SISTEM KUOTA PRABAYAR IoT UNTUK DISTRIBUSI AIR KOST

Krisna Murti[1], Mohd. Ilyas Hadikusuma[2], Rusman[3], M. Ridhwan Sufandi[4], Eko Mardianto[5]

[1,2,3,4,5]Program Studi Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Politeknik Negeri Pontianak

Jl. Jendral Ahmad Yani – Pontianak 78124, Kalimantan Barat
[1]krisnamurti025@gmail.com, [2]mohd.ilyas.hadikusuma@gmail.com, [3]rusman.dn@gmail.com,
[4]mr.sufandi86@gmail.com, [5]emardianto74@gmail.com

Abstract

Water management in boarding houses is generally conducted conventionally without individual metering systems, resulting in unequal water allocation and excessive consumption. This study proposes an Internet of Things (IoT)-based prepaid quota system to control water distribution in boarding house bathrooms. The system employs a dual-microcontroller architecture consisting of ESP32 as the IoT gateway and Arduino Nano as the data acquisition unit integrated with YF-S201 flow meter sensors and solenoid valves as automatic cut-off mechanisms. Water quotas can be configured through a 4×4 keypad or the Blynk application with real-time notifications using Telegram Bot. System success was evaluated against four indicators: volumetric measurement accuracy (error threshold ≤5%), statistically unbiased measurement (p-value > 0.05), automatic cut-off responsiveness (threshold ≤0.05 L), and reliable EEPROM quota recovery after power interruption. Sensor calibration yielded individual constants of 335.2, 264.5, and 377.6 pulses/liter — significantly deviating from the manufacturer's nominal value of 450 pulses/liter — confirming the necessity of per-unit calibration. Experimental testing over 500–2000 mL produced an overall system accuracy of 97.10% (mean error 2.90%), with per-sensor accuracies of 95.71%, 98.26%, and 97.33%, all satisfying the accepted residential water metering standard of ≤5%. Independent sample t-tests yielded p-values greater than 0.05 for all three sensors, confirming the absence of systematic measurement bias. The automatic cut-off mechanism successfully closed the solenoid valve before quota depletion in every test scenario, and full quota data recovery was verified following simulated power failures. This study contributes a low-cost IoT utility management architecture that uniquely integrates a prepaid mechanism, per-room automatic cut-off, and dual-platform notifications in a single system — an approach not previously reported in similar research. The system is replicable as a transparent, equitable, and consumption-based water distribution solution for small-to-medium boarding house settings.

Keywords : *IoT, Prepaid Quota, ESP32, Solenoid Valve, Blynk*

Abstrak

Pengelolaan air pada hunian kost umumnya masih dilakukan secara konvensional tanpa sistem meterisasi individual sehingga menyebabkan ketidakmerataan distribusi dan pemborosan air. Penelitian ini mengusulkan sistem *Internet of Things* (IoT) berbasis kuota prabayar untuk mengendalikan distribusi air pada kamar mandi kost. Sistem menggunakan arsitektur *dual-microcontroller* berupa ESP32 sebagai *IoT gateway* dan Arduino Nano sebagai unit akuisisi data yang terintegrasi dengan sensor *flow meter* YF-S201 dan *solenoid valve* sebagai mekanisme pemutusan aliran otomatis. Pengelola dapat mengatur kuota melalui *keypad* 4×4 maupun aplikasi Blynk dengan notifikasi *real-time* menggunakan Telegram Bot. Keberhasilan sistem dievaluasi melalui empat indikator: akurasi pengukuran volumetrik (ambang batas *error* ≤5%), validasi statistik bebas bias (*p-value* > 0,05), responsivitas mekanisme *cut-off* otomatis (ambang batas ≤0,05 liter), dan keandalan pemulihan data kuota dari EEPROM pascagangguan daya. Hasil kalibrasi sensor menunjukkan konstanta individual sebesar 335,2; 264,5; dan 377,6 pulsa/liter — berbeda signifikan dari nilai nominal pabrikan 450 pulsa/liter — yang mengonfirmasi pentingnya kalibrasi per unit. Pengujian pada rentang 500–2000 mL menghasilkan akurasi keseluruhan sistem sebesar 97,10% (*error* rata-rata 2,90%), dengan akurasi per sensor masing-masing 95,71%, 98,26%, dan 97,33%, seluruhnya memenuhi standar *residential water metering* ≤5%. Validasi statistik menggunakan *independent sample t-test*

menghasilkan *p-value* > 0,05 untuk ketiga sensor, membuktikan tidak terdapat bias pengukuran yang signifikan. Mekanisme *cut-off* otomatis berhasil menutup *solenoid valve* sebelum kuota habis pada setiap skenario pengujian, dan data kuota berhasil dipulihkan sepenuhnya pascasimulasi gangguan daya. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan sistem manajemen utilitas air berbiaya rendah yang menggabungkan mekanisme prabayar, *cut-off* otomatis per kamar, dan notifikasi *dual-platform* dalam satu arsitektur IoT — pendekatan yang belum dijumpai pada penelitian sejenis. Sistem ini layak direplikasi sebagai solusi distribusi air yang transparan, adil, dan berbasis konsumsi aktual pada hunian kost skala kecil hingga menengah.

Kata kunci : *IoT*, Kuota Prabayar, ESP32, Solenoid Valve, *Blynk*

1. PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan dasar dengan ketersediaan terbatas, terutama di kawasan perkotaan padat seperti area hunian kost-kosan. Di Indonesia terdapat 41.306 unit hunian kost yang tersebar di seluruh wilayah [1]. Sistem distribusi air pada hunian kost umumnya masih mengandalkan metode konvensional tanpa metering individual sehingga menyebabkan ketidakmerataan alokasi. Penelitian terkait menunjukkan bahwa monitoring kebocoran air menggunakan sensor flowmeter berbasis Arduino Uno dan aplikasi mobile Blynk mampu mendeteksi kebocoran secara real-time [2]. Sistem distribusi air perkotaan menghadapi masalah serius berupa tingkat kebocoran yang signifikan dari total produksi. Ketiadaan sistem monitoring konsumsi per kamar serta penetapan biaya berbasis flat rate tanpa mempertimbangkan konsumsi aktual menjadi masalah utama yang memerlukan solusi teknologi tepat guna [3].

