

Autofilling: Sistem Pengisian Air Otomatis Berbasis Load Cell dan Kendali Fuzzy Takagi-Sugeno dengan Pemantauan Real-Time pada Arduino

Autofilling: An Automatic Water Filling System Based on Load Cell and Takagi-Sugeno Fuzzy Control with Real-Time Monitoring on Arduino

¹Ferhad Zulfas, ¹Galih Setyawan*)

¹Universitas Gadjah Mada, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281, Indonesia

*) corresponding email: galih.setyawan@ugm.ac.id

Abstrak

Proses pengisian air otomatis membutuhkan akurasi tinggi agar jumlah air sesuai target. Sistem dengan kecepatan pompa konstan cenderung menghasilkan *overshoot* karena laju aliran tidak dapat disesuaikan saat mendekati target. Penelitian ini mengembangkan sistem *Autofilling* berbasis umpan balik berat dengan kendali *fuzzy logic* Takagi-Sugeno untuk mengatur kecepatan pompa secara adaptif. Sistem menggunakan Arduino Nano, *load cell*-HX711, pompa DC dengan pengaturan PWM, *solenoid valve*, dan HMI Nextion untuk pemantauan *real-time*. Kendali *fuzzy* menggunakan *error* dan *delta error* sebagai input untuk menentukan PWM pompa. Pengujian dilakukan pada target 200–1000 g dengan membandingkan sistem tanpa kendali *fuzzy* dan sistem dengan kendali *fuzzy* Takagi-Sugeno. Penerapan kendali *fuzzy* menurunkan rata-rata *error* dari 23,24 g menjadi 1,20 g dan persentase *error* dari 5,53% menjadi 0,21%, serta meningkatkan akurasi dari 94,47% menjadi 99,79%. Rata-rata durasi pengisian juga berkurang dari 44,61 s menjadi 22,08 s. Hasil menunjukkan bahwa pengaturan PWM adaptif berbasis *fuzzy* Takagi-Sugeno meningkatkan akurasi dan mengurangi *overshoot*, dengan durasi pengisian yang lebih singkat pada konfigurasi pengujian yang digunakan.

Kata Kunci: *Arduino, fuzzy Takagi-Sugeno, load cell, HMI, PWM*

Abstract

The automatic water filling process requires high accuracy to ensure that the filled amount meets the specified target. Systems operating at a constant pump speed tend to produce *overshoot* because the flow rate cannot be adjusted as the target is approached. This study develops an *Autofilling* system based on weight feedback using Takagi-Sugeno fuzzy logic control to adaptively regulate the pump speed. The system integrates an Arduino Nano, a load cell with an HX711 module, a PWM-controlled DC pump, a solenoid valve, and a Nextion HMI for real-time monitoring. The fuzzy controller uses error and delta error as inputs to determine the pump PWM. Tests were conducted at target weights ranging from 200 to 1000 g by comparing the system without fuzzy control with the Takagi-Sugeno fuzzy-controlled system. The fuzzy controller reduced the average error from 23.24 g to 1.20 g and the percentage error from 5.53% to 0.21%, while increasing the accuracy from 94.47% to 99.79%. The average filling duration was also reduced from 44.61 s to 22.08 s. These results demonstrate that Takagi-Sugeno fuzzy control improves accuracy and reduces *overshoot*, with a shorter filling duration under the experimental configuration used.

Keywords: *Arduino, Takagi-Sugeno fuzzy, load cell, HMI, PWM*

Makalah diterima 22 Juni 2026 – makalah direvisi 21 September 2026 – disetujui 02 Oktober 2026

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



1 Pendahuluan

Teknologi otomasi telah berkembang pesat untuk meningkatkan efisiensi, ketepatan, dan kestabilan proses kerja di berbagai sektor industri. Proses yang sebelumnya bergantung pada pengawasan manual kini diarahkan ke sistem otomatis untuk mengurangi kesalahan manusia dan meningkatkan kualitas kendali. Salah satu penerapannya adalah sistem pengisian air otomatis, yang memastikan jumlah cairan sesuai target berat atau volume. Pengisian manual memerlukan tenaga dan waktu besar, sehingga menurunkan produktivitas, sementara sistem otomatis meningkatkan mutu produk, mempercepat produksi, mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja, menekan biaya operasional, meminimalkan pemborosan bahan baku, dan mengurangi waktu tidak produktif [1],[2]. Sistem pengisian otomatis banyak digunakan dalam manufaktur, termasuk produksi deterjen, sabun cair, jus, susu, dan air minum botolan, sehingga meningkatkan efisiensi waktu, konsistensi pengisian, dan pengendalian kualitas produk dibanding metode manual [3].

Akurasi pengukuran berat aktual menjadi faktor penting karena memengaruhi ketepatan pengisian, kinerja pompa, dan kestabilan proses. Pengisian manual berpotensi menghasilkan jumlah cairan tidak sesuai target akibat keterlambatan penghentian pompa [4],[5]. Selain itu, pompa yang bekerja dengan laju aliran tetap saat mendekati target dapat menyebabkan *overshoot* akibat material *in flight* [5],[6]. Oleh karena itu, sistem otomatis diperlukan untuk membaca berat secara *real-time* dan menyesuaikan kecepatan pompa secara bertahap [5],[7].

Pengukuran berat dilakukan menggunakan sensor *load cell* dengan modul HX711, yang mendeteksi perubahan beban pada tangki dan digunakan sebagai umpan balik untuk kontroler [8]. Selisih antara target dan berat aktual menjadi dasar pengaturan PWM pompa DC agar proses pengisian terukur dan tidak bergantung pada observasi manual [9]. Sistem ini memiliki karakteristik nonlinear karena debit air dapat berubah akibat respon pompa, kondisi aliran, tekanan, dan *delay* antara perintah kontrol dan berat terbaca sensor [10]. Karakteristik ini menyulitkan pengendalian jika hanya menggunakan pompa dengan kecepatan tetap.

Metode *fuzzy logic* Takagi-Sugeno dipilih karena mampu menghasilkan keputusan kendali berbasis aturan tanpa memerlukan model matematis presisi [11]. T-S mengendalikan sistem non-linear secara adaptif melalui aturan *fuzzy* yang menghubungkan input ke output deterministik, dan telah terbukti efektif pada sistem interferometri, kontrol struktur, dan robotika, serta mengurangi efek non-idealitas dan gangguan eksternal menggunakan model berbasis LMI [12]. Output T-S berupa nilai crisp sehingga bisa langsung diterapkan pada aktuator untuk mengatur pompa *real-time*. Keunggulannya dibanding Mamdani atau PID adalah inferensi cepat, output langsung, kontrol responsif, dan tidak memerlukan model matematis presisi [13],[14].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pengisian dan penimbangan otomatis menggunakan pendekatan pengukuran dan metode kendali yang berbeda. Tiboni et al. [15] menerapkan *load cell* untuk pemantauan berat secara kontinu pada sistem *automatic weight filling* cairan, sedangkan Er et al. [16] mengembangkan pendekatan adaptif berbasis *fuzzy logic* pada sistem penimbangan dinamis berbasis *load cell*. Sinchai et al. [17] menunjukkan bahwa kelebihan berat setelah proses pengisian merupakan permasalahan penting pada sistem *filling weighing* sehingga diperlukan kompensasi *setpoint* untuk meningkatkan ketepatan berat akhir. Penelitian lain juga telah menerapkan kontrol ON/OFF, PID, dan *fuzzy Mamdani* pada sistem pengisian dengan karakteristik umpan balik yang berbeda. Perbandingan penelitian terdahulu yang paling berkaitan dengan sistem yang dikembangkan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan penelitian terdahulu dan sistem *autofilling*

