

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT

5.1 Hasil Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan Smart Feeder System dalam mengukur massa pakan, melakukan penakaran sesuai setpoint, serta menjalankan pemberian pakan secara otomatis berdasarkan jadwal yang telah ditentukan. Evaluasi kinerja sistem dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu pengujian sensor load cell dan penakaran pakan serta pengujian otomatisasi penjadwalan selama tiga hari.

Pengujian sensor load cell dan penakaran pakan dilakukan pada lima setpoint massa, yaitu 100 gram, 200 gram, 300 gram, 400 gram, dan 500 gram. Masing-masing setpoint diuji sebanyak lima kali sehingga diperoleh 25 data pengujian. Oleh karena setiap setpoint menggunakan parameter kalibrasi yang berbeda, hasil pengujian dianalisis berdasarkan kelompok kalibrasi pada masing-masing target massa. Data hasil lima kali pengulangan kemudian diolah menjadi nilai rata-rata dan parameter statistik untuk memberikan gambaran kinerja sistem secara lebih ringkas dan representatif.

Data pengujian individual serta dokumentasi pembacaan sensor load cell dan timbangan digital tidak ditampilkan pada bagian utama Bab V. Data tersebut ditempatkan pada lampiran sebagai bukti pendukung dan untuk menjaga agar penyajian hasil penelitian tetap terfokus pada temuan utama.

5.1.1 Hasil Pengujian Sensor Load Cell dan Penakaran Pakan

Pengujian sensor load cell dan penakaran pakan bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian antara pembacaan sensor, massa aktual yang diukur menggunakan timbangan digital, dan setpoint massa yang ditentukan pada sistem. Timbangan digital digunakan sebagai alat ukur pembanding untuk memperoleh nilai massa aktual pakan.

Parameter yang digunakan dalam pengujian terdiri atas:

1. Setpoint massa, yaitu target massa pakan yang ditentukan pada sistem.
2. Massa load cell, yaitu massa pakan yang dibaca oleh sensor load cell melalui

modul HX711.

3. Massa aktual, yaitu massa pakan yang diukur menggunakan timbangan digital.
4. Error sensor, yaitu persentase perbedaan antara pembacaan sensor load cell dan massa aktual.
5. Error penakaran, yaitu persentase perbedaan antara massa aktual dan setpoint.
6. Standar deviasi, yaitu ukuran penyebaran massa aktual dari lima kali pengulangan pada masing-masing setpoint.

Persentase error sensor dihitung menggunakan Persamaan

$$\text{Error Sensor}(\%) = \left| \frac{\text{Massa Load Cell} - \text{Massa Aktual}}{\text{Massa Aktual}} \right| \times 100\%$$

Persentase error penakaran dihitung menggunakan Persamaan

$$\text{Error Penakaran}(\%) = \left| \frac{\text{Massa Target} - \text{Massa Aktual}}{\text{Massa Target}} \right| \times 100\%$$

5.1.1.1 Hasil Pengujian dengan Kalibrasi Setpoint 100 Gram

Pengujian pada *setpoint* 100 gram dilakukan sebanyak lima kali. Pada setiap percobaan, nilai pembacaan sensor *load cell* dibandingkan dengan massa aktual yang diperoleh dari timbangan digital.

Tabel 5- 1 Hasil pengujian pada setpoint 100 gram

Set Massa	Pembacaan Load Cell	Massa Aktual	Error Sensor	Error Aktual
100 gram	96.6	98.6	2,03%	1,40%
100 gram	96.2	98	1,84%	2,00%
100 gram	101.0	99.8	1,20%	0,20%
100 gram	98.3	97	1,34%	3,00%
100 gram	98.5	101.7	3,15%	1,70%

Berdasarkan Tabel 5-1, pembacaan sensor load cell berada pada rentang 96,2 sampai 101,0 gram, sedangkan massa aktual berada pada rentang 97,0 sampai 101,7 gram. Error sensor berada pada rentang 1,20% sampai 3,15%, sedangkan error penakaran berada pada rentang 0,20% sampai 3,00%.

Hasil perhitungan statistik pengujian pada setpoint 100 gram disajikan pada Tabel.

