

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

Bab ini membahas hasil implementasi, pengujian, dan analisis terhadap sistem monitoring dan kontrol konsentrasi nutrisi pada *mixing tank* fertigasi berbasis ESP32-S3 yang telah dirancang pada Bab III. Pengujian dilakukan secara bertahap dimulai dari pengujian masing-masing komponen (*unit testing*), dilanjutkan dengan pengujian subsistem, hingga pengujian sistem secara keseluruhan (*system testing*). Parameter yang diamati meliputi tingkat akurasi sensor, karakteristik proses pencampuran, performa aktuator, respon sistem terhadap perubahan konsentrasi nutrisi, serta keberhasilan metode kontrol dalam mencapai kondisi larutan yang homogen dan sesuai *setpoint*.

4.1 Pengujian Sensor

Pada subbab berikut membahas mengenai proses pengkalibrasian masing-masing sensor yang digunakan pada alat tugas akhir agar dapat berjalan dengan optimal dan menjelaskan kondisi fisis yang terjadi pada lapangan.

4.1.1 Proses Kalibrasi Sensor TDS

Kalibrasi sensor TDS dilakukan untuk memperoleh hubungan antara nilai keluaran sensor berupa *Analog to Digital Converter* (ADC) dengan nilai konsentrasi *Total Dissolved Solids* (TDS) yang diukur menggunakan TDS meter sebagai alat pembanding. Proses kalibrasi bertujuan menghasilkan persamaan konversi sehingga pembacaan sensor dapat merepresentasikan nilai TDS sebenarnya pada sistem fertigasi.

Larutan uji dibuat dengan metode penambahan larutan nutrisi secara bertahap ke dalam air bersih sehingga dihasilkan variasi konsentrasi TDS dari rendah hingga tinggi. Pada setiap tahapan penambahan, dilakukan pengukuran menggunakan sensor TDS dan TDS meter sebanyak beberapa kali untuk memperoleh nilai rata-rata pembacaan yang representatif. Seluruh proses pengujian dilakukan pada rentang suhu 26–28°C untuk meminimalkan pengaruh perubahan suhu terhadap hasil pengukuran.

4.1.1.1 Data Kalibrasi

Data hasil pengambilan sampel kalibrasi disajikan pada Tabel 4.1. Data ini diperoleh dari 52 titik pengukuran yang dikumpulkan melalui beberapa tahap pengenceran, mencakup rentang konsentrasi 0 – 735 ppm dan rentang ADC 47 – 1583.

Tabel 4.1 Data hasil kalibrasi sensor TDS (52 titik)

No	ADC	TDS (ppm)	Suhu °C
1	47.48	Diudara	
2	104.55	50	28
3	144.65	65	28
4	169.09	67	28
5	203.65	93	28
6	240.72	100	28
7	271.28	113	28
8	322.87	140	28
9	341.77	144	28
10	412.52	176	28
11	414.27	171	28
12	445.85	197	28
13	505.05	209	28
14	553.82	229	28
15	598.83	245	28
16	626.23	256	28
17	633.19	279	28
18	684.68	281	28
19	693.85	304	28
20	778.00	309	28
21	824.89	329	28
22	862.60	333	28
23	889.49	346	28
24	937.73	366	28
25	956.50	375	28
26	1008.37	399	28
27	1019.11	397	28
28	1080.48	415	28
29	1095.30	426	28
30	1130.74	440	28

No	ADC	TDS (ppm)	Suhu °C
31	1151.33	458	28
32	1173.94	458	29
33	1212.65	478	29
34	1243.96	510	28
35	1262.90	529	28
36	1279.19	542	28
37	1293.33	560	28
38	1300.91	575	28
39	1304.36	595	28
40	1306.22	620	28
41	1309.38	642	28
42	1310.49	658	28
43	1310.48	659	28
44	1312.28	704	28
45	1313.26	724	28
46	1319.23	520	28
47	1333.55	485	28
48	1360.00	551	28
49	1405.00	541	28
50	1509.00	592	28
51	1543.00	597	28
52	1583.00	735	28

4.1.1.2 Pembentukan Persamaan Kalibrasi

Setelah diperoleh data hasil pengukuran, dilakukan analisis hubungan antara nilai ADC rata-rata dengan nilai TDS hasil pengukuran menggunakan TDS meter. Nilai ADC dipilih sebagai variabel bebas karena merupakan keluaran langsung dari sensor, sedangkan nilai TDS hasil pengukuran TDS meter digunakan sebagai variabel acuan.

Berdasarkan seluruh data hasil kalibrasi yang diperoleh, dilakukan proses curve-fitting menggunakan metode regresi polinomial orde tiga untuk memperoleh persamaan konversi nilai ADC menjadi konsentrasi TDS. Regresi polinomial orde tiga dipilih karena mampu memberikan tingkat kecocokan yang lebih baik dibandingkan regresi linier pada rentang pengukuran yang digunakan. Metode ini bekerja dengan meminimalkan jumlah kuadrat error antara nilai prediksi

dan nilai aktual, sehingga dihasilkan koefisien regresi yang paling sesuai dengan data.

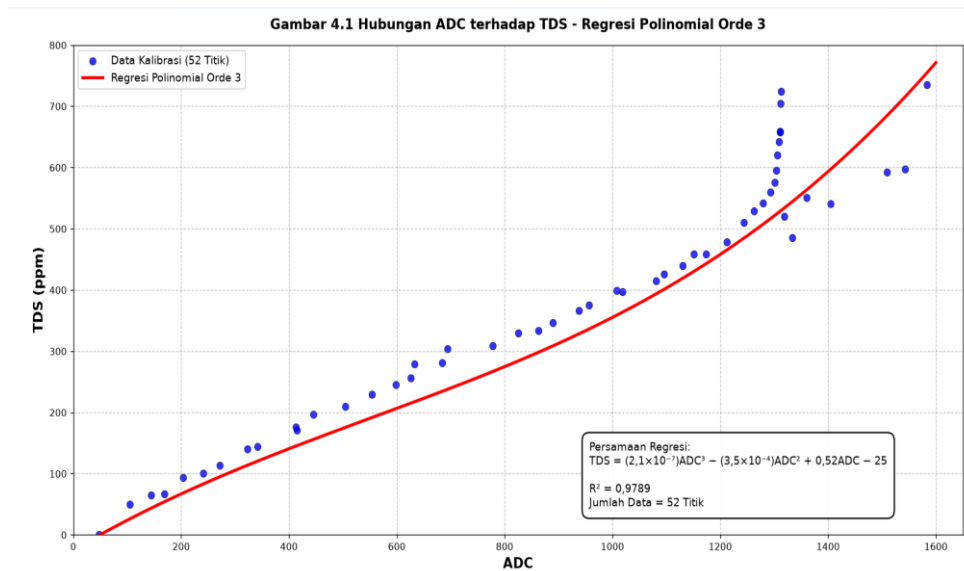
4.1.1.3 Hasil Kalibrasi

Dari proses regresi menggunakan 52 titik data kalibrasi, diperoleh persamaan pada Lampiran 1. Koefisien regresi yang diperoleh disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Koefisien regresi polinomial orde tiga

Koefisien	Nilai	Notasi
a_3	0.00000021	Koefisien ADC^3
a_2	-0.00035	Koefisien ADC^2
a_1	0.52	Koefisien ADC
a_0	-25	Konstanta

Nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh adalah 0.9789. Nilai ini menunjukkan bahwa 97.89% variasi data hasil pengukuran dapat dijelaskan oleh persamaan regresi yang diperoleh, yang berarti model memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik antara keluaran sensor berupa ADC dengan nilai TDS hasil pengukuran menggunakan TDS meter. Hubungan antara nilai ADC dan nilai TDS hasil regresi disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Hubungan nilai ADC terhadap nilai TDS hasil regresi polinomial orde tiga

Berdasarkan Gambar 4.1 terlihat bahwa titik-titik data kalibrasi (berwarna biru) tersebar mengikuti pola kurva yang dibentuk oleh persamaan regresi polinomial orde tiga (garis merah). Sebaran data menunjukkan hubungan yang erat antara nilai ADC dan konsentrasi TDS, yang mengindikasikan bahwa sensor memiliki karakteristik yang dapat dimodelkan dengan baik pada rentang pengukuran yang digunakan.

4.1.1.4 Validasi Persamaan Kalibrasi

Setelah diperoleh persamaan kalibrasi, dilakukan proses validasi menggunakan data pengujian yang berbeda dengan data pembentukan model. Pengujian validasi bertujuan mengetahui kemampuan persamaan kalibrasi dalam memperkirakan nilai TDS sebenarnya pada berbagai tingkat konsentrasi larutan.

Data hasil validasi sensor TDS terhadap pembanding, untuk hasilnya disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Data hasil validasi persamaan kalibrasi sensor TDS

No	TDS Meter (ppm)	ADC	TDS Sensor (ppm)	Error (ppm)	Error (%)
1	206	547	189	17	8,3
2	262	693	237	25	9,5
3	310	839	289	21	6,8

No	TDS Meter (ppm)	ADC	TDS Sensor (ppm)	Error (ppm)	Error (%)
4	354	965	339	15	4,2
5	438	1177	445	7	1,6
6	443	1171	441	2	0,5
7	479	1303	523	44	9,2
8	522	1343	522	0	0,0
9	527	1358	562	35	6,6
10	668	1561	732	64	9,6
11	721	1583	754	33	4,6
Rata-rata				23,91	5,54

Berdasarkan hasil kalibrasi dan validasi terlampir pada Tabel 4.3, persamaan regresi polinomial orde tiga mampu menggambarkan hubungan antara nilai ADC dan konsentrasi TDS dengan tingkat akurasi yang tinggi. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9789 menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data kalibrasi. Pada rentang sekitar setpoint 500 ppm, sensor menunjukkan error pengukuran yang relatif rendah sehingga masih sesuai digunakan sebagai umpan balik sistem kontrol.

Berdasarkan hasil kalibrasi dan validasi, persamaan regresi polinomial orde tiga mampu menggambarkan hubungan antara nilai ADC dan konsentrasi TDS dengan tingkat akurasi yang representatif. Nilai R^2 sebesar 0,9789 serta rata-rata persentase error sebesar 5,54% menunjukkan bahwa persamaan yang diperoleh memiliki tingkat kesalahan yang relatif rendah dan dapat digunakan sebagai faktor kalibrasi sensor TDS pada sistem monitoring dan kontrol fertigasi yang dikembangkan dalam penelitian ini.

Namun, pada rentang konsentrasi di atas 600 ppm, hasil validasi menunjukkan adanya peningkatan penyimpangan pembacaan sensor. Pada nilai TDS meter sebesar 668 ppm, sensor menghasilkan pembacaan sebesar 732 ppm dengan error 64 ppm atau 9,6%, sedangkan pada nilai TDS meter sebesar 721 ppm, sensor menghasilkan pembacaan sebesar 754 ppm dengan error 33 ppm atau 4,6%. Oleh karena itu, sistem kontrol fertigasi dirancang dengan setpoint 500 ppm, sehingga titik operasi utama sistem berada pada rentang konsentrasi yang

memberikan hasil pembacaan sensor yang masih sesuai untuk digunakan sebagai umpan balik sistem kontrol.

4.1.2 Pengujian Sensor Jarak

Sensor ultrasonik merupakan komponen utama dalam sistem monitoring ketinggian air pada tangki pencampur dan tangki penyimpanan. Pada penelitian ini digunakan dua jenis sensor ultrasonik, yaitu AJ-SR04M pada *mixing tank* dan JSN-SR04T pada *supply tank*. Kedua sensor memiliki prinsip kerja yang sama, yaitu mengukur jarak berdasarkan waktu tempuh gelombang ultrasonik pantulan *time of flight*. Namun, perbedaan konstruksi fisik, karakteristik *transduser*, lingkungan pemasangan, serta metode konversi sinyal menyebabkan *respons* kedua sensor terhadap perubahan ketinggian air tidak identik. Oleh karena itu, masing-masing sensor dikalibrasi secara terpisah agar hasil pengukuran mencerminkan kondisi aktual di lapangan.

Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai pembacaan sensor terhadap jarak aktual yang diukur menggunakan mistar ukur berskala milimeter. Prosedur ini diterapkan secara bertahap pada berbagai tingkat ketinggian air. Seluruh data dianalisis menggunakan pendekatan regresi linier untuk memperoleh model hubungan antara variabel bebas (pembacaan sensor) dan variabel terikat (jarak aktual). Model tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan algoritma koreksi pada mikrokontroler ESP32.

4.1.2.1 Pengujian Sensor AJ-SR04M

Sensor AJ-SR04M dipasang pada bagian atas tangki pencampur dengan arah pancaran gelombang ultrasonik mengarah vertikal ke bawah menuju permukaan air. Sensor ini menggunakan konfigurasi *transduser* ganda, sehingga pemancar dan penerima gelombang ultrasonik terpisah secara fisik. Konfigurasi ini memberikan keunggulan dalam hal penguatan sinyal pantulan karena tidak terjadi tumpang tindih antara gelombang yang dipancarkan dan diterima. Namun, konstruksi tersebut juga menyebabkan sensor memiliki sudut pancar yang relatif lebar, sehingga gelombang ultrasonik tidak hanya dipantulkan oleh permukaan air,

tetapi juga oleh dinding tangki apabila ketinggian air berada di bawah area optimal pengukuran.

Tujuan kalibrasi sensor AJ-SR04M adalah untuk memperoleh hubungan antara nilai mentah yang dibaca sensor (dalam satuan sentimeter) dengan ketinggian air aktual di dalam tangki. Proses kalibrasi dilakukan dengan mengisi tangki secara bertahap dari kondisi kosong hingga ketinggian 20 cm dengan interval 5 cm. Pada setiap tahap, pembacaan sensor dicatat sebanyak 50 kali, kemudian dirata-ratakan untuk mengurangi pengaruh fluktuasi sinyal akibat turbulensi permukaan air dan gangguan lingkungan. Ketinggian aktual diukur menggunakan mistar ukur yang ditempatkan secara vertikal pada dinding tangki sebagai referensi.

