

Implementasi Sensor Ultrasonic Pada Sistem Pengontrol Volume Air dan Pembaca Debit Air Berbasis IoT

Jevan Farica*, Budihardja Murtianta, Demas Sabatino

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer
Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga, INDONESIA

Article Info

Article History:

Received
10-11-2025

Accepted
12-05-2026

Keywords:

Blynk IoT; clamp-on ultrasonic flowmeter; ESP32 microcontroller; flow rate measurement; transit-time flow measurement; water volume control.

Abstract

This system designs a non-intrusive water flow rate reader and volume controller based on a clamp-on transit-time ultrasonic flow meter (V-mount, 4-inch pipe) using the TUF-2000M, integrated with an ESP32. The time-of-flight difference is converted into velocity, flow rate is calculated ($Q = v \cdot A$), and volume is estimated through integration. The volume controller stops the flow precisely at set points of 2, 4, and 6 liters to minimize overshoot. The Blynk IoT platform provides a remote interface for set point selection and real-time monitoring (flow rate, velocity, fluid sound). Performance is evaluated based on volume error, set point achievement time, and repeatability, with quick installation and minimal pressure loss. The ESP32 microcontroller serves as the controller and data processor, supported by a relay module to control the solenoid valve's open or closed state. Testing results show a 4% error for 2 liters (within a 10% error limit), a 0.10% error for 4 liters (within a 10% error limit), and a 2.5% error for 6 liters (within a 10% error limit).

Info Artikel

Histori Artikel:

Received
10-11-2025

Accepted
12-05-2026

Keywords:

Blynk IoT; flowmeter ultrasonic clamp-on; kendali volume air; mikrokontroler ESP32; pengukuran aliran berbasis waktu rambat (transit-time); pengukuran debit.

Abstrak

Sistem ini merancang pembaca debit dan pengontrol volume air non-intrusif berbasis flow meter ultrasonic clamp-on transit-time (V-mount, pipa 4 inci) menggunakan TUF-2000M yang terintegrasi dengan ESP32. Selisih waktu rambat dikonversi menjadi kecepatan, dihitung debit ($Q = v \cdot A$), lalu diintegrasikan untuk estimasi volume, dan pengontrol volume menghentikan aliran tepat di set point 2, 4, dan 6 liter guna menekan overshoot. Blynk IoT menyediakan antarmuka jarak jauh untuk pemilihan set point dan pemantauan real-time (flow rate, velocity, fluid sound). Kinerja dievaluasi dari galat volume, waktu pencapaian set point, dan keterulangan, dengan pemasangan cepat serta rugi tekan yang sangat kecil. Mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai pengendali data dengan dukungan modul relay yang berfungsi mengontrol katup solenoid terbuka atau tertutup. Dari hasil penelitian, pengujian 2 liter diperoleh error sebesar 4% dari batas error 10%, pengujian 4 liter diperoleh error sebesar 0,10% dari batas error 10%, dan pengujian 6 liter diperoleh error sebesar 2,5% dari batas error 10%.

1. PENDAHULUAN

Pada industri kimia formulasi cair, pengukuran debit dan volume air merupakan proses krusial untuk penyiapan larutan baku, pengenceran, dan pengisian kemasan. Selama ini, banyak lini menggunakan flow meter in-line (turbin/elektromagnetik) yang akurat namun memerlukan penghentian aliran saat pemasangan atau perawatan, penyesuaian diameter dan sambungan pipa, serta berpotensi menambah rugi tekan, sehingga kurang ideal bagi operasi yang menuntut fleksibilitas tinggi dan sering berubah resep.

Sebagai jawaban atas kebutuhan fleksibilitas, digunakan metode pengukuran yang tidak mengubah konstruksi pipa dengan memasang sensor ultrasonik clamp-on dari luar. Ultrasonik adalah suara atau getaran dengan frekuensi ≥ 20 kHz dan banyak dimanfaatkan pada pengukuran jarak/level berbasis pantulan [1]. Namun, penelitian ini tidak memakai pendekatan ranging, melainkan transit-time yang lebih tepat untuk mengestimasi kecepatan alir secara langsung di dalam pipa pada kondisi operasi [2].