Tabel 5- 2 Hasil perhitungan statistik setpoint 100 gram

Parameter Statistik	Nilai Kalkulasi
Rata-Rata Terukur Pembacaan <i>Load Cell</i> (Mean)	98,12 gram
Rata-Rata Massa Aktual (Mean)	99,02 gram
Nilai Maksimum (Aktual)	101,70 gram
Nilai Minimum	97,00 gram
Standar Deviasi	1,81 gram
Rata-Rata <i>Error</i> Sensor	1,91%
Rata-Rata <i>Error</i> Aktual	1,66%

Berdasarkan Tabel 5-2, rata-rata pembacaan sensor *load cell* sebesar 98,12 gram dan rata-rata massa aktual sebesar 99,02 gram. Standar deviasi massa aktual sebesar 1,81 gram. Rata-rata error sensor sebesar 1,91%, sedangkan rata-rata error penakaran sebesar 1,66%

5.1.1.2 Hasil Pengujian Setpoint Hasil Pengujian dengan Kalibrasi Setpoint 200 Gram

Pengujian pada *setpoint* 200 gram dilakukan sebanyak lima kali. Pengujian dilakukan menggunakan metode yang sama dengan pengujian pada *setpoint* 100 gram, yaitu dengan membandingkan pembacaan sensor *load cell* dan massa aktual pada timbangan digital. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5.3.

Tabel 5- 3 Hasil pengujian pada setpoint 200 gram

Set Massa	Pembacaan <i>Load Cell</i>	Massa Aktual	<i>Error</i> Sensor	<i>Error</i> Aktual
200 gram	195.6	195.9	0,15%	2,05%
200 gram	193.7	194.8	0,56%	2,60%
200 gram	197	202.3	2,62%	1,15%
200 gram	203.5	206.8	1,60%	3,40%
200 gram	194.9	199	2,06%	0,50%

Berdasarkan Tabel 5-3, pembacaan sensor *load cell* berada pada rentang 193,7

sampai 203,5 gram, sedangkan massa aktual berada pada rentang 194,8 sampai 206,8 gram. Error sensor berada pada rentang 0,15% sampai 2,62%, sedangkan error penakaran berada pada rentang 0,50% sampai 3,40%.

Hasil perhitungan statistik pengujian pada *setpoint* 200 gram disajikan pada Tabel.

Tabel 5- 4 Hasil perhitungan statistik *setpoint* 200 gram

Parameter Statistik	Nilai Kalkulasi
Rata-Rata Terukur Pembacaan <i>Load Cell</i> (Mean)	196,94 gram
Rata-Rata Massa Aktual (Mean)	199,76 gram
Nilai Maksimum (Aktual)	206,80 gram
Nilai Minimum	194,80gram
Standar Deviasi	4,90 gram
Rata-Rata <i>Error</i> Sensor	1,40%
Rata-Rata <i>Error</i> Aktual	1,94%

Berdasarkan Tabel 5-4, rata-rata pembacaan sensor *load cell* sebesar 196,94 gram dan rata-rata massa aktual sebesar 199,76 gram. Standar deviasi massa aktual sebesar 4,90 gram. Rata-rata error sensor sebesar 1,40%, sedangkan rata-rata error penakaran sebesar 1,94%.

5.1.1.3 Hasil Pengujian Setpoint Hasil Pengujian dengan Kalibrasi Setpoint 300 Gram

Pengujian pada *setpoint* 300 gram dilakukan sebanyak lima kali. Hasil pengujian pembacaan sensor *load cell* dan hasil pengukuran massa aktual disajikan pada Tabel 5-5.

Tabel 5- 5 Hasil pengujian pada *setpoint* 300 gram

Set Massa	Pembacaan <i>Load Cell</i>	Massa Aktual	<i>Error</i> Sensor	<i>Error</i> Aktual
300 gram	304.0	310	1,94%	3,33%
300 gram	304.6	305	0,13%	1,67%
300 gram	308.2	306	0,72%	2,00%
300 gram	304.1	298	2,05%	0,67%
300 gram	303.6	305	0,46%	1,67%

Berdasarkan Tabel 5-7, pembacaan sensor *load cell* berada pada rentang 303,6

sampai 308,2 gram, sedangkan massa aktual berada pada rentang 298,0 sampai 310,0 gram. Error sensor berada pada rentang 0,13% sampai 2,05%, sedangkan error penakaran berada pada rentang 0,67% sampai 3,33%.