Tabel 4. 4 Hasil Kalibrasi Sensor AJ-SR04M

Tinggi Air Referensi (cm)	Pembacaan Mentah Sensor (cm)	Tinggi Air Hasil Koreksi (cm)	Error Absolut (cm)	Error Absolut (%)
5	83,04	5,50	0,50	10,00
10	78,20	10,50	0,50	5,00
15	73,57	15,28	0,28	1,87
20	68,45	20,56	0,56	2,80
Rata-rata			0,46	4,92

Pada Tabel 4.4, nilai jarak aktual sensor terhadap permukaan air diperoleh dari selisih antara tinggi pemasangan sensor terhadap dasar tangki sebesar 88,36 cm dan tinggi air aktual. Nilai tersebut digunakan sebagai nilai referensi untuk mengevaluasi pembacaan sensor AJ-SR04M. Besarnya penyimpangan pembacaan sensor terhadap nilai referensi dinyatakan menggunakan error absolut, sehingga nilai error tidak dipengaruhi oleh arah penyimpangan pembacaan.

Berdasarkan hasil kalibrasi, error absolut pembacaan sensor berada pada rentang 0–0,32 cm, dengan rata-rata error absolut sebesar 0,16 cm. Error absolut terbesar sebesar 0,32 cm diperoleh pada tinggi air aktual 5 cm, sedangkan pada kondisi tangki kosong diperoleh error absolut sebesar 0 cm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada rentang kalibrasi 0–20 cm, pembacaan sensor memiliki penyimpangan yang relatif kecil terhadap nilai referensi.

Berdasarkan hasil kalibrasi tersebut, perhitungan tinggi air kemudian diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 sebagaimana ditunjukkan pada Lampiran 2. Nilai 88,36 cm digunakan sebagai jarak acuan sensor terhadap dasar tangki yang diperoleh dari rata-rata pembacaan sensor pada kondisi tangki kosong. Selanjutnya, faktor koreksi empiris sebesar 1,033 diterapkan untuk menyesuaikan hasil pembacaan sensor terhadap kondisi aktual berdasarkan hasil kalibrasi. Implementasi faktor koreksi tersebut digunakan pada rentang operasi sensor yang diuji dalam penelitian ini. Sederhana secara komputasi dan tetap menghasilkan tingkat akurasi yang dapat diterima, sebagaimana ditunjukkan pada proses validasi.

Setelah proses kalibrasi dan penerapan faktor koreksi, dilakukan validasi untuk mengevaluasi hasil pengukuran sensor terhadap tinggi air referensi. Validasi menggunakan data pengujian yang berbeda dari data yang digunakan dalam proses kalibrasi, dengan tinggi air referensi sebesar 5, 10, 15, dan 20 cm. Pada tahap ini, evaluasi dilakukan menggunakan error absolut dalam satuan sentimeter dan persentase error absolut terhadap nilai referensi.

Untuk melihat efektivitas terhadap persamaan hasil kalibrasi sensor AJ-SR04M disajikan pada Tabel 4.5, berikut :

Tabel 4. 5 Data Validasi Kalibrasi Sensor AJ-SR04M

Tinggi Air Referensi (cm)	Pembacaan Mentah Sensor (cm)	Tinggi Air Hasil Koreksi (cm)	Error Absolut (cm)	Error Absolut (%)
5	83,04	5,50	0,50	10,00
10	78,20	10,50	0,50	5,00
15	73,57	15,28	0,28	1,87
20	68,45	20,56	0,56	2,80
Rata-rata			0,46	4,92

Berdasarkan Tabel 4.5, hasil validasi menunjukkan error absolut sebesar 0,28–0,56 cm, dengan rata-rata error absolut sebesar 0,46 cm. Jika dinyatakan relatif terhadap tinggi air referensi, persentase error absolut berada pada rentang 1,87–10,00%, dengan rata-rata sebesar 4,92%. Persentase error terbesar diperoleh pada tinggi air referensi 5 cm sebesar 10,00%. Hal tersebut terjadi karena penyimpangan sebesar 0,50 cm memiliki proporsi yang lebih besar terhadap nilai

referensi yang relatif kecil. Pada tinggi referensi 10–20 cm, persentase error berada pada rentang 1,87–5,00%.

Hasil validasi menunjukkan bahwa faktor koreksi yang diterapkan mampu menghasilkan pembacaan tinggi air yang mendekati nilai referensi pada rentang pengujian. Sensor AJ-SR04M selanjutnya digunakan sebagai masukan sistem untuk memantau kondisi level air pada mixing tank sesuai dengan rentang operasi yang digunakan dalam penelitian.

4.1.2.2 Pengujian Sensor JSN-SR04T

Sensor JSN-SR04T digunakan pada tangki penyimpanan air yang ditempatkan pojok tangki. Kalibrasi sensor JSN-SR04T dilakukan untuk mengetahui penyimpangan pembacaan sensor terhadap jarak referensi antara sensor dan permukaan air. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi tinggi air aktual, yaitu 10–91 cm. Jarak referensi sensor terhadap permukaan air ditentukan berdasarkan posisi permukaan air pada setiap kondisi pengujian, kemudian dibandingkan dengan hasil pembacaan sensor JSN-SR04T. Besarnya penyimpangan pada setiap titik pengujian dievaluasi menggunakan error absolut sehingga nilai yang diperoleh menunjukkan besar kesalahan pembacaan tanpa dipengaruhi oleh arah penyimpangan. Hasil pengumpulan data kalibrasi sensor JSN-SR04T disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Pengumpulan Data Kalibrasi Sensor JSN SR04T

No.	Tinggi Air Aktual (cm)	Jarak Referensi Sensor–Air (cm)	Pembacaan Sensor (cm)	Error Absolut (cm)
1	10	119	114,69	4,31
2	21	108	102,70	5,30
3	31	98	94,04	3,96
4	41	88	83,95	4,05
5	51	78	73,84	4,16
6	61	68	64,06	3,94
7	71	58	54,15	3,85
8	81	48	44,15	3,85
9	91	38	34,96	3,04
Rata-rata				4,05

Berdasarkan Tabel 4.6, pembacaan sensor JSN-SR04T menunjukkan penyimpangan terhadap jarak referensi pada seluruh titik pengujian. Error absolut berada pada rentang 3,04–5,31 cm, dengan rata-rata error absolut sebesar 4,05 cm. Error absolut terbesar diperoleh pada tinggi air aktual 10 cm sebesar 4,31 cm, sedangkan error absolut terkecil diperoleh pada tinggi air aktual 91 cm sebesar 3,04 cm.

Selain besarnya error, data kalibrasi menunjukkan bahwa pembacaan sensor pada seluruh titik pengujian berada di bawah jarak referensi. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kecenderungan penyimpangan pembacaan yang konsisten sehingga diperlukan koreksi terhadap keluaran sensor sebelum nilai jarak digunakan untuk menentukan tinggi air.

Berdasarkan hubungan antara pembacaan sensor dan jarak referensi pada data kalibrasi, diperoleh persamaan koreksi yang selanjutnya diterapkan pada mikrokontroler ESP32. Persamaan tersebut digunakan untuk mengubah pembacaan mentah sensor menjadi jarak sensor terhadap permukaan air yang telah dikoreksi, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan Lampiran 3. dengan: $J_{koreksi}$ = jarak sensor–air setelah koreksi (cm) kemudian J_{sensor} = pembacaan mentah JSN-SR04T (cm). Jarak hasil koreksi selanjutnya dikonversi menjadi tinggi air dengan mengurangi jarak tersebut terhadap tinggi pemasangan sensor yang digunakan pada implementasi sistem, yaitu 129 cm. Implementasi program terlampir pada gambar 4.2.

```
float raw = readJSNSensor();
float jarakTerkoreksi = (1.048 * raw) - 0.22;
float tinggiAir = 129.0 - jarakTerkoreksi;
```

Gambar 4. 2 Fungsi pada program jarak tangki air (Dokumentasi penulis)

Setelah persamaan koreksi diperoleh, dilakukan validasi untuk mengevaluasi kemampuan persamaan tersebut dalam menghasilkan estimasi tinggi air. Data validasi menggunakan kondisi pengujian yang berbeda dari data yang digunakan dalam proses kalibrasi. Pembacaan mentah sensor terlebih dahulu

dikoreksi menggunakan persamaan kalibrasi, kemudian dikonversi menjadi tinggi air dan dibandingkan dengan tinggi air aktual.

Evaluasi dilakukan menggunakan error absolut dalam satuan sentimeter dan persentase error absolut terhadap tinggi air aktual. Hasil validasi sensor JSN-SR04T disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Validasi Sensor JSN SR04T

Tinggi Air Aktual (cm)	Pembacaan Sensor (cm)	Jarak Terkoreksi (cm)	Tinggi Air Hasil Kalibrasi (cm)	Error Absolut (cm)	Error Absolut (%)
91	34,90	36,36	92,64	1,64	1,80
76	49,84	52,01	76,99	0,99	1,30
61	61,81	64,57	64,43	3,43	5,62
56	78,17	81,72	47,28	8,72	15,57
Rata-rata				3,70	6,07

Berdasarkan Tabel 4.7, hasil validasi sensor JSN-SR04T menghasilkan error absolut sebesar 0,99–8,72 cm, dengan rata-rata error absolut sebesar 3,70 cm. Jika dinyatakan relatif terhadap tinggi air aktual, persentase error absolut berada pada rentang 1,30–15,57%, dengan rata-rata sebesar 6,07%.

Hasil terbaik diperoleh pada tinggi air aktual 76 cm, dengan tinggi air hasil kalibrasi sebesar 76,99 cm sehingga menghasilkan error absolut sebesar 0,99 cm atau 1,30%. Pada tinggi air aktual 91 cm, error absolut juga relatif kecil, yaitu sebesar 1,64 cm atau 1,80%. Sementara itu, pada tinggi air aktual 61 cm diperoleh error absolut sebesar 3,43 cm atau 5,62%.

Penyimpangan terbesar terjadi pada tinggi air aktual 56 cm. Pada kondisi tersebut, sistem menghasilkan tinggi air sebesar 47,28 cm sehingga diperoleh error absolut sebesar 8,72 cm atau 15,57%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa performa pembacaan sensor tidak seragam pada seluruh rentang pengujian. Sensor memberikan hasil yang lebih mendekati nilai referensi pada beberapa kondisi pengujian, tetapi masih menunjukkan penyimpangan yang lebih besar pada titik tertentu.

Berdasarkan keseluruhan hasil validasi, rata-rata persentase error absolut sensor sebesar 6,07%. Meskipun terdapat peningkatan penyimpangan pada salah

satu titik pengujian, sensor JSN-SR04T tetap digunakan pada sistem untuk memberikan informasi kondisi level tandon. Penggunaannya dalam sistem lebih ditujukan untuk menentukan kondisi level berdasarkan batas operasi yang telah ditetapkan pada logika kontrol, bukan sebagai instrumen pengukuran tinggi air presisi.

4.2 Pengujian Agitator

Pengujian motor agitator dilakukan untuk mengetahui karakteristik hubungan antara sinyal Pulse Width Modulation (PWM) yang dihasilkan oleh ESP32 terhadap kecepatan putaran motor DC sebagai penggerak agitator. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa driver motor BTS7960 mampu mengendalikan kecepatan motor secara proporsional sesuai nilai PWM yang diberikan, sehingga proses pencampuran larutan nutrisi pada mixing tank dapat berlangsung dengan baik.

Pengujian dilakukan menggunakan motor DC high torque 350 W yang di pasangkan shaft dan coupling serta impeller sesuai dengan sistem yang akan di implementasikan, tegangan kerja 24 VDC yang dikendalikan menggunakan driver motor BTS7960 (IBT-2). Driver memperoleh catu daya dari power supply switching 24 VDC, sedangkan sinyal kendali PWM diberikan oleh mikrokontroler ESP32 melalui pin PWM menuju input RPWM pada driver BTS7960.

Nilai PWM divariasikan secara bertahap mulai dari 0 hingga 255 dengan interval tertentu, kemudian kecepatan putaran motor diukur menggunakan tachometer digital dalam satuan revolutions per minute (RPM). Setiap perubahan nilai PWM dilakukan setelah putaran motor mencapai kondisi stabil sehingga nilai RPM yang diperoleh merepresentasikan kondisi operasi motor pada setiap tingkat PWM.

Berikut merupakan data hasil melihat hubungan antara nilai PWM dengan *Rotation Per Minute* RPM terlampir pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Hubungan Agitator dan PWM

No.	PWM	Kecepatan Motor (RPM)
1	0	0
2	10	0

No.	PWM	Kecepatan Motor (RPM)
3	20	13
4	40	33
5	60	56
6	80	78
7	100	89
8	120	116
9	140	136
10	160	154
11	180	174
12	200	197
13	220	240
14	240	245
15	255	270

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.8** Hubungan Agitator dan PWM terlihat bahwa peningkatan nilai PWM menghasilkan kenaikan kecepatan putaran motor secara bertahap. Pada nilai PWM 0 hingga 10 motor belum mampu berputar sehingga kecepatan yang dihasilkan masih sebesar 0 RPM. Motor mulai berputar pada PWM 20 dengan kecepatan sebesar 13 RPM. Kondisi tersebut menunjukkan adanya dead zone, yaitu rentang PWM di mana energi listrik yang diberikan belum mampu menghasilkan torsi awal yang cukup untuk mengatasi gaya gesek statis pada rotor motor maupun beban mekanis agitator. Seiring meningkatnya nilai PWM, kecepatan motor juga mengalami peningkatan hingga mencapai 269 RPM pada PWM maksimum sebesar 255. Nilai tersebut sangat mendekati spesifikasi nominal motor sebesar 270 RPM sehingga menunjukkan bahwa kombinasi antara power supply 24 VDC, driver BTS7960, dan motor DC mampu bekerja secara optimal dalam menyediakan kecepatan putar yang dibutuhkan pada proses pengadukan. Pengaturan kecepatan motor agitator memiliki peranan penting dalam proses pencampuran larutan nutrisi di dalam mixing tank, karakteristik hubungan antara PWM dan RPM digunakan untuk memverifikasi kemampuan aktuator dan hubungan PWM–RPM, bukan membuktikan RPM optimal secara ilmiah.