Flow meter ultrasonik *clamp-on* berbasis transit-time bersifat non-intrusif sehingga tidak mengganggu integritas pipa dan menimbulkan rugi tekan sangat kecil [3]. Dua transduser dipasang searah dan berlawanan arah aliran; selisih waktu rambat gelombang dikonversi menjadi kecepatan alir (m/s) lalu

*Corresponding author: Jevan Farica

Email address: 612020002@student.uksw.edu

debit ($Q = v \cdot A$). Keunggulannya ialah pemasangan cepat, tanpa obstruksi, dan cocok untuk retrofit, sementara tantangannya mencakup kondisi dinding pipa, mutu coupling gel, geometri pemasangan (*V-mount*, *W-mount*, *Z-mount*), profil kecepatan, serta adanya gelembung/partikel tersuspensi [4], [5].

Fokus aplikasi berada pada stasiun pencampur dan pengisian di industri kimia formulasi dengan resep etanol 70% v/v untuk disinfeksi [6]. Pengenceran dihitung menggunakan $C_1V_1 = C_2V_2$; agar mencapai 70% v/v, kebutuhan untuk 2 L, 4 L, dan 6 L berturut-turut $\pm 1,458$ L, $\pm 2,917$ L, dan $\pm 4,375$ L etanol 96%, kemudian air ditambahkan hingga volume akhir untuk mengkompensasi kontraksi campuran etanol dengan air [7]. Skema penelitian dengan pengujian volume air 2, 4, dan 6 liter diselaraskan dengan alur kerja yang dimana 2 L untuk uji cepat dan verifikasi resep, 4 L setara satu galon untuk standar pengisian, dan 6 L sebagai mini-batch berdurasi lebih panjang guna menilai drift sensor, stabilitas telemetri, dan konsistensi kendali sebelum scale-up.

Untuk memudahkan operasi, *Blynk* IoT digunakan sebagai antarmuka pemantauan jarak jauh sehingga operator dapat memilih set point 2, 4, atau 6 liter serta memantau debit-volume, velocity, dan fluid sound secara waktu nyata. Secara teknis, sistem mengandalkan sensor ultrasonik clamp-on transit-time pada pipa 4 inci (konfigurasi *V-mount*) dengan ESP32 sebagai pusat pemrosesan dan telemetri; sinyal waktu rambat dikonversi menjadi kecepatan alir, debit dihitung melalui $Q = v \cdot A$, lalu diintegrasikan menjadi volume. Logika *early-stop* berbasis integrasi volume diterapkan untuk menekan overshoot, sedangkan kinerja dievaluasi melalui galat volume, waktu pencapaian set point, dan keterulangan hasil dalam satu aplikasi yang konsisten [8]. Penggunaan Tuf-2000M yang terintegrasi dengan Sensor Ultrasonik dan juga terhubung dengan ESP32 berbasis IoT serta dapat dikontrol dengan jarak jauh memudahkan untuk melakukan monitoring debit air yang mengalir dan juga memudahkan untuk mengontrol volume air yang akan digunakan.

2. LITERATURE REVIEW

Penelitian tentang monitoring pengukuran debit air berbasis IoT telah dilakukan oleh [9] dengan akurasi pembacaan sensor sebesar 97,53%. Namun sensor yang digunakan memiliki sifat *intrusive* atau harus dipasang diantara aliran fluida/ dalam pipa. Pada industri yang berjalan, penggunaan sensor *intrusive* memerlukan investasi yang besar karena harus menghentikan operasi dan mengganti pipa yang sudah ada. Permasalahan ini dapat diatasi dengan *Ultrasonic flow meter* yang dapat mengukur aliran fluida menggunakan gelombang ultrasonik [10]. Perangkat ini memiliki dua metode utama, yakni *Transit-Time-Difference* (TTD) dan *ultrasound Doppler*. Metode *Doppler* digunakan untuk fluida yang mengandung partikel seperti gelembung atau pasir karena pengukurannya bergantung pada partikel yang melintas, sedangkan TTD ditujukan untuk fluida homogen tanpa partikel dengan keunggulan akurasi tinggi, perawatan rendah, dan biaya ekonomis [11]. TTD memiliki tiga topologi (*Z*, *V*, *W*) dan dua tipe implementasi, yaitu *in-line* dan *clamp-on*.

Penelitian ini menggunakan *Ultrasonic flow meter* TUF-2000M yang dipasang/ ditempel (*clamp-on*) pada bagian luar pipa sehingga tidak perlu mengubah konfigurasi pipa. Integrasi dengan IoT telah dilakukan pada penelitian [12] namun hanya untuk memonitor debit air saja melalui perangkat android. Dalam penelitian ini integrasi IoT akan digunakan untuk memonitor aliran fluida yang mengalir sekaligus mengendalikan volume fluida yang mengalir.

