

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Prosedur Pengukuran dan Pengujian

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa purwarupa sistem kendali nutrisi hidroponik berbasis ESP32 dapat bekerja dan terintegrasi sesuai dengan spesifikasi yang telah dirancang. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi keakuratan instrumen pengukuran meliputi sensor *Total Dissolved Solids* (TDS) untuk kepekatan nutrisi dan sensor DS18B20 untuk suhu air guna memberikan nilai umpan balik yang valid bagi algoritma kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID).

Selain itu, pengujian juga bertujuan untuk mengonfirmasi bahwa metode penjadwalan gain adaptif (auto-tuning) pada PID mampu mengalkulasi dan merespons setiap *error* secara proporsional. Respons ini kemudian diverifikasi melalui kinerja *motor driver* L298N dalam mengatur *Pulse Width Modulation* untuk menentukan durasi dan kecepatan tiga buah pompa dosing (A, B, dan Air Baku) hingga nilai konsentrasi nutrisi di dalam tangki mencapai batas setpoint yang ditetapkan.

Pada tahap persiapan, seluruh perangkat keras, sensor, aktuator, dan koneksi kabel dipastikan dalam kondisi terhubung dengan baik. Kalibrasi dilakukan pada sensor TDS untuk memastikan bahwa pembacaan sensor akurat dan sesuai dengan kondisi kepekatan yang sebenarnya.

Selanjutnya, pengujian dilakukan dengan menjalankan sistem secara utuh selama beberapa siklus perubahan target TDS untuk mendapatkan dataset respons sistem. Data performa (suhu, nilai TDS, status aktuator, dan konstanta Kp/Ki/Kd) akan dikirim dan diamati melalui Web Server Lokal, antarmuka LCD, serta platform pemantauan jarak jauh Blynk dan Google Spreadsheet.

Berikut merupakan langkah-langkah dalam melakukan prosedur pengukuran dan pengujian sistem:

1. Langkah pertama adalah memastikan tata letak komponen antara ESP32, sensor TDS, sensor DS18B20, layar LCD 20x4, dan modul driver motor L298N sesuai dengan skematik rancangan. Peralatan pembanding seperti TDS meter disiapkan untuk memvalidasi pembacaan dari sensor utama.
2. Mikrokontroler dinyalakan dan dihubungkan ke jaringan Wi-Fi. Pengujian awal dilakukan dengan mengakses halaman konfigurasi berbasis web melalui *browser* di alamat <http://esp32.local> untuk memasukkan parameter krusial awal, seperti batas target setpoint TDS dan batas toleransi *deadband*.
3. ESP32 dibiarkan melakukan pengambilan sampel data dari air nutrisi. Keakuratan sistem algoritma median filtering dievaluasi dengan melihat stabilitas angka TDS pada layar LCD. Perubahan suhu air secara artifisial juga diuji untuk memastikan fungsi kompensasi suhu (koefisien 2% per °C) pada perhitungan TDS berjalan dengan semestinya.
4. Nilai setpoint TDS sengaja diubah secara drastis (baik diturunkan maupun dinaikkan) melalui Web Server atau aplikasi Blynk. Pengamatan difokuskan pada perubahan otomatis nilai parameter Kp, Ki, dan Kd, serta bagaimana driver L298N menyesuaikan nilai persentase kecepatan PWM pada Pompa Nutrisi atau Pompa Air Baku untuk mengejar target tersebut.
5. Sistem dibiarkan berjalan dalam waktu tertentu sembari memantau pengiriman data setiap 15 detik ke platform Blynk dan database Google Spreadsheet.
6. Data histori yang terkumpul di Google Spreadsheet diunduh dan divisualisasikan dalam bentuk grafik waktu nyata. Analisis dilakukan untuk melihat tren kecepatan sistem dalam mencapai setpoint (waktu naik/rise time), ada tidaknya lonjakan berlebih (overshoot), serta kestabilan di sekitar titik toleransi (steady-state error) setelah algoritma PID adaptif diterapkan.

5.2 Pengujian Respons Sistem dengan Penalaan PID Manual

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan respons sistem kendali dosing nutrisi menggunakan algoritma Proportional-Integral-Derivative (PID) dengan parameter yang ditetapkan secara manual. Nilai konstanta K_p , K_i , dan K_d yang digunakan merujuk pada hasil jurnal penelitian terdahulu yang relevan dan beberapa *tunning* tambahan. Pengujian ini dilakukan untuk melihat sejauh mana parameter tersebut cocok dan stabil ketika diterapkan pada karakteristik plant hidroponik yang dikembangkan.

Proses pengujian dilakukan dengan mempersiapkan air baku di dalam tangki penampungan dan mengamati respons aktuator hingga sistem mencapai kondisi stabil. Berikut adalah parameter awal pengujian:

- Volume Air Awal: 5 Liter
- TDS Awal: ~240 ppm
- Target Setpoint: 400 ppm
- Parameter PID Manual:
 - Percobaan I ($K_p = 0.86652$, $K_i = 0.001$, dan $K_d = 28$)
 - Percobaan II peningkatan K_p ($K_p = 1,489$, $K_i = 0.001$, dan $K_d = 28$)
 - Percobaan III peningkatan K_i dan K_d ($K_p = 1.489$, $K_i = 0.15$, dan $K_d = 30$)
- *Deadband* (Batas Toleransi): 10 ppm