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan distribusi air. Sistem pengisian air otomatis berbasis sensor flow dan mikrokontroler ESP32 terbukti mampu mencapai akurasi 92% dalam mengontrol volume air [4]. Dalam tinjauan literatur terhadap berbagai implementasi sistem water management berbasis IoT, teknologi ini terbukti mampu mengurangi biaya operasional secara signifikan melalui automated meter reading dan deteksi kebocoran dini [5]. Sistem monitoring berbasis IoT dengan sensor flow meter terbukti mampu menyediakan data konsumsi secara real-time kepada pengguna melalui aplikasi mobile, meningkatkan transparansi, dan memungkinkan kontrol otomatis [6]. Penerapan aplikasi Blynk sebagai platform monitoring terpadu berbasis IoT juga telah dibuktikan pada berbagai sistem kendali dan pemantauan lingkungan secara real-time [7].

Sistem kuota prabayar untuk air juga menunjukkan keunggulan dalam mengatasi ketidakadilan dan pemborosan. Sistem prepaid water meter berbasis LC sensor dengan mikrokontroler STM32L431CBT6 mencapai skor usability aplikasi mobile sebesar 80 (skala SUS) dan sensor error rate 1,33%, membuktikan bahwa sistem prabayar dapat meningkatkan akurasi penagihan dan transparansi konsumsi melalui mekanisme pay-per-use yang adil [8]. Namun, sebagian besar penelitian IoT untuk manajemen air terfokus pada rumah tinggal tunggal atau gedung besar, sementara hunian multi-kamar seperti kost memerlukan pendekatan berbeda yang lebih feasible untuk skala kecil.

Penerapan ESP32 pada sistem IoT berbasis LoRa juga terbukti mampu mengelola komunikasi data dan pengiriman notifikasi secara real-time dengan biaya rendah. Kemampuan ESP32 dalam menangani konektivitas nirkabel secara bersamaan dengan pemrosesan data lokal menjadikannya pilihan optimal untuk sistem IoT skala kecil. Dalam penelitian ini, kapabilitas tersebut dimanfaatkan untuk mengintegrasikan monitoring konsumsi air secara real-time dengan sistem notifikasi otomatis melalui Telegram Bot, sehingga pengelola kost dapat memantau status kuota setiap kamar kapan saja dan dari mana saja [9].

Kajian terhadap penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan adanya kesenjangan yang belum tertangani secara komprehensif. Sistem monitoring kebocoran berbasis Arduino Uno dan Blynk mampu mendeteksi kebocoran secara real-time, namun tidak dilengkapi mekanisme kuota maupun cut-off otomatis sehingga tidak dapat mengendalikan konsumsi secara aktif [2]. Sistem pengisian air otomatis berbasis ESP32 dan sensor flow berhasil mencapai akurasi 92% dalam mengontrol volume air, tetapi bersifat reaktif

tanpa fitur prabayar maupun notifikasi pengguna [4]. Prepaid water meter berbasis LC sensor dengan konektivitas BLE mencapai sensor error rate 1,33%, namun mengandalkan infrastruktur tokenisasi yang lebih kompleks dan mahal serta tidak dirancang untuk manajemen multi-kamar [8]. Sementara itu, platform WSN monitoring kualitas dan konsumsi air ditujukan untuk skala perkotaan yang lebih luas tanpa mempertimbangkan kebutuhan spesifik hunian kost berskala kecil [6]. Dari tinjauan ini, teridentifikasi bahwa belum ada penelitian yang secara khusus mengintegrasikan mekanisme prabayar, cut-off otomatis per kamar, dan notifikasi dual-platform dalam satu sistem IoT berbiaya rendah untuk konteks hunian kost multi-kamar.

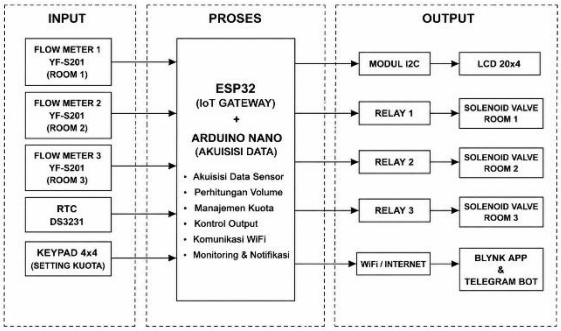
Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem IoT berbiaya rendah untuk mengontrol distribusi air berbasis kuota prabayar yang dirancang khusus untuk hunian kost. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada tiga aspek: (1) integrasi mekanisme kuota prabayar dengan cut-off otomatis yang dirancang khusus untuk konteks multi-kamar hunian kost skala kecil — pendekatan yang belum dijumpai pada penelitian sejenis; (2) arsitektur dual-microcontroller berbiaya rendah yang memisahkan fungsi akuisisi data lokal (Arduino Nano) dan konektivitas IoT (ESP32) untuk meningkatkan reliabilitas; serta (3) sistem notifikasi dual-platform (Blynk dan Telegram Bot) dengan role-based access control yang memberikan fleksibilitas manajemen bagi pengelola maupun penghuni secara simultan. Sistem menggunakan arsitektur dual-microcontroller dengan ESP32 sebagai IoT gateway dan Arduino Nano sebagai data acquisition unit, dilengkapi sensor flow meter YF-S201, serta terintegrasi dengan platform Blynk dan Telegram Bot untuk monitoring dan notifikasi real-time. Tujuan penelitian ini adalah: (1) merancang dan membangun sistem pengendalian distribusi air berbasis kuota prabayar dengan mekanisme cut-off otomatis untuk setiap kamar kost; dan (2) mengintegrasikan sistem IoT dengan platform Blynk dan Telegram Bot untuk monitoring dan notifikasi real-time.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Skema Alur Penelitian

