, E., & H., J. S. (2020). Sistem monitoring instrument air compressor (IAC) berbasis SCADA dengan komunikasi Modbus RTU RS-485. *J-Eltrik*, 2(2), 79–85. <https://doi.org/10.30649/j-eltrik.v2i2.124>