No.	Referensi	Fokus sistem	Komponen utama	Kelemahan sistem sebelumnya	Inovasi penelitian <i>Autofilling</i>
1	Fuad Mahathir Dawalo dan Edy Victor Haryanto (2024) [18]	Sistem pengisian air galon otomatis berbasis berat	Arduino, <i>load cell</i> , sensor ultrasonik, dan <i>solenoid valve</i>	Masih menggunakan kontrol ON/OFF.	Menggunakan kendali <i>fuzzy Takagi-Sugeno</i> untuk mengatur PWM pompa berdasarkan <i>error</i> dan <i>delta error</i>
2	Hilmi Kuscu dan Kubilay Ozyalcin (2026) [19]	Sistem pengisian cairan otomatis berbasis umpan balik berat	<i>Load cell</i> , servo motor, dan kontrol PID	Menggunakan kontrol PID yang memerlukan penentuan parameter kendali dan belum menerapkan <i>fuzzy logic</i>	Menggunakan <i>fuzzy Takagi-Sugeno</i> untuk mengendalikan pompa secara adaptif pada sistem pengisian berbasis <i>load cell</i>
3	Riga Sahputra Dewa, Desmira, dan Irwanto (2026) [20]	Sistem pengisian ulang air mineral otomatis berbasis <i>fuzzy logic</i>	ESP32, sensor IR, sensor ultrasonik, dan <i>fuzzy Mamdani</i>	Pengukuran menggunakan ketinggian air dan metode <i>fuzzy Mamdani</i> , bukan pengukuran berat	Menggunakan <i>load cell</i> sebagai umpan balik berat, <i>fuzzy Takagi-Sugeno</i> , serta HMI untuk pemantauan sistem secara <i>real-time</i>

Berdasarkan Tabel 1, sistem *Autofilling* memiliki perbedaan utama pada metode pengendalian dan jenis umpan balik yang digunakan. Penelitian Dawalo dan Haryanto masih menerapkan kontrol ON/OFF, sehingga laju pompa tidak dapat disesuaikan secara bertahap ketika berat mendekati target. Penelitian Kuscu dan Ozyalcin telah menggunakan umpan balik berat, tetapi pengendalian dilakukan dengan metode PID yang memerlukan penentuan parameter kendali. Sementara itu, penelitian Dewa, Desmira, dan Irwanto menerapkan *fuzzy Mamdani* dengan sensor ketinggian air, sehingga pengendalian tidak didasarkan pada berat aktual cairan.

Berdasarkan perbandingan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem *Autofilling*, yaitu sistem pengisian air otomatis berbasis umpan balik berat yang mengintegrasikan *load cell*, Arduino Nano, kendali *fuzzy Takagi-Sugeno*, pengaturan PWM pompa, dan HMI dalam satu sistem. *Load cell* digunakan sebagai umpan balik berat

aktual, sedangkan *fuzzy* Takagi-Sugeno menentukan nilai PWM pompa berdasarkan *error* dan *delta error* sehingga kecepatan pompa dapat disesuaikan secara adaptif ketika berat mendekati *setpoint*. HMI digunakan untuk memasukkan *setpoint* dan memantau kondisi sistem secara *real-time*. Integrasi pengukuran berat, pengendalian PWM adaptif, dan pemantauan *real-time* tersebut menjadi kontribusi utama penelitian ini dibandingkan sistem sebelumnya yang menggunakan kontrol ON/OFF, PID berbasis berat, atau *fuzzy* Mamdani berbasis pengukuran ketinggian.

Pada penelitian ini, *error* berat didefinisikan sebagai selisih antara target dan berat aktual, sedangkan *delta error* merupakan perubahan *error* dari siklus sebelumnya [21]. Kedua variabel tersebut digunakan sebagai input kendali *fuzzy* Takagi-Sugeno untuk menentukan PWM pompa secara adaptif. Pengujian dilakukan pada sistem tanpa kontrol *fuzzy* menggunakan PWM konstan dan sistem dengan kontrol *fuzzy* Takagi-Sugeno. Kinerja sistem dievaluasi berdasarkan berat akhir, *error*, persentase *error*, akurasi, *overshoot*, durasi pengisian, dan respons berat terhadap waktu.

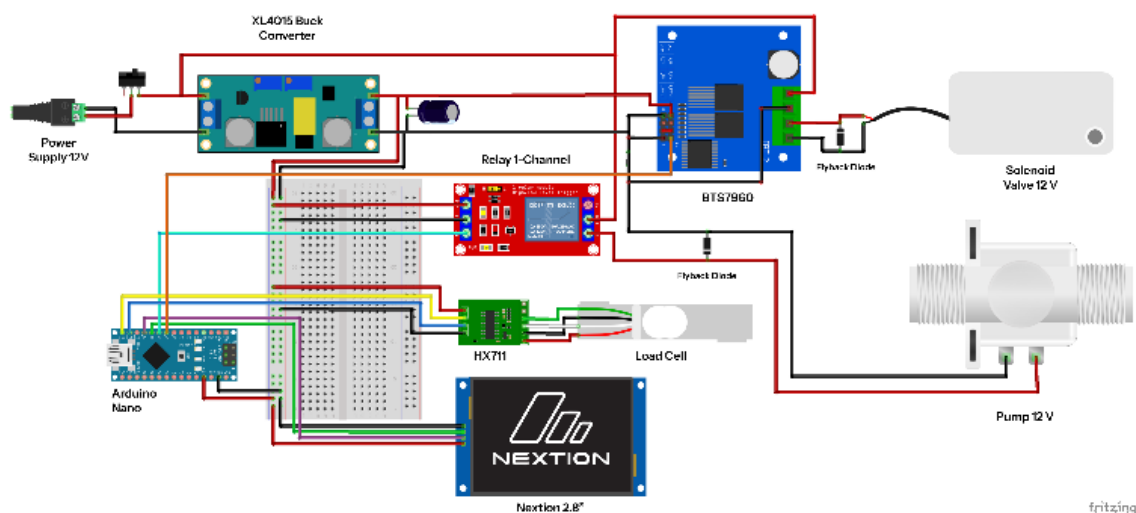
Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi sistem *Autofilling* berbasis umpan balik berat dengan kendali *fuzzy* Takagi-Sugeno untuk mengatur PWM pompa secara adaptif berdasarkan *error* dan *delta error*. Kinerja sistem dibandingkan dengan sistem tanpa kontrol *fuzzy* menggunakan PWM konstan untuk mengevaluasi pengaruh kendali terhadap ketepatan pengisian, *error*, *overshoot*, dan respons pengisian [22].

2 Metode

Metode penelitian ini meliputi perancangan perangkat keras yang mencakup desain mekanis dan *wiring diagram*, dilanjutkan dengan perancangan kontrol *fuzzy logic* Takagi-Sugeno yang mencakup penentuan input *error* dan *delta error*, fungsi keanggotaan, *rule base*, serta output PWM pompa. Setelah itu, dilakukan perancangan perangkat lunak berupa pemrograman mikrokontroler dan desain antarmuka HMI. Tahap selanjutnya meliputi verifikasi dan kalibrasi *load cell*, pengujian sistem tanpa dan dengan kontrol *fuzzy logic*, serta analisis perbandingan hasil pengujian kedua sistem.

2.1 Desain Wiring Diagram

Desain *wiring diagram* menyajikan hubungan skematis antarkomponen pada sistem, termasuk port dan pin yang digunakan serta konfigurasi sumber tegangan, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem terdiri atas *power supply* 12V, *buck converter* XL4015, Arduino Nano, HMI Nextion, HX711, *load cell*, *relay*, *driver* BTS7960, pompa DC, dan *solenoid valve*. Spesifikasi komponen utama dirangkum pada Tabel 2.