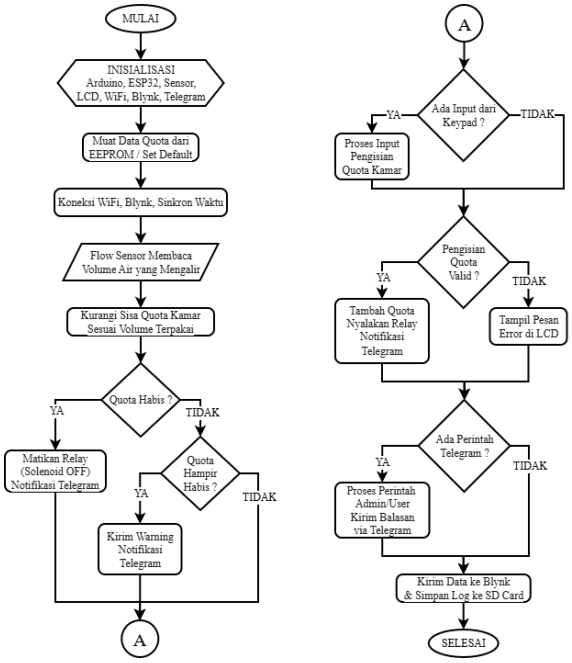
Penelitian ini menggunakan metode *Research* and *Development* (R&D) dengan pendekatan eksperimental yang dilaksanakan melalui lima tahap sistematis: (1) studi literatur dan analisis kebutuhan; (2) perancangan sistem mencakup mekanik, elektronik, dan *software*; (3) implementasi dan konstruksi perangkat keras dan lunak; (4) pengujian dan kalibrasi; serta (5) analisis dan evaluasi.

Sistem dirancang dengan arsitektur modular berbasis *dual-microcontroller* yang memisahkan fungsi *data acquisition* dan konektivitas IoT untuk meningkatkan *reliability*. Arsitektur ini terdiri dari tiga lapisan: *Physical Layer* (sensor *flow meter* YF-S201 dan *solenoid valve*), *Control Layer* (Arduino Nano dan ESP32), serta *Application Layer* (Blynk dan Telegram Bot). Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Alur kerja sistem *monitoring* dan kontrol distribusi air berbasis kuota prabayar ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem diawali dengan proses inisialisasi Arduino Nano, ESP32, sensor *flow meter*, LCD, WiFi, Blynk, dan Telegram Bot, kemudian memuat data kuota dari EEPROM. Sensor *flow meter* membaca volume air yang digunakan secara *real-time* dan sistem secara otomatis mengurangi sisa kuota setiap kamar. Ketika kuota habis, *relay* akan dimatikan sehingga *solenoid valve* menutup otomatis dan notifikasi dikirim melalui Telegram.



Gambar 2. *Flowchart* Sistem

2.2. Perancangan Hardware

Komponen utama sistem meliputi mikrokontroler ESP32-WROOM-32 sebagai *IoT gateway* dengan kemampuan *dual-core* Xtensa LX6 240 MHz, RAM 520 KB, dan WiFi 802.11 b/g/n; Arduino Nano berbasis ATmega328P sebagai *data acquisition unit* dengan EEPROM 1 KB untuk *persistent storage*; tiga unit sensor *flow meter* YF-S201 bertipe *turbine hall effect* dengan rentang pengukuran 1–30 L/menit dan akurasi ±10% (spesifikasi pabrikan); tiga unit *solenoid valve* 12V DC *normally closed* (NC) sebagai mekanisme *cut-off* otomatis; serta LCD I2C 20×4 dan *keypad* 4×4 sebagai antarmuka lokal. Pemilihan *solenoid valve* bertipe *normally closed* merupakan desain *fail-safe* sehingga katup menutup otomatis saat terjadi pemadaman daya [10].

Sistem mekanik menggunakan rangka kayu pinus 4×4 cm setinggi 107 cm dengan drum HDPE 50 liter di bagian atas yang menghasilkan tekanan gravitasi ±0,06 bar. Panel kontrol berukuran 30×40 cm dipasang pada ketinggian 30 cm dari dasar. Pipa distribusi menggunakan PVC ½ inci yang kompatibel dengan konektor sensor *flow* dan *solenoid valve*. Pendekatan kontrol dan monitoring pengisian air menggunakan prinsip serupa juga telah diterapkan di Politeknik Negeri Pontianak dengan hasil operasional yang baik [11]. Catu daya rakitan dua keluaran (5V dan 12V DC) didesain berbasis IC regulator 7805 dan 7812 dengan transistor TIP3055 sebagai penguat arus, mampu mensuplai daya total 40,10 Watt.

2.3. Kalibrasi Sensor Flow Meter

Kalibrasi individual dilakukan untuk setiap sensor menggunakan metode *volumetric calibration* dengan mengacu pada prosedur evaluasi pengukuran standar [12]. Volume air dihitung menggunakan persamaan (1):

$$V = N/K \quad (1)$$

di mana V = volume air (liter), N = total pulsa yang terdeteksi, dan K = konstanta kalibrasi (pulsa/liter). Konstanta kalibrasi K dihitung menggunakan persamaan (2):

$$K = N/V_referensi \quad (2)$$

Prosedur kalibrasi meliputi pengaliran 1 liter air pada *flow rate* konstan ±5 L/menit, pencatatan pulsa secara otomatis menggunakan *hardware interrupt* Arduino Nano, dan pengulangan 10 kali untuk setiap sensor. Hasil kalibrasi ditunjukkan pada Tabel 1.