4.3 Pengujian *Finite State Machine*

Pengujian *Finite State Machine* (FSM) dilakukan untuk mengevaluasi implementasi logika kendali pada sistem *mixing tank* berdasarkan data aktual yang direkam oleh ESP32 selama proses pencampuran nutrisi. Parameter yang diamati meliputi waktu operasi (*elapsed time*), nilai konsentrasi TDS, level air pada *mixing tank*, level larutan pada tangki nutrisi (*torn*), status aktuatur (pompa pengisian, pompa nutrisi, dan motor agitator), jumlah proses *dosing*, serta perpindahan state selama sistem beroperasi. Selama pengujian diperoleh dua data log, di mana log pertama digunakan untuk memverifikasi keberadaan state IDLE, sedangkan log kedua digunakan sebagai dasar evaluasi proses operasi karena telah menunjukkan seluruh tahapan sistem hingga mencapai state READY setelah penyempurnaan logika program.

Tabel 4. 9 Pengujian FSM

State	Parameter Aktual	Kondisi Sistem	Evaluasi
IDLE	TDS $\approx$ 76,7 ppm, level mixing tank 49,6%, level tangki air 82,7%, seluruh aktuatur OFF	Sistem berada pada kondisi siaga setelah proses inisialisasi dan menunggu perintah mulai.	State IDLE berfungsi sebagai kondisi awal sistem sebelum seluruh proses otomatis dijalankan.
CHECK SAFETY	Waktu 0 s, TDS 77,9 ppm, level mixing tank 12,5%, level tangki nutrisi 82,2%, seluruh aktuatur OFF	Sistem melakukan pemeriksaan kondisi awal sensor dan level tangki.	Hasil pemeriksaan menunjukkan sistem berada pada kondisi aman sehingga FSM dapat melanjutkan proses ke state FILL_TANK.
FILL TANK	Waktu 0,5–80 s, level mixing tank meningkat dari 12,5% hingga sekitar 82,5%, pompa pengisian aktif (mix_air = 1)	Air dialirkan dari tangki supply menuju mixing tank hingga mencapai level operasi.	FSM mempertahankan state ini hingga volume air memenuhi syarat sehingga proses mixing tidak dilakukan pada kondisi tangki kosong.
MIXING	Waktu 80,5–133,5 s, level mixing tank stabil sekitar 82,5%, waktu pengadukan mencapai 59,4 s,	Motor agitator menghomogenkan larutan sebelum pembacaan sensor TDS dilakukan.	Pengadukan berlangsung sesuai waktu yang ditentukan sehingga larutan memiliki kesempatan menjadi

State	Parameter Aktual	Kondisi Sistem	Evaluasi
CHECK TDS	agitator aktif (agitator = 1)		homogen sebelum evaluasi konsentrasi.
	TDS sekitar 191–193 ppm, level mixing tank $\pm 78\%$, mixing_elapsed_s $\approx 51,4$ s, seluruh pompa OFF	Sensor TDS membaca konsentrasi aktual dan menghitung error terhadap setpoint.	FSM menggunakan hasil pembacaan sensor sebagai dasar pengambilan keputusan berikutnya, bukan berdasarkan waktu operasi.
DOSING	Waktu 87–125,5 s, fuzzy_output_s = 19,5 s, dosing_count bertambah, pompa nutrisi aktif (premix = 1)	Larutan nutrisi ditambahkan sesuai durasi hasil inferensi fuzzy.	Keputusan dosing dilakukan secara adaptif berdasarkan nilai error dan delta error hasil pembacaan sensor TDS, kemudian sistem kembali menuju CHECK_TDS untuk melakukan evaluasi ulang.
READY	Waktu 135–154 s, TDS 515,5–520,2 ppm, level mixing tank 84,4%, dosing_count = 5	Proses pencampuran selesai dan larutan nutrisi berada 500ppm siap digunakan.	FSM berhasil menyelesaikan seluruh siklus operasi secara otomatis ketika konsentrasi nutrisi telah berada pada rentang target sistem.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem memulai proses pada state IDLE setelah seluruh proses inisialisasi selesai dilakukan. Pada kondisi ini nilai TDS yang terbaca sebesar sekitar 76,7 ppm, level *mixing tank* berada pada 49,6%, sedangkan level tangki nutrisi berada pada 82,7%. Seluruh aktuator, yaitu pompa pengisian air, pompa nutrisi, dan motor agitator berada dalam kondisi tidak aktif. Hal tersebut menunjukkan bahwa state IDLE berfungsi sebagai kondisi siaga sebelum pengguna memberikan perintah untuk memulai proses pencampuran. Setelah sistem menerima perintah mulai, FSM berpindah menuju state CHECK_SAFETY.

Berdasarkan data log pada waktu 0 s, sistem membaca nilai TDS sebesar 77,9 ppm, level *mixing tank* sebesar 12,5%, dan level tangki air sebesar 82,2%.

Pada tahap ini belum terdapat aktuator yang aktif sehingga sistem hanya melakukan pemeriksaan kondisi awal. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa seluruh sensor dapat dibaca dengan baik kemudian parameter tangki air masih berada di ambang batas bawa $<10\%$ sehingga sistem melanjutkan proses menuju state FILL_TANK. Pada state FILL_TANK, pompa pengisian air diaktifkan untuk mengalirkan air menuju *mixing tank*. Berdasarkan data log, state ini berlangsung dari waktu 0,5 s hingga sekitar 80 s. Selama proses tersebut level *mixing tank* meningkat secara bertahap dari 12,5% hingga mencapai sekitar 82,5%, sedangkan level tangki air relatif pada rentang 78-80%. Kondisi ini menunjukkan bahwa mekanisme pengisian air bekerja sesuai rancangan dan FSM mempertahankan state FILL_TANK hingga volume air memenuhi batas minimum operasi yaitu $>35\% - 80\%$. Setelah volume air berada pada 80%, sistem berpindah menuju state MIXING. Pada tahap ini motor agitator diaktifkan untuk menghomogenkan larutan di dalam *mixing tank*.

Berdasarkan data log, proses pengadukan berlangsung selama sekitar 59,4 detik, dengan level *mixing tank* tetap berada pada kisaran 82,5%. Waktu pengadukan tersebut memberikan kesempatan bagi larutan nutrisi untuk tercampur secara lebih merata sehingga pembacaan sensor TDS pada tahap berikutnya dapat merepresentasikan kondisi larutan yang sebenarnya. Setelah proses pengadukan selesai, FSM memasuki state CHECK_TDS untuk membaca konsentrasi nutrisi menggunakan sensor TDS. Pada data pengujian diperoleh nilai TDS sekitar 191–193 ppm nilai naik karena terdapat residu ataupun nutrisi yang masih mengendap dengan level *mixing tank* tetap berada pada kisaran 82%. Berdasarkan nilai tersebut sistem menghitung selisih terhadap nilai setpoint (*error*) dan perubahan Delta error yang selanjutnya digunakan sebagai masukan metode fuzzy.

Hal ini menunjukkan bahwa keputusan sistem tidak ditentukan berdasarkan waktu operasi, tetapi berdasarkan hasil pengukuran aktual dari sensor. Ketika hasil evaluasi menunjukkan bahwa konsentrasi nutrisi masih berada di bawah setpoint, sistem berpindah menuju state DOSING. Berdasarkan data log, keluaran fuzzy menghasilkan durasi aktivasi pompa nutrisi sebesar 19,5 detik, ditandai dengan perubahan status *premix* = 1 serta bertambahnya nilai *dosing_count*. Setelah proses

penambahan nutrisi selesai, sistem kembali menuju state *CHECK_TDS* untuk mengevaluasi perubahan konsentrasi larutan.

Mekanisme ini menunjukkan bahwa FSM bekerja secara closed-loop, yaitu setiap keputusan penambahan nutrisi selalu didasarkan pada hasil pembacaan sensor TDS terbaru. Setelah beberapa kali proses evaluasi dan *dosing*, sistem berhasil mencapai state *READY* pada waktu sekitar 135–154 detik. Pada kondisi ini nilai TDS telah meningkat hingga berada pada kisaran 515,5–520,2 ppm, dengan level *mixing tank* sekitar 84,4% dan jumlah proses *dosing* sebanyak 5 kali. Hasil tersebut menunjukkan bahwa seluruh rangkaian FSM mampu berjalan secara berurutan mulai dari proses pengisian air, pencampuran, evaluasi konsentrasi, penambahan nutrisi, hingga sistem menghentikan proses secara otomatis ketika target konsentrasi telah tercapai.

4.4 Pengujian Kontrol Fuzzy

Pada subbab ini dilakukan pengujian terhadap metode kontrol Fuzzy Logic yang diterapkan untuk menentukan durasi aktivasi pompa premix berdasarkan nilai error dan delta error. Pengujian dilaksanakan secara bertahap mulai dari evaluasi parameter awal, proses penalaan parameter, hingga validasi parameter final yang digunakan pada sistem. Seluruh hasil pengujian dianalisis menggunakan data aktual yang diperoleh dari implementasi sistem sehingga pembahasan tidak hanya menunjukkan keberhasilan mencapai *setpoint*, tetapi juga menjelaskan proses pengembangan pengendali fuzzy selama penelitian. Data pengujian dibagi menjadi tiga tahap pengembangan. Tahap parameter awal menggunakan premix 500 g/40 L, tahap penalaan menggunakan premix 1000 g/40 L, dan tahap validasi parameter final menggunakan premix 1500 g/40 L.

Tabel 4. 10 Skenario Penalaan

Tahap	Kondisi/Parameter	Premix	Tujuan
Awal	Parameter awal	500 g/40 L	Menilai performa awal
Penalaan	Parameter hasil revisi	1000 g/40 L	Mengevaluasi perubahan parameter
Final	Parameter final	1500 g/40 L	Validasi performa akhir

4.4.1 Penentuan Parameter Awal

Pada sistem pengendalian TDS, metode fuzzy menggunakan dua variabel masukan, yaitu Error dan Delta Error, serta satu keluaran berupa durasi dosing. Nilai error diperoleh dari selisih antara setpoint TDS sebesar 500 ppm dengan nilai TDS aktual. Berikut himpunan awal yang diimplementasikan pada percobaan awal terlihat pada tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Himpunan Error tahap awal

Variabel	Himpunan	Rentang	Karakteristik
Error	Low	0–100 ppm	Error kecil atau TDS sudah relatif dekat dengan setpoint
	Medium	50–300 ppm	Error menengah
	High	≥ 200 ppm	Error besar atau TDS masih jauh dari setpoint
Delta Error	Negative	≤ 0 ppm	Error cenderung menurun
	Zero	–30 sampai +30 ppm	Perubahan error relatif kecil/stabil
	Positive	0 sampai $\geq +50$ ppm	Error Mengalami Peningkatan
Output	Short	5 detik	-
	Medium	7 detik	-
	Long	9 detik	-

Pada himpunan Low, derajat keanggotaan bernilai penuh ketika error ≤ 50 ppm dan kemudian menurun hingga nol pada 100 ppm. Himpunan Medium memiliki daerah keanggotaan pada rentang 50–300 ppm dengan nilai maksimum di sekitar 175 ppm. Sementara itu, himpunan High mulai aktif pada error 200 ppm dan mencapai derajat keanggotaan penuh ketika error lebih besar dari 350 ppm. Adanya daerah yang saling tumpang tindih (*overlap*) antar himpunan menyebabkan satu nilai error dapat memiliki derajat keanggotaan pada lebih dari satu himpunan secara bersamaan. Karakteristik tersebut merupakan bagian dari proses fuzzifikasi pada logika fuzzy dan memungkinkan perubahan keputusan kontrol berlangsung secara bertahap, bukan berpindah secara tegas antara kondisi Low, Medium, dan High.

Rule yang digunakan berjumlah 9 rule yang berasal dari perancangan himpunan, tabel terlampir pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Rule Base yang Digunakan

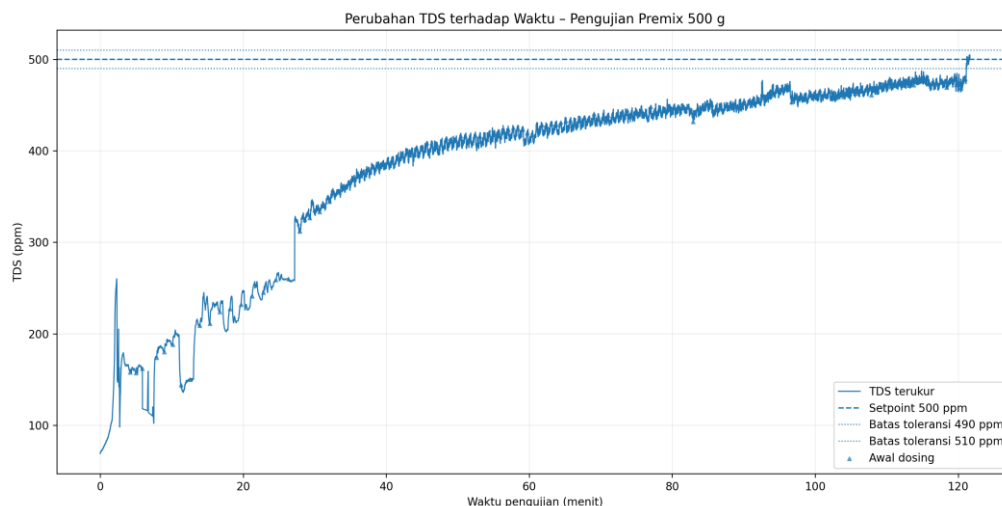
Rule	Error	Delta Error	Output
1	Low	Negative	SHORT
2	Low	Zero	SHORT
3	Low	Positive	MEDIUM
4	Medium	Negative	SHORT
5	Medium	Zero	MEDIUM
6	Medium	Positive	LONG
7	High	Negative	MEDIUM
8	High	Zero	LONG
9	High	Positive	LONG

Rule tersebut menunjukkan bahwa semakin besar *error* dan semakin besar kecenderungan *error* untuk meningkat, maka sistem akan memberikan durasi *dosing* yang lebih panjang. Sebaliknya, ketika *error* sudah kecil atau *error* sedang mengalami penurunan, durasi *dosing* dibuat lebih pendek untuk mengurangi kemungkinan *overshoot* terhadap setpoint.