3. METODE

3.1 Pengukuran Debit Air

Pengukuran debit air dapat dilakukan dengan secara langsung dan secara tidak langsung. Pengukuran secara langsung adalah pengukuran yang dilakukan menggunakan peralatan alat ukur arus atau debit air. Dan hasil pengukuran dapat langsung diketahui setelah dilakukan perhitungan setelah pengukuran selesai dilakukan. Pengukuran debit secara tidak langsung adalah pengukuran debit air yang dilakukan dengan menggunakan rumus hidrolika, contohnya rumus *Manning* atau *Chezy*. Debit air adalah ukuran banyaknya volume air yang melewati suatu tempat dalam satuan waktu. Besarnya debit air dihitung berdasarkan perkalian antara kecepatan aliran dan luas penampang pipa sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (1).

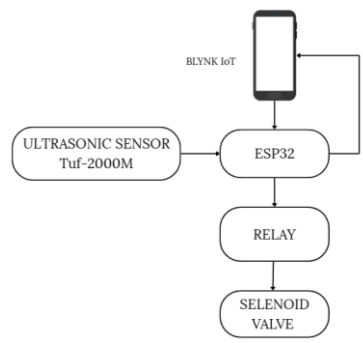
$$Q = v \times A \quad (1)$$

Dimana Q adalah Debit Air, v adalah Kecepatan Debit Air (m/s), dan A adalah Luas Penampang (m^2). Sistem yang dirancang dengan menggunakan komponen-komponen elektronika, yakni ESP32 yang digunakan sebagai mikrokontroler pada sistem dan berfungsi sebagai pusat pengolahan data. ESP32 sudah dilengkapi dengan fitur Wi-Fi sehingga digunakan dalam berbagai proyek IoT. Terdapat juga Tuf-2000M yang terintegrasi dengan Sensor Ultrasonik yang berfungsi untuk pembacaan aliran fluida.

Kemudian *Power Supply* 24V yang digunakan untuk mensuplai daya Tuf-2000M dan perangkat elektronika lainnya.

Selain menggunakan ESP32, Tuf-2000M, Sensor Ultrasonik, dan Power Supply 24V, sistem ini juga menggunakan komponen elektronika lainnya. Modbus RTU RS485 TTL yang berfungsi untuk komunikasi pertukaran data antara ESP32 dan Tuf-2000M, dengan cara mengambil alamat register dari data yang akan digunakan yakni data dari Tuf-2000M. Selanjutnya, komponen *Buck Converter* yang digunakan untuk menurunkan tegangan dari 24V menjadi 5V yang digunakan untuk supply ESP32 dan komponen elektronika lainnya. Modul *Relay* berfungsi sebagai saklar kontrol untuk mengaktifkan dan menonaktifkan katup *solenoid*, sehingga posisi katup dapat dibuka atau ditutup sesuai perintah. Sistem ini menggunakan metode Transit Time Difference dengan pemasangan sensor dengan cara clamp-on dengan topologi pemasangan sensor menggunakan topologi V serta sudah terintegrasi dengan IoT.

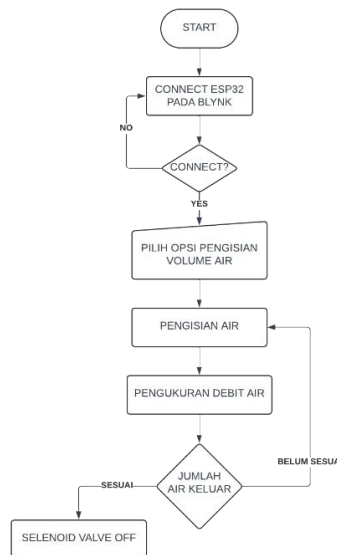
Metode yang dilakukan pada penelitian ini merupakan perancangan yang digunakan untuk mengatur volume air dan membaca debit air serta dapat dikontrol melalui aplikasi *Blynk*. Berikut adalah diagram blok dari perancangan sistem. Struktur fungsional dari alat yang dirancang secara garis besar dapat dilihat pada Diagram Blok Sistem yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

3.2 Flowchart Sistem

Flowchart pada gambar 2 menunjukkan alur kerja sistem secara menyeluruh. Sistem akan beroperasi ketika sudah dinyalakan, kemudian langkah pertama yang dilakukan adalah menghubungkan ESP32 dengan *Blynk* IoT. Jika terhubung maka akan lanjut ke tahap berikutnya dan jika belum terhubung maka proses penghubungan antara ESP32 dan *Blynk* IoT terus berjalan. Saat terhubung maka lanjut ke proses pemilihan opsi volume air yang akan digunakan, setelah melakukan pemilihan volume air maka sistem akan bekerja dan melakukan pengisian sesuai target volume air, dilakukan pengukuran debit air untuk menghitung apakah volume air sudah sesuai dengan target atau belum jika belum sesuai dengan volume target yang ditetapkan maka proses pengisian terus berlanjut dan jika volume air sudah sesuai maka pengisian akan berhenti.