TABEL I. HASIL KALIBRASI SENSOR FLOW METER YF-S201

Sensor	Konstanta K (pulsa/liter)	Nilai Nominal Pabrikan (pulsa/liter)	Selisih (%)
Kamar 1	335,2	450	25,5%
Kamar 2	264,5	450	41,2%
Kamar 3	377,6	450	16,1%

Perbedaan signifikan antara konstanta kalibrasi aktual dengan nilai nominal pabrikan mengonfirmasi pentingnya kalibrasi individual. Hal ini disebabkan oleh variasi karakteristik manufaktur pada setiap unit sensor, sehingga penggunaan nilai *default datasheet* akan menghasilkan error pengukuran yang besar.

2.4. Perancangan Sistem IoT

Sistem IoT mengintegrasikan dua platform utama: Blynk sebagai *dashboard monitoring* visual dan Telegram Bot sebagai antarmuka notifikasi berbasis pesan teks. Penerapan notifikasi IoT

berbasis Telegram juga telah diterapkan pada sistem early warning deteksi kualitas udara dengan efektivitas respons tinggi [13]. Arduino Nano bertugas membaca data tiga sensor *flow* melalui *hardware interrupt* (D2, D3) dan *polling* (D4), menghitung volume serta mengelola kuota, kemudian mengirimkan data ke ESP32 melalui UART (*baud rate* 9600 bps) dalam format *key-value*: TIME, ROOM1–ROOM3, USED1–USED3, FLOW1–FLOW3, dan RELAY1–RELAY3. ESP32 mem-*parsing* data tersebut dan mendistribusikannya ke *Virtual Pins* Blynk (V0–V21) serta menangani perintah Telegram Bot.

Mekanisme kuota prabayar bekerja dengan prinsip *pay-before-use*: pengelola mengisi kuota melalui *keypad* 4×4 atau aplikasi Blynk, Arduino Nano menghitung sisa kuota secara *real-time* menggunakan rumus Kuota Baru = Kuota Lama – Volume Terpakai, dan *relay* dimatikan secara otomatis saat kuota mencapai ambang batas ≤0,05 liter. Sistem notifikasi bertingkat mengirimkan peringatan pada tiga kondisi: kuota kritis (≤20% atau ≤1,0 liter), kuota habis (0 liter), dan kuota terisi. Data kuota tersimpan di EEPROM dengan *auto-save* setiap 30 detik untuk ketahanan terhadap gangguan daya.

2.5. Pengumpulan dan Analisis Data

Data akurasi dikumpulkan melalui pengujian eksperimental dengan mengalirkan air pada volume 500–2000 mL (16 titik ukur, interval 100 mL) menggunakan gelas ukur kalibrasi. Setiap pengujian diulang satu kali per titik ukur dengan *flow rate* konstan ±5 L/menit. Persentase *error* dihitung menggunakan persamaan (3):

$$Error\ (\%) = \left|\frac{V_{terukur} - V_{aktual}}{V_{aktual}}\right| \times 100\% \qquad (3)$$

Akurasi dihitung sebagai Akurasi (%) = 100% – Error (%). Validasi statistik menggunakan *independent sample t-test* (Welch's t-test, α = 0,05) membandingkan rata-rata volume terukur sensor dengan volume aktual referensi. Kriteria: jika *p-value* > 0,05 maka H_0 diterima (tidak ada perbedaan signifikan; pengukuran valid) [14].

2.6. Skenario Pengujian

Pengujian akurasi dilakukan pada prototipe skala kecil menggunakan rangka kayu setinggi 107 cm dengan drum HDPE 50 liter sebagai sumber air yang menghasilkan tekanan gravitasi ±0,06 bar. Pengujian dilaksanakan dalam tiga skenario utama sebagai berikut.

Skenario 1 Pengujian Akurasi Volumetrik. Air dialirkan melalui masing-masing sensor pada 16 titik ukur volume (500, 600, 700, ..., 2000 mL; interval 100 mL) dengan *flow rate* konstan ±5 L/menit. Volume aktual diukur menggunakan gelas ukur berkapasitas 2000 mL (graduasi 50 mL) sebagai referensi. Setiap titik ukur diuji satu kali per sensor sehingga diperoleh 48 data pengamatan (16 titik × 3 sensor). Total pulsa dicatat secara otomatis oleh sistem menggunakan *hardware interrupt* Arduino Nano, kemudian volume terukur dihitung menggunakan persamaan (1) dengan konstanta kalibrasi individual masing-masing sensor.

Skenario 2 Pengujian Mekanisme *Cut-off* Otomatis. Kuota diatur pada nilai tertentu, kemudian air dialirkan secara terus-menerus hingga kuota mencapai ambang batas ≤0,05 liter. Pengujian ini memverifikasi bahwa *relay* menonaktifkan *solenoid valve* secara otomatis sebelum kuota benar-benar habis, sekaligus menguji pengiriman notifikasi bertingkat (kuota kritis ≤20% dan kuota habis) melalui Telegram Bot.

Skenario 3 Pengujian *Persistent Storage* (EEPROM). Sistem dimatikan paksa saat kuota dalam kondisi tertentu, kemudian dinyalakan kembali untuk memverifikasi bahwa data kuota terakhir berhasil dimuat dari EEPROM tanpa kehilangan informasi. Skenario ini memvalidasi ketahanan sistem terhadap gangguan daya yang umum terjadi di lingkungan hunian.