4.4.1.1 Evaluasi Parameter Awal

Pengujian dilakukan menggunakan setpoint TDS sebesar 500 ppm dengan toleransi ± 10 ppm kemudian dengan larutan premix 500gr / 40 Liter. Pada awal pengujian, nilai TDS larutan tercatat sebesar 69 ppm, sehingga selisih awal terhadap setpoint mencapai sekitar 431 ppm.

Untuk melihat respon hasil dari parameter yang diterapkan dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Respon Parameter Awal

Pengujian dilakukan menggunakan setpoint TDS sebesar 500 ppm dengan toleransi ± 10 ppm. Pada awal pengujian, nilai TDS larutan tercatat sebesar 69 ppm, sehingga selisih awal terhadap *setpoint* mencapai sekitar 431 ppm.

Seiring proses pengendalian berlangsung, sistem melakukan dosing secara bertahap. Setiap proses *dosing* diikuti oleh proses *mixing* dan pemeriksaan kembali nilai TDS. Berdasarkan keseluruhan data, TDS meningkat dari 69 ppm menjadi 504,2 ppm pada akhir pengujian.

Pola peningkatan TDS tidak berbentuk garis linier sempurna. Pada beberapa bagian awal pengujian ditemukan kenaikan dan penurunan pembacaan yang relatif besar. Hal tersebut dapat terjadi karena larutan premix yang baru masuk belum langsung tersebar secara homogen di seluruh *mixing tank*. Posisi sensor, aliran larutan, serta proses pengadukan menyebabkan pembacaan sesaat dapat berubah sebelum kondisi larutan menjadi lebih homogen.

Setelah TDS mencapai kisaran sekitar 300–400 ppm, pola kenaikannya menjadi lebih teratur. Ketika nilai TDS semakin mendekati setpoint, kenaikan yang terjadi juga semakin kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem melakukan koreksi secara bertahap sehingga penambahan premix tidak langsung diberikan dalam durasi panjang ketika konsentrasi sudah mendekati target.

Pada akhir pengujian diperoleh TDS sebesar 504,2 ppm. Nilai tersebut hanya memiliki selisih sebesar +4,2 ppm terhadap setpoint 500 ppm dan masih berada di

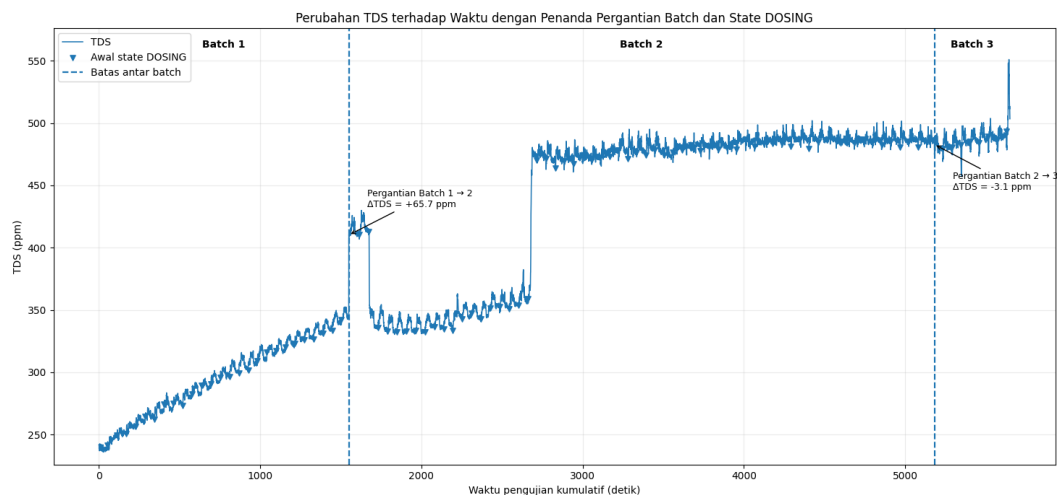
dalam daerah toleransi 490–510 ppm. Oleh karena itu, sistem berhasil meningkatkan konsentrasi larutan dari kondisi awal hingga mencapai daerah target. Berdasarkan identifikasi setiap perubahan state menuju *DOSING*, sistem melakukan sebanyak 158 siklus dosing selama satu kali pengujian. Jumlah tersebut tidak menunjukkan bahwa sistem gagal sebanyak 158 kali, tetapi menunjukkan mekanisme koreksi secara berulang yang memang diterapkan pada sistem.

Apabila hasil *CHECK_TDS* masih menunjukkan nilai di bawah batas target, sistem menghitung kembali nilai error dan delta error. Nilai tersebut kemudian digunakan pada proses inferensi fuzzy untuk menentukan durasi dosing berikutnya. Rata-rata TDS pada awal state dosing sebesar 406,73 ppm, sedangkan pada akhir *state* dosing sebesar 409,73 ppm.

Dengan demikian, rata-rata perubahan yang teramati selama pompa berada pada *state DOSING* adalah sekitar +3,00 ppm.

Nilai tersebut tidak dapat dianggap sebagai keseluruhan peningkatan yang dihasilkan oleh satu kali dosing. Setelah pompa berhenti, larutan masih mengalami proses distribusi selama state *MIXING*. Oleh karena itu, pengaruh satu siklus dosing terhadap konsentrasi lebih tepat dievaluasi setelah rangkaian proses *mixing* dan *CHECK_TDS* selesai.

Pada pengujian selanjutnya mengevaluasi respons sistem terhadap perubahan konsentrasi nutrisi, dilakukan pengujian secara bertahap dalam beberapa batch menggunakan larutan yang sama. Setelah satu batch pengujian selesai, proses pengujian dilanjutkan ke batch berikutnya tanpa mengganti larutan pada mixing tank. Oleh karena itu, data dari seluruh batch digabungkan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai kinerja sistem selama proses pengendalian TDS. Batas antarbatch ditandai berdasarkan reset nilai waktu pengujian (*elapsed_s*) yang menunjukkan dimulainya sesi pencatatan data berikutnya.



Gambar 4. 4 Perubahan nilai TDS terhadap waktu selama beberapa batch pengujian dengan penanda pergantian batch dan state *DOSING*.

Berdasarkan Gambar 4.4, nilai TDS menunjukkan kecenderungan meningkat seiring berlangsungnya proses pengujian dan penambahan larutan nutrisi yang dikendalikan oleh algoritma fuzzy dan *finite state machine* (FSM). Penanda ▼ pada grafik menunjukkan awal sistem memasuki state *DOSING*, yaitu kondisi ketika nilai TDS masih berada di bawah nilai setpoint sehingga sistem mengaktifkan pompa nutrisi untuk meningkatkan konsentrasi larutan. Pada grafik terlihat adanya perubahan nilai TDS yang cukup besar pada batas antara *Batch 1* dan *Batch 2*. Untuk respon tertotal terhadap titik pada Gambar 4.4 terlihat pada tabel 4.10.

Tabel 4. 1 Respon sistem pada titik berbeda

Parameter	Hasil
Jumlah transisi menuju state <i>DOSING</i>	97 kali
Rata-rata durasi setiap dosing	$\pm 5,2$ detik
Rata-rata kenaikan TDS per dosing	± 3 ppm

Berdasarkan hasil pengolahan data, nilai TDS berubah dari 344,5 ppm pada akhir *Batch 1* menjadi 410,2 ppm pada awal *Batch 2*, atau mengalami selisih sebesar 65,7 ppm. Perubahan ini bukan merupakan kenaikan TDS secara instan akibat proses dosing maupun kesalahan pembacaan sensor, melainkan disebabkan oleh dimulainya sesi pengujian berikutnya. Meskipun larutan yang digunakan tetap sama, pencatatan data dilakukan dalam batch yang berbeda sehingga kondisi awal

pembacaan pada Batch 2 tidak identik dengan kondisi akhir Batch 1. Oleh karena itu, perubahan tersebut diperlakukan sebagai transisi antarbatch, bukan sebagai karakteristik dinamis dari sistem kendali.

Selanjutnya, pada batas antara Batch 2 dan Batch 3 hanya terjadi perubahan sebesar $-3,1$ ppm, yaitu dari 485,9 ppm menjadi 482,8 ppm. Nilai tersebut relatif kecil dibandingkan dengan rentang pengukuran sensor sehingga menunjukkan bahwa kondisi larutan pada akhir Batch 2 dan awal Batch 3 masih berada pada keadaan yang hampir sama. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pengujian dilanjutkan dengan kondisi larutan yang relatif stabil. Setelah memasuki setiap batch, pola perubahan nilai TDS kembali menunjukkan karakteristik yang konsisten. Nilai TDS meningkat secara bertahap selama proses dosing dan pencampuran hingga mendekati nilai setpoint. Pola tersebut menunjukkan bahwa algoritma fuzzy mampu menentukan aksi penambahan nutrisi sesuai dengan besar error terhadap setpoint, sedangkan FSM mengatur urutan proses pengisian, pencampuran, pemeriksaan TDS, dan dosing secara berulang hingga kondisi yang diinginkan tercapai.

4.4.1.2 Proses Penalaan Konsentrasi Premix 1000 g/40 L

Pengujian pada tahap ini dilakukan untuk mengevaluasi respons pengendali Fuzzy setelah perubahan kondisi larutan premix menjadi 1000 g pupuk NPK dalam 40 L air. Sistem dikendalikan berdasarkan nilai TDS aktual dengan setpoint sebesar 500 ppm. Nilai TDS digunakan untuk memperoleh nilai *error* dan *delta error*, yang selanjutnya menjadi masukan pengendali fuzzy dalam menentukan durasi aktivasi pompa nutrisi.

Pengujian menghasilkan sebanyak 6.259 data logger selama kurang lebih 3.164,5 detik. Berdasarkan pemeriksaan terhadap variabel waktu elapsed_s, tidak ditemukan proses reset selama pencatatan sehingga keseluruhan data diperlakukan sebagai satu sesi pengujian. Selama sesi tersebut, sistem menjalankan proses pengisian, pencampuran, pemeriksaan TDS, dan dosing secara berulang hingga konsentrasi nutrisi bergerak menuju setpoint. Untuk detail terkait dengan hasil pengujian terdapat pada tabel

Tabel 4. 2 Ringkasan Data Pengujian Premix 1000 g/40 L

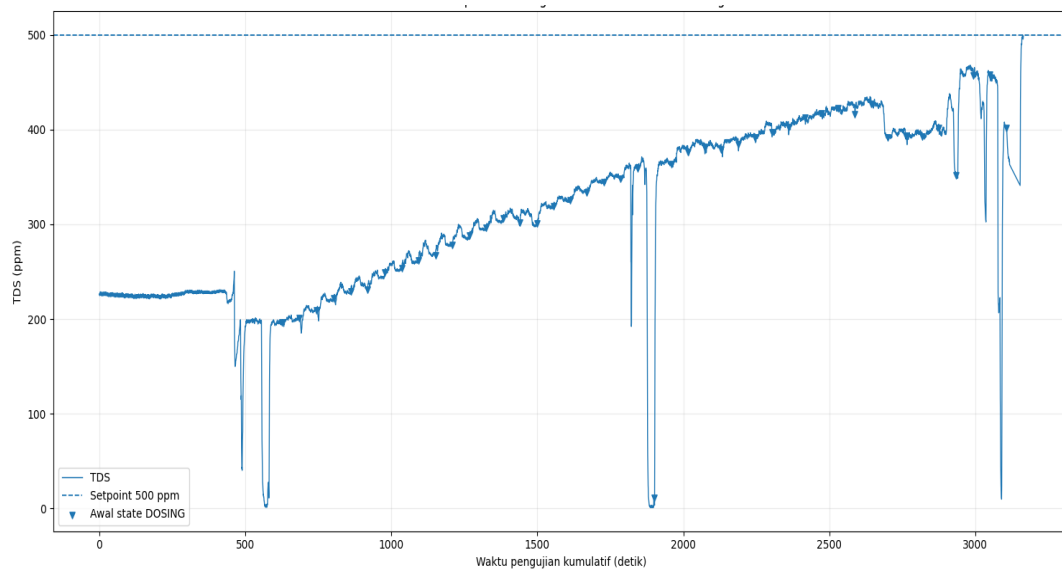
Parameter	Hasil
Jumlah data logger	6.259 data
Durasi pengujian	3.164,5 detik
Jumlah sesi	1 sesi
Setpoint TDS	500 ppm
Jumlah transisi ke DOSING	44 kali
Sampel pada state DOSING	527 data
Rata-rata durasi state DOSING	5,49 detik
Rata-rata Δ TDS selama DOSING	+7,90 ppm
Median Δ TDS selama DOSING	+0,90 ppm
TDS minimum tercatat	0,9 ppm
TDS maksimum tercatat	500 ppm
TDS rata-rata seluruh logger	312,51 ppm

Nilai minimum tidak digunakan sebagai representasi konsentrasi aktual karena teridentifikasi sebagai pembacaan transien sensor.

Jumlah transisi menuju state DOSING sebanyak 44 kali sesuai dengan nilai maksimum variabel dosing_count, yaitu 44. Kesesuaian kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa pencatatan aktivitas dosing oleh *logger* konsisten dengan penghitung internal sistem. Namun, jumlah 44 dosing tersebut merupakan jumlah dosing yang tercatat secara keseluruhan, sehingga selanjutnya perlu dibedakan antara dosing pada kondisi pembacaan normal dan dosing yang berpotensi dipengaruhi pembacaan TDS transien.

Gambar 4.5 memperlihatkan perubahan konsentrasi TDS selama pengujian. Secara umum, nilai TDS menunjukkan kecenderungan meningkat menuju setpoint sebesar 500 ppm. Peningkatan berlangsung secara bertahap melalui siklus pemeriksaan TDS, aktivasi pompa nutrisi, dan pencampuran larutan.

Pada bagian awal pengujian, konsentrasi TDS masih berada cukup jauh dari setpoint sehingga sistem melakukan dosing secara berulang. Setelah setiap proses dosing, larutan kembali dicampur sebelum dilakukan evaluasi TDS berikutnya. Mekanisme tersebut menyebabkan perubahan TDS tidak berbentuk kenaikan linier sempurna, tetapi memiliki fluktuasi yang mengikuti dinamika pencampuran di dalam tangki.