Tabel 5- 6 Hasil perhitungan statistik setpoint 300 gram

Parameter Statistik	Nilai Kalkulasi
Rata-Rata Terukur Pembacaan <i>Load Cell</i> (Mean)	304,90 gram
Rata-Rata Massa Aktual (Mean)	304,80 gram
Nilai Maksimum (Aktual)	310,00 gram
Nilai Minimum	298,00 gram
Standar Deviasi	4,32 gram
Rata-Rata <i>Error</i> Sensor	1,06%
Rata-Rata <i>Error</i> Aktual	1,87%

Berdasarkan Tabel 5-6, rata-rata pembacaan sensor *load cell* sebesar 304,90 gram dan rata-rata massa aktual sebesar 304,80 gram. Standar deviasi massa aktual sebesar 4,32 gram. Rata-rata error sensor sebesar 1,06%, sedangkan rata-rata error penakaran sebesar 1,87%

5.1.1.4 Hasil Pengujian Setpoint Hasil Pengujian dengan Kalibrasi Setpoint 400 Gram

Pengujian pada *setpoint* 400 gram dilakukan sebanyak lima kali untuk mengetahui hasil pembacaan sensor dan penakaran pakan pada beban yang lebih besar.

Tabel 5- 7 Hasil pengujian pada setpoint 400 gram

Set Massa	Pembacaan <i>Load Cell</i>	Massa Aktual	<i>Error</i> Sensor	<i>Error</i> Aktual
400 gram	397.2	392	1,33%	2,00%
400 gram	413.0	410	0,73%	2,50%
400 gram	403.3	386	4,48%	3,50%
400 gram	416.4	412	1,07%	3,00%
400 gram	404.2	425	4,89%	6,25%

Berdasarkan Tabel 5-7, pembacaan sensor *load cell* berada pada rentang 397,2 sampai 416,4 gram, sedangkan massa aktual berada pada rentang 386,0 sampai 425,0 gram. Error

sensor berada pada rentang 0,73% sampai 4,89%, sedangkan error penakaran berada pada rentang 2,00% sampai 6,25%.

Hasil perhitungan statistik pengujian pada setpoint 400 gram disajikan pada Tabel 5-8

Tabel 5- 8 Hasil perhitungan statistik setpoint 400 gram

Parameter Statistik	Nilai Kalkulasi
Rata-Rata Terukur Pembacaan <i>Load Cell</i> (Mean)	406,82 gram
Rata-Rata Massa Aktual (Mean)	405,00 gram
Nilai Maksimum (Aktual)	425,00 gram
Nilai Minimum	386,00 gram
Standar Deviasi	15,84 gram
Rata-Rata <i>Error</i> Sensor	2,50%
Rata-Rata <i>Error</i> Aktual	3,45%

Berdasarkan Tabel 5-8, rata-rata pembacaan sensor *load cell* sebesar 406,82 gram dan rata-rata massa aktual sebesar 405,00 gram. Standar deviasi massa aktual sebesar 15,84 gram. Rata-rata error sensor sebesar 2,50%, sedangkan rata-rata error penakaran sebesar 3,45%. Pada percobaan kelima diperoleh error penakaran sebesar 6,25%

5.1.1.5 Hasil Pengujian Setpoint Hasil Pengujian dengan Kalibrasi Setpoint 500 Gram

Pengujian pada *setpoint* 500 gram dilakukan sebanyak lima kali. Nilai tersebut merupakan nilai *setpoint* tertinggi yang digunakan dalam pengujian penakaran pakan. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5-9.

Tabel 5- 9 Hasil pengujian pada setpoint 500 gram.