2.7. Parameter Evaluasi Sistem

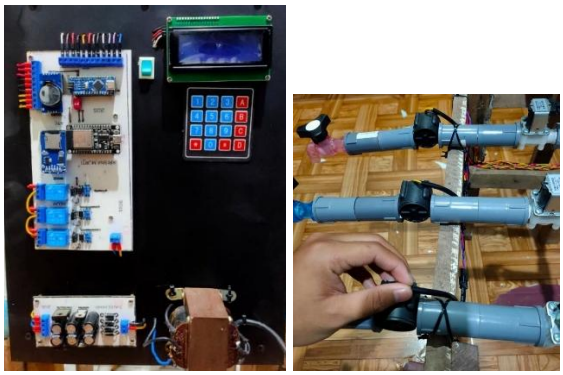
Kinerja sistem dievaluasi menggunakan empat parameter berikut. (1) Akurasi pengukuran volume, dinyatakan sebagai persentase *error* rata-rata per sensor dan akurasi keseluruhan sistem (persamaan 3 dan 4). Sistem dinyatakan memenuhi standar jika *error* rata-rata ≤5% sesuai ambang batas yang diterima untuk aplikasi *residential water metering* [15]. (2) Validasi statistik, menggunakan *independent sample t-test* (Welch's t-test, α = 0,05) untuk menguji hipotesis H_0: tidak terdapat perbedaan signifikan antara volume terukur dan volume aktual (H_0 diterima jika *p-value* > 0,05), yang mengindikasikan sistem pengukuran bebas dari bias sistematis [14]. (3) Responsivitas mekanisme *cut-off* otomatis, dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem menutup *solenoid valve* sebelum kuota habis menggunakan algoritma *predictive cut-off* (evaluasi setiap 100 ms, ambang batas ≤0,05 liter). (4) Keandalan *persistent storage* (EEPROM),

diverifikasi melalui simulasi gangguan daya untuk memastikan data kuota berhasil dipulihkan sepenuhnya pascapemadaman.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Realisasi Hardware

Realisasi *hardware* meliputi konstruksi rangka mekanik, instalasi komponen elektronik pada panel kontrol, pemasangan sensor *flow* dan *solenoid valve* pada jalur distribusi air, serta catu daya rakitan dua keluaran. Panel kontrol menampung LCD 20×4, *keypad* 4×4, ESP32, Arduino Nano, modul *relay* 3 kanal, RTC DS3231, dan modul SD Card. Sensor *flow* dipasang dengan orientasi sesuai arah aliran air menggunakan *seal tape* PTFE untuk mencegah kebocoran. *Solenoid valve normally closed* dipasang 20 cm di hilir sensor *flow* sebagai mekanisme *fail-safe*. Hasil implementasi *hardware* ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



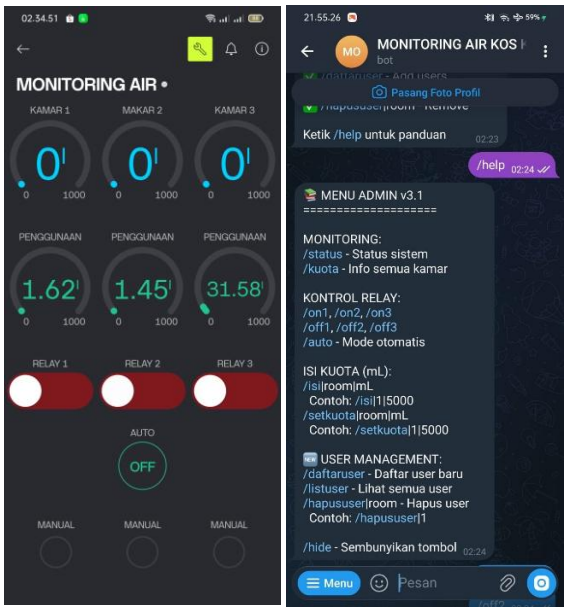
Gambar 3. Panel Kontrol Utama Sistem (kiri) dan Instalasi Flow Sensor pada Jalur Distribusi Air (kanan)



Gambar 4. Hasil Rancang Bangun tampak keseluruhan

3.2. Realisasi Software

Tampilan antarmuka lokal melalui LCD 20×4 menggunakan sistem menu hierarkis dengan 5 menu utama: Status Kamar, Isi Kuota, Riwayat Transaksi, Jam & Tanggal, dan *Flow Monitor*. *Dashboard* Blynk menyediakan visualisasi *real-time* kuota tersisa dan volume terpakai per kamar, serta kontrol *relay* manual. Telegram Bot mengimplementasikan sistem *dual-role*: admin memiliki akses penuh (*monitoring*, kontrol *relay*, manajemen pengguna), sedangkan pengguna reguler hanya dapat memantau kuota kamar mereka sendiri. Antarmuka Blynk dan Telegram Bot ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Dashboard Blynk untuk Monitoring Jarak Jauh (kiri) dan Interface Menu Admin Telegram Bot (kanan)

3.3. Pengujian Akurasi Sensor Flow Meter

Pengujian akurasi dilakukan pada rentang operasional 500–2000 mL menggunakan konstanta kalibrasi individual. Hasil pengujian untuk ketiga sensor disajikan pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

TABEL II. HASIL PENGUJIAN AKURASI SENSOR FLOW METER KAMAR 1 (K = 335,2 pulsa/liter)

No	Aktual (mL)	Terukur (mL)	Error (%)
1	500	550	10,00
2	600	640	6,67
3	700	750	7,14
4	800	840	5,00

No	Aktual (mL)	Terukur (mL)	Error (%)
5	900	970	7,78
6	1000	1000	0,00
7	1100	1150	4,55
8	1200	1250	4,17
9	1300	1350	3,85
10	1400	1450	3,57
11	1500	1530	2,00
12	1600	1625	1,56
13	1700	1800	5,88
14	1800	1850	2,78
15	1900	1950	2,63
16	2000	2020	1,00
Rata-rata Error			4,29%

Berdasarkan Tabel 2, Sensor Kamar 1 menunjukkan rata-rata *error* 4,29% dengan rentang *error* 0,00%–10,00%. *Error* tertinggi terjadi pada volume kecil (500 mL = 10,00%) dan terendah pada 1000 mL (0,00%). Sensor cenderung *overreading* dengan selisih 0–100 mL. Hal ini mengindikasikan bahwa akurasi sensor menurun pada volume rendah akibat karakteristik *turbine flow meter* yang kurang presisi pada *flow rate* rendah [8].