Gambar 1 Diagram rangkaian yang digunakan dalam penelitian

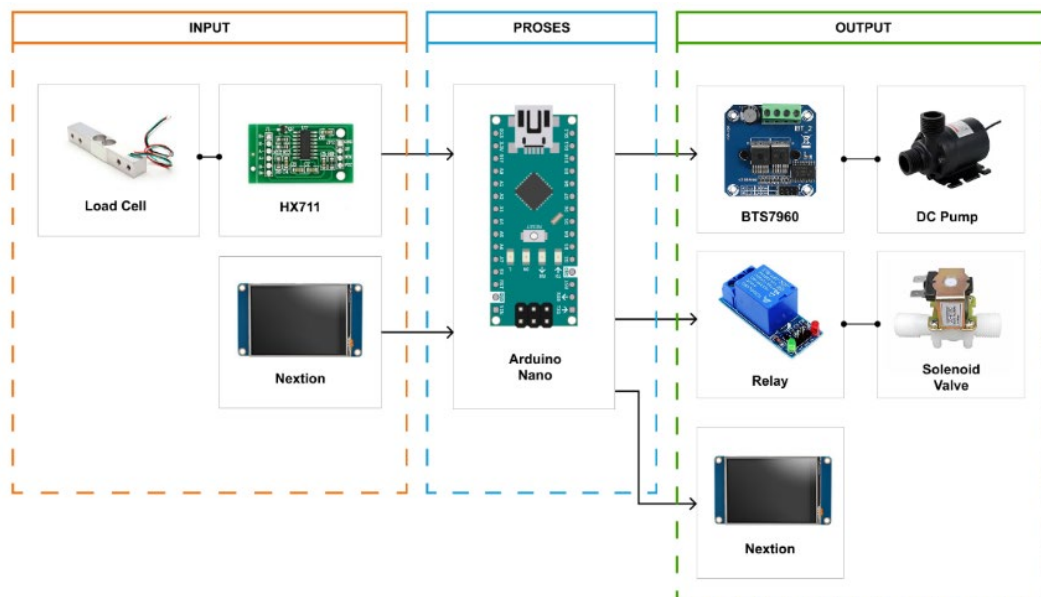
Power supply 12 V digunakan untuk menyuplai aktuatur, sedangkan *buck converter* menurunkan tegangan untuk komponen kontrol. Arduino Nano menerima data berat dari *load cell* melalui HX711 [23] dan berkomunikasi dengan HMI Nextion untuk menerima *setpoint* serta menampilkan kondisi sistem. Pompa DC dikendalikan melalui BTS7960 menggunakan sinyal PWM hasil kendali *fuzzy* Takagi-Sugeno, sementara *solenoid valve* dioperasikan melalui *relay*. *Flyback diode* dipasang pada beban induktif untuk melindungi rangkaian dari lonjakan tegangan balik. Kalibrasi dilakukan dengan menetapkan kondisi tanpa beban sebagai titik nol (*tare*) dan menggunakan beban referensi yang telah diketahui nilainya untuk menentukan faktor kalibrasi. Setelah proses kalibrasi, pembacaan *load cell* diverifikasi pada beberapa variasi beban dengan membandingkan nilai hasil pengukuran terhadap berat referensi.

Tabel 2. Spesifikasi komponen utama

Komponen	Spesifikasi utama	Fungsi
Arduino Nano	ATmega328P	Kontroler utama
Load cell	Kapasitas 5Kg	Pengukuran berat
HX711	ADC 24-bit	Akuisisi sinyal <i>load cell</i>
Pompa DC	12 V	Pengisian air
BTS7960	Driver motor DC	Pengaturan PWM pompa
Solenoid valve	12 V	Pengaturan aliran
HMI Nexion	Komunikasi UART/USART	Input <i>setpoint</i> dan monitoring

2.2 Diagram Blok Fungsional Sistem

Untuk memudahkan pemahaman terhadap alur kerja sistem, diagram blok fungsional digunakan sebagai representasi visual yang menunjukkan hubungan antarbagian utama sistem, yaitu *input*, *proses*, dan *output*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram blok fungsi sistem

Bagian input terdiri atas *load cell*, modul HX711, dan HMI Nexion. *Load cell* berfungsi mengukur berat air pada tangki proses, sedangkan HX711 digunakan untuk memperkuat dan mengonversi sinyal dari *load cell* agar dapat dibaca oleh Arduino Nano. HMI Nexion digunakan sebagai media input *setpoint* dan perintah sistem. Pada bagian proses, Arduino Nano berfungsi sebagai pusat kendali yang mengolah data berat aktual dan masukan pengguna menggunakan *fuzzy logic* metode Takagi-Sugeno untuk menghasilkan sinyal PWM. Bagian output terdiri atas *driver* BTS7960, pompa DC, *relay*, *solenoid valve*, dan tampilan HMI Nexion. BTS7960 mengatur kecepatan pompa berdasarkan sinyal PWM dari Arduino, *relay* mengendalikan *solenoid valve* sebagai katup aliran air, sedangkan HMI menampilkan informasi sistem seperti berat aktual, status pompa, status *valve*, nilai PWM, *error*, *delta error*, dan proses pengisian secara *real-time*.

2.3 Perancangan Sistem Kontrol

Kendali *fuzzy logic* Takagi-Sugeno menggunakan dua variabel input, yaitu *error*Berat (e) dan *deltaError* (Δe), serta satu output berupa *pwm*Pompa. *Error* merupakan selisih antara *setpoint* berat (W_{SP}) dan berat aktual ($W(k)$), sedangkan *delta error* menunjukkan perubahan *error* antara dua siklus pengukuran berturut-turut:

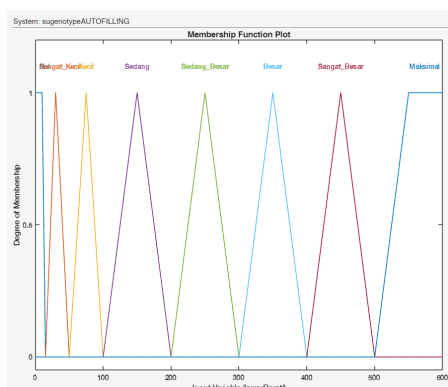
$$e(k) = W_{SP} - W(k) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (2)$$

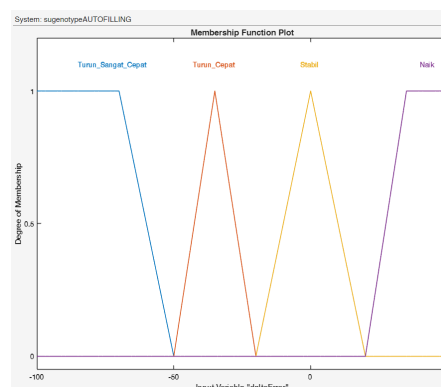
Input errorBerat dirancang pada rentang 0–600 g menggunakan delapan fungsi keanggotaan, sedangkan deltaError menggunakan empat fungsi keanggotaan pada rentang –100 sampai 50 g. Fungsi keanggotaan menggunakan kombinasi kurva segitiga dan trapesium. Parameter numeriknya dirangkum pada Tabel 3, sedangkan bentuk fungsi keanggotaan ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Tabel 3 Parameter fungsi keanggotaan *input*

Input	Himpunan <i>fuzzy</i>	Tipe	Parameter (g)
errorBerat	Nol	Trapesium	[0 0 10 15]
	Sangat Kecil	Segitiga	[15 30 50]
	Kecil	Segitiga	[50 75 100]
	Sedang	Segitiga	[100 150 200]
	Sedang Besar	Segitiga	[200 250 300]
	Besar	Segitiga	[300 350 400]
	Sangat Besar	Segitiga	[400 450 500]
	Maksimal	Trapesium	[500 550 600 600]
deltaError	Turun Sangat Cepat	Trapesium	[-100 -100 -70 -50]
	Turun Cepat	Segitiga	[-50 -35 -20]
	Stabil	Segitiga	[-20 0 20]
	Naik	Trapesium	[20 35 50 50]