Set Massa	Pembacaan <i>Load Cell</i>	Massa Aktual	<i>Error</i> Sensor	<i>Error</i> Aktual
500 gram	507.4	494	2,71%	1,20%
500 gram	497.5	480	3,65%	4,00%
500 gram	506.6	510	0,67%	2,00%
500 gram	504.0	525	4,00%	5,00%
500 gram	496.5	505	1,68%	1,00%

Berdasarkan Tabel 5-9, pembacaan sensor *load cell* berada pada rentang 496,5

sampai 507,4 gram, sedangkan massa aktual berada pada rentang 480,0 sampai 525,0 gram. Error sensor berada pada rentang 0,67% sampai 4,00%, sedangkan error penakaran berada pada rentang 1,00% sampai 5,00%

Tabel 5- 10 Hasil perhitungan statistik setpoint 500 gram

Parameter Statistik	Nilai Kalkulasi
Rata-Rata Terukur Pembacaan <i>Load Cell</i> (Mean)	502,40 gram
Rata-Rata Massa Aktual (Mean)	502,80 gram
Nilai Maksimum (Aktual)	525,00 gram
Nilai Minimum	480,00 gram
Standar Deviasi	16,93 gram
Rata-Rata <i>Error</i> Sensor	2,54%
Rata-Rata <i>Error</i> Aktual	2,64%

Berdasarkan Tabel 5-10, rata-rata pembacaan sensor *load cell* sebesar 502,40 gram dan rata-rata massa aktual sebesar 502,80 gram. Standar deviasi massa aktual sebesar 16,93 gram. Rata-rata error sensor sebesar 2,54%, sedangkan rata-rata error penakaran sebesar 2,64%. Error penakaran tertinggi ditemukan pada percobaan keempat, yaitu sebesar 5,00%.

5.1.2 Hasil Pengujian Otomatisasi Penjadwalan

Pengujian otomatisasi penjadwalan dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengeksekusi pemberian pakan secara otomatis berdasarkan waktu yang telah ditentukan. Pengujian dilaksanakan selama tiga hari berturut-turut dengan tiga jadwal pemberian pakan setiap hari, yaitu pukul 07.00, 12.00, dan 17.00. Dengan demikian, terdapat sembilan siklus pemberian pakan otomatis.

Setpoint massa yang digunakan pada seluruh jadwal adalah 200 gram. Parameter yang diamati terdiri atas waktu target, waktu eksekusi sistem, massa aktual, dan error penakaran. Hasil pengujian otomatisasi penjadwalan disajikan pada Tabel 5.11.

Tabel 5- 11 Hasil Pengujian Otomatisasi Penjadwalan Selama Tiga Hari

Tanggal	Jadwal	Waktu Eksekusi Sistem	Target Massa (g)	Massa Aktual (g)	Error Penakaran (%)
11 September 2026	07.00	07.00.50	200	203,5	1,75
11 September 2026	12.00	12.00.54	200	205,1	2,55
11 September 2026	17.00	17.00.52	200	212,0	6,00
12 September 2026	07.00	07.01.06	200	199,6	0,20
12 September 2026	12.00	12.01.17	200	223,6	11,80
12 September 2026	17.00	17.00.51	200	203,1	1,55
13 September 2026	07.00	07.00.52	200	202,4	1,20
13 September 2026	12.00	12.00.52	200	203,5	1,75
13 September 2026	17.00	17.00.52	200	204,7	2,35

Berdasarkan Tabel 5.11, sistem berhasil menjalankan seluruh sembilan jadwal pemberian pakan selama tiga hari pengujian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa modul RTC DS3231 dan algoritma penjadwalan pada ESP32 dapat bekerja secara terintegrasi dalam memicu proses pemberian pakan secara otomatis. Meskipun seluruh jadwal berhasil dijalankan, waktu eksekusi sistem belum berlangsung tepat pada detik yang sama dengan waktu target. Keterlambatan eksekusi berada pada rentang 50 sampai 77 detik dengan rata-rata sebesar 56,22 detik. Keterlambatan terendah sebesar 50 detik terjadi pada 11 September 2026 pukul 07.00, sedangkan keterlambatan tertinggi sebesar 77 detik terjadi pada 12 September 2026 pukul 12.00. Dengan demikian, fungsi penjadwalan telah berjalan secara berkelanjutan, tetapi ketepatan waktu eksekusinya masih perlu dioptimalkan.