TABEL III. HASIL PENGUJIAN AKURASI SENSOR FLOW METER KAMAR 2 (K = 264,5 pulsa/liter)

No	Aktual (mL)	Terukur (mL)	Error (%)
1	500	540	8,00
2	600	650	8,33
3	700	730	4,29
4	800	840	5,00
5	900	920	2,22
6	1000	1000	0,00
7	1100	1100	0,00
8	1200	1200	0,00
9	1300	1300	0,00
10	1400	1400	0,00
11	1500	1500	0,00
12	1600	1600	0,00
13	1700	1700	0,00
14	1800	1800	0,00
15	1900	1900	0,00
16	2000	2000	0,00
Rata-rata Error			1,74%

Sensor Kamar 2 menunjukkan performa terbaik dengan rata-rata *error* 1,74%. Sebanyak 11 dari 16 titik ukur (volume ≥1000 mL) mencapai akurasi sempurna (*error* 0,00%). *Error* hanya terjadi pada volume rendah 500–900 mL. Hal ini mengonfirmasi bahwa kalibrasi individual dengan K = 264,5 pulsa/liter berhasil mengkompensasi karakteristik sensor secara optimal.

TABEL IV. HASIL PENGUJIAN AKURASI SENSOR FLOW METER KAMAR 3 (K = 377,6 pulsa/liter)

No	Aktual (mL)	Terukur (mL)	Error (%)
1	500	500	0,00
2	600	630	5,00
3	700	750	7,14
4	800	850	6,25
5	900	950	5,56
6	1000	1030	3,00
7	1100	1150	4,55
8	1200	1240	3,33
9	1300	1340	3,08
10	1400	1450	3,57
11	1500	1500	0,00
12	1600	1620	1,25
13	1700	1700	0,00
14	1800	1800	0,00
15	1900	1900	0,00
16	2000	2000	0,00

No	Aktual (mL)	Terukur (mL)	Error (%)
Rata-rata Error			2,67%

Sensor Kamar 3 menghasilkan rata-rata *error* 2,67% dengan 7 dari 16 titik ukur mencapai akurasi sempurna. Pola *error* bersifat tidak seragam, dengan nilai tertinggi pada volume 700 mL (7,14%) namun mencapai akurasi sempurna pada 500 mL. Hal ini dapat disebabkan oleh variasi karakteristik rotor pada sensor tertentu. Secara mekanis, turbin pada sensor YF-S201 membutuhkan momentum awal untuk berputar stabil sehingga pada aliran rendah (volume <700 mL dengan flow rate ≤5 L/menit), gesekan mekanis rotor lebih dominan dan menghasilkan pulsa yang tidak proporsional terhadap volume aktual. Fenomena ini dikenal sebagai low-flow inaccuracy dan merupakan keterbatasan inheren sensor bertipe turbine hall-effect berbiaya rendah [8]. Dalam konteks praktis penggunaan air di kost, volume penggunaan rata-rata per sesi mandi (≥10 liter) jauh melampaui rentang kritis tersebut, sehingga dampak error pada volume rendah terhadap akurasi penagihan kuota dapat dianggap minimal.

3.4. Ringkasan Akurasi dan Validasi Statistik

TABEL V. RINGKASAN AKURASI SENSOR FLOW METER KESELURUHAN SISTEM

Sensor	K (pulsa/liter)	Jumlah Uji	Error Rata-rata (%)	Akurasi (%)
Kamar 1	335,2	16	4,29	95,71
Kamar 2	264,5	16	1,74	98,26
Kamar 3	377,6	16	2,67	97,33
Rata-rata Keseluruhan	–	48	2,90	97,10

Akurasi keseluruhan sistem mencapai 97,10% dengan rata-rata *error* 2,90%. Nilai ini berada di bawah ambang batas 5% yang umumnya diterima untuk aplikasi *residential water metering* [15], sehingga termasuk kategori sangat baik. Perbedaan akurasi antar sensor (Kamar 1: 95,71%, Kamar 2: 98,26%, Kamar 3: 97,33%) mengonfirmasi pentingnya kalibrasi individual. Penelitian sebelumnya dengan sistem prepaid water meter berbasis LC sensor dan mikrokontroler STM32L431CBT6 melaporkan sensor error rate 1,33%, menunjukkan bahwa hasil penelitian ini sudah kompetitif menggunakan sensor *turbine* berbiaya rendah [8]. Perbedaan error rate antara penelitian ini (2,90%) dan sistem berbasis LC sensor [8] (1,33%) dapat dijelaskan oleh perbedaan prinsip kerja sensor: sensor LC (induktif) bekerja berdasarkan perubahan induktansi magnet sehingga lebih presisi pada flow rate rendah, sedangkan sensor YF-S201 bertipe turbine hall-effect memiliki keterbatasan mekanis pada aliran rendah sebagaimana dibahas di atas. Meskipun demikian, selisih error rate sebesar 1,57% ini tidak berdampak signifikan dalam konteks aplikasi residential water metering, mengingat standar toleransi yang diterima adalah ≤5% [15] dan sistem ini telah memenuhi standar tersebut. Lebih dari itu, pemilihan sensor YF-S201 dilandasi oleh pertimbangan aksesibilitas komponen di pasar lokal serta kemudahan replikasi sistem oleh pengelola kost pada umumnya, sesuai dengan prinsip perancangan sistem IoT yang berorientasi pada kemudahan adopsi teknologi (technology adoptability) di lingkungan residensial skala kecil [5].

TABEL VI. HASIL UJI STATISTIK INDEPENDENT SAMPLE t-TEST

Sensor	n	Mean Aktual (mL)	Mean Terukur (mL)	p-value	Keputusan
Kamar 1	16	1250,00	1295,31	0,7898	H_0 Diterima (Valid)
Kamar 2	16	1250,00	1261,25	0,9464	H_0 Diterima (Valid)
Kamar 3	16	1250,00	1275,63	0,8785	H_0 Diterima (Valid)

Hasil uji *t-test* menunjukkan bahwa untuk ketiga sensor, *p-value* > 0,05 pada tingkat kepercayaan 95%, sehingga H_0 diterima. Tidak terdapat perbedaan signifikan antara volume terukur sensor dengan volume aktual. Hal ini membuktikan bahwa sistem pengukuran tidak mengandung bias sistematis dan dapat diandalkan untuk aplikasi *monitoring* distribusi air kost. Konsistensi ini dicapai melalui implementasi kalibrasi individual yang mengkompensasi variasi karakteristik manufaktur setiap sensor [14].