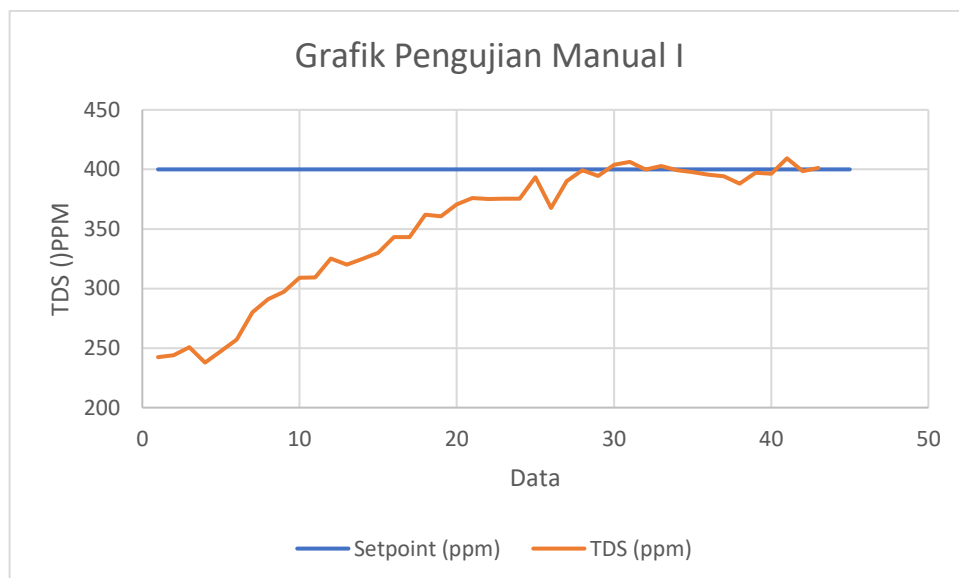
5.2.1 Hasil pengujian I

Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

Table 5- 1 Data Hasil Pengujian Manual 1

No	Waktu	PPM	Kecepatan Pompa
1	9/1/2026 7:14:49	242,4	+48
2	9/1/2026 7:15:04	244	+100
3	9/1/2026 7:15:19	250,8	+24
4	9/1/2026 7:15:34	237,8	+100
5	9/1/2026 7:15:49	247,4	+72
6	9/1/2026 7:16:04	257,1	+100
7	9/1/2026 7:16:35	280,1	+100
8	9/1/2026 7:16:51	290,9	+81
9	9/1/2026 7:17:05	297,3	+100
10	9/1/2026 7:17:20	309,1	+8

11	9/1/2026 7:17:35	309,4	+50
12	9/1/2026 7:17:50	325,2	+65
13	9/1/2026 7:18:05	320	+60
14	9/1/2026 7:18:20	324,8	+100
15	9/1/2026 7:18:35	329,9	+27
16	9/1/2026 7:18:50	343,1	+41
17	9/1/2026 7:19:05	343,1	+100
18	9/1/2026 7:19:20	362	+35
19	9/1/2026 7:19:35	360,6	+94
20	9/1/2026 7:19:50	370,6	+18
21	9/1/2026 7:20:06	375,9	+17
22	9/1/2026 7:20:20	375,2	+22
23	9/1/2026 7:20:36	375,5	+14
24	9/1/2026 7:21:06	375,4	+100
25	9/1/2026 7:21:20	393,5	+100
26	9/1/2026 7:21:33	367,7	+100
27	9/1/2026 7:21:36	390,2	79
28	9/1/2026 7:21:51	399,4	56
29	9/1/2026 7:22:06	394,6	76
30	9/1/2026 7:22:21	403,8	100
31	9/1/2026 7:22:35	406,4	46



Gambar 5. 1 Grafik Pengujian Manual 1

Berdasarkan data logging dari sistem, ketika setpoint diubah menjadi 400 ppm, algoritma PID merespons dengan menyalakan Pompa A dan Pompa B (nutrisi) secara bersamaan. Sinyal kendali (*Pulse Width Modulation/PWM*) secara dinamis

mengatur kecepatan pompa seiring dengan naiknya kepekatan nutrisi. Dari grafik respons TDS terhadap waktu dan persamaan 2.3 dan 2.4, diperoleh beberapa parameter kinerja sistem kendali sebagai berikut:

- Waktu Naik (*Rise Time*): Sistem membutuhkan waktu sekitar 451,8 detik sejak aktuator menyala untuk pertama kali menembus nilai target setpoint 400 ppm. Kenaikan yang terjadi relatif stabil dan linear, menunjukkan bahwa nilai K_p dan K_i bekerja dengan baik.
- Maximum *Overshoot*: Setelah mencapai batas setpoint, nilai TDS sempat mengalami sedikit lonjakan tertinggi hingga mencapai batas 409,3 ppm. Hal ini menunjukkan terjadinya overshoot sebesar 2,33% dari target. Nilai ini tergolong sangat baik karena masih berada jauh di bawah batas toleransi umum sistem kendali.
- Keadaan Tunak (*Steady-State*) dan *Error*: Pada akhir periode pengujian, sistem cenderung stabil berosilasi sangat tipis di sekitar nilai target dengan rata-rata TDS akhir sebesar 397,71 ppm. Hal ini menghasilkan steady-state error yang sangat minim, yaitu sebesar 2,29 ppm.
- Kinerja Aktuator dan Efek Deadband: Penggunaan parameter deadband (batas toleransi) sebesar 10 ppm terbukti efektif mencegah pompa menyala-mati secara terus-menerus. Ketika nilai TDS sudah masuk ke dalam rentang aman toleransi, aktuator pompa sepenuhnya dalam status OFF untuk mencegah overdosing. Pompa hanya merespons menyala kembali ketika terjadi penurunan TDS dan langsung kembali OFF setelah nilai TDS kembali naik ke ambang aman.