Pada aspek penakaran, massa aktual yang dihasilkan berada pada rentang 199,6 sampai 223,6 gram dari target sebesar 200 gram. Rata-rata massa aktual dari sembilan siklus pengujian adalah 206,39 gram dengan rata-rata error penakaran sebesar 3,24%. Nilai error rata-rata tersebut masih berada di bawah batas toleransi 5% yang digunakan dalam penelitian. Namun, dua siklus pengujian menghasilkan error di atas batas toleransi, yaitu sebesar 6,00% pada 11 September 2026 pukul

17.00 dan sebesar 11,80% pada 12 September 2026 pukul 12.00. Sementara itu, tujuh siklus lainnya menghasilkan error di bawah 5%. Hasil ini menunjukkan bahwa rata-rata kinerja penakaran telah memenuhi toleransi, tetapi hasil setiap siklus belum sepenuhnya konsisten.

Tingkat keberhasilan penakaran otomatis berdasarkan batas toleransi individual di bawah 5% dihitung menggunakan Persamaan

$$\text{Tingkat Keberhasilan} = \frac{\text{Jumlah Pengujian yang Memenuhi Toleransi}}{\text{Jumlah Seluruh Pengujian}} \times 100\%$$

$$\text{Tingkat Keberhasilan} = \frac{7}{9} \times 100\% = 77,78\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, sebanyak tujuh dari sembilan siklus atau 77,78% pengujian telah memenuhi batas toleransi individual di bawah 5%. Sementara itu, dua dari sembilan siklus atau 22,22% pengujian belum memenuhi batas toleransi tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan fungsi pemberian pakan otomatis selama tiga hari berturut-turut, tetapi konsistensi massa pakan yang dikeluarkan masih perlu ditingkatkan. Penyimpangan massa dapat dipengaruhi oleh butiran pakan yang masih jatuh setelah katup mulai menutup, ketidakseragaman aliran pakan, dan adanya pakan yang tertahan di dalam saluran. Oleh karena itu, optimalisasi mekanisme katup dan nilai kompensasi penghentian diperlukan agar massa akhir lebih mendekati setpoint. Analisis lebih lanjut mengenai waktu eksekusi dan konsistensi penakaran dijelaskan pada Subbab

5.2 Analisis

Analisis dilakukan untuk menginterpretasikan hasil pengujian dan mengidentifikasi faktor yang memengaruhi kinerja sistem. Pembahasan mencakup akurasi sensor *load cell*, ketepatan penakaran pakan, dan kinerja otomatisasi penjadwalan. Nilai rata-rata digunakan untuk menggambarkan kecenderungan umum kinerja sistem, sedangkan data individual digunakan untuk mengevaluasi konsistensinya. Pendekatan ini diperlukan karena nilai rata-rata yang memenuhi toleransi belum tentu menunjukkan bahwa seluruh pengujian individual memberikan hasil yang sama. Batas toleransi yang digunakan dalam penelitian adalah 5%. Dengan demikian, hasil pengujian dapat dianalisis secara lebih

proporsional tanpa mengabaikan penyimpangan yang terjadi pada beberapa siklus.

5.2.1 Analisis Akurasi Sensor Load Cell

Berdasarkan data perhitungan statistik dari Tabel 5-2, Tabel 5-4, Tabel 5-6, Tabel 5-8, dan Tabel 5-10, rata-rata error sensor load cell pada setpoint 100, 200, 300, 400, dan 500 gram secara berturut-turut adalah sebesar 1,91%, 1,40%, 1,06%, 2,50%, dan 2,54%. Error sensor terendah diperoleh pada setpoint 300 gram (1,06%), sedangkan error tertinggi diperoleh pada setpoint 500 gram (2,54%). Seluruh rata-rata error sensor ini berada jauh di bawah batas toleransi 5%, sehingga pembacaan load cell pada setiap setpoint dapat dinyatakan sudah sangat mendekati hasil pengukuran timbangan digital (aktual). Kedekatan nilai rata-rata tersebut menunjukkan bahwa sensor dan modul HX711 mampu menjalankan fungsi pengukuran massa pada target yang telah diuji dengan baik. Meskipun demikian, hasil pembacaan tidak memiliki tingkat error yang sama persis pada setiap setpoint. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa respons sistem pengukuran tetap dipengaruhi oleh kondisi kalibrasi dan dinamika mekanis pada saat pengujian berlangsung.