Gambar 2. Flowchart Sistem

3.3 Sketsa Perancangan

Perancangan perangkat keras diawali dengan pembuatan desain tiga dimensi (3D) alat yang kemudian direalisasikan dalam bentuk fisik. Desain 3D tersebut dibuat menggunakan software SOLIDWORKS, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Sementara itu, perancangan tampilan aplikasi *Blynk* dilakukan menggunakan *website editing* berbasis 2D sebagai acuan dalam proses realisasi, sehingga dapat meminimalkan kesalahan pada tahap implementasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Desain Hardware



Gambar 4. Desain Software

Selanjutnya, Perancangan perangkat lunak dilakukan dengan menggunakan aplikasi Arduino IDE sebagai software untuk memprogram ESP32 agar dapat terintegrasi dengan aplikasi *Blynk*. Kemudian, tampilan aplikasi *Blynk* dibuat dengan menyesuaikan kebutuhan yang akan digunakan dengan memanfaatkan fitur-fitur yang tersedia dari platform tersebut.

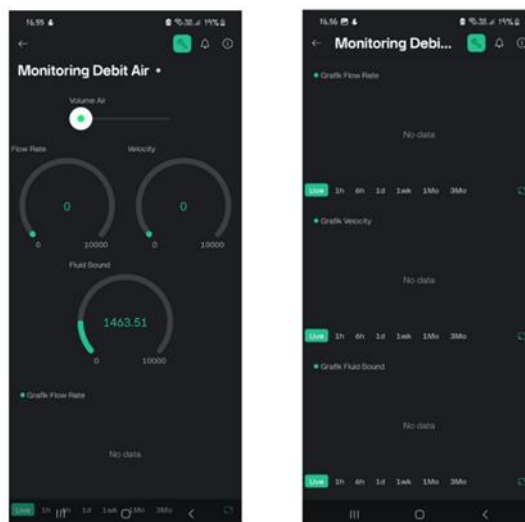
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Realisasi Alat

Perancangan perangkat lunak dimulai dengan mendesain tampilan aplikasi monitoring menggunakan website editing desain dua dimensi yang berfungsi sebagai acuan sebelum merealisasikan tampilan dalam aplikasi *Blynk* IoT.



Gambar 5. Realisasi Alat



Gambar 6. Realisasi Aplikasi Blynk IoT

Gambar 5 menunjukkan pengukuran debit air dengan flowmeter ultrasonik clamp-on pada pipa PVC, memanfaatkan tandon di atas sebagai *head* gravitasi dan katup solenoid untuk ON-OFF aliran. ESP32 membaca data *flowmeter*, mengendalikan solenoid via relay, dan mengirimkannya ke *Blynk* untuk tampilan gauge dan grafik real-time seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Sistem memungkinkan pengukuran debit/volume tanpa melubangi pipa, dengan akurasi yang sangat dipengaruhi oleh pemasangan transduser dan kondisi aliran.

4.2 Pengujian System

Pengujian dilakukan pada sistem yang telah terintegrasi dengan IoT. Target volume ditentukan melalui aplikasi *Blynk*, kemudian sistem memantau tiga parameter utama, yaitu *flow rate* (Q), *velocity* (v), dan *fluid sound* (c). Nilai v digunakan untuk memastikan penerapan Persamaan (1), tetap akurat, membedakan fluktuasi aliran yang sebenarnya dari noise, serta memperkirakan sisa aliran saat katup menutup sehingga overshoot dapat diminimalkan. Sementara itu, parameter c berfungsi sebagai indikator kualitas pengukuran. Perubahan nilai c dapat mengindikasikan adanya gelembung udara, perubahan suhu, atau ketidaktepatan pemasangan transduser yang pada akhirnya memengaruhi nilai v dan Q .