Gambar 3. *Membership function input errorBerat*



Gambar 4. *Membership function input deltaError*

Sistem menggunakan Takagi-Sugeno orde nol dengan konsekuen berupa nilai PWM konstan, yaitu 0, 70, 80, 90, 110, 140, 170, 190, dan 200. Nilai konsekuen PWM dipilih berdasarkan pengujian awal karakteristik pompa untuk memperoleh rentang operasi yang menghasilkan aliran stabil serta memungkinkan laju pengisian dikurangi secara bertahap ketika berat mendekati *setpoint*. Nilai PWM yang lebih tinggi diterapkan ketika *error* masih besar untuk mempercepat pengisian, sedangkan nilai PWM yang lebih rendah digunakan ketika *error* mengecil untuk mengurangi potensi *overshoot*. Aturan ke-*i* secara umum dinyatakan sebagai:

$$R_i: \text{IF } e \text{ is } A_i \text{ AND } \Delta e \text{ is } B_i \text{ THEN } z_i = c_i \quad (3)$$

dengan A_i dan B_i merupakan himpunan fuzzy pada kedua input dan c_i merupakan nilai PWM konsekuen. *Rule base* yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai akhir keluaran diperoleh menggunakan metode *weighted average*:

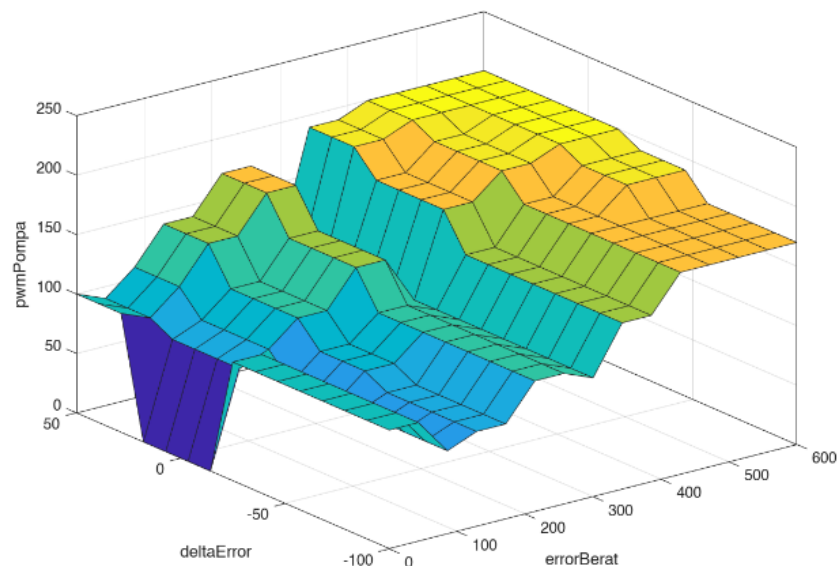
$$PWM = \frac{\sum_{i=1}^n w_i c_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4)$$

dengan w_i merupakan kekuatan aktivasi aturan ke-*i*, c_i merupakan nilai PWM konsekuen, dan n merupakan jumlah aturan yang aktif. Dengan mekanisme ini, PWM dapat diturunkan secara bertahap ketika berat

mendekati *setpoint* untuk mengurangi *overshoot*. Hubungan antara *errorBerat*, *deltaError*, dan *pwmPompa* ditampilkan pada *control surface* Gambar 5.

Tabel 4. *Rule base* fuzzy Takagi-Sugeno

<i>errorBerat</i> \ <i>deltaError</i>	Turun Sangat Cepat	Turun Cepat	Stabil	Naik
Nol	–	–	0	–
Sangat Kecil	–	–	80	90
Kecil	70	70	90	110
Sedang	80	90	110	140
Sedang Besar	110	110	140	170
Besar	140	140	170	190
Sangat Besar	170	170	190	200
Maksimal	190	190	200	200



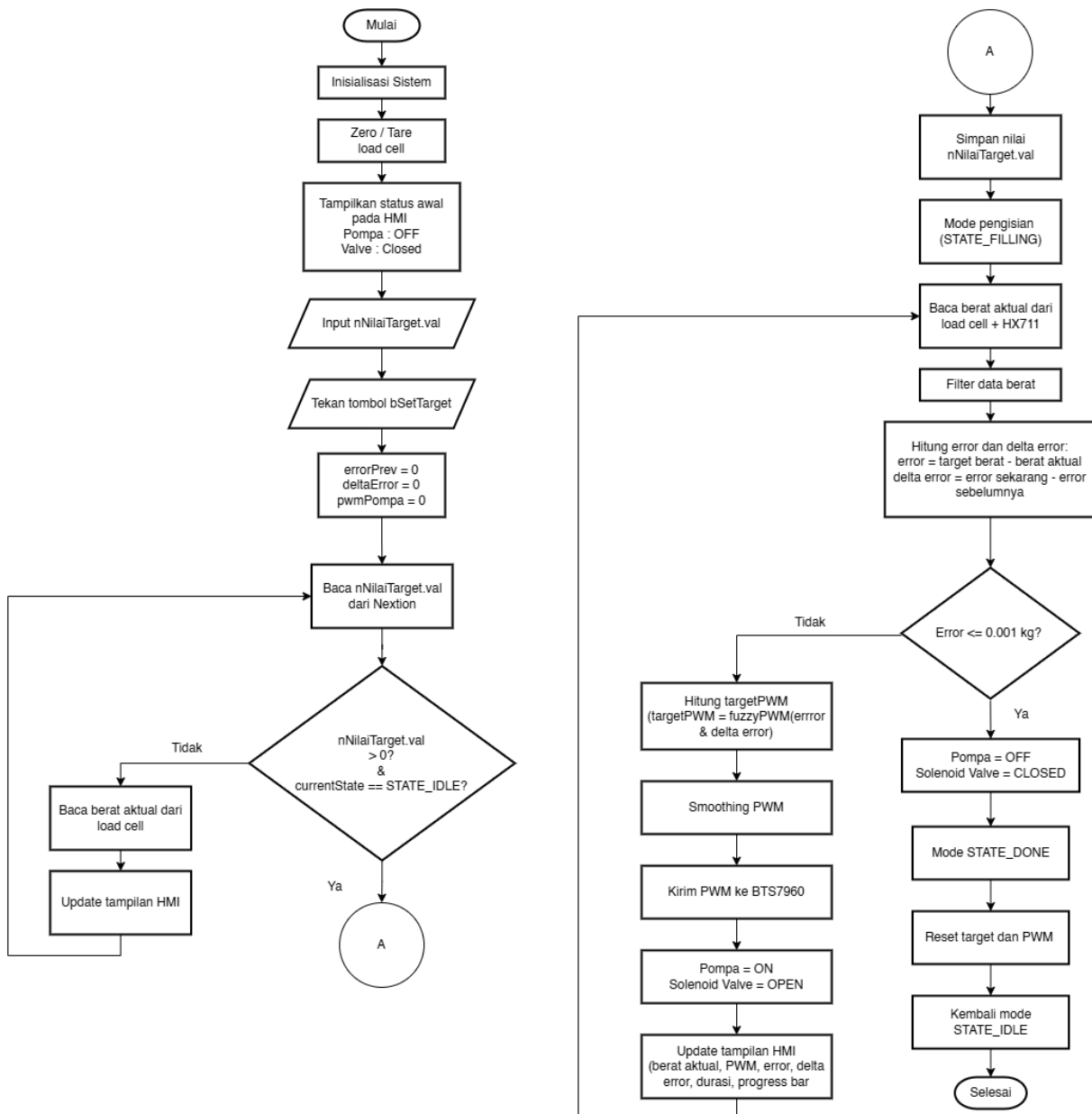
Gambar 5. *Control surface* fuzzy logic-controller Takagi-Sugeno