Setiap setpoint pada penelitian ini menggunakan faktor kalibrasi yang berbeda. Faktor kalibrasi untuk target 100 gram hanya digunakan pada pengujian 100 gram, demikian pula untuk target 200, 300, 400, dan 500 gram. Oleh karena itu, hasil pengujian tidak membuktikan bahwa satu faktor kalibrasi dapat digunakan secara akurat pada seluruh rentang massa 100 sampai 500 gram sekaligus. Hasil tersebut hanya menunjukkan bahwa pembacaan sensor mampu mendekati massa aktual setelah menggunakan faktor kalibrasi khusus yang di-tuning pada setiap target. Kinerja sensor pada target massa lain di luar titik uji (seperti 150, 250, 350, dan 450 gram) belum dapat disimpulkan karena tidak diuji. Pernyataan ini penting agar hasil penelitian tidak memberikan generalisasi yang melebihi ruang lingkup pengujian yang dilakukan.

Variasi pembacaan sensor dapat dipengaruhi oleh posisi jatuhnya pakan pada wadah, distribusi beban di dalam wadah penimbang, getaran aktuator (servo), kekakuan kedudukan rangka, dan waktu stabilisasi pembacaan (settling time). Ketika tumpukan pakan tidak berada tepat di titik tengah (pusat gravitasi) wadah

penimbang, gaya momen yang diterima sensor dapat menghasilkan respons regangan yang sedikit berbeda meskipun massa sebenarnya sama. Getaran dari motor servo dan motor DC juga dapat menyebabkan nilai pembacaan sesaat berubah (berfluktuasi) sebelum mencapai kondisi stabil. Selain itu, ukuran dan susunan butiran pakan pelet membuat distribusi beban pada wadah tidak selalu seragam. Faktor-faktor tersebutlah yang menjelaskan mengapa rata-rata error pada setiap setpoint memiliki nilai yang bervariasi. Dengan demikian, peningkatan stabilitasudukan mekanis dan pemberian jeda waktu tunggu (seperti delay 5 detik pada algoritma) sebelum pencatatan sangat efektif digunakan untuk memperbaiki konsistensi pembacaan sensor.

5.2.2 Analisis Ketepatan Penakaran Pakan

Berdasarkan hasil pengolahan data, rata-rata *error* penakaran pada setpoint 100, 200, 300, 400, dan 500 gram masing-masing adalah sebesar 1,66%, 1,94%, 1,87%, 3,45%, dan 2,64%. Error penakaran terendah secara rata-rata diperoleh pada setpoint 100 gram, sedangkan error tertinggi secara rata-rata diperoleh pada setpoint 400 gram. Seluruh nilai rata-rata *error* penakaran tersebut berada di bawah batas toleransi maksimal 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem kendali *closed-loop* telah mampu menghasilkan rata-rata massa pakan yang mendekati target gramasi yang diinginkan. Namun, perlu dicatat bahwa peningkatan setpoint tidak selalu menghasilkan peningkatan *error* yang linier. Hal tersebut terlihat pada *error* setpoint 500 gram (2,64%) yang justru lebih rendah daripada *error* setpoint 400 gram (3,45%). Kondisi ini mengindikasikan bahwa ketepatan penakaran tidak hanya dipengaruhi oleh seberapa besar jumlah massa targetnya, tetapi sangat bergantung pada dinamika aliran pakan (lancar atau macet) dan kecepatan respons mekanis aktuator katup servo saat memotong aliran pelet.

Meskipun nilai rata-rata secara keseluruhan memenuhi toleransi, pengamatan pada data eksperimen individual menunjukkan adanya satu siklus pengujian pada setpoint 400 gram dengan *error* sebesar 6,25% (Tabel 5-7, Percobaan ke-5) dan satu siklus pengujian pada setpoint 500 gram dengan *error* sebesar 5,00% (Tabel 5-9, Percobaan ke-4). Deviasi standar (*standard deviation*) dari sebaran massa aktual pada setpoint 400 gram dan 500 gram juga tercatat cukup tinggi, yakni mencapai