3.5. Analisis Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Dibandingkan dengan penelitian terdahulu di bidang *prepaid water metering*, sistem yang dikembangkan menawarkan keunggulan pada aspek keterjangkauan dan integrasi multi-platform. Sistem prepaid water meter berbasis LC sensor menggunakan mikrokontroler STM32L431CBT6 dengan konektivitas BLE dari smartphone pengguna untuk mencapai sensor error rate 1,33%, namun memerlukan infrastruktur tokenisasi yang lebih kompleks [8]. Penelitian ini menggunakan sensor *turbine* YF-S201 berbiaya rendah namun tetap mencapai akurasi 97,10% melalui kalibrasi individual yang cermat.

Platform IoT berbasis WSN *monitoring* kualitas dan konsumsi air menggunakan ESP32 dengan sensor turbidity, temperatur, dan flow meter, ditujukan untuk lingkungan rural maupun perkotaan berskala lebih luas [6]. Penelitian ini memfokuskan pada hunian kost skala kecil dengan pendekatan yang lebih sederhana namun dilengkapi mekanisme kuota prabayar dan notifikasi *real-time* yang tidak tersedia pada penelitian tersebut. Keunggulan utama sistem ini adalah integrasi *dual-platform* (Blynk + Telegram Bot) dengan *role-based access control* yang memberikan fleksibilitas manajemen bagi pengelola maupun penghuni secara simultan. Penggunaan ESP32 sebagai inti sistem IoT untuk monitoring berbasis web juga telah dikonfirmasi dalam penelitian smart agriculture [16], serta pada prototype alat otomatis berbasis ESP32 dan Blynk yang menunjukkan kemampuan monitoring real-time serupa [17]. Dari perspektif implikasi praktis, kecenderungan overreading pada semua sensor (volume terukur selalu ≥ volume aktual) memiliki konsekuensi asimetris bagi pengguna: penghuni kost akan mengalami pengurangan kuota lebih cepat dari seharusnya, yang secara potensial menimbulkan ketidakpuasan. Oleh karena itu, pengelola disarankan menerapkan faktor koreksi berbasis hasil kalibrasi sebagai margin toleransi pada penetapan kuota awal. Selain itu, ambang batas cut-off sebesar ≤0,05 liter dipilih untuk memastikan solenoid valve menutup sebelum kuota benar-benar habis, sekaligus memperhitungkan jeda respons relay dan latensi komunikasi UART antara Arduino Nano dan ESP32 (baud rate 9600 bps), sehingga tidak terdapat volume air yang terpakai tanpa tercatat.

4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem *monitoring* dan kontrol distribusi air prabayar berbasis IoT untuk hunian kost, dapat disimpulkan bahwa: (1) Sistem pengendalian aliran air berbasis kuota prabayar menggunakan arsitektur *dual-microcontroller* (Arduino Nano dan ESP32) dengan mekanisme *cut-off* otomatis menggunakan *solenoid valve* 12V DC *normally closed* telah berhasil dirancang dan diimplementasikan. Sistem dapat beroperasi secara mandiri melalui antarmuka lokal LCD 20×4 dan *keypad* 4×4 tanpa memerlukan infrastruktur IoT; (2) Sistem IoT terintegrasi berhasil diimplementasikan dengan platform Blynk untuk *monitoring* dan kontrol jarak jauh serta Telegram Bot dengan *role-based access control* (admin dan pengguna), di mana sistem mengirimkan notifikasi otomatis saat kuota terisi, habis, atau mencapai batas kritis 20%; dan (3) Kalibrasi individual menghasilkan konstanta sensor yang berbeda signifikan dari nilai nominal pabrikan (335,2; 264,5; dan 377,6 pulsa/liter vs 450 pulsa/liter). Pada rentang operasional 500–2000 mL, sistem mencapai akurasi keseluruhan 97,10% dengan *error* rata-rata 2,90%. Validasi statistik *independent sample t-test* (*p-value* > 0,05 untuk ketiga sensor) membuktikan tidak ada bias pengukuran yang signifikan. Secara implikasi praktis, sistem ini dapat langsung diterapkan oleh pengelola kost untuk menggantikan pencatatan konsumsi air secara manual yang rentan terhadap kesalahan dan potensi sengketa tagihan. Mekanisme kuota prabayar mendorong kesadaran penghuni terhadap konsumsi air secara mandiri sehingga berpotensi menekan pemborosan. Notifikasi otomatis melalui Telegram Bot memungkinkan pengelola memantau seluruh kamar dari jarak jauh tanpa kehadiran fisik, yang secara signifikan mengurangi beban operasional harian. Bagi penghuni, transparansi data konsumsi secara *real-time* memberikan kepercayaan bahwa tagihan sesuai dengan penggunaan aktual, sehingga sistem ini layak direplikasi pada hunian kost berskala kecil hingga menengah sebagai solusi manajemen utilitas yang terjangkau dan berbasis teknologi.