Volume akhir hasil pengukuran kemudian divalidasi menggunakan gelas ukur, dan seluruh data ditampilkan secara *real-time* pada aplikasi *Blynk* sehingga mudah untuk dipantau. Target kesalahan (error) maksimum yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah 10%. Untuk menganalisis hasil pengukuran volume air, perhitungan error volume dilakukan menggunakan Persamaan (2), sedangkan perhitungan rata-rata error volume menggunakan Persamaan (3).

$$\text{Error Volume Air (\%)} = \left(\frac{\text{Hasil Akhir Volume Air} - \text{Input Volume Air}}{\text{Input Volume Air}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Untuk mencari rata-rata error volume air menggunakan persamaan (2).

$$\text{Rata - rata Error Volume Air} = \left(\frac{\% \text{ Error}_1 + \% \text{ Error}_2 + \dots + \% \text{ Error}_{10}}{10} \right) \quad (3)$$

Penelitian ini akan menguji 3 jenis volume air yang akan dibutuhkan sebesar 2 liter, 4 liter dan 6 liter. Pada setiap percobaan pengisian (2 L, 4 L, 6 L), sistem merekam laju alir (*flow rate*), kecepatan aliran (*velocity*), dan kecepatan rambat suara (*fluid sound*). Untuk konsistensi pelaporan, nilai yang dicatat pada tabel adalah nilai puncak (*peak*) dari kurva *flow rate* dan *velocity* selama interval pengisian. Pengujian sistem dilakukan dengan cara 10 kali percobaan untuk setiap volume air yang akan digunakan. Dalam penelitian ini volume air yang digunakan 2 Liter, 4 Liter, dan 6 Liter. Berikut adalah hasil pengujian.

4.2.1 Pengujian Blynk IoT

Gambar 7 menunjukkan tampilan *Blynk* untuk pengujian volume 6 dimana aplikasi *Blynk* digunakan untuk mengatur volume air yang akan digunakan dan juga sebagai media informasi yang dilengkapi dengan tampilan visual sehingga memudahkan untuk melakukan pemantauan. Nilai yang ditampilkan merupakan nilai puncak (*peak*) yang diperoleh dari alat ukur, serta divisualisasikan dalam bentuk grafik (*flow rate*, *velocity*, dan *fluid sound*) pada antarmuka *Blynk* sebagai media informasi dan pemantauan.



Gambar 7. Tampilan *Blynk* saat pengujian volume 6 Liter

4.2.2 Pengujian Debit Air

Penelitian ini melakukan pengujian pada tiga variasi volume air, yaitu 2 liter, 4 liter, dan 6 liter. Pada setiap percobaan pengisian, sistem merekam parameter utama yang meliputi *flow rate*, *velocity*, dan *fluid sound*. Untuk menjaga konsistensi pelaporan, nilai yang dicatat pada tabel merupakan nilai puncak (*peak*) dari kurva *flow rate* dan *velocity* selama proses pengisian berlangsung.

Pengujian sistem dilakukan sebanyak 10 kali percobaan untuk masing-masing variasi volume air. Hasil pengujian untuk setiap variasi volume disajikan pada Tabel 1 untuk volume 2 liter, Tabel 2 untuk volume 4 liter, dan Tabel 3 untuk volume 6 liter.

Tabel 1. Pengujian Pengisian Volume Air 2 Liter

No	Input (Liter)	Data Flow (m ³ /h)	Data Velocity (m/s)	Hasil (Liter)	Waktu (Detik)	Error (%)
1	2L	1.054	0.033	2.2	7.80	10
2	2L	1.034	0.033	2	7.00	0
3	2L	1.020	0.032	2	7.37	0
4	2L	1.045	0.033	2.1	7.54	5
5	2L	1.010	0.032	2.1	7.72	5
6	2L	1.060	0.033	2.1	7.24	5
7	2L	1.000	0.031	2.1	7.53	5
8	2L	1.025	0.032	2.1	7.60	5
9	2L	1.040	0.033	2	7.07	0
10	2L	1.015	0.032	2.1	7.38	5
Rata-rata		1.0303	0.0324	2.08	7.43	4
Standar Devisiasi		0.0196	0.000699	0.063	0.26	3.16

Hasil pengujian untuk volume target 2 liter disajikan pada Tabel 1, di mana rata-rata galat yang diperoleh adalah 4%.