Gambar 4. 5 Perubahan TDS terhadap waktu pada pengujian premix 1000 g/40 L
Grafik juga menunjukkan bahwa peningkatan TDS tidak selalu terjadi

secara langsung selama pompa aktif. Pada beberapa interval, nilai TDS dapat mengalami penurunan kecil sebelum kembali meningkat setelah proses pencampuran. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa membandingkan pembacaan tepat sebelum dan tepat sesudah pompa aktif belum cukup untuk menentukan efektivitas suatu *dosing*. Larutan nutrisi yang baru dimasukkan membutuhkan waktu untuk terdistribusi di dalam *mixing tank* sehingga evaluasi respons lebih tepat dilakukan setelah proses pencampuran dan stabilisasi pembacaan.

Hal tersebut juga menjelaskan perbedaan antara rata-rata perubahan TDS selama state DOSING sebesar +7,90 ppm dan median sebesar +0,90 ppm. Selisih yang cukup besar antara rata-rata dan median menunjukkan bahwa perubahan TDS selama interval pompa aktif tidak terdistribusi secara seragam dan terdapat beberapa perubahan besar yang meningkatkan nilai rata-rata. Oleh sebab itu, Δ TDS selama pompa aktif tidak digunakan sebagai satu-satunya indikator performa pengendali.

Selama pengujian tercatat 44 kali proses dosing, dengan rata-rata durasi state *DOSING* sebesar 5,49 detik. Jumlah tersebut menunjukkan bahwa pada konfigurasi pengujian ini pengendali melakukan penambahan nutrisi secara

bertahap melalui sejumlah aksi dengan durasi relatif pendek dibandingkan memberikan satu aktivasi pompa dalam waktu yang panjang.

Karakteristik tersebut merupakan konsekuensi dari mekanisme pengendalian tertutup yang digunakan. Setelah satu aksi dosing diberikan, sistem tidak langsung memberikan dosing berikutnya, melainkan melakukan proses pencampuran dan mengevaluasi kembali konsentrasi TDS. Nilai pembacaan berikutnya kemudian digunakan untuk memperbarui *error* dan *delta error* sebelum pengendali fuzzy menghasilkan keputusan selanjutnya.

Dengan demikian, jumlah dosing yang relatif banyak tidak dapat langsung dinyatakan sebagai kegagalan pengendali. Parameter tersebut perlu dievaluasi bersama durasi dosing, perkembangan error, kondisi premix, serta kemampuan sistem mencapai daerah setpoint. Namun, jumlah dosing dapat digunakan sebagai salah satu indikator ketika konfigurasi ini nantinya dibandingkan dengan konfigurasi parameter lainnya.

Nilai *error* pada pengendali ditentukan berdasarkan selisih antara setpoint dan nilai TDS aktual, dengan setpoint sebesar 500 ppm. Ketika konsentrasi TDS masih rendah, nilai error menjadi besar sehingga pengendali membutuhkan aksi penambahan nutrisi. Seiring peningkatan TDS, nilai error semakin berkurang dan sistem bergerak menuju kondisi target.

Selain error, pengendali menggunakan *delta error* untuk menggambarkan perubahan error antara dua pembacaan. Dengan demikian, keputusan dosing tidak hanya mempertimbangkan seberapa jauh konsentrasi terhadap target, tetapi juga arah perubahan kondisi sistem.

Hubungan tersebut penting terutama ketika sistem mendekati *setpoint*. Dua kondisi dapat memiliki nilai error yang relatif serupa, tetapi menghasilkan keluaran fuzzy berbeda apabila delta error menunjukkan kecenderungan perubahan yang berbeda. Dengan mekanisme tersebut, pengendali dapat menyesuaikan durasi dosing terhadap kondisi dinamis proses pencampuran.

Secara keseluruhan, pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu meningkatkan konsentrasi TDS secara bertahap hingga mencapai daerah sekitar

500 ppm. Selama satu sesi pengujian tercatat 44 kali proses *dosing*, yang terverifikasi baik dari jumlah transisi menuju state *DOSING* maupun nilai maksimum *dosing_count*. Hal tersebut menunjukkan konsistensi antara proses aktual yang dicatat melalui *state* dan penghitung dosing pada sistem.

Respons TDS memperlihatkan bahwa penambahan nutrisi tidak selalu menghasilkan perubahan konsentrasi secara langsung selama pompa aktif. Hal ini disebabkan oleh dinamika distribusi larutan dan proses homogenisasi di dalam mixing tank. Oleh sebab itu, evaluasi respons dosing tidak hanya didasarkan pada perubahan TDS selama state *DOSING*, tetapi lebih diarahkan pada kondisi setelah proses pencampuran dan pembacaan berikutnya.

Aktivasi rule juga menunjukkan bahwa pengendali fuzzy merespons perubahan kondisi masukan. Rule 5 merupakan kondisi yang paling dominan dengan 45,97% sampel, diikuti Rule 2 sebesar 29,03%. Distribusi tersebut memperlihatkan bahwa selama pengujian sistem lebih sering berada pada beberapa kombinasi error dan delta error tertentu, sedangkan kondisi lainnya hanya terjadi pada sebagian kecil periode pengujian.

Meskipun demikian, ditemukan gangguan pembacaan TDS transien pada beberapa interval. Karena sebagian gangguan terjadi pada proses evaluasi TDS dan dapat memengaruhi keputusan fuzzy, 44 dosing yang tercatat tidak seluruhnya dapat diperlakukan sebagai 44 keputusan kendali normal yang setara. Oleh karena itu, angka 44 tetap dilaporkan sebagai jumlah dosing aktual yang tercatat.

4.4.1.3 Proses Penalaan Konsentrasi Premix 1000 g/40 L dengan pergantian parameter

Pengujian ini ditempatkan setelah evaluasi konfigurasi fuzzy sebelumnya dan sebelum penetapan parameter fuzzy final. Pengujian tidak diposisikan sebagai validasi akhir sistem, melainkan sebagai tahap penalaan lanjutan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan himpunan keanggotaan terhadap respons pengendali. Kondisi larutan premix dipertahankan pada konsentrasi 1000 g pupuk NPK dalam 40 L air, sedangkan perubahan utama dilakukan pada parameter pengendali fuzzy.

Tahap ini diperlukan karena hasil pengujian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem telah mampu melakukan penambahan nutrisi secara bertahap menuju setpoint, tetapi respons pengendali masih perlu dievaluasi terutama pada hubungan antara besar error, perubahan error, dan durasi dosing. Dengan mempertahankan konsentrasi premix yang sama, evaluasi dapat lebih difokuskan pada pengaruh perubahan konfigurasi fuzzy, walaupun dinamika pencampuran, homogenitas larutan, suhu, dan karakteristik pembacaan sensor tetap menjadi faktor eksperimen. Pengujian ini digunakan sebagai dasar untuk menentukan apakah perubahan domain dan bentuk membership function telah menghasilkan respons yang lebih sesuai. Apabila masih ditemukan respons terlalu agresif, terlalu lambat, atau kurang stabil ketika mendekati setpoint, parameter kembali disesuaikan hingga diperoleh himpunan fuzzy final. Untuk metode inferensi masih sama menggunakan MIN dan Agregasi menggunakan metode MAX.

Hubungan antara kedua masukan tersebut tetap dievaluasi menggunakan *rule base* yang terdiri atas kombinasi himpunan *error* dan *delta error*. Setiap kombinasi menghasilkan keluaran linguistik berupa SHORT, MEDIUM, atau LONG, yang selanjutnya direpresentasikan sebagai nilai singleton durasi *dosing*. Pada tahap ini, mekanisme inferensi tidak mengalami perubahan, yaitu menggunakan operator MIN untuk menentukan *firing strength*, agregasi MAX untuk memperoleh derajat aktivasi masing-masing kategori keluaran, serta *Weighted Average* pada tahap defuzzifikasi. Dengan demikian, evaluasi pada tahap penalaan lebih difokuskan pada pengaruh perubahan parameter fungsi keanggotaan dan nilai keluaran terhadap respons sistem.

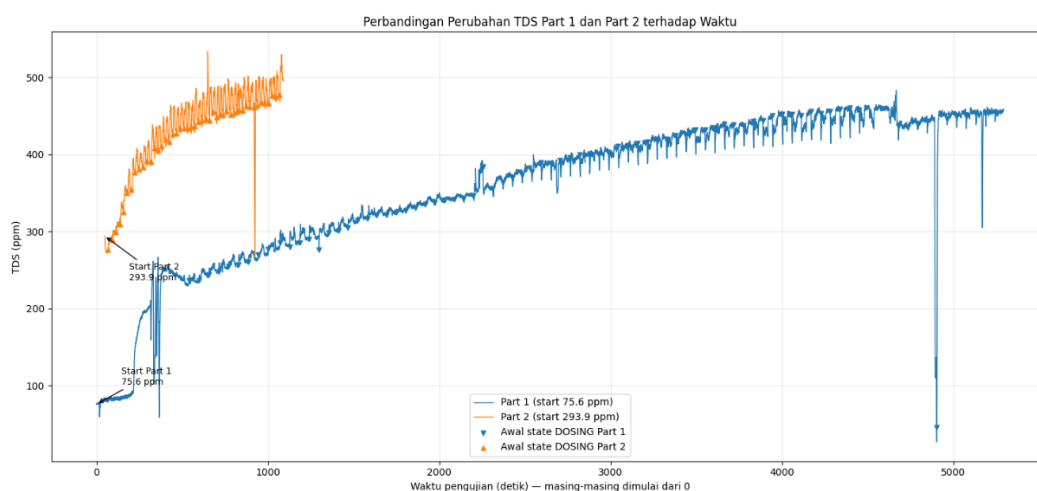
Parameter himpunan keanggotaan yang digunakan pada proses penalaan kedua disajikan pada Tabel 4.12.

Tabel 4. 3 Himpunan Penalaan kedua

Variabel	Himpunan	Parameter	Makna
Error TDS	Low	$\mu=1$ untuk error <40 ppm, turun linier 40–90 ppm	Error kecil

Variabel	Himpunan	Parameter	Makna
Delta Error	Medium	60–140–230 ppm	Error sedang
	High	naik 170–280 ppm, $\mu=1$ untuk ≥ 280 ppm	Error besar
	Negative	domain negatif sampai 0	Error sedang menurun
	Zero	–10–0–10 ppm	Error relatif stabil
	Positive	0–25 ppm naik, 25–120 ppm $\mu=1$	Error meningkat
Output	Short	5 detik	Dosing pendek
	Medium	9 detik	Dosing sedang
	Long	13 detik	Dosing Panjang

Hasil pengujian, Percobaan 1 tercatat TDS awal 75,6 ppm kemudiann TDS akhir hingga 456.6 ppm terlihat pada grafik 4.6. Selama keseluruhan rekaman, TDS minimum sebesar 26,9 ppm dan maksimum 483,3 ppm, dengan durasi data sekitar 5.291,5 detik. Nilai akhir masih berada 43,5 ppm di bawah setpoint sehingga Pengujian 1 belum mencapai daerah toleransi 490 - 510 ppm. Pada Part 1, Rule 5 dan Rule 2 merupakan dua aturan yang paling dominan. Terlihat pada Gambar 4.6 untuk respon sistemnya.



Gambar 4. 6 Respon Sistem Pengujian

Hal ini menunjukkan bahwa selama sebagian besar pengujian sistem berada pada kondisi perubahan error yang relatif kecil, dengan perpindahan antara daerah error Medium dan Low. Rule 8 juga cukup sering muncul pada Part 1, yang menunjukkan adanya periode ketika error masih High tetapi perubahan error relatif stabil sehingga sistem meminta output Long. Pada *Part 2*, Rule 2 menjadi sangat dominan.

Kondisi tersebut sesuai dengan posisi TDS yang semakin dekat dengan setpoint. Rule 3, 6, dan 9 tidak muncul pada Part 2, yang berarti kombinasi delta error Positive pada masing-masing daerah error tersebut tidak menjadi kondisi dominan pada rekaman ini. Distribusi rule tersebut mendukung bahwa rule base benar-benar berpindah mengikuti kondisi input dan tidak menghasilkan satu output tetap sepanjang proses. Ringkasan hasil pengujian terlihat pada tabel 4.13.

Pengujian 2 dimulai pada TDS 293,9 ppm dan berakhir pada 495,8 ppm. Nilai akhir tersebut menghasilkan error hanya 4,2 ppm, sehingga telah berada dalam toleransi ± 10 ppm dari setpoint. TDS maksimum selama rekaman mencapai 533,8 ppm, sehingga terdapat overshoot maksimum sebesar 33,8 ppm pada suatu bagian proses, meskipun kondisi akhir kembali berada dekat setpoint.

Berdasarkan kedua bagian pengujian, membership function baru telah menghasilkan respons adaptif terhadap perubahan kondisi TDS. Durasi dosing cenderung lebih besar ketika jarak terhadap setpoint masih besar dan menjadi lebih pendek ketika sistem mendekati target. Part 1 memperlihatkan fase perjalanan dari konsentrasi rendah menuju daerah menengah, sedangkan Part 2 memperlihatkan fase fine-tuning hingga nilai akhir 495,8 ppm.

Tabel 4. 4 Pengujian 1 dan 2

Parameter	Part 1 – 1000GR A	Part 2 – 1000GR B
TDS awal	75,6 ppm	293,9 ppm
TDS akhir	456,5 ppm	495,8 ppm
TDS minimum	26,9 ppm	267,5 ppm

Parameter	Part 1 – 1000GR A	Part 2 – 1000GR B
TDS maksimum	483,3 ppm	533,8 ppm
Durasi pengujian	5.291,5 s	1.041,5 s
Dosing_count maksimum	75	40
Rule dominan keseluruhan	Rule 5	Rule 2
Rule dominan Dosing	Rule 5	Rule 2

Namun, hasil ini juga menunjukkan dua hal yang masih perlu dipertimbangkan sebelum parameter ditetapkan sebagai konfigurasi final. Pertama, pengujian 1 membutuhkan banyak siklus dan belum mencapai daerah toleransi pada akhir rekaman. Kedua, pengujian 2 sempat mengalami nilai maksimum 533,8 ppm atau overshoot 33,8 ppm namun setelah itu masuk pada nilai toleransi namun masih memerlukan siklus yang banyak sehingga tidak efisien untuk pengimplementasian di lapangan. Oleh karena itu, konfigurasi pada tahap ini lebih tepat diposisikan sebagai hasil penalaan, bukan langsung sebagai parameter final.