Berdasarkan keterbatasan yang ditemukan, saran untuk penelitian selanjutnya meliputi: (1) penggantian platform Blynk versi gratis dengan alternatif berbayar atau server MQTT mandiri untuk mengatasi batasan *datapoints*; (2) penambahan sensor kualitas air (pH, *turbidity*, TDS) untuk fungsi *monitoring* yang lebih komprehensif; (3) integrasi *payment gateway* untuk pengisian kuota online oleh penghuni; dan (4) pengembangan aplikasi *mobile native* menggunakan Flutter untuk meningkatkan *user experience* dengan fitur grafik historis dan analisis pola konsumsi; serta (5) pengujian skalabilitas

sistem pada lingkungan kost berskala lebih besar dengan jumlah kamar yang lebih banyak guna mengevaluasi ketahanan arsitektur *dual-microcontroller* dan kapasitas jaringan IoT dalam kondisi beban tinggi, sekaligus mengeksplorasi penerapan algoritma prediksi konsumsi berbasis *machine learning* untuk rekomendasi penetapan kuota yang adaptif sesuai pola konsumsi masing-masing penghuni.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penyelesaian penelitian ini tidak lepas dari peran serta berbagai pihak. Penulis mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua atas segala doa, semangat, dan dukungan. Apresiasi setinggi-tingginya kepada almamater tercinta Politeknik Negeri Pontianak atas fasilitas dan iklim akademis yang kondusif. Penulis juga berterima kasih kepada Bapak Mohd. Ilyas Hadikusuma, S.T., M.Eng. dan Bapak Ir. Rusman, M.T. selaku dosen pembimbing, serta Bapak M. Ridhwan Sufandi, ST., MT. dan Bapak Eko Mardianto, S.ST., M.T. selaku dosen penguji atas segala bimbingan dan saran yang bernilai. Penelitian ini didanai secara mandiri dan dilaksanakan di Laboratorium Program Studi Teknologi Rekayasa Sistem Elektronika, Politeknik Negeri Pontianak.

Daftar Pustaka:

[1] Badan Pusat Statistik, "Statistik Perumahan dan Permukiman Indonesia," 2023, *BPS RI, Jakarta*.

[2] I. W. S. Yasa, I. W. Suriana, and I. W. Sukadana, "Monitoring Kebocoran Air Menggunakan Mikrokontrol Arduino Uno Berbasis Aplikasi Mobile," *JIRE (Jurnal Inform. \& Rekayasa Elektron.*, vol. 7, no. 2, pp. 421–429, Nov. 2024.

[3] Y. Arbi, R. Ramadhianty, S. Rahayu, and W. Putri, "System dynamics modelling of integrated urban clean water management: A case study in {Padang City, Indonesia}," *J. Eng. Res. Lect.*, vol. 4, no. 2, pp. 66–76, 2025, doi: 10.58712/jerel.v4i2.184.

[4] A. Majid, Jamaaluddin, A. Wiguna, H. Setiawan, and A. Farihah, "Development of an automatic water flow sensor system using {ESP32} for efficient water control," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1242, no. 1, p. 12016, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1242/1/012016.

[5] N. J. Okoli and B. Kabaso, "Building a smart water city: {IoT} smart water technologies, applications, and future directions," *Water*, vol. 16, no. 4, p. 557, 2024, doi: 10.3390/w16040557.

[6] C. Axiotidis, E. Konstantopoulou, and N. Sklavos, "A wireless sensor network {IoT} platform for consumption and quality monitoring of drinking water," *Discov. Appl. Sci.*, vol. 7, p. 15, 2025, doi: 10.1007/s42452-024-06384-1.

[7] T. Juwariyah, L. Krisnawati, and S. Sulasminingsih, "Perancangan Sistem Monitoring Terpadu Smart Bins Berbasis {IoT} Menggunakan Aplikasi Blynk," *JIRE (Jurnal Inform. \& Rekayasa Elektron.*, vol. 3, no. 2, pp. 91–99, Nov. 2020.

[8] A. K. Purboyo, H. Fakhrurroja, D. Pramesti, and A. R. Chaidir, "Mobile application development for prepaid water meter based on {LC} sensor," *Sensors*, vol. 24, no. 20, p. 6762, 2024, doi: 10.3390/s24206762.

[9] Satriyo, A. Haddad, Ramli, and S. A. Salim, "Implementasi Wireless Sensor Network pada Pendeteksi Tanah Longsor Berbasis Internet of Things ({IoT}) dan {LoRa}," *JIRE (Jurnal Inform. \& Rekayasa Elektron.*, vol. 8, no. 1, pp. 179–187, Apr. 2025.

[10] S. V Angadi and R. L. Jackson, "A critical review on the solenoid valve reliability, performance and remaining useful life including its industrial applications," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 136, p. 106231, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106231.

[11] E. Mardianto, Suparno, and Y. Chrysostomos, "Kontrol dan Monitoring Pengisian Air di Laboratorium Teknik Elektronika Politeknik Negeri Pontianak," *JIRE (Jurnal Inform. \& Rekayasa Elektron.*, vol. 8, no. 1, pp. 51–59, Apr. 2025, doi: 10.36595/jire.v8i1.1368.

[12] BIPM *et al.*, "Evaluation of Measurement Data --- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, {JCGM} 100:2008," 2008.

[13] A. N. A. Muhid, O. Rahmanto, A. Noor, and Fathurrahmani, "Sistem Early Warning Deteksi Kualitas Udara Berbasis {IoT}," *JIRE (Jurnal Inform. \& Rekayasa Elektron.*, vol. 7, no. 2, pp. 402–412, Nov. 2024, doi: 10.36595/jire.v7i2.1277.

[14] T. K. Kim and J. H. Park, "More about the basic assumptions of t-test: Normality and sample size," *Korean J. Anesthesiol.*, vol. 72, no. 4, pp. 331–335, 2019, doi: 10.4097/kja.d.18.00292.

[15] S. Ismail, D. W. Dawoud, N. Ismail, R. Marsh, and A. S. Alshami, "{IoT}-based water management systems: Survey and future research direction," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 35942–35952, 2022, doi:

10.1109/ACCESS.2022.3163742.
[16] A. Noor, "Prototipe Smart Agriculture di Lahan Pertanian Berbasis Web," *JIRE (Jurnal Inform. \& Rekayasa Elektron.*, vol. 7, no. 1, pp. 140–151, Apr. 2024.
[17] Y. Mulyanto, R. A. T. Susanto, E. S. Susanto, and F. Idifitriani, "Rancangan Prototype Alat Pakan Anakan Ayam Kampung Menggunakan {ESP32} Berbasis Internet of Things ({IoT})," *JIRE (Jurnal Inform. \& Rekayasa Elektron.*, vol. 8, no. 1, pp. 168–177, Apr. 2025.