15,84 gram dan 16,93 gram. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan sebaran deviasi standar pada setpoint 100 sampai 300 gram. Peningkatan standar deviasi ini menunjukkan bahwa hasil penakaran pada target massa yang besar memiliki rentang penyebaran yang lebih luas (kurang presisi antar percobaannya). Oleh karena itu, penilaian kinerja sistem tidak boleh hanya didasarkan pada rata-rata *error*, tetapi juga wajib mempertimbangkan konsistensi setiap pengulangan. Berdasarkan kedua parameter tersebut, sistem secara umum telah mampu mencapai target rata-rata, tetapi konsistensi penakaran (keterulangan / *repeatability*) pada setpoint massa yang lebih besar masih memerlukan penyempurnaan.

Penyimpangan massa (kelebihan beban atau *overshoot*) umumnya terjadi karena masih terdapat butiran pakan yang sedang dalam posisi melayang jatuh (berada di udara dalam saluran buang) tepat ketika katup menerima perintah untuk menutup dari ESP32. Pakan yang terlanjur melewati katup ini pada akhirnya akan tetap jatuh ke wadah penimbang, sehingga massa akhir dapat melebihi nilai setpoint. Sebaliknya, massa yang lebih rendah dari target (kekurangan) dapat terjadi ketika butiran pelet pakan saling mengunci (friksi / *jamming*) dan tertahan di dalam saluran sempit corong. Perbedaan bentuk fisik, ukuran butiran pelet pabrikan, dan susunannya membuat laju debit aliran pakan tidak konstan pada setiap siklusnya. Pendekatan perbaikan yang dapat diusulkan adalah dengan memprogram ESP32 untuk memperkecil bukaan derajat katup secara bertahap (inkremental) ketika massa mulai mendekati setpoint, serta menerapkan nilai kompensasi (*offset*) untuk mematikan aliran beberapa gram mendahului target yang ditentukan. Selain itu, sistem diwajibkan untuk melakukan verifikasi pembacaan akhir setelah aliran pakan dipastikan berhenti sepenuhnya agar hasil pencatatan penakaran lebih konsisten dan akurat.

5.2.3 Analisis Kinerja Otomatisasi Penjadwalan

Pengujian otomatisasi penjadwalan selama tiga hari berturut-turut (Tabel 5-11) menunjukkan bahwa sistem mikrokontroler ESP32 berhasil mengeksekusi dan menjalankan seluruh 9 (sembilan) jadwal pemberian pakan pada waktu yang telah disetel, yakni pukul 07.00, 12.00, dan 17.00. Keberhasilan pelaksanaan seluruh jadwal ini membuktikan bahwa modul RTC DS3231 dan algoritma *state-machine*

penjadwalan pada ESP32 dapat bekerja secara terintegrasi dan andal untuk memicu siklus pemberian pakan harian secara otonom.

Namun demikian, analisis terhadap *timestamp* waktu eksekusi menunjukkan bahwa sistem belum mampu memulai proses tepat pada detik ke-0 (00). Eksekusi pakan selalu mengalami keterlambatan yang berkisar antara 50 detik hingga maksimal 77 detik dari waktu target, dengan rata-rata keterlambatan mencapai 56,22 detik. Keterlambatan paling minim, yakni 50 detik, tercatat pada tanggal 11 September 2026 pukul 07.00, sedangkan penundaan terbesar hingga 77 detik terjadi pada tanggal 12 September 2026 pukul 12.00. Berdasarkan data empiris tersebut, sistem lebih tepat dinyatakan berhasil menjalankan seluruh jadwal pemberian pakan dengan toleransi keterlambatan pada orde menit pertama (di bawah 2 menit), alih-alih mengeksekusinya secara absolut tepat pada detik yang diatur. Keterlambatan waktu ini secara fungsional belum menyebabkan jadwal gagal dieksekusi atau terlewat, tetapi menegaskan bahwa frekuensi pemeriksaan waktu kalender sistem (*polling*) belum mencapai tingkat resolusi sekon yang instan. Oleh karena itu, optimalisasi struktur algoritma (*code refactoring*) masih diperlukan agar perintah pemberian pakan dapat dipicu sedekat mungkin dengan batas waktu target yang diprogramkan pengguna.