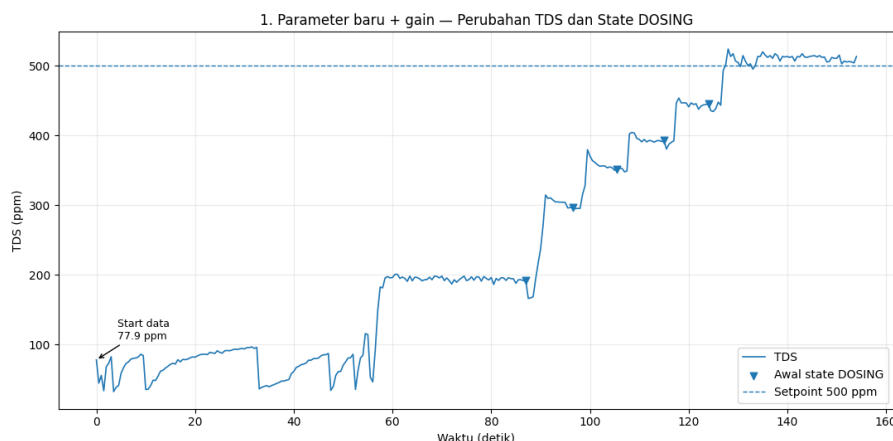
4.4.1.4 Pengujian Parameter Final

Pada tahap ini sistem menggunakan setpoint TDS sebesar 500 ppm dengan toleransi ± 5 ppm. Waktu pencampuran ditetapkan selama 50 detik, sedangkan waktu stabilisasi pembacaan TDS sebelum proses pengambilan keputusan adalah 5 detik. Terkait dengan himpunan yang dipergunakan terlihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 5 Parameter Himpunan

Variabel	Himpunan	Parameter final	Interpretasi
Error	Low	$\mu=1$ untuk error <30 ppm, turun linier 30–70 ppm	Nilai TDS sudah relatif dekat target
	Medium	60–140–230 ppm	Kekurangan TDS sedang
	High	naik 170–280 ppm, $\mu=1$ pada ≥ 280 ppm	Kekurangan TDS besar
Delta error	Negative	domain negatif hingga 0	Error cenderung mengecil
	Zero	–10–0–10 ppm	Error relatif stabil
	Positive	0–25 naik, 25–120 $\mu=1$	Error cenderung bertambah
Output	Short	7,5 s	Dosing Short
	Medium	13,5 s	Dosing Medium
	Long	19,5 s	Dosing Long

Pengujian parameter final dilakukan dalam enam variasi kondisi awal. Penggunaan beberapa kondisi awal bertujuan mengevaluasi apakah pengendali tetap mampu memberikan respons yang sesuai ketika sistem dimulai dari konsentrasi TDS yang berbeda.



Gambar 4. 7 Pengujian 1 Parameter Final

Pengujian pertama dilakukan pada kondisi awal analisis sebesar 77.9 ppm. Pada kondisi tersebut error awal masih besar, sehingga sistem berada pada daerah Error High. Pengendali kemudian melakukan proses dosing sebanyak 5 kali hingga konsentrasi akhir mencapai 513,5 ppm.

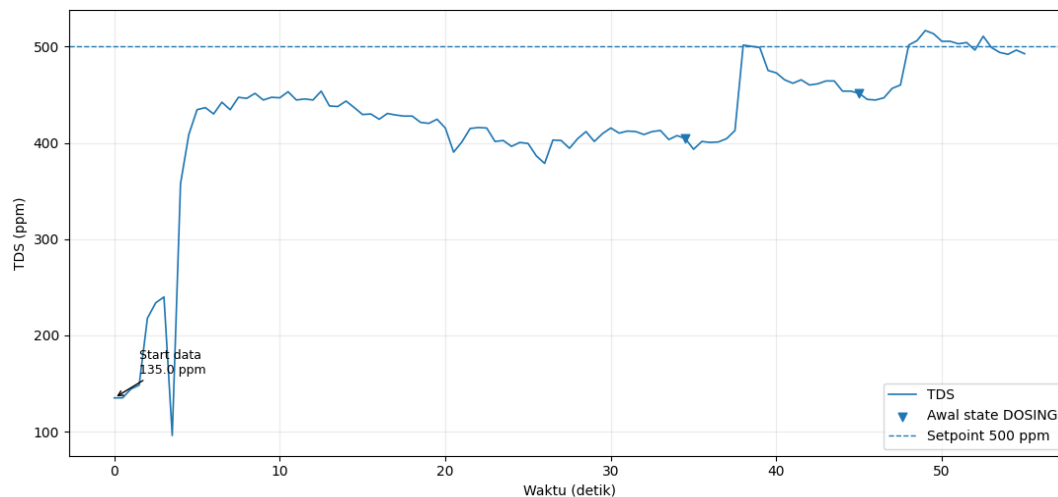
Jumlah dosing sebanyak lima kali menunjukkan bahwa meskipun output fuzzy telah dibuat lebih agresif dibandingkan konfigurasi awal, sistem tetap melakukan koreksi secara bertahap. Hal ini sesuai dengan prinsip kerja fuzzy yang tidak menentukan jumlah dosing secara tetap, melainkan mengevaluasi ulang kondisi setelah setiap proses pencampuran.

Pada pengujian ini nilai maksimum TDS mencapai 524,3 ppm, sehingga diperoleh overshoot maksimum sebesar 24,3 ppm. Overshoot tersebut menunjukkan bahwa efek dosing sebelumnya masih dapat muncul setelah pompa berhenti karena nutrisi membutuhkan waktu untuk tercampur dan terdistribusi secara merata di dalam mixing tank.

Rule yang paling dominan pada saat dosing adalah Rule 4, yaitu kombinasi Error Medium dan Delta Error Negative yang menghasilkan output Short. Dominasi rule ini menunjukkan bahwa sebagian besar proses dosing terjadi ketika error telah mengalami penurunan dan sistem bergerak mendekati target. Dengan kondisi delta error negatif, pengendali mengurangi aksi dosing agar kenaikan TDS tidak terlalu agresif.

Secara keseluruhan, pengujian pertama memperlihatkan bahwa parameter final mampu membawa TDS dari kondisi rendah menuju daerah setpoint hanya

dalam lima siklus dosing. Namun, masih terdapat *overshoot* sekitar 24 ppm sebelum homogen namun setelah homogen di 13ppm yang menunjukkan bahwa respons fisik plant dan delay mixing tetap memengaruhi hasil akhir.

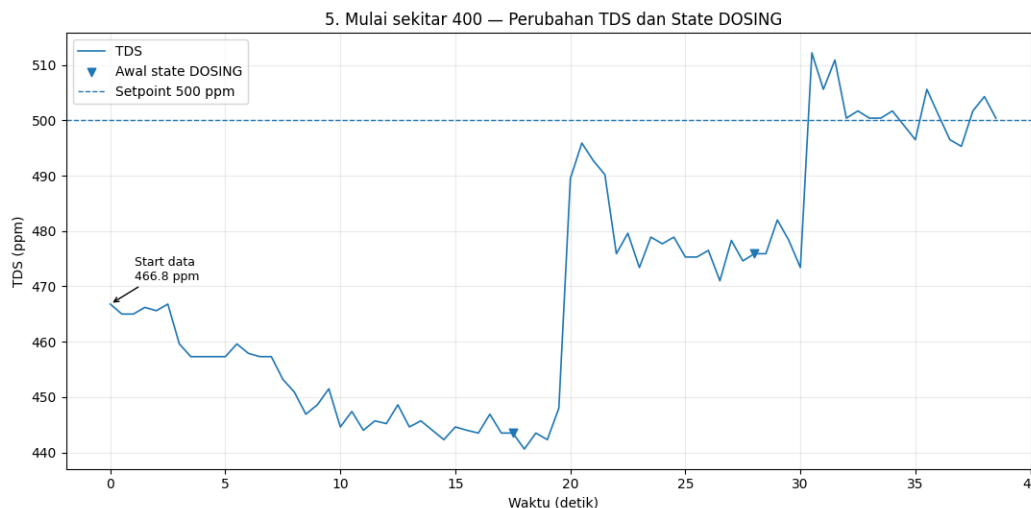


Gambar 4. 8 Pengujian 2 Parameter final

Pada pengujian kedua, kondisi awal analisis berada pada 135.0 ppm, sehingga error awal hanya sekitar 365 ppm. Karena sistem telah relatif dekat terhadap setpoint, jumlah *dosing* yang dibutuhkan berkurang menjadi hanya 2 kali. TDS akhir yang diperoleh sebesar 492,7 ppm, sehingga error akhir absolut sebesar 7,3 ppm. Nilai tersebut berada sedikit di luar toleransi ± 5 ppm jika hanya dilihat dari pembacaan terakhir, namun selama proses pengujian nilai maksimum TDS sempat mencapai 516,8 ppm.

Pengujian ini menunjukkan bahwa kondisi awal mempunyai pengaruh besar terhadap jumlah dosing yang diperlukan. Ketika TDS awal sudah mendekati setpoint, pengendali tidak perlu memberikan aksi panjang maupun melakukan banyak pengulangan. Rule dominan selama proses dosing adalah Rule 5, yaitu kombinasi *Error Medium* dan *Delta Error Zero* yang menghasilkan output Medium. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa error masih berada pada daerah sedang, tetapi perubahan *error* relatif kecil sehingga sistem memberikan aksi menengah.

Hasil ini memperlihatkan bahwa pengendali mampu menyesuaikan tindakan terhadap kondisi awal sistem. Jumlah dosing menurun dari lima menjadi dua tanpa perubahan rule base atau parameter fuzzy, sehingga perbedaan tersebut berasal dari kondisi input yang berbeda.



Gambar 4. 9 Pengujian 3 Parameter final

Pengujian ketiga dilakukan pada kondisi awal analisis sebesar 451,5 ppm. Error awal hanya sekitar 48,5 ppm sehingga sistem telah berada pada daerah Error Low. Karena kondisi awal sudah relatif dekat terhadap setpoint, sistem hanya melakukan 2 kali dosing. Setelah proses tersebut, nilai akhir mencapai 500,4 ppm, sehingga error akhir hanya 0,4 ppm. Nilai tersebut berada di dalam rentang toleransi ± 5 ppm dan merupakan salah satu hasil terbaik pada pengujian parameter final. TDS maksimum selama pengujian sebesar 512,2 ppm, sehingga overshoot maksimum sebesar 12,2 ppm.

Meskipun terdapat *overshoot* transien, nilai akhir kembali berada sangat dekat dengan target. Rule dominan saat dosing adalah Rule 2, yaitu kombinasi *Error Low* dan *Delta Error Zero* dengan output Short. Kondisi tersebut sesuai dengan karakteristik sistem yang telah mendekati setpoint sehingga pengendali memberikan aksi dosing minimum. Pengujian ini menunjukkan keberhasilan fase fine-tuning. Ketika sistem dimulai dekat target, fuzzy tidak memberikan durasi panjang dan hanya melakukan dua kali koreksi sebelum mencapai konsentrasi sekitar 500 ppm. Berdasarkan perhitungan menggunakan Persamaan (2.17) dan Persamaan (2.18), diperoleh error akhir absolut dan persentase error akhir untuk masing-masing sampel sebagaimana disajikan pada **Tabel 4.15**.

Tabel 4. 6 Pengujian Parameter final

Sampel	TDS Awal (ppm)	TDS Akhir (ppm)	Error Akhir Absolut (ppm)	Error Akhir (%)	Jumlah Dosing
1	77,9	513,5	13,5	2,70	5
2	135,0	492,7	7,3	1,46	2
3	200,2	528,3	28,3	5,66	5
4	309,8	506,9	6,9	1,38	4
5	451,5	500,4	0,4	0,08	2
Rata-rata			11,28	2,26	3,6

Parameter final menunjukkan respons lebih responsif dengan durasi aksi kontrol yang lebih besar dibandingkan konfigurasi awal, sehingga jumlah pengulangan dosing dapat dikurangi. Ketika kondisi awal berada dekat *setpoint*, seperti pada sampel 5, sistem hanya memerlukan dua kali dosing dan menghasilkan nilai akhir sebesar 500,4 ppm dengan error akhir 0,4 ppm.

Pengendali fuzzy menghasilkan TDS akhir pada rentang 492,7–528,3 ppm terhadap *setpoint* 500 ppm. Nilai *error* akhir absolut dihitung berdasarkan selisih absolut antara TDS akhir dan *setpoint* 500 ppm menggunakan Persamaan (2.17). Selanjutnya, persentase *error* akhir dihitung terhadap nilai *setpoint* menggunakan Persamaan (2.18). Berdasarkan lima pengujian parameter final, diperoleh rata-rata *error* akhir absolut sebesar 11,28 ppm dengan rata-rata persentase *error* akhir sebesar 2,26%. Sementara itu, jumlah *dosing* yang diperlukan berada pada rentang 2–5 kali dengan rata-rata 3,6 kali *dosing*. Sampel 5 menghasilkan nilai yang paling dekat dengan *setpoint*, yaitu 500,4 ppm dengan *error* akhir 0,4 ppm atau 0,08%, sedangkan *error* terbesar terdapat pada Sampel 3 sebesar 28,3 ppm atau 5,66%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada parameter final, pengendali mampu mengarahkan konsentrasi TDS mendekati *setpoint* 500 ppm dengan rata-rata penyimpangan akhir sebesar 2,26%. Jumlah *dosing* yang berbeda pada setiap pengujian menunjukkan bahwa aksi kendali tidak diberikan dalam jumlah siklus yang tetap, tetapi dipengaruhi oleh kondisi TDS serta respons sistem selama proses pengendalian. Namun, nilai *error* akhir masih bervariasi antarpengujian, fenomena tersebut memperlihatkan bahwa performa sistem tidak hanya dipengaruhi oleh

logika fuzzy, tetapi juga oleh delay pencampuran, homogenitas larutan, konsentrasi premix, dan respons sensor. Dengan demikian, parameter final dapat dinyatakan lebih responsif dan efisien dalam jumlah *dosing*, tetapi performanya tetap memiliki *trade-off* antara kecepatan mencapai *setpoint* dan risiko *overshoot*.