2.4 Perancangan Perangkat Lunak

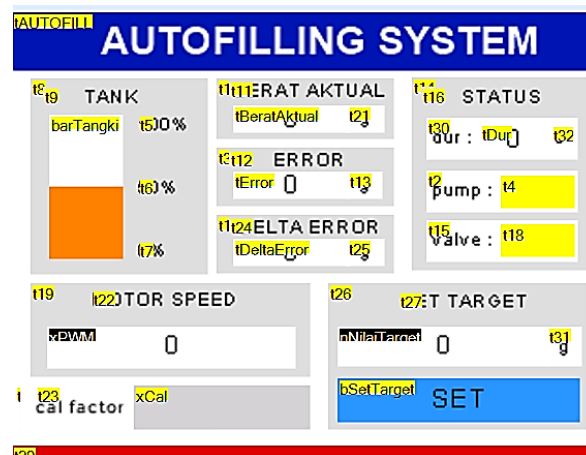
Pada bagian ini dijelaskan keseluruhan pengoperasian sistem pengisian air otomatis. Seluruh sistem diprogram menggunakan Arduino IDE untuk mengendalikan Arduino Nano yang terintegrasi dengan sensor *load cell* melalui modul HX711, HMI Nextion, driver BTS7960, pompa DC, *relay*, dan *solenoid valve*. Diagram alir pada Gambar 6 menunjukkan urutan kerja program mulai dari inisialisasi sistem, proses *tare load cell*, pembacaan target berat dari HMI, hingga sistem masuk ke mode pengisian. Selama proses berlangsung, Arduino membaca berat aktual, menghitung *error* dan *delta error*, kemudian memproses kedua nilai tersebut menggunakan kendali *fuzzy logic* metode Takagi-Sugeno untuk menghasilkan sinyal PWM pompa. Nilai PWM selanjutnya digunakan untuk mengatur kecepatan pompa melalui driver BTS7960, sedangkan *solenoid valve* dibuka agar air dapat mengalir ke tangki proses. Proses ini berlangsung secara berulang hingga berat aktual mencapai target, kemudian pompa dimatikan, *solenoid valve* ditutup, dan sistem kembali ke kondisi awal.

Sebagai pembanding, pengujian tanpa kendali *fuzzy* dilakukan menggunakan PWM konstan sebesar 100. Nilai PWM 100 dipilih berdasarkan pengujian awal karena pada nilai tersebut pompa menghasilkan aliran yang stabil dan kontinu. Nilai ini selanjutnya digunakan sebagai kondisi *baseline* yang tetap selama proses pengisian sehingga pengaruh pengaturan PWM adaptif oleh kendali *fuzzy* Takagi-Sugeno dapat dievaluasi secara langsung.

Desain HMI ditunjukkan pada Gambar 7 dan digunakan sebagai antarmuka untuk memasukkan target berat serta memantau kondisi sistem. Tampilan HMI memuat informasi berat aktual, *error*, *delta error*, nilai PWM, durasi pengisian, progres tangki, status pompa, status *valve*, dan faktor kalibrasi secara *real-time*.



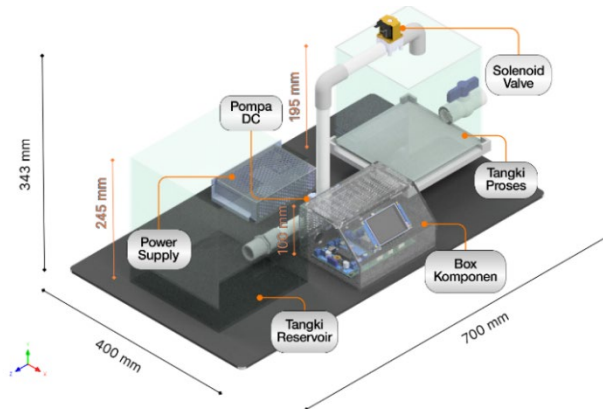
Gambar 6. Diagram alir keseluruhan sistem



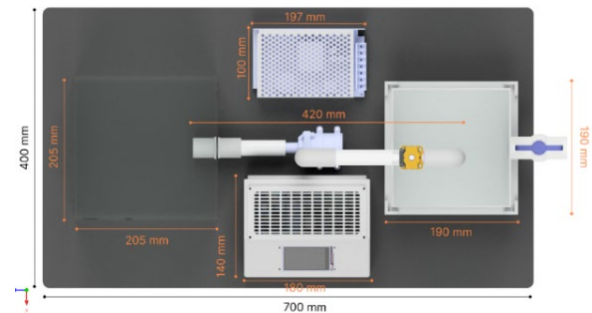
Gambar 7. Desain antarmuka HMI

2.5 Desain Mekanis

Perancangan mekanis dilakukan untuk menentukan bentuk struktur, ukuran rangka, posisi tangki,udukan sensor *load cell*, jalur perpipaan, posisi pompa DC dan *solenoid valve*, serta penempatan panel HMI agar seluruh komponen tersusun secara stabil, rapi, dan mudah diakses saat pengoperasian maupun perawatan. Desain mekanis keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Desain tata letak dan posisi komponen



Gambar 9. Desain tata letak dan posisi komponen tampilan atas

Prototipe menggunakan satu tangki reservoir sebagai sumber air dan satu tangki proses sebagai objek pengukuran yang ditempatkan di atas platform *load cell*. Air dialirkan dari tangki reservoir menuju tangki proses menggunakan pompa DC melalui pipa PVC berdiameter $\frac{1}{2}$ inci dan *solenoid valve* sebagai pengatur aliran, sedangkan ball valve dipasang pada keluaran tangki proses untuk mengosongkan air setelah pengujian. Komponen elektronika ditempatkan pada panel kontrol di bagian depan sistem, sementara pompa dan jalur perpipaan diposisikan sedekat mungkin dengan kedua tangki untuk mengurangi panjang saluran dan kehilangan tekanan.

2.6 Evaluasi Kinerja

Kinerja sistem dievaluasi berdasarkan *error* absolut, persentase *error*, akurasi, *overshoot*, *rise time*, *settling time*, dan durasi pengisian. *Error* (e) absolut dihitung menggunakan:

$$e = |W_{sp} - W_a| \quad (5)$$

Persentase *error* (e_p) dihitung menggunakan:

$$e_p = \frac{|W_{sp} - W_a|}{W_{sp}} \times 100\% \quad (6)$$

sedangkan akurasi (A) dihitung menggunakan:

$$A = 100\% - e_p \quad (7)$$

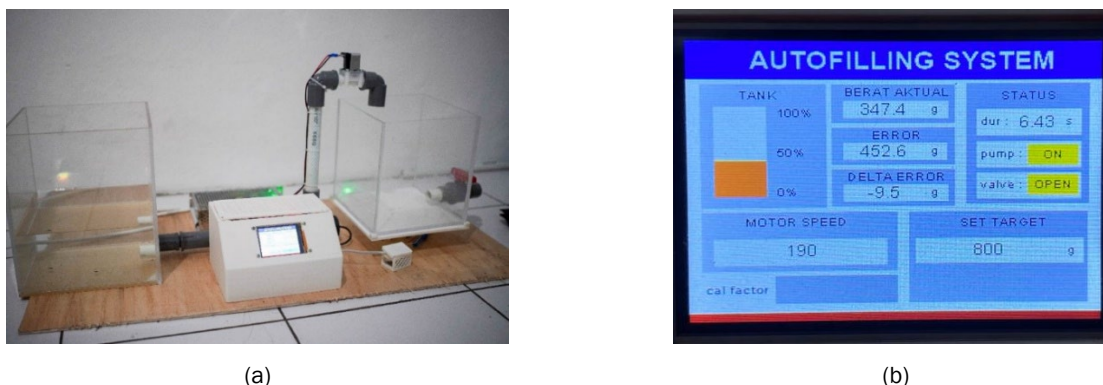
dengan W_{sp} merupakan berat target (*setpoint*) dan W_a merupakan berat aktual akhir hasil pengisian.