Tabel 2. Pengujian Pengisian Volume Air 4 Liter

No	Input (Liter)	Data Flow (m ³ /h)	Data Velocity (m/s)	Hasil (Liter)	Waktu (Detik)	Error (%)
1	4L	1.099	0.035	4	13.20	0
2	4L	1.089	0.034	3.99	13.22	0.25
3	4L	1.105	0.035	3.99	13.03	0.25
4	4L	1.095	0.034	4	13.15	0
5	4L	1.100	0.035	4	13.09	0
6	4L	1.085	0.034	3.99	13.27	0.25
7	4L	1.110	0.035	3.99	12.97	0.25
8	4L	1.092	0.034	4	13.19	0
9	4L	1.102	0.035	4	13.07	0
10	4L	1.097	0.035	4	13.13	0
Rata-rata		1.0974	0.0346	3.996	13.13	0.10
Standar Devisiasi		0.0075	0.00052	0.0052	0.093	0.13

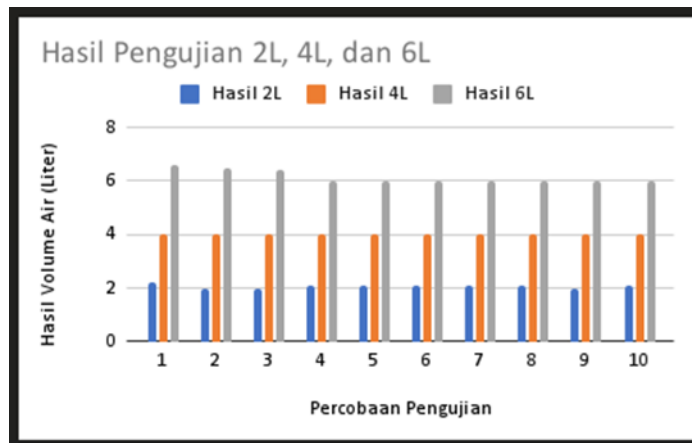
Hasil pengujian untuk volume target 4 liter disajikan pada Tabel 1, di mana rata-rata galat yang diperoleh adalah 0.10%.

Tabel 3. Pengujian Pengisian Volume Air 6 Liter

No	Input (Liter)	Data Flow (m ³ /h)	Data Velocity (m/s)	Hasil (Liter)	Waktu (Detik)	Error (%)
1	6L	1.234	0.039	6.6	19.43	10
2	6L	1.230	0.039	6.5	19.30	8.3
3	6L	1.220	0.038	6.4	18.95	6.7
4	6L	1.240	0.039	6	17.42	0
5	6L	1.228	0.039	6	17.59	0
6	6L	1.236	0.039	6	17.78	0
7	6L	1.218	0.038	5.99	17.73	0.2
8	6L	1.242	0.039	6	17.39	0
9	6L	1.226	0.039	6	17.62	0
10	6L	1.232	0.039	5.99	17.53	0.2
Rata-rata		1.2306	0.0388	6.148	18.07	2.5
Standar Devisiasi		0.0078	0.00042	0.247	0.812	4.079

Hasil pengujian untuk volume target 6 liter disajikan pada Tabel 1, di mana rata-rata galat yang diperoleh adalah 2.5%.

Data pada tabel hasil percobaan kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik untuk memperjelas hasil penelitian serta memudahkan analisis perbandingan antar set point. Visualisasi tersebut ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik Hasil Akhir Pengujian Volume Air 2 Liter, 4 Liter, dan 6 Liter

Pada hasil pengujian dengan volume air 2 liter sistem dapat berjalan dengan baik akan tetapi pada hasil akhir setelah dilakukan validasi dengan gelas ukur terdapat kelebihan air cukup bervariasi dari percobaan pertama sampai dengan percobaan kesepuluh. Dengan data diatas dan melalui perhitungan error rate serta perhitungan rata-rata error rate, didapatkan hasil rata-rata error rate untuk volume air 2 liter sebesar 4% dari batas maksimal 10% dan penyimpangan volume air secara keseluruhan didapatkan hasil sebesar 0,08 liter. Pada hasil pengujian dengan volume air 4 liter sistem dapat berjalan dengan baik akan tetapi pada hasil akhir setelah dilakukan validasi dengan gelas ukur terdapat kelebihan air cukup bervariasi dari percobaan pertama sampai dengan percobaan kesepuluh. Dengan data diatas dan melalui perhitungan error rate serta perhitungan rata-rata error rate, didapatkan hasil rata-rata error rate untuk volume air 4 liter sebesar 0,10% dari batas maksimal 10% dan penyimpangan volume air secara keseluruhan didapatkan hasil sebesar 0,004 liter. Pada hasil pengujian dengan volume air 6 liter sistem dapat berjalan dengan baik akan tetapi pada hasil akhir setelah dilakukan validasi dengan gelas ukur terdapat kelebihan air cukup bervariasi dari percobaan pertama sampai dengan percobaan kesepuluh. Dengan data diatas dan melalui perhitungan error rate serta perhitungan rata-rata error rate, didapatkan hasil rata-rata error rate untuk volume air 6 liter sebesar 2,5% dari batas maksimal 10% dan penyimpangan volume air secara keseluruhan didapatkan hasil sebesar 0,148 liter.