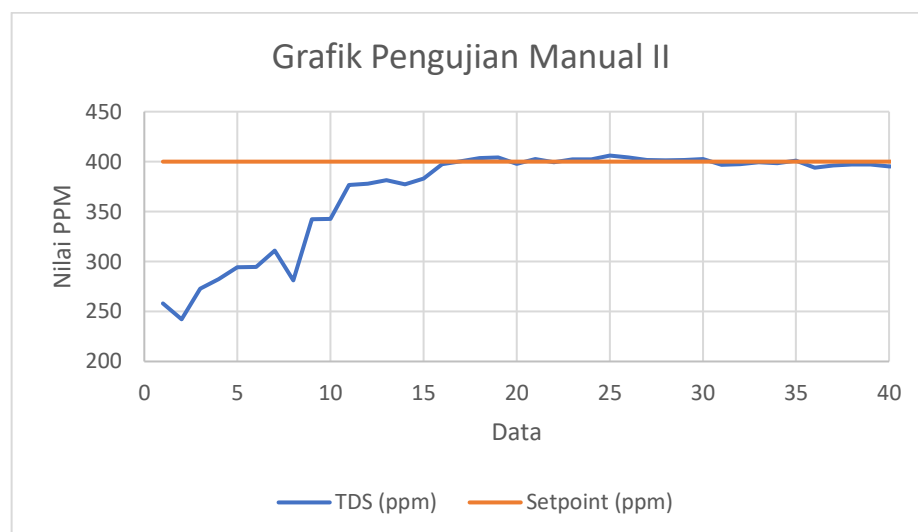
5.2.2 Hasil Pengujian II ($K_p = 1,489$, $K_i = 0.001$, dan $K_d = 28$)

Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

Table 5- 2 Data Hasil Pengujian Manual 2

No	Waktu	PPM	Kecepatan Pompa
1	9/15/2026 7:12:17	235	+78
2	9/15/2026 7:12:32	233	+76

3	9/15/2026 7:13:02	258,2	+85
4	9/15/2026 7:13:17	242,2	+100
5	9/15/2026 7:13:31	272,8	+100
6	9/15/2026 7:13:46	282,5	+100
7	9/15/2026 7:14:02	294,2	+100
8	9/15/2026 7:14:17	294,6	+100
9	9/15/2026 7:14:33	311,1	+98
10	9/15/2026 7:14:48	281,2	+100
11	9/15/2026 7:15:02	342,3	+100
12	9/15/2026 7:15:17	342,7	+100
13	9/15/2026 7:15:32	376,6	+100
14	9/15/2026 7:15:48	378	+100
15	9/15/2026 7:16:03	381,3	+100
16	9/15/2026 7:16:18	377,3	+100
17	9/15/2026 7:16:33	383,1	+40
18	9/15/2026 7:16:48	397,6	69
19	9/15/2026 7:17:03	400,5	96
20	9/15/2026 7:17:18	403,5	47
21	9/15/2026 7:17:33	404,2	100
22	9/15/2026 7:17:48	397,9	100
23	9/15/2026 7:18:03	402,7	0
24	9/15/2026 7:18:18	399,4	100
25	9/15/2026 7:18:33	402,4	45
26	9/15/2026 7:18:48	402,4	65
27	9/15/2026 7:19:03	406,1	100
28	9/15/2026 7:19:18	404,2	99
29	9/15/2026 7:19:33	401,6	13
30	9/15/2026 7:19:48	401,3	35



Gambar 5. 2 Grafik Pengujian Manual 2

Pada pengujian kedua, nilai K_p dinaikkan hampir dua kali lipat menjadi 1,489. Berdasarkan analisis data log dan persamaan 2.3 dan 2.4, respons sistem berubah sebagai berikut:

- Waktu Naik (*Rise Time*): Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai batas toleransi 390 ppm menurun drastis menjadi 255,3 detik (sebelumnya 451,8 detik). Hal ini membuktikan teori kendali bahwa memperbesar nilai K_p akan mempercepat sistem dalam mencapai target.
- Lonjakan (*Overshoot*): Dorongan pompa yang lebih kuat menghasilkan sedikit lonjakan nilai TDS di akhir fase naik, menyentuh titik maksimum di angka 406,1 ppm. Nilai ini menghasilkan overshoot sebesar 1,53%, yang mana masih berada di dalam zona aman *deadband* 10 ppm. Sistem perlahan stabil di sekitar target 400 ppm.

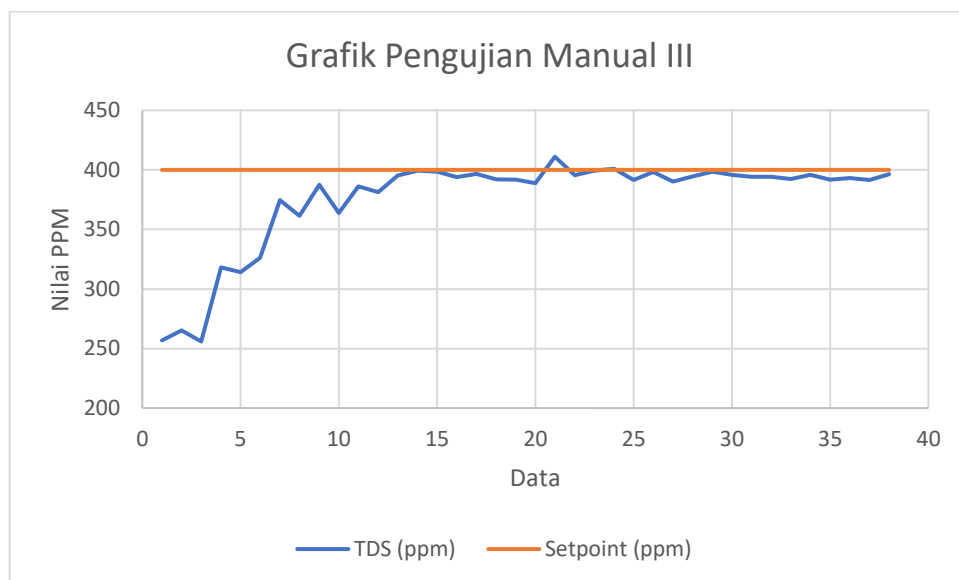
5.2.3 Hasil Pengujian III ($K_p = 1,489$, $K_i = 0.15$, dan $K_d = 30$)

Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

Table 5- 3 Data Hasil Pengujian Manual 3

No	Waktu	PPM	Kecepatan Pompa
1	9/15/2026 8:31:53	248	+77
2	9/15/2026 8:32:10	247,1	+77
3	9/15/2026 8:32:38	256,9	+100
4	9/15/2026 8:32:53	265,1	+22
5	9/15/2026 8:33:08	255,9	+100
6	9/15/2026 8:33:23	318,1	+100
7	9/15/2026 8:33:38	314	+100
8	9/15/2026 8:33:54	326,2	+100
9	9/15/2026 8:34:09	374,7	+100
10	9/15/2026 8:34:24	361,4	+71
11	9/15/2026 8:34:39	387,4	+47
12	9/15/2026 8:34:53	363,8	+100
13	9/15/2026 8:35:08	386,2	+100
14	9/15/2026 8:35:24	381,2	+100
15	9/15/2026 8:35:39	395,2	100
16	9/15/2026 8:35:54	399,2	67

17	9/15/2026 8:36:09	398,6	31
18	9/15/2026 8:36:24	393,8	8
19	9/15/2026 8:36:39	396,7	25
20	9/15/2026 8:36:56	392	100
21	9/15/2026 8:37:10	391,7	85
22	9/15/2026 8:37:24	388,8	+91
23	9/15/2026 8:37:38	411	-27
24	9/15/2026 8:37:54	395,6	97
25	9/15/2026 8:38:09	399,2	100
26	9/15/2026 8:38:24	400,8	57
27	9/15/2026 8:38:48	391,6	100
28	9/15/2026 8:38:53	398,1	23
29	9/15/2026 8:39:09	390,1	100
30	9/15/2026 8:39:24	394,5	94



Gambar 5. 3 Grafik Pengujian Manual 3

Pada pengujian ketiga, selain K_p yang tetap tinggi, konstanta Integral dinaikkan secara ekstrem menjadi 0,15 dan Derivatif menjadi 30. Berdasarkan data grafik dan persamaan 2.3 dan 2.4, diperoleh parameter performa berikut:

- Waktu Naik (*Rise Time*): Sistem merespons dengan sangat agresif. Kecepatan pompa mencapai nilai puncaknya dengan cepat, memangkas waktu naik menjadi hanya 209,3 detik (sekitar 3,4 menit).

- Lonjakan Maksimum (*Maximum Overshoot*): Akibat nilai K_i yang terlampau besar, terjadi akumulasi error selama proses kenaikan. Hal ini menyebabkan pompa kesulitan "mengerem", sehingga kepekatan bablas menyentuh titik puncak 411,0 ppm. Analisis Kestabilan: Overshoot sebesar 2,75% ini menyebabkan TDS keluar sesaat dari batas atas toleransi deadband. Akibatnya, sistem merespons kelebihan ini dengan mengaktifkan Pompa Air Baku. Dapat dilihat pada grafik bahwa setelah menyentuh 411 ppm, terjadi fluktuasi sebelum sistem akhirnya berhasil mendarat stabil di angka 400 ppm. Konstanta Derivatif K_d sebesar 30 ternyata belum cukup kuat untuk meredam ayunan agresif yang ditimbulkan oleh kombinasi K_p dan K_i yang tinggi.

5.3 Pengujian Respons Sistem dengan Penalaan PID Adaptif (*Auto-Tuning*)

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan algoritma penjadwalan gain adaptif (heuristic gain-scheduling) dalam merespons perubahan target kepekatan nutrisi. Berbeda dengan PID manual yang nilainya statis, sistem adaptif dirancang untuk mengalkulasi ulang parameter K_p , K_i , dan K_d secara dinamis setiap detiknya berdasarkan besaran error dan laju perubahannya. Pengujian ini difokuskan untuk melihat bagaimana sistem merespons rentang kenaikan TDS yang berbeda.

Proses pengujian dilakukan secara berkesinambungan dengan membagi kenaikan target TDS ke dalam tiga sesi pengujian, menggunakan wadah penampungan air berkapasitas 5 Liter. Parameter dasar pada sistem diatur sebagai berikut:

- Volume Air Awal: 5 Liter
- TDS Awal: ~240 ppm
- Target Setpoint: 400 ppm (sesi 1), 600 ppm (sesi 2), dan 800 (sesi 3)
- Parameter PID: Dihitung otomatis oleh sistem (*auto-tuning*)