3 Hasil dan Diskusi

Bagian ini memaparkan dan membahas hasil pengujian sistem pengisian air otomatis berbasis sensor *load cell* dan kendali *fuzzy logic* Takagi-Sugeno. Pengujian meliputi verifikasi dan kalibrasi sensor *load cell*, pengujian sistem tanpa kontrol *fuzzy* menggunakan PWM konstan, serta pengujian sistem dengan kontrol *fuzzy* untuk mengetahui akurasi pengisian, *error*, *overshoot*, waktu pengisian, *rise time*, dan *settling time*.

Sebelum pengujian dilakukan, ditampilkan hasil implementasi perangkat keras dan perangkat lunak sistem yang mencakup mekanik alat, rangkaian elektronika, program mikrokontroler, dan antarmuka HMI. Hasil pengujian sistem tanpa dan dengan kontrol *fuzzy* selanjutnya dibandingkan untuk mengevaluasi pengaruh kendali *fuzzy* Takagi-Sugeno terhadap respons dan kinerja sistem pengisian air.

Gambar 10 menunjukkan hasil implementasi sistem pengisian air otomatis yang telah dibuat. Gambar 10(a) menampilkan keseluruhan prototipe sistem, sedangkan Gambar 10(b) menunjukkan tampilan antarmuka HMI yang digunakan untuk memasukkan nilai target serta memantau berat aktual, *error*, *delta error*, nilai PWM, durasi pengisian, status pompa, dan status valve secara *real-time*.



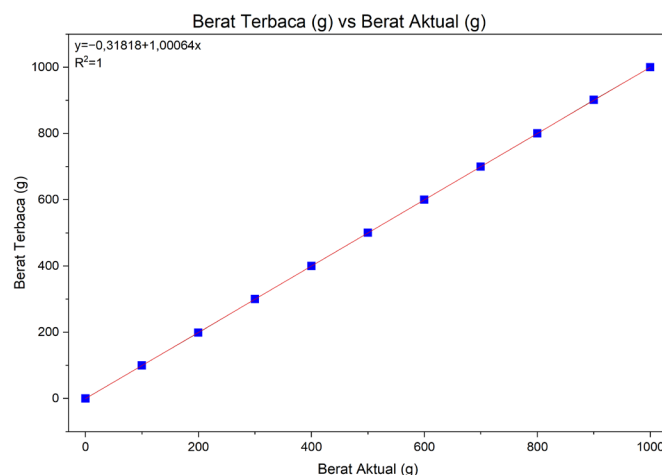
(a) (b)
Gambar 10. (a) Hasil jadi sistem. (b) Implementasi HMI *real-time*.

3.1 Verifikasi dan Kalibrasi Sensor *Load Cell*

Pengujian sensor *load cell* dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian pembacaan berat sebelum sensor digunakan sebagai umpan balik pada sistem pengisian air otomatis. Pengujian dilakukan menggunakan variasi beban dari 0 g hingga 1000 g, kemudian nilai berat terbaca dibandingkan dengan berat aktual untuk memperoleh *error*, persentase *error*, akurasi, *Mean Squared Error* (MSE), dan *Root Mean Squared Error* (RMSE). MSE digunakan untuk mengukur rata-rata kuadrat selisih antara berat terbaca dan berat aktual, sehingga memberikan penalti lebih besar terhadap penyimpangan yang besar. Sementara itu, RMSE merupakan akar kuadrat dari MSE dan menunjukkan besarnya kesalahan pengukuran dalam satuan yang sama dengan berat, yaitu gram. Semakin kecil nilai MSE dan RMSE, semakin dekat hasil pembacaan sensor terhadap nilai aktual.

Berdasarkan Tabel 5, pembacaan sensor sangat mendekati berat aktual. Penyimpangan sebesar 1 g hanya terjadi pada beban 200 g dan 900 g, sedangkan pada titik pengujian lainnya tidak ditemukan *error*. Hasil perhitungan menunjukkan rata-rata *error* sebesar 0,18 g, rata-rata persentase *error* sebesar 0,06%, akurasi sebesar 99,94%, MSE sebesar 0,18 g², dan RMSE sebesar 0,42 g. Nilai MSE dan RMSE yang rendah menunjukkan bahwa penyimpangan pembacaan sensor terhadap berat aktual relatif kecil. Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa *load cell* memiliki ketelitian yang memadai untuk digunakan sebagai sensor umpan balik berat pada sistem pengisian.

Gambar 11 menunjukkan hubungan antara berat aktual dan berat yang terbaca oleh sensor *load cell*. Titik-titik hasil pengujian berada sangat dekat dengan garis regresi linear dengan persamaan ($y = -0.31818 + 1.00064x$) dan nilai ($R^2 = 1$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan sensor bersifat linear dan konsisten pada rentang pengujian 0–1000 g sehingga layak digunakan sebagai sensor umpan balik pada sistem.



Gambar 11. Grafik pengujian sensor *load cell*

Tabel 5. Data hasil pengujian sensor *load cell*

No	Berat aktual (g)	Berat terbaca (g)	Error (g)	Persentase error (%)	Akurasi (%)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2	100.00	100.00	0.00	0.00	100.00
3	200.00	199.00	1.00	0.50	99.50
4	300.00	300.00	0.00	0.00	100.00
5	400.00	400.00	0.00	0.00	100.00
6	500.00	500.00	0.00	0.00	100.00
7	600.00	600.00	0.00	0.00	100.00
8	700.00	700.00	0.00	0.00	100.00
9	800.00	800.00	0.00	0.00	100.00
10	900.00	901.00	1.00	0.11	99.89
11	1000.00	1000.00	0.00	0.00	100.00
Rata-rata			0.18	0.06	99.94
MSE				0.18	
RMSE				0.42	

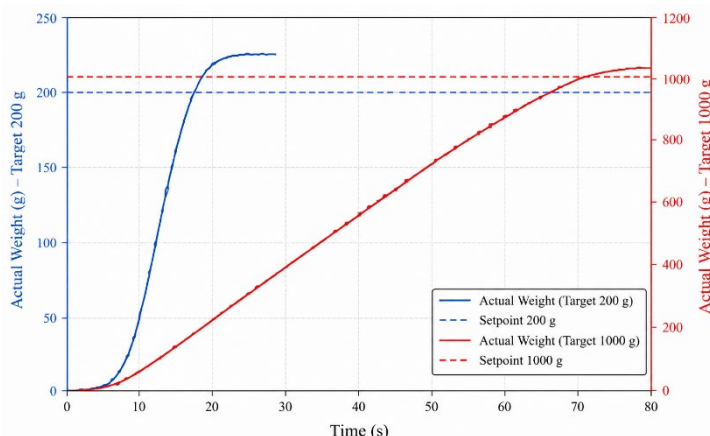
3.2 Pengujian Sistem Tanpa Kontrol *Fuzzy Logic*

Pengujian sistem tanpa kontrol *fuzzy logic* dilakukan untuk mengetahui karakteristik dasar sistem ketika pompa bekerja menggunakan nilai PWM konstan sebesar 100 tanpa penyesuaian kecepatan secara adaptif. Sensor *load cell* tetap digunakan untuk memantau berat aktual, sedangkan pompa dan *solenoid valve* akan dihentikan ketika berat aktual telah mencapai atau melebihi *setpoint*. Pengujian dilakukan pada target 200 g, 400 g, 600 g, 800 g, dan 1000 g, dengan tiga kali pengujian pada setiap target. Parameter yang dianalisis meliputi berat akhir, selisih terhadap target, dan persentase kelebihan pengisian.