Error volume didefinisikan sebagai selisih relatif antara volume tercatat dan volume target, yang secara fisik terutama dipengaruhi dua komponen, yaitu *overshoot* saat penghentian aliran akibat jeda penutupan katup/solenoid dan inersia aliran, serta akumulasi fluktuasi debit sepanjang pengisian (*drift integral*). *Overshoot* berperilaku seperti tambahan volume hampir tetap per siklus sehingga persentasenya dominan pada target kecil, misalnya 2 L. Sementara itu, ketika target membesar, kontribusi *overshoot* menurun dan variasi debit cenderung termerata, tetapi *drift* yang terakumulasi pada durasi panjang justru dapat membesarkan galat, seperti pada 6 L. Fluktuasi debit sendiri dipicu oleh transien hidraulik on-off solenoid, perubahan *head* tandon, turbulensi dari sambungan atau belokan pipa yang dekat dengan sensor, mutu pemasangan *transducer clamp-on* mode V termasuk *couplant*, jarak, dan penyelarasan, serta kehadiran gelembung udara yang mengubah kecepatan rambat dan menambah noise. Konsekuensinya, volume kecil lebih sensitif terhadap *overshoot*, volume besar lebih rentan terhadap *drift* terintegrasi, sedangkan titik menengah seperti 4 L kerap menjadi “*sweet spot*” dengan galat terendah. Oleh karena itu, secara keseluruhan, variabilitas debit dari waktu ke waktu berkontribusi langsung pada integral volume yang dihitung sistem dan menjelaskan perbedaan error antar target.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang dilakukan pada prototipe sistem pengukur debit dan pengontrol volume air berbasis ESP32, sensor ultrasonik (*clamp-on*, metode *transit-time*, topologi V) dengan integrasi *blynk*, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Perancangan prototipe berhasil diwujudkan dan dapat melakukan pengukuran debit serta pengendalian volume pengisian secara real-time melalui aplikasi *Blynk* dengan hasil pengujian fungsional yang memadai.

2. Perhitungan volume air pada tahap akhir pada setiap input memiliki rata-rata yang berbeda dan dibawah 10%. Untuk perhitungan volume air 2 liter didapatkan hasil dengan rata-rata error volume air yang didapat sebesar 4% dari batas maksimal yaitu sebesar 10%. Perhitungan volume air 4 liter didapatkan hasil rata-rata error volume air sebesar 0,10% dari batas maksimal yaitu sebesar 10%. Perhitungan volume air 6 liter didapatkan hasil rata-rata error volume air sebesar 2,5% dari batas maksimal yaitu sebesar 10%.
3. Pengukuran menggunakan sensor ultrasonik *clamp-on* (metode *Transit-Time*, topologi V) dapat diaplikasikan pada pipa 4 inchi tanpa perlu memodifikasi konstruksi pipa (*non-intrusive*), sehingga alat bersifat portable dan mudah dipasang/pindah.
4. Integrasi ESP32 dengan *Blynk* berjalan efektif dan sistem mampu mengirim data *flow rate*, *velocity*, dan *fluid sound*, serta mengendalikan volume air yang telah tersedia untuk digunakan.
5. Hasil pengujian (uji volume 2 L, 4 L, 6 L) menunjukkan alat bekerja sesuai fungsi, namun terdapat selisih pembacaan dibandingkan pengukuran manual, diperlukan analisis kuantitatif error dan kalibrasi untuk memperbaiki akurasi. Berdasarkan hasil pengujian, hubungan antara target volume dan galat (error) tidak bersifat linier. Error justru mencapai nilai paling kecil pada target 4 liter, sementara pada 2 liter error lebih besar karena kontribusi overshoot saat penutupan aliran relatif dominan pada volume kecil, dan pada 6 liter error kembali meningkat akibat akumulasi fluktuasi debit sepanjang durasi pengisian yang lebih lama.