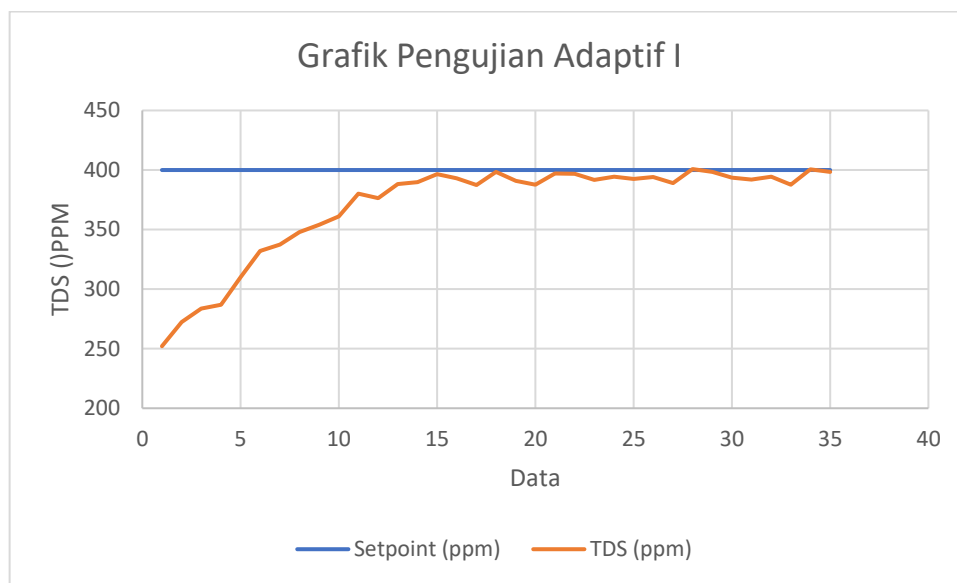
- Deadband/Batas Toleransi: 10 ppm

5.3.1 Hasil Pengujian Sesi 1 (Setpoint 400 PPM)

Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

Table 5- 4 Data Hasil Pengujian Adaptif 1

No	Error	PPM	Kecepatan Pompa	Kp	Ki	Kd
1	147,9	252,1	+100	1,79	0,1	0,17
2	127,7	272,3	+100	1,62	0,11	0,14
3	116,3	283,7	+100	1,52	0,11	0,16
4	113,1	286,9	+100	1,49	0,11	0,16
5	90	310	+100	1,29	0,12	0,17
6	67,9	332,1	+100	1,09	0,13	0,49
7	62,6	337,4	+100	1,05	0,13	0,17
8	52,1	347,9	+100	0,96	0,13	0,13
9	45,8	354,2	+100	0,9	0,13	0,24
10	38,8	361,2	+100	0,84	0,14	0,14
11	19,8	380,2	+84	0,67	0,14	0,23
12	23,5	376,5	+87	0,71	0,14	0,17
13	11,8	388,2	+80	0,6	0,15	0,12
14	10,1	389,9	+77	0,59	0,15	0,27
15	3,5	396,5	76	0,53	0,15	0,11
16	7	393	76	0,56	0,15	0,22
17	12,6	387,4	+81	0,61	0,15	0,15
18	1,5	398,5	65	0,51	0,15	0,13
19	9,2	390,8	+78	0,58	0,15	0,12
20	12,3	387,7	+80	0,61	0,15	0,16
21	2,9	397,1	71	0,53	0,15	0,14
22	3,3	396,7	76	0,53	0,15	0,14
23	8,2	391,8	78	0,57	0,15	0,11
24	5,7	394,3	77	0,55	0,15	0,13
25	7,4	392,6	78	0,57	0,15	0,11
26	5,8	394,2	77	0,55	0,15	0,11
27	11	389	+80	0,6	0,15	0,19
28	-0,8	400,8	51	0,51	0,15	0,22
29	1,6	398,4	65	0,51	0,15	0,19
30	6,5	393,5	77	0,56	0,15	0,12
31	7,9	392,1	78	0,57	0,15	0,11
32	5,6	394,4	77	0,55	0,15	0,14
33	12,2	387,8	+82	0,61	0,15	0,26
34	-0,7	400,7	64	0,51	0,15	0,18
35	1,6	398,4	69	0,51	0,15	0,1



Gambar 5. 4 Grafik pengujian Adaptif I

Sesaat setelah setpoint diubah ke 400 ppm, algoritma adaptif merespons dengan memberikan nilai Proporsional (K_p) yang sangat agresif di angka 1,794 untuk memompa nutrisi secepat mungkin. Seiring dengan menipisnya nilai error, parameter K_p berangsur-angsur turun ke kisaran 0,5, sementara nilai Integral (K_i) menyeimbangkan sistem di kisaran 0,147. Dari pengolahan data log pada grafik menggunakan persamaan 2.3 dan 2.4, diperoleh parameter performa berikut:

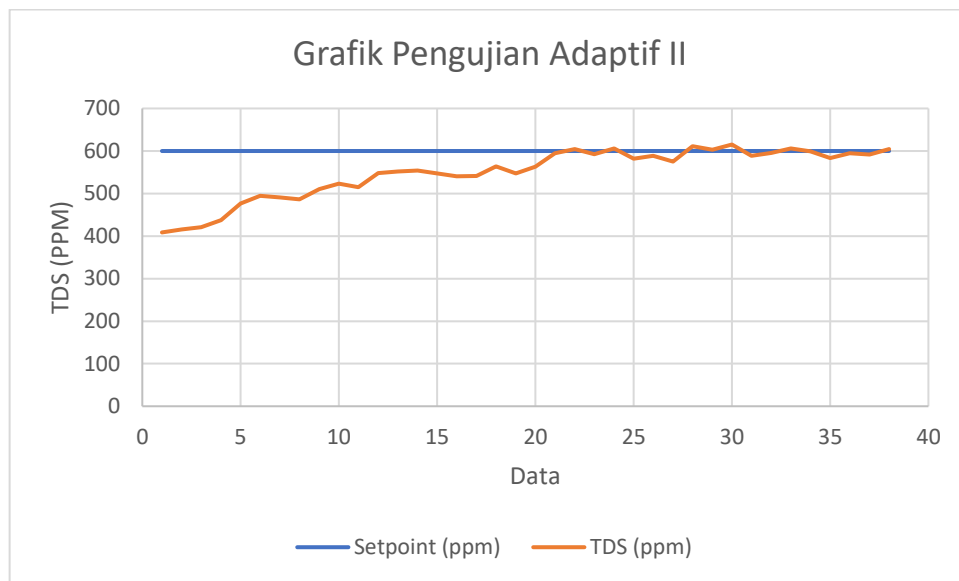
- Waktu Naik (*Rise Time*): Sistem hanya membutuhkan waktu 215,6 detik untuk mendorong kepekatan nutrisi masuk ke batas bawah deadband.
- *Maximum Overshoot*: Kinerja redaman sistem adaptif bekerja dengan sangat sempurna. Lonjakan nilai TDS tertinggi hanya menyentuh angka 400,8 ppm. Ini menghasilkan persentase overshoot yang sangat kecil, yakni hanya 0,20% dari target.
- Keadaan Tunak (*Steady-State*): Sistem berhasil menetap di dalam zona aman toleransi dengan rata-rata TDS akhir sebesar 394,93 ppm (menghasilkan steady-state error sebesar 5,07 ppm).