Berdasarkan Tabel 6, sistem tanpa kontrol *fuzzy* menghasilkan berat terukur yang secara konsisten melebihi *setpoint*. Pada target 200–1000 g, selisih berat terhadap target berada pada rentang 20,80–25,77 g, dengan kelebihan relatif tertinggi sebesar 12,65% pada target 200 g dan terendah sebesar 2,08% pada target 1000 g. Variasi antar-pengujian relatif kecil, dengan standar deviasi berat sebesar 0,38–2,31 g, yang menunjukkan bahwa hasil pengisian cukup konsisten, tetapi belum mampu mencapai target secara akurat. Respons pada Gambar 12 memperlihatkan bahwa berat aktual melewati garis *setpoint* 200 g dan 1000 g. Penghentian PWM tidak didasarkan pada *timer*, tetapi pada kondisi ketika berat aktual mencapai atau melebihi *setpoint*. Meskipun pompa dan *solenoid valve* telah dihentikan, air yang telah berada pada jalur aliran masih dapat masuk ke tangki sehingga berat terus meningkat. Fenomena *material in flight* dan keterlambatan respons antara aliran air dan pembacaan *load cell* menyebabkan berat terukur melampaui *setpoint*. Karena PWM dipertahankan konstan sebesar 100 hingga kondisi penghentian tercapai, sistem tidak melakukan pengurangan laju pengisian sebelum mendekati target.

Tabel 6. Hasil pengujian sistem tanpa kontrol *fuzzy logic*

Target (g)	Berat terukur setelah pengisian (g)	Selisih terhadap target (g)	Kelebihan terhadap target (%)
200	225,30 ± 1,18	25,30	12,65
400	425,77 ± 2,31	25,77	6,45
600	622,57 ± 1,60	22,57	3,76
800	821,77 ± 0,38	21,77	2,72
1000	1020,80 ± 1,57	20,80	2,08



Gambar 12 Respons sistem pada target 200 g dan 1000 g tanpa kontrol fuzzy Takagi-Sugeno

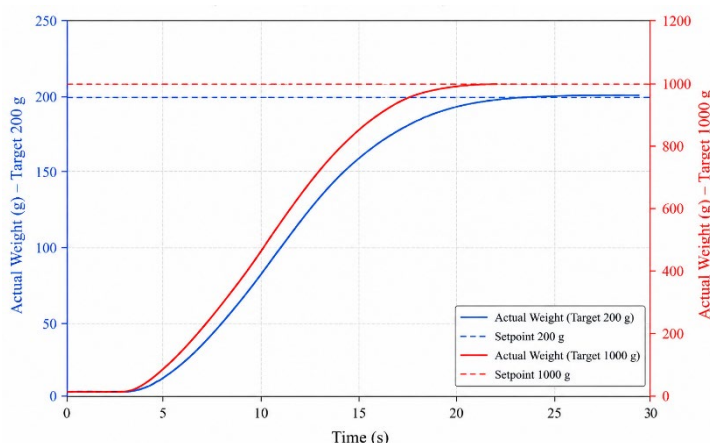
3.3 Pengujian Sistem dengan Kontrol *Fuzzy Logic*

Pengujian sistem dengan kontrol *fuzzy logic* Takagi-Sugeno dilakukan untuk mengetahui kemampuan pengendali dalam mengatur kecepatan pompa secara adaptif berdasarkan nilai error dan delta error. Pengujian dilakukan pada target 200 g, 400 g, 600 g, 800 g, dan 1000 g sebanyak tiga kali untuk setiap target. Parameter respons transien yang dianalisis meliputi *rise time*, *settling time*, dan *overshoot*.

Berdasarkan Tabel 7, sistem dengan kontrol *fuzzy* Takagi-Sugeno menghasilkan berat akhir yang mendekati *setpoint* pada seluruh target. Standar deviasi berat akhir berada pada rentang 0,25–1,42 g, menunjukkan variasi antar-pengujian yang relatif kecil. *Rise time* berada pada rentang $6,93 \pm 0,46$ s hingga $13,73 \pm 1,22$ s, sedangkan *settling time* tercapai pada seluruh target dengan nilai rata-rata 13,33–22,67 s. *Overshoot* juga relatif rendah, yaitu $0,13 \pm 0,07\%$ hingga $0,33 \pm 0,14\%$. Respons pada Gambar 13 menunjukkan bahwa peningkatan berat mulai melandai ketika mendekati *setpoint* karena pengendali *fuzzy* menurunkan PWM pompa secara bertahap. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kendali Takagi-Sugeno tidak hanya menurunkan *overshoot*, tetapi juga menghasilkan respons pengisian yang konsisten pada tiga kali pengujian.

Tabel 7. Hasil pengujian sistem dengan kontrol *fuzzy logic*

Target (g)	Berat akhir (g)	<i>Rise time</i> (s)	<i>Settling time</i> (s)	<i>Overshoot</i> (%)
200	200.67 ± 0.29	13.73 ± 1.22	22.67 ± 3.21	0.33 ± 0.14
400	400.53 ± 0.25	6.93 ± 0.46	15.07 ± 0.46	0.14 ± 0.06
600	600.77 ± 0.40	7.60 ± 0.00	13.33 ± 0.23	0.13 ± 0.07
800	801.87 ± 1.42	9.07 ± 0.23	14.53 ± 0.61	0.24 ± 0.18
1000	1002.13 ± 0.78	10.40 ± 0.00	16.80 ± 0.00	0.21 ± 0.08



Gambar 13. Respons sistem pada target 200 g dan 1000 g dengan kontrol *fuzzy* Takagi-Sugeno

3.4 Perbandingan Kinerja Sistem

Perbandingan dilakukan untuk mengevaluasi ketercapaian target dan kinerja pengisian antara sistem tanpa kontrol dan sistem dengan kontrol *fuzzy logic* Takagi-Sugeno berdasarkan *error* absolut, persentase *error*, akurasi, persentase kelebihan pengisian, dan durasi pengisian. Ringkasan hasil perbandingan kedua sistem ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil perbandingan kinerja sistem

Parameter	Sistem tanpa kontrol <i>fuzzy logic</i>	Sistem dengan kontrol <i>fuzzy logic</i>
Rata-rata error absolut	23,24 g	1,20 g
Rata-rata persentase error	5,53%	0,21%
Rata-rata akurasi	94,47%	99,79%
Rata-rata kelebihan pengisian terhadap target	5,53%	0,21%
Rata-rata durasi pengisian	44,61 s	22,08 s

Berdasarkan Tabel 8, penerapan kontrol fuzzy menurunkan rata-rata error absolut dari 23,24 g menjadi 1,20 g dan rata-rata persentase error dari 5,53% menjadi 0,21%, serta meningkatkan akurasi dari 94,47% menjadi 99,79%. Rata-rata kelebihan pengisian terhadap target juga berkurang dari 5,53% menjadi 0,21%. Rata-rata durasi pengisian pada sistem tanpa kontrol *fuzzy* adalah 44,61 s, sedangkan pada sistem dengan kontrol *fuzzy* sebesar 22,08 s. Perbedaan durasi tersebut perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan strategi pengaturan PWM yang berbeda. Sistem tanpa kontrol *fuzzy* menggunakan PWM konstan sebesar 100, sedangkan kendali *fuzzy* menggunakan PWM adaptif dengan nilai konsekuensi hingga 200. Oleh karena itu, durasi pengisian yang lebih singkat pada sistem *fuzzy* tidak semata-mata menunjukkan keunggulan metode kendali, tetapi juga dipengaruhi oleh penggunaan PWM yang lebih tinggi ketika error masih besar. Keunggulan utama kendali *fuzzy* pada pengujian ini ditunjukkan oleh kemampuannya menggunakan PWM tinggi pada kondisi error besar dan menurunkan PWM secara bertahap ketika mendekati *setpoint*, sehingga waktu pengisian yang relatif singkat dapat dicapai dengan tetap mempertahankan error dan overshoot yang rendah.