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, terdapat beberapa pengembangan atau future work yang dapat dilakukan untuk meningkatkan performa sistem ini. Langkah pertama yang krusial adalah melakukan analisis kuantitatif terhadap galat (error) dan proses kalibrasi yang lebih mendalam guna memperbaiki akurasi pembacaan sensor dibandingkan dengan pengukuran manual. Fokus pengembangan selanjutnya perlu diarahkan pada perbaikan logika penghentian aliran untuk meminimalkan overshoot yang dominan terjadi pada target volume kecil seperti 2 liter, serta menekan akumulasi fluktuasi debit (drift integral) pada durasi pengisian yang lebih panjang seperti pada target 6 liter. Selain itu, sistem ini dapat ditingkatkan dengan mengintegrasikan kompensasi otomatis terhadap faktor lingkungan, mengingat parameter kecepatan rambat suara (fluid sound) sangat sensitif terhadap perubahan suhu dan keberadaan gelembung udara di dalam pipa. Terakhir, pengujian lebih lanjut dapat dilakukan dengan memvariasikan jenis fluida atau kondisi pipa yang berbeda untuk menguji konsistensi dan fleksibilitas pemasangan sensor *clamp-on* ini dalam skala operasional yang lebih luas.

REFERENCE

- [1] S. S. Wibowo, K. Suharno, and S. Widodo, "Analisis Debit Fluida Pada Pipa Elbow 90° Dengan Variasi Diameter Pipa," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 1, Mar. 2017, doi: 10.31002/jom.v1i1.377.
- [2] Y. Gao *et al.*, "A miniaturized transit-time ultrasonic flowmeter based on ScAlN piezoelectric micromachined ultrasonic transducers for small-diameter applications," *Microsyst. Nanoeng.*, vol. 9, no. 1, p. 49, Apr. 2023, doi: 10.1038/s41378-023-00518-y.
- [3] E. Mandard, D. Kouame, R. Battault, J.-P. Remenieras, and F. Patat, "Transit time ultrasonic flowmeter : velocity profile estimation," in *IEEE Ultrasonics Symposium, 2005.*, IEEE, pp. 763–766. doi: 10.1109/ULTSYM.2005.1602963.
- [4] P. Piechota, P. Synowiec, A. Andruszkiewicz, W. Wędrychowicz, E. Wróblewska, and A. Mrowiec, "Experimental Determination Influence of Flow Disturbances behind the Knife Gate Valve on the Indications of the Ultrasonic Flow Meter with Clamp-On Sensors on Pipelines," *Sensors*, vol. 23, no. 10, p. 4677, May 2023, doi: 10.3390/s23104677.
- [5] S. Alsaqoor *et al.*, "Examining Transit-Time Ultrasonic Flowmeter Inaccuracies during Changing Gas Velocity Profiles," *Processes*, vol. 11, no. 5, p. 1367, Apr. 2023, doi: 10.3390/pr11051367.
- [6] G. Xiling *et al.*, "In vitro inactivation of SARS-CoV-2 by commonly used disinfection products and methods," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 2418, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-82148-w.
- [7] G. Guevara-Carrión, R. Fingerhut, and J. Vrabec, "Density and Partial Molar Volumes of the Liquid Mixture Water + Methanol + Ethanol + 2-Propanol at 298.15 K and 0.1 MPa," *J. Chem. Eng. Data*, pp.3436–3449, 2021, doi: 10.1021/acs.jced.1c00356.
- [8] J. Musić, I. Stančić, B. Džaja, and V. Pekić, "Image-Based Sensor for Liquid Level Monitoring during Bottling with Application to Craft and Home-Brewing," *Sensors*, vol. 23, no. 16, p. 7126, Aug. 2023, doi: 10.3390/s23167126.

- [9] A. D. Prasetya, H. Haryanto, and K. A. Wibisono, "Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Pendeteksi Lokasi Kebocoran Pipa Berdasarkan Analisis Debit Air Berbasis IoT," *Elektrika*, vol. 12, no. 1, p. 39, Jun. 2020, doi: 10.26623/elektrika.v12i1.2338.
- [10] Y. Nurdin, B. Brades, L. Gaol, and M. K. Muchamad, "Kajian Perbandingan Desain Sensor Pengukur Water Flow di WTP PDAM Tirta Daroy Lambaro," *KITEKTRO: Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, dan Elektro*, vol. 7, no. 3, 2022.
- [11] M. A. GÜNGÖR, "Analyzing the Fluid Flow of Transit-Time Ultrasonic Flowmeter with Image Processing Technique and Developing a Quality Metric Depending on Pipe Profile," *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 193–200, Jul. 2020, doi: 10.17694/bajece.654414.
- [12] G. Aditya Rahardi, D. Nur Rachman, T. Elektro, and U. Jember, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Debit Air Berbasis Flowmeter Ultrasonik Clamp On dan IoT," *SinarFe7*, vol. 6, no. 1, pp. 198-204, 2024.