5.3.2 Hasil Pengujian Sesi 2 (Setpoint 600 PPM)

Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

Table 5- 5 Data Hasil Pengujian Adaptif 2

No	Error	PPM	Kecepatan Pompa	Kp	Ki	Kd
1	191.4	408,6	+100	1,616	0,105	0,295
2	184.5	415,5	+100	1,576	0,107	0,115
3	179	421	+100	1,544	0,108	0,341
4	162.4	437,6	+100	1,447	0,112	0,149
5	123.3	476,7	+100	1,219	0,121	0,112
6	105.7	494,3	+100	1,117	0,125	0,107
7	109.3	490,7	+100	1,138	0,124	0,111
8	113.3	486,7	+100	1,161	0,124	0,103
9	89.8	510,2	+100	1,024	0,129	0,156
10	76.7	523,3	+100	0,948	0,132	0,129
11	85.1	514,9	+100	0,996	0,13	0,152
12	51.9	548,1	+100	0,803	0,138	0,164
13	48.1	551,9	+83	0,605	0,146	0,187
14	45.6	554,4	+77	0,532	0,149	0,122
15	52.4	547,6	+100	0,806	0,138	0,232
16	59.3	540,7	+100	0,846	0,136	0,112
17	58.5	541,5	+100	0,841	0,136	0,102
18	36.1	563,9	+96	0,711	0,142	0,137
19	52.9	547,1	+100	0,808	0,138	0,146
20	37	563	+97	0,716	0,141	0,133
21	5.6	594,4	+76	0,532	0,149	0,191
22	-4.7	604,7	+66	0,528	0,149	0,119
23	7.9	592,1	+78	0,546	0,148	0,14
24	-5.7	605,7	+63	0,533	0,149	0,12
25	18	582	+84	0,605	0,146	0,144
26	11.6	588,4	+80	0,568	0,147	0,115
27	24.8	575,2	+88	0,645	0,144	0,127
28	-10.9	610,9	-55	0,564	0,147	0,175
29	-2.9	602,9	68	0,517	0,149	0,141
30	-15.2	615,2	-42	0,589	0,146	0,158
31	11.6	588,4	+75	0,568	0,147	0,181
32	4.6	595,4	54	0,527	0,149	0,149
33	-6.2	606,2	39	0,536	0,149	0,132
34	0.4	599,6	48	0,502	0,15	0,111
35	16.6	583,4	+80	0,597	0,146	0,148
36	5.5	594,5	77	0,532	0,149	0,112
37	8.3	591,7	78	0,549	0,148	0,108
38	-4.3	604,3	67	0,525	0,149	0,147



Gambar 5. 5 Grafik pengujian Adaptif 2

Pada sesi kedua, target setpoint dinaikkan dari 400 ppm menjadi 600 ppm. Sistem langsung merespons dengan mengalkulasi nilai K_p yang tinggi di awal proses untuk mendorong pompa menyala penuh. Berikut adalah parameter performa yang dihasilkan:

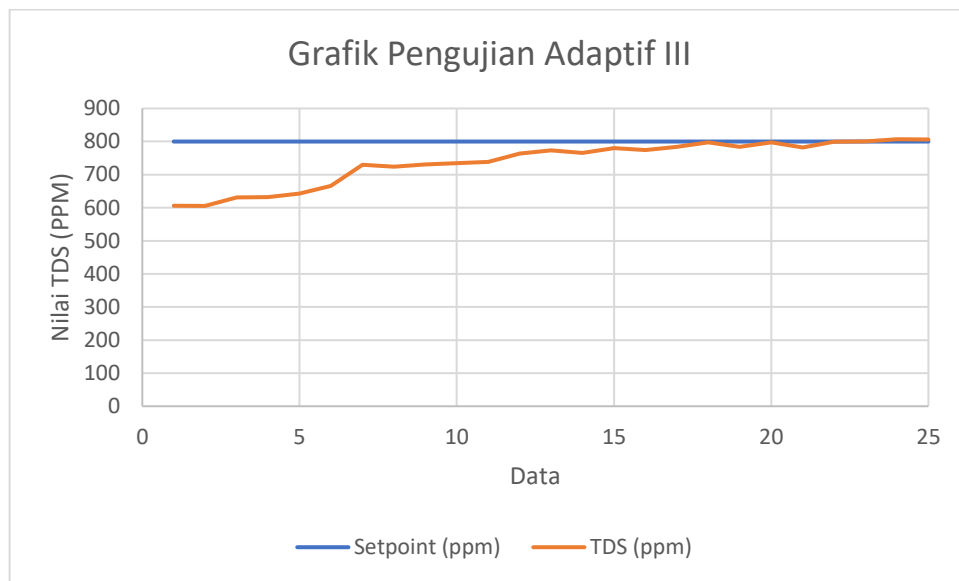
- Waktu Naik (*Rise Time*): Sistem memerlukan waktu sekitar 196,2 detik untuk mencapai batas bawah deadband.
- *Maximum Overshoot*: Nilai TDS sempat melewati batas atas deadband hingga menyentuh angka 615,2 ppm. Hal ini mengindikasikan persentase overshoot yang sangat aman, yakni hanya 2,53% dari target.
- Keadaan Tunak (*Steady-State*): Setelah melewati lonjakan pertama, nilai K_p dan K_d secara otomatis mengecil dan nilai K_i mendominasi untuk melakukan koreksi halus. Sistem stabil dengan rata-rata TDS akhir sebesar 600,84 ppm.