4 Kesimpulan

Sistem *Autofilling* berbasis umpan balik berat dengan kendali *fuzzy* Takagi-Sugeno berhasil mengatur PWM pompa secara adaptif berdasarkan error dan *delta error* pada rentang target 200–1000 g. Penerapan kendali fuzzy menghasilkan rata-rata error absolut 1,20 g dan akurasi 99,79%, dibandingkan 23,24 g dan 94,47% pada sistem dengan PWM konstan. Respons sistem dengan kendali *fuzzy* menunjukkan overshoot sebesar 0,13–0,33% dan *settling time* 13,33–22,67 s, yang menunjukkan kemampuan sistem mencapai dan mempertahankan berat di sekitar *setpoint*. Rata-rata durasi pengisian pada konfigurasi *fuzzy* sebesar 22,08 s dibandingkan 44,61 s pada *baseline*; namun, perbedaan ini juga dipengaruhi oleh penggunaan PWM adaptif hingga 200, sedangkan *baseline* menggunakan PWM konstan 100. Sistem masih terbatas pada pengujian menggunakan air dengan konfigurasi pompa, sensor, dan jalur aliran yang tetap. Penelitian selanjutnya dapat mengevaluasi sistem pada rentang kapasitas dan karakteristik fluida yang lebih luas serta melakukan pengujian perbandingan dengan metode kendali lain pada kondisi operasi yang setara.

Referensi

- [1] K. J. Opieliński and T. Świetlik, "Application of the Akaike information criterion to ultrasonic measurement of liquid volume in a cylindrical tank," *Sensors*, vol. 25, no. 23, Dec. 2025. <https://doi.org/10.3390/s25237191>
- [2] M. Yusman, and A. H. Purnama, "Prototipe sistem otomasi pada pengisian depot air minum," *Jurnal Universitas Mitra Indonesia*, vol. 2, no. 2, Okt. 2021. <https://doi.org/10.57084/jeda.v2i2.975>
- [3] A. Burhan Ardiansyah, I. Lutfi, and A. Rahman, "Perbandingan akurasi sensor *flow meter* dan *load cell* pada proses pengisian botol air," *Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung*, vol. 6, no. 2, Sep. 2025. <https://doi.org/10.23960/jpi.v6n2.179>
- [4] H. Lu et al., "Improved mass flow rate regulation methods based on variable frequency control : A case study of oxidizer agent weighing for solid propellants," *Actuators*, vol. 12, no. 7, Jul. 2023. <https://doi.org/10.3390/act12070285>

- [5] A. Saputra and A. Supriyanto dan Arif Surtono, "Desain dan realisasi alat ukur massa (neraca digital) menggunakan sensor *load cell* berbasis Arduino," Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika, vol. 10, no. 2, 2022. [Online]. Available: <https://jtaf.fmipa.unila.ac.id/article/297>
- [6] R. A. Bimo, S. Putra, A. R. Al Tahtawi, and K. Wijayanto, "Pengendalian kecepatan motor DC menggunakan metode *fuzzy integral controller*," Aug. 2021, pp. 4–5. <https://doi.org/10.35313/irwns.v12i0.2657>
- [7] V. Andriani and J. Sardi, "Sistem kendali level air pada tangki dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) berbasis PLC dan HMI," JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia, vol. 4, no. 2, pp. 1014–1022, Nov. 2023. <https://doi.org/10.24036/itein.v4i2.550>
- [8] B. Yeşil, "Design of a microcontroller-based coupled tank system and implementation of level control with feedback linearization method," Master Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir Kâtip Çelebi University, June 2023. [Online]. Available: https://acikerisim.ikcu.edu.tr/10549402_64bfc93495f38
- [9] B. Yeşil and S. Sahin, "Real-time implementation of a microcontroller-based coupled-tank water level control system with feedback linearization and fuzzy logic controller algorithms," Sensors, vol. 25, no. 5, p. 1279, Feb. 2025. <https://doi.org/10.3390/s25051279>
- [10] A. R. Al Tahtawi, S. Yahya, B. Setiadi, and C. Marsya, "The implementation of embedded fuzzy logic controller on liquid level control system," 2020. <https://doi.org/10.2991/aer.k.201221.028>
- [11] K. I. Sebastian, S. Sungkono, and B. Priyadi, "Sistem pengisian minuman menggunakan metode *fuzzy logic* pada vending machine," Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri, vol. 10, no. 1, pp. 76–84, May 2023. <https://doi.org/10.33795/elkolind.v10i1.2752>
- [12] A. Harits Mahdami and W. A. Pambudi, "Rancang bangun pengisian otomatis air minum isi ulang dengan sistem *full bridge load cell* menggunakan metode filter Kalman," Jreec Journal Renewable Energy Electronics and Control, vol. 3, pp. 43–47, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://ejurnal.itats.ac.id/jreec//3223>
- [13] P. Pangestu et al., "Sistem auto filling machine berbasis mikrokontroler human machine interface dengan water flow sensor," Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS), vol. 7, no. 3, 2024. <https://doi.org/10.31539/intecom.v7i3.9742>
- [14] H. Kuscü and K. Ozyalcin, "Automatic controlled liquid filling system : Loadcell and servo motor controlled approach," Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Jan. 2026, pp. 389–394. <https://doi.org/10.1109/ica67591.2025.11324710>
- [15] M. Tiboni, R. Bussola, F. Aggogeri, and C. Amici, "Experimental and model-based study of the vibrations in the *load cell* response of automatic weight fillers," Electronics 2020, Vol. 9, Page 995, vol. 9, no. 6, p. 995, Jun. 2020. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS9060995>
- [16] Z. Er, B. Gökçe, and S. M. Yurter, "Fuzzy logic based adaptive parameter estimation system in moving measurement systems," International Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 6, pp. 126–136, Oct. 2024. <https://doi.org/10.37394/232027.2024.6.15>
- [17] ศ. สันไชย, จ. โกษิยาภรณ์, and ป. วาดเขียน, "Set-point recompense in filling weigher using Kalman filter," Engineering and Technology Horizons, vol. 32, no. 3, pp. 1–6, 2015, Accessed: Oct. 07, 2026. [Online]. Available: <https://ph01.tci-thaijo.org//241157>
- [18] F. M. Dawalo and E. V. Haryanto, "Rancang bangun *prototype* sistem pengisian air galon otomatis berbasis Arduino," Jurnal Info Digit (JID), vol. 2, no. 3, pp. 1028–1041, Jan. 2024, Accessed: Sep. 21, 2026. [Online]. Available: <https://kti.potensi-utama.org/1421>
- [19] H. Kuscü and K. Ozyalcin, "Automatic controlled liquid filling system: Loadcell and servo motor controlled approach," International Conference Automatics and Informatics, ICAI 2025 - Proceedings, pp. 389–394, 2025. <https://doi.org/10.1109/ICA67591.2025.11324710>
- [20] R. S. Dewa, D. Desmira, and I. Irwanto, "Design and construction of automatic mineral water refilling system using fuzzy logic," Journal of Engineering, Electrical and Informatics, vol. 6, no. 1, pp. 69–79, Feb. 2026. <https://doi.org/10.55606/JEEI.V6i1.6731>
- [21] E. C. Prima, S. S. Munifah, R. Salam, M. H. Aziz, and A. T. Suryani, "Automatic water tank filling system controlled using ArduinoTM based sensor for home application," in Procedia Engineering, Elsevier Ltd, 2017, pp. 373–377. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.060>
- [22] A. A. M. Yusof, A. F. M. Mansor, M. K. F. M. Atan, R. A. Rahim, A. A. M. Ralib, and A. N. Nordin, "Portable device for dual impedance and mass measurement in fruit ripening assessment," Journal of Food Measurement and Characterization 2026 20:4, vol. 20, no. 4, pp. 5707–5719, Jan. 2026. <https://doi.org/10.1007/S11694-026-04027-0>