4.4.2 Evaluasi Kinerja Pengendali Fuzzy

Evaluasi kinerja pengendali fuzzy dilakukan terhadap lima sampel pengujian parameter final yang memiliki data sensor valid. Evaluasi dilakukan menggunakan error akhir absolut, persentase error akhir, jumlah siklus *dosing*, dan *Integral Absolute Error* (IAE). Error akhir absolut dihitung berdasarkan selisih absolut antara nilai TDS akhir dan *setpoint* menggunakan Persamaan (2.17), sedangkan persentase error akhir dihitung menggunakan Persamaan (2.18). Selanjutnya, rata-rata error akhir absolut dan rata-rata persentase error dari seluruh sampel dihitung menggunakan Persamaan (2.19) dan Persamaan (2.20). Adapun IAE digunakan untuk mengevaluasi akumulasi penyimpangan terhadap *setpoint* selama proses pengendalian sebagaimana didefinisikan pada Persamaan (2.22). Karena data pengujian diperoleh secara diskrit melalui data logger, perhitungan IAE dilakukan secara numerik menggunakan pendekatan trapesium pada Persamaan (2.23).

Berdasarkan lima pengujian parameter final, diperoleh rata-rata *error* akhir absolut sebesar 11,28 ppm dengan rata-rata persentase *error* akhir sebesar 2,26%. Jumlah siklus *dosing* berada pada rentang 2–5 kali dengan rata-rata 3,6 kali *dosing*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengendali menghasilkan jumlah aksi *dosing* yang berbeda sesuai dengan kondisi awal dan respons TDS selama proses pengendalian.

Selain evaluasi kondisi akhir, kinerja pengendali dianalisis menggunakan *Integral Absolute Error* (IAE). IAE digunakan untuk mengukur akumulasi nilai absolut *error* terhadap *setpoint* selama periode pengendalian. Dengan demikian, evaluasi tidak hanya mempertimbangkan penyimpangan pada kondisi akhir, tetapi juga penyimpangan yang terjadi selama respons sistem menuju kondisi target. Selanjutnya, evaluasi terhadap akumulasi error selama proses pengendalian

dilakukan menggunakan IAE. Karena data pengujian berupa data diskrit terhadap waktu, nilai IAE dihitung menggunakan pendekatan trapesium berdasarkan Persamaan (2.23). Hasil perhitungan IAE pada masing-masing sampel disajikan pada Tabel 4.16

Tabel 4. 7 Hasil Evaluasi Integral Absolute Error (IAE) Pengendali Fuzzy

Sampel	TDS Awal (ppm)	TDS Akhir (ppm)	Durasi Analisis (s)	IAE (ppm·s)
1	77,9	513,5	154,0	39.475,80
2	135,0	492,7	55,0	4.403,88
3	200,2	528,3	55,0	6.967,68
4	309,8	506,9	47,5	3.531,93
5	451,5	500,4	29,0	810,63

Berdasarkan Tabel 4.16, nilai IAE yang diperoleh menunjukkan perbedaan pada setiap kondisi awal pengujian. Sampel 1 menghasilkan nilai IAE terbesar sebesar 39.475,80 ppm·s, sedangkan Sampel 5 menghasilkan nilai IAE terkecil sebesar 810,63 ppm·s. Sampel 1 memiliki kondisi awal yang paling jauh dari *setpoint* dengan durasi analisis paling panjang, sehingga menghasilkan akumulasi *error* yang lebih besar. Sebaliknya, Sampel 5 dimulai pada kondisi yang relatif dekat dengan *setpoint* dan memiliki durasi analisis lebih singkat sehingga akumulasi *error* yang dihasilkan lebih kecil.

Perbedaan nilai IAE menunjukkan bahwa besarnya akumulasi *error* dipengaruhi oleh kondisi awal dan lamanya penyimpangan terhadap *setpoint*. Oleh karena itu, nilai IAE pada masing-masing sampel digunakan untuk menggambarkan akumulasi penyimpangan selama proses pengendalian pada kondisi awal yang berbeda. Nilai tersebut tidak digunakan untuk menentukan sampel yang memiliki parameter pengendali lebih baik karena seluruh pengujian menggunakan konfigurasi fuzzy parameter final yang sama.

Secara keseluruhan, ketiga parameter evaluasi memberikan informasi yang saling melengkapi terhadap kinerja pengendali. *Error* akhir menunjukkan kedekatan kondisi akhir terhadap *setpoint*, jumlah siklus *dosing* menunjukkan banyaknya aksi kontrol yang diperlukan, sedangkan IAE menggambarkan akumulasi penyimpangan selama berlangsungnya proses pengendalian. Pada lima

sampel dengan kondisi awal sensor yang valid, diperoleh rata-rata *error* akhir absolut sebesar 11,28 ppm atau 2,26% terhadap *setpoint* dengan rata-rata 3,6 kali *dosing*. Sementara itu, nilai IAE menunjukkan bahwa kondisi awal yang lebih jauh dari *setpoint* cenderung menghasilkan akumulasi *error* yang lebih besar selama proses pengendalian.

4.4.3 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Perbandingan dengan penelitian terdahulu dilakukan untuk memberikan konteks terhadap hasil kinerja pengendali fuzzy yang dikembangkan. Penelitian Sholihah *et al.* dipilih sebagai pembanding karena memiliki kesamaan pada struktur pengendalian konsentrasi TDS, yaitu menggunakan *error* dan *delta error* sebagai masukan fuzzy serta durasi aktivasi pompa sebagai keluaran pengendali. Selain itu, penelitian tersebut menggunakan *Weighted Average* pada proses defuzzifikasi dan melakukan evaluasi respons berdasarkan nilai *Integral Absolute Error* (IAE) [32]. Penelitian Sholihah *et al.* diterapkan pada sistem hidroponik *Deep Flow Technique* (DFT) dengan beberapa variasi *setpoint*, sedangkan penelitian ini diterapkan pada *mixing tank* fertigasi dengan *setpoint* 500 ppm.

Oleh karena itu, perbandingan dilakukan untuk melihat karakteristik dan pendekatan evaluasi kinerja pengendali, bukan sebagai perbandingan langsung untuk menentukan pengendali yang lebih unggul.

Tabel 4. 8 Perbandingan Pengendali Fuzzy dengan Penelitian Terdahulu

Parameter	Sholihah <i>et al.</i> (2021)	Penelitian ini
Objek pengendalian	Hidroponik DFT	<i>Mixing tank</i> fertigasi
Variabel dikendalikan	TDS nutrisi	TDS nutrisi
Input fuzzy	<i>Error</i> dan <i>delta error</i>	<i>Error</i> dan <i>delta error</i>
Output fuzzy	Durasi ON/OFF pompa	Durasi <i>dosing</i> pompa premix
Defuzzifikasi	<i>Weighted Average</i>	<i>Weighted Average</i>
Mekanisme kontrol	Evaluasi TDS dan aktivasi pompa secara berulang	<i>Dosing–mixing–evaluasi TDS</i> secara berulang
<i>Setpoint</i> pengujian	600, 800, dan 1000 ppm	500 ppm
Evaluasi kinerja	IAE dan ITAE	<i>Error</i> akhir, jumlah <i>dosing</i> , dan IAE
IAE	1341; 1119; 1547	810,62–39.475,80 ppm·s

Parameter	Sholihah <i>et al.</i> (2021)	Penelitian ini
Jumlah <i>dosing</i>	Tidak dilaporkan sebagai metrik kinerja	2–5 kali; rata-rata 3,6 kali
Error akhir rata-rata	Tidak dilaporkan dalam bentuk yang sama	11,28 ppm (2,26%)

Berdasarkan Tabel 4.17, terdapat kesamaan pada struktur dasar pengendalian antara penelitian terdahulu dan penelitian ini. Kedua sistem menggunakan nilai *error* dan *delta error* untuk merepresentasikan kondisi TDS terhadap *setpoint* serta menghasilkan keluaran berupa durasi aktivasi aktuator. Perbedaan utama terdapat pada objek pengendalian dan tahapan proses. Pada penelitian ini, setiap aksi *dosing* diikuti proses *mixing* dan stabilisasi pembacaan TDS sebelum pengendali melakukan evaluasi berikutnya, karena larutan nutrisi perlu dihomogenisasi terlebih dahulu di dalam *mixing tank*.

Penelitian Sholihah *et al.* memperoleh nilai IAE sebesar 1341, 1119, dan 1547 pada *setpoint* masing-masing 600, 800, dan 1000 ppm. Penelitian tersebut juga menyatakan bahwa pengendali fuzzy belum sepenuhnya menghilangkan *steady-state error*, tetapi nilai TDS masih berada pada rentang yang diizinkan. Pada penelitian ini, lima pengujian parameter final menghasilkan IAE sebesar 810,62–39.475,80 ppm·s dengan rata-rata *error* akhir sebesar 11,28 ppm atau 2,26% terhadap *setpoint* 500 ppm serta membutuhkan 2–5 siklus *dosing* dengan rata-rata 3,6 kali.

Nilai IAE kedua penelitian tidak digunakan untuk menentukan pengendali yang lebih baik secara langsung karena kondisi awal, *setpoint*, durasi pengujian, karakteristik *plant*, serta prosedur pengendalian yang digunakan berbeda. Pada penelitian ini, variasi nilai IAE juga dipengaruhi oleh jarak kondisi awal terhadap *setpoint* dan durasi proses pengendalian. Oleh karena itu, perbandingan menunjukkan bahwa penggunaan *error* dan *delta error* sebagai masukan fuzzy serta durasi aktuator sebagai keluaran dapat diterapkan pada pengendalian TDS dengan karakteristik *plant* yang berbeda, sedangkan performa akhirnya tetap dipengaruhi oleh kondisi dan dinamika sistem masing-masing.

4.4.4 Evaluasi Perubahan Jumlah Dosing

Evaluasi perubahan jumlah *dosing* dilakukan untuk melihat perkembangan respons sistem selama proses penalaan pengendali fuzzy. Jumlah *dosing* digunakan sebagai salah satu indikator karena setiap siklus *dosing* merepresentasikan aksi pengendali dalam menambahkan larutan premix untuk mengarahkan konsentrasi TDS menuju *setpoint* 500 ppm. Evaluasi dilakukan terhadap parameter awal, tahap penalaan, dan parameter final yang digunakan selama pengembangan sistem.

Perbandingan antar tahap dilakukan secara deskriptif karena kondisi pengujian tidak sepenuhnya identik. Selain perubahan parameter fuzzy, konsentrasi larutan premix juga ditingkatkan dari 500 g/40 L pada parameter awal, menjadi 1000 g/40 L pada tahap penalaan, dan 1500 g/40 L pada parameter final.

Oleh karena itu, perubahan jumlah *dosing* tidak diinterpretasikan sebagai pengaruh parameter fuzzy secara tunggal, tetapi sebagai hasil interaksi antara konfigurasi pengendali dan kondisi *plant*.

Tabel 4. 9 Evaluasi Perubahan Respons Dosing pada Tahap Penalaan

Tahap	Konsentrasi Premix	TDS Awal–Akhir (ppm)	Jumlah Dosing	Error Akhir (ppm)	Interpretasi
Parameter awal	500 g/40 L	69 hingga 504,2	97 kali	4,2	Dosing sangat sering, aksi kontrol masih konservatif
Penalaan I	1000 g/40 L	241 hingga 500	44 kali	0	Jumlah dosing berkurang, tetapi sebagian keputusan dipengaruhi pembacaan transien
Penalaan II – Pengujian 1	1000 g/40 L	75,6 hingga 456,5	75 kali	43,5	Belum mencapai daerah target dan masih membutuhkan banyak siklus
Penalaan II – Pengujian 2	1000 g/40 L	293,9 hingga 495,8	40 kali	4,2	Mencapai daerah target, tetapi jumlah dosing masih tinggi

Tahap	Konsentrasi Premix	TDS Awal–Akhir (ppm)	Jumlah Dosing	Error Akhir (ppm)	Interpretasi
Parameter final	1500 g/40 L	5 kondisi awal berbeda	2–5 kali	rata-rata 11,28	Jumlah aksi kontrol jauh lebih sedikit dengan hasil akhir tetap mendekati setpoint

Berdasarkan Tabel 4.18, tahapan penalaan menunjukkan adanya perubahan respons sistem terhadap aksi dosing. Pada parameter awal, nilai singleton yang digunakan masih relatif pendek, yaitu 5 s, 7 s, dan 9 s, sehingga peningkatan konsentrasi dilakukan melalui banyak siklus dosing. Pada tahap ini tercatat 97 transisi menuju state DOSING pada pengujian multi-batch, sementara TDS akhir mencapai 504,2 ppm.

Setelah konsentrasi premix ditingkatkan menjadi 1000 g/40 L, jumlah dosing pada salah satu sesi pengujian menurun menjadi 44 kali. Namun, pada tahap tersebut masih ditemukan pembacaan TDS transien yang dapat memengaruhi keputusan kontrol sehingga jumlah dosing yang tercatat belum seluruhnya merepresentasikan keputusan fuzzy pada kondisi pengukuran normal.

Pada penalaan berikutnya, nilai singleton dinaikkan menjadi 5 s, 9 s, dan 13 s. Pengujian 1 menghasilkan 75 kali dosing dan belum mencapai daerah target, sedangkan Pengujian 2 menghasilkan 40 kali dosing dengan TDS akhir 495,8 ppm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan durasi output belum secara langsung menjamin jumlah dosing menjadi sedikit karena kondisi awal dan respons plant tetap memberikan pengaruh terhadap jumlah koreksi yang diperlukan.

Pada parameter final, konsentrasi premix ditingkatkan menjadi 1500 g/40 L dan nilai singleton dinaikkan menjadi 7,5 s, 13,5 s, dan 19,5 s. Pada lima pengujian dengan kondisi awal sensor yang valid, sistem membutuhkan 2–5 kali dosing dengan rata-rata 3,6 kali dosing dan menghasilkan rata-rata error akhir absolut 11,28 ppm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi final menghasilkan aksi kontrol yang lebih besar pada setiap siklus sehingga jumlah pengulangan dosing dapat dikurangi, namun tetap mempertahankan kemampuan sistem untuk mengarahkan TDS mendekati setpoint 500 ppm.

Meskipun demikian, perubahan jumlah dosing tidak dapat dikaitkan hanya dengan penalaan parameter fuzzy karena konsentrasi premix juga berubah pada setiap tahap pengembangan. Oleh karena itu, penurunan jumlah dosing pada parameter final dipandang sebagai hasil interaksi antara peningkatan durasi output fuzzy, peningkatan konsentrasi premix, kondisi awal TDS, dan karakteristik aktual mixing tank.

4.5 Pengujian Webserver Komunikasi HTTP

Pengujian web server dilakukan untuk memverifikasi proses pengiriman dan penyajian data antara mikrokontroler ESP32 dengan sistem monitoring berbasis web. Pada sistem yang dikembangkan, ESP32 berfungsi sebagai perangkat utama yang mengolah hasil pembacaan sensor dan kondisi sistem sebelum data dikirimkan menuju *Google Apps Script*. Komunikasi dilakukan menggunakan metode HTTP POST, sedangkan data telemetri disusun menggunakan format JSON (*JavaScript Object Notation*) agar beberapa parameter dapat dikirimkan secara terstruktur dalam satu proses komunikasi.

Data yang diterima kemudian disimpan pada Google Sheets dan digunakan sebagai sumber data pada dashboard monitoring. Pengujian dilakukan dengan mengambil satu sampel data telemetri pada 3 Agustus 2026 pukul 21:00:10 dengan device_id ESP32_FERTIGASI_01 data terlihat pada tabel 4.19 . Data tersebut digunakan untuk memverifikasi bahwa informasi hasil pembacaan sensor dan kondisi operasional sistem dapat diterima oleh web server dan ditampilkan melalui dashboard.

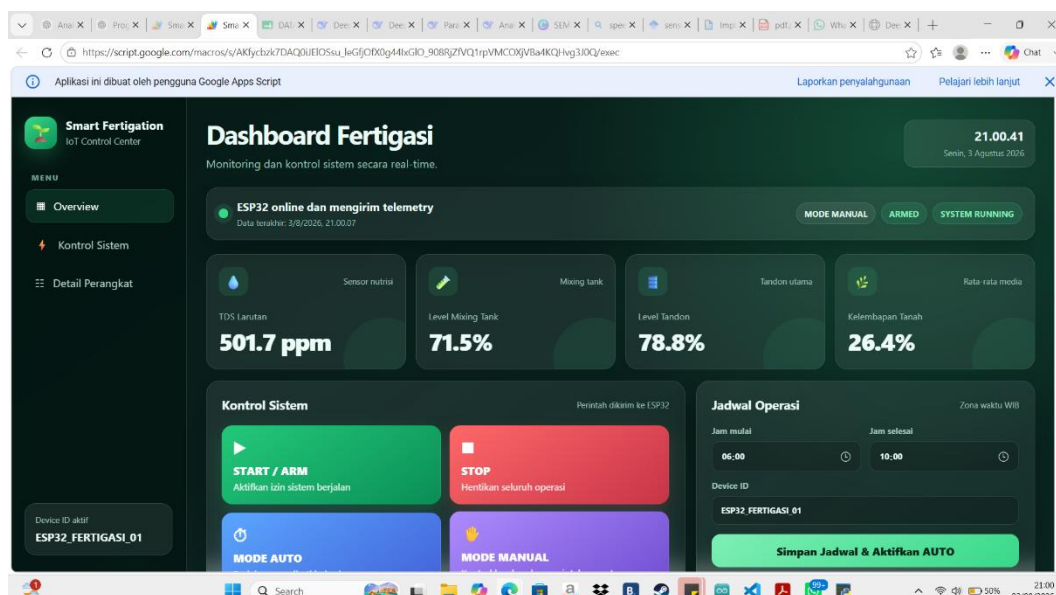
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Data Telemetri Web Server

Parameter	Hasil
Waktu pencatatan	03/08/2026 21:00:10
Device ID	ESP32_FERTIGASI_01
System armed	TRUE
System running	TRUE
Mode operasi	MANUAL
Emergency stop	FALSE
Time valid	TRUE

Parameter	Hasil
Mixing state	2
Fertigation state	7
TDS	501,693 ppm
Level mixing tank	71,45261%
Level tandon	78,7673%
Nitrogen (N)	8 mg/kg
Phosphorus (P)	65 mg/kg
Potassium (K)	58 mg/kg
Kelembapan rata-rata	26,40854%
Auto refill	FALSE
Wi-Fi RSSI	-51 dBm
Uptime	1016 detik
Pesan perangkat	START:CLOUD

Berdasarkan Tabel 4.15, data telemetri yang diterima tidak hanya memuat hasil pembacaan sensor, tetapi juga kondisi operasional perangkat. Pada waktu pengujian, nilai TDS tercatat sebesar 501,693 ppm, level *mixing tank* sebesar 71,45261%, level tandon sebesar 78,7673%, serta nilai N, P, dan K masing-masing sebesar 8 mg/kg, 65 mg/kg, dan 58 mg/kg. Selain itu, kelembapan rata-rata tercatat sebesar 26,40854%. Data tersebut menunjukkan bahwa beberapa parameter sensor dapat dikirimkan secara bersamaan dalam satu data telemetri.

Informasi kondisi sistem juga berhasil tercatat, yaitu sistem berada dalam mode *MANUAL*, *system_armed* dan *system_running* bernilai *TRUE*, sedangkan *emergency_stop* dan *auto_refill* bernilai *FALSE*. Selain itu, data juga memuat *mixing state 2*, *fertigation state 7*, RSSI Wi-Fi sebesar -51 dBm, dan *uptime* perangkat sebesar 1016 detik. Hal ini menunjukkan bahwa komunikasi tidak hanya digunakan untuk mengirim nilai sensor, tetapi juga untuk menyampaikan kondisi sistem dan perangkat kepada sistem *monitoring*.



Gambar 4. 10 Hasil visualisasi data telemetry pada *dashboard* web

Berdasarkan Gambar 4.10, data telemetry yang diterima selanjutnya ditampilkan melalui *dashboard* sehingga kondisi sistem dapat dipantau melalui antarmuka web. Kesesuaian antara data yang tersimpan dan informasi yang ditampilkan pada *dashboard* menunjukkan bahwa proses integrasi data dari ESP32 menuju sistem *monitoring* telah berjalan sesuai fungsi yang dirancang. Dashboard juga menyediakan informasi status perangkat dan kondisi operasional sistem sehingga pengguna dapat melakukan pemantauan tanpa melakukan pembacaan langsung pada mikrokontroler.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengintegrasikan data sensor dan status operasional perangkat dalam satu mekanisme telemetry. Penggunaan format JSON memungkinkan parameter dengan jenis data yang berbeda, seperti nilai numerik sensor, nilai *boolean*, *state*, mode operasi, RSSI, dan pesan perangkat, disusun dalam satu struktur data sebelum dikirimkan melalui HTTP.

Pada sampel pengujian, seluruh parameter utama yang diperlukan untuk monitoring tersedia pada data yang diterima. Nilai TDS sebesar 501,693 ppm, misalnya, dapat digunakan oleh dashboard untuk menampilkan kondisi konsentrasi larutan, sedangkan informasi *mixing_state*, *fertigation_state*, dan status sistem digunakan untuk menunjukkan kondisi proses yang sedang berlangsung. Dengan

demikian, fungsi web server pada sistem tidak terbatas pada menampilkan nilai sensor, tetapi juga memberikan informasi mengenai kondisi operasional sistem fertigasi.

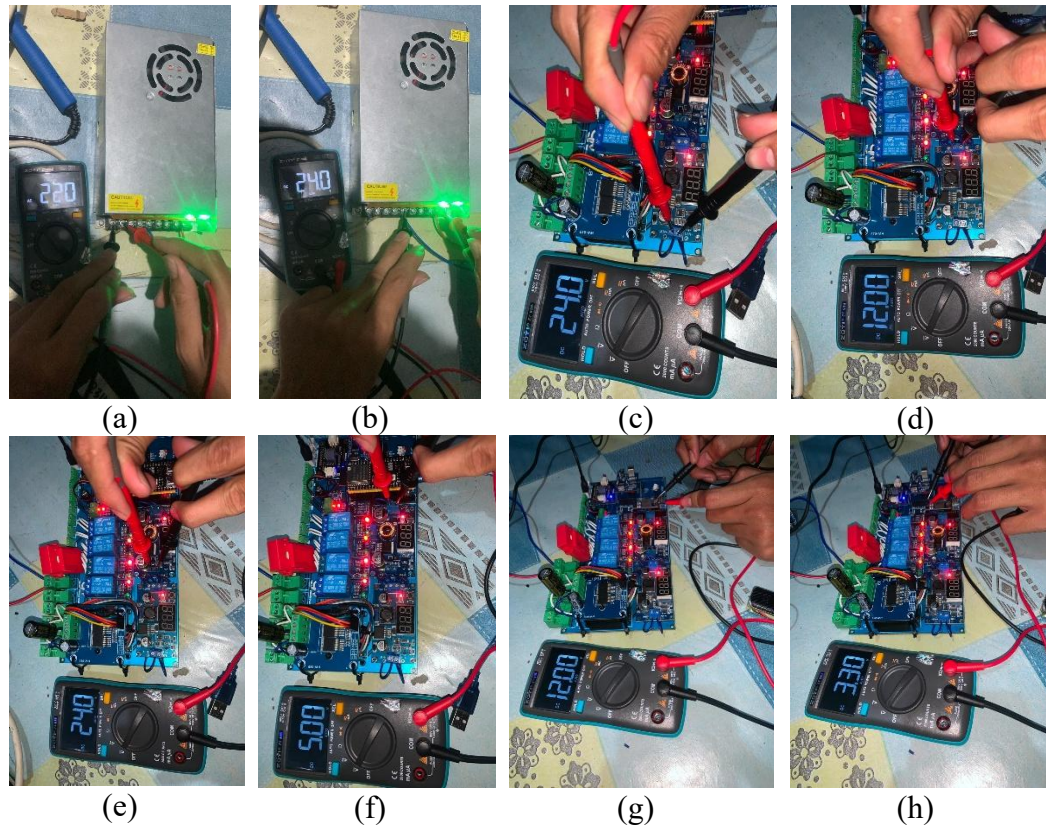
Nilai RSSI sebesar -51 dBm pada sampel tersebut menunjukkan kondisi sinyal Wi-Fi pada saat data dicatat. Namun, karena pengujian ini hanya menggunakan satu sampel untuk verifikasi kesesuaian data, nilai RSSI tersebut tidak digunakan untuk menyimpulkan kualitas jaringan secara keseluruhan. Demikian pula, pengujian ini tidak mengevaluasi *latency*, *throughput*, maupun persentase keberhasilan paket karena parameter tersebut tidak direkam dalam data pengujian.

4.6 Pengujian Fungsional Catu Daya

Berdasarkan perhitungan kebutuhan tegangan dan arus pada bab sebelumnya, di gunakan catu daya 24 Volt 20 Ampere dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian catu daya dan modul pendukung pada sistem mampu menghasilkan tegangan sesuai dengan kebutuhan masing-masing perangkat. Pengukuran dilakukan menggunakan multimeter digital pada beberapa titik rangkaian, meliputi sumber daya utama, keluaran konverter DC-DC, serta bagian rangkaian kendali. Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4.11, pengukuran dilakukan secara bertahap mulai dari sumber tegangan utama hingga keluaran buck converter yang digunakan untuk menyuplai perangkat pada sistem. Pada pengujian sumber PLN diperoleh tegangan sebesar 220 V AC, sedangkan keluaran power supply menghasilkan tegangan sebesar 24,0 V DC. Hasil tersebut menunjukkan bahwa power supply mampu mengubah sumber tegangan AC menjadi tegangan DC sesuai dengan kebutuhan sumber utama sistem, yaitu 24 V DC.

Tegangan keluaran 24 V DC selanjutnya digunakan sebagai sumber untuk rangkaian kendali dan beberapa *buck converter*. Berdasarkan hasil pengukuran pada rangkaian, tegangan 24 V yang diterima tetap terbaca sebesar 24,0 V DC. Selanjutnya, hasil pengujian buck converter menunjukkan keluaran sebesar 12,00 V DC, 5,00 V DC, dan 3,30 V DC. Nilai tersebut sesuai dengan tegangan yang telah

diatur untuk memenuhi kebutuhan perangkat dengan level tegangan kerja yang berbeda.



Gambar 4. 11 (a) dan (b) pengujian input; (c) dan (d) pengujian 12 volt; (e) pengujian 5 volt; (g) dan (h) pengujian 3.3 volt

Pada salah satu titik pengukuran jalur 5 V diperoleh nilai sebesar 4,99 V DC. Perbedaan sebesar 0,01 V terhadap nilai nominal 5 V tergolong sangat kecil, sehingga tidak menunjukkan penyimpangan yang signifikan pada keluaran catu daya. Dengan demikian, jalur tersebut tetap dapat dikategorikan menghasilkan tegangan yang sesuai dengan kebutuhan rangkaian.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa rangkaian catu daya mampu menyediakan beberapa level tegangan yang dibutuhkan sistem, yaitu 24 V, 12 V, 5 V, dan 3,3 V DC. Hasil ini menunjukkan bahwa distribusi dan konversi tegangan pada perangkat keras telah bekerja sesuai dengan rancangan. Dengan tersedianya tegangan kerja yang sesuai pada setiap jalur, rangkaian dapat digunakan untuk mendukung pengoperasian mikrokontroler, sensor, modul kendali, dan aktuator pada pengujian sistem.