5.3.3 Hasil Pengujian Sesi 3 (Setpoint 800 PPM)

Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

Table 5- 6 Data Hasil Pengujian Adaptif 3

No	Error	PPM	Kecepatan Pompa	Kp	Ki	Kd
1	193.6	606,4	+100	1,347	0,116	0,174
2	194.5	605,5	+100	1,351	0,116	0,102
3	169.3	630,7	+100	1,241	0,12	0,152
4	167.9	632,1	+100	1,016	0,129	0,128
5	156.9	643,1	+100	1,187	0,123	0,102
6	134.1	665,9	+100	1,086	0,127	0,171
7	70.6	729,4	+100	0,809	0,138	0,217
8	75.6	724,4	+100	0,831	0,137	0,15
9	69.2	730,8	+97	0,672	0,143	0,214
10	65.8	734,2	+82	0,569	0,147	0,18
11	61.2	738,8	+100	0,768	0,139	0,138
12	36.5	763,5	+96	0,66	0,144	0,13
13	27.1	772,9	+89	0,619	0,145	0,113
14	34.7	765,3	+95	0,652	0,144	0,167
15	20	780	+84	0,587	0,147	0,154
16	25.9	774,1	+89	0,613	0,145	0,168
17	15.8	784,2	+83	0,569	0,147	0,132
18	2	798	75	0,509	0,15	0,147
19	16.3	783,7	+100	0,703	0,142	0,138
20	2.6	797,4	76	0,511	0,15	0,111
21	17.6	782,4	+84	0,577	0,147	0,155
22	0.1	799,9	73	0,501	0,15	0,257
23	-0.5	800,5	73	0,502	0,15	0,223
24	-7	807	61	0,53	0,149	0,293
25	-6.3	806,3	42	0,528	0,149	0,116



Gambar 5. 6 Grafik pengujian Adaptif 3

Pada sesi kedua, pengujian dilanjutkan dengan menaikkan setpoint dari 600 ppm menjadi 800 ppm. Respons sistem pada rentang kepekatan yang lebih tinggi ini memberikan hasil sebagai berikut:

- Waktu Naik (*Rise Time*): Untuk mencapai batas aman 790 ppm, waktu yang dibutuhkan sedikit lebih lama dibandingkan sesi pertama, yakni 255,2 detik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem adaptif bekerja lebih berhati-hati pada konsentrasi nutrisi yang sudah pekat.
- Maximum Overshoot: Lonjakan maksimal tercatat pada angka 828,2 ppm, yang mana masih tergolong wajar dengan persentase overshoot sebesar 3,53%.
- Keadaan Tunak (*Steady-State*): Rata-rata nilai TDS pada akhir percobaan menunjukkan angka 796,48 ppm dengan steady-state error sebesar 3,52 ppm.

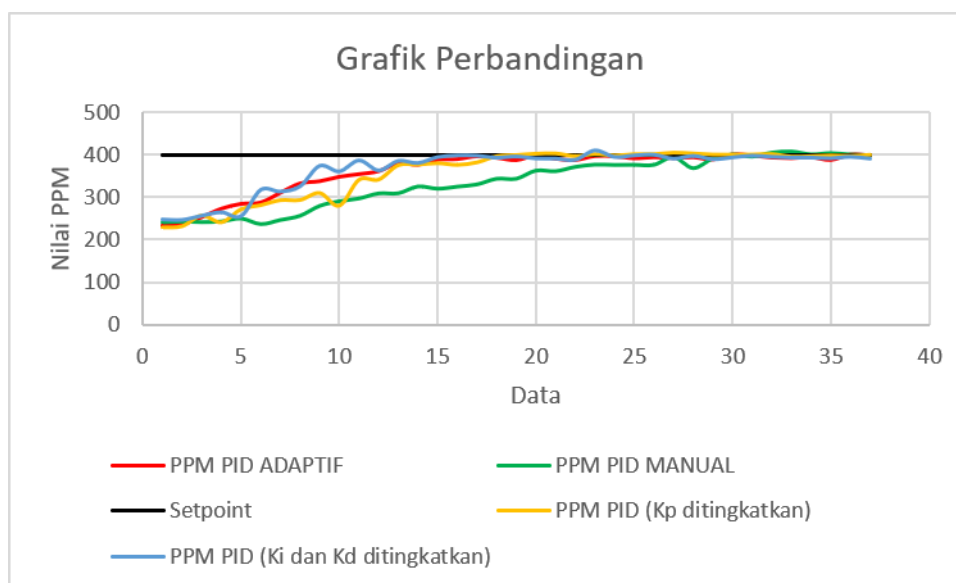
5.4 Perbandingan Kinerja PID Adaptif dan PID Manual

Untuk melihat efektivitas algoritma cerdas yang dikembangkan, penulis melakukan perbandingan kinerja secara keseluruhan antara metode PID Adaptif (*Auto-Tuning*) yang dikembangkan dengan tiga skenario PID Manual yang

menggunakan parameter statis. Komparasi ini bertujuan untuk memvalidasi apakah algoritma penjadwalan gain dinamis mampu menyelesaikan masalah *trade-off* (tarik-ulur) klasik dalam sistem kendali tertutup, yakni antara mengejar kecepatan respons (*rise time*) dan menekan lonjakan (*overshoot*). Seluruh pengujian dibandingkan pada kondisi awal yang identik. Tabel berikut merangkum metrik kinerja dari keempat skenario pengujian yang telah dilakukan:

Table 5- 7 Hasil Perbandingan

Skenario Pengujian	Parameter	Rise Time	Overshoot	Steady-State Error
PID Adaptif	Dinamis	215,6 detik	0,20 %	5,07 PPM
PID Manual I	0.867 ; 0.001 ; 28.0	451,8 detik	2,33 %	2,29 PPM
PID Manual II	1.489 ; 0.001 ; 28.0	255,3 detik	1,53 %	2,89 PPM
PID Manual III	1.489 ; 0.150 ; 30.0	209,3 detik	2,75 %	5,63 PPM



Gambar 5. 7 Grafik Perbandingan

- Analisis Kecepatan Respon (*Rise Time*)

Upaya untuk mempercepat kinerja dosing nutrisi pada PID statis mengharuskan kenaikan nilai konstanta secara manual. Manual 1 terbukti sangat lambat (451,8 detik). Ketika Kp dinaikkan pada Manual 2, waktu

berhasil dipangkas menjadi 255,3 detik. Kecepatan maksimal pada sistem statis didapat pada Manual 3 (209,3 detik) dengan menaikkan seluruh parameter. Namun, PID Adaptif mampu memberikan kecepatan respons (215,6 detik) yang hampir setara dengan Manual 3 tanpa memerlukan intervensi kalibrasi manual dari pengguna, karena sistem secara cerdas menyuntikkan nilai K_p tinggi di awal siklus saat error masih besar.

- Analisis Kestabilan dan Lonjakan (*Overshoot*)
Konsekuensi dari mempercepat sistem pada PID Manual 3 adalah munculnya *overshoot* tertinggi sebesar 2,75%, yang membuat kecepatan nutrisi melewati batas atas deadband dan memicu sistem kompensasi darurat (menyalakan pompa air baku). Di sinilah keunggulan utama PID Adaptif terlihat jelas. Meskipun melesat sangat cepat di awal, algoritma adaptif mampu mengerem laju pompa secara dinamis seiring dengan menipisnya error. Hasilnya, PID Adaptif menghasilkan pendaratan yang nyaris sempurna dengan *overshoot* hanya 0,20%.
- Kesimpulan Komparatif
Melalui perbandingan ini, dapat dibuktikan bahwa metode PID Adaptif terbukti efisien dan stabil. Pada metode manual, pengguna harus memilih antara sistem yang stabil namun sangat lambat (Manual 1), atau sistem yang sangat cepat namun tidak stabil dan bablas (Manual 3). Algoritma PID Adaptif berhasil menggabungkan kedua kelebihan tersebut: bekerja secepat sistem agresif, namun tetap mendarat selembut sistem konservatif, sehingga sangat ideal dan aman diaplikasikan untuk otomasi lingkungan hidroponik.

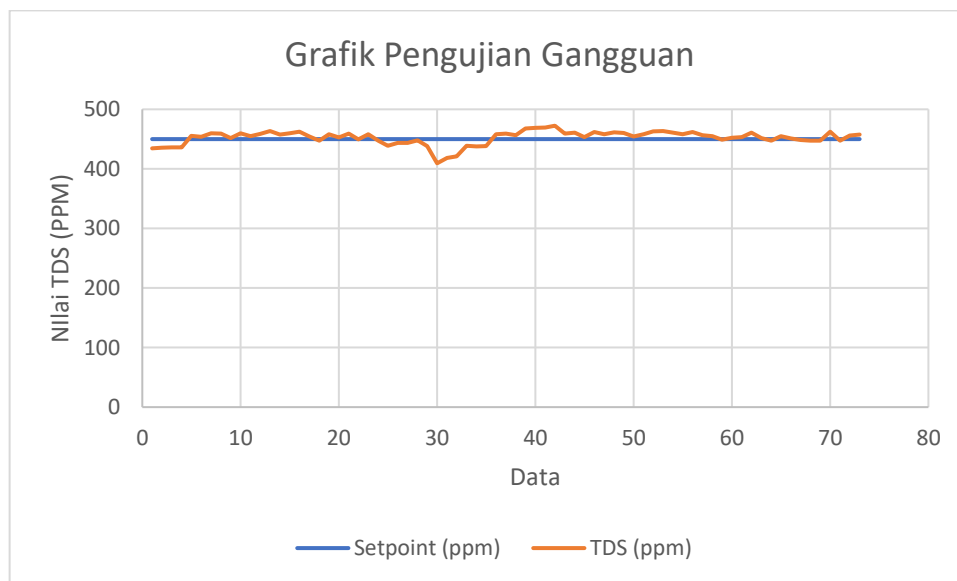
5.5 Pengujian Penolakan Gangguan pada PID Adaptif

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan dan daya respons sistem dalam menghadapi gangguan fisik dari luar. Dalam lingkungan hidroponik nyata, fluktuasi kecepatan dapat terjadi kapan saja akibat penambahan air baku manual, penyerapan nutrisi oleh tanaman, atau sisa air hujan yang masuk ke dalam tendon. Oleh karena itu, algoritma kendali PID adaptif diuji kemampuannya untuk

mendeteksi penurunan nilai kepekatan (*error*) tersebut dan secara otomatis memulihkannya kembali ke target setpoint dengan cepat dan stabil.

Proses pengujian dilakukan dengan menyimulasikan penambahan air murni ke dalam tangki nutrisi yang kondisinya sudah stabil. Parameter dasar pengujian diatur sebagai berikut:

- Volume Air Awal: 5 Liter
- Target (Setpoint): 450 ppm
- Deadband (Batas Toleransi): 10 ppm (440 - 460 ppm)
- Gangguan : Penambahan air baku ke dalam wadah untuk mencairkan pekatan.
- Parameter PID: Dihitung dan diperbarui secara otomatis (Adaptif).



Gambar 5. 8 Grafik Pengujian Terhadap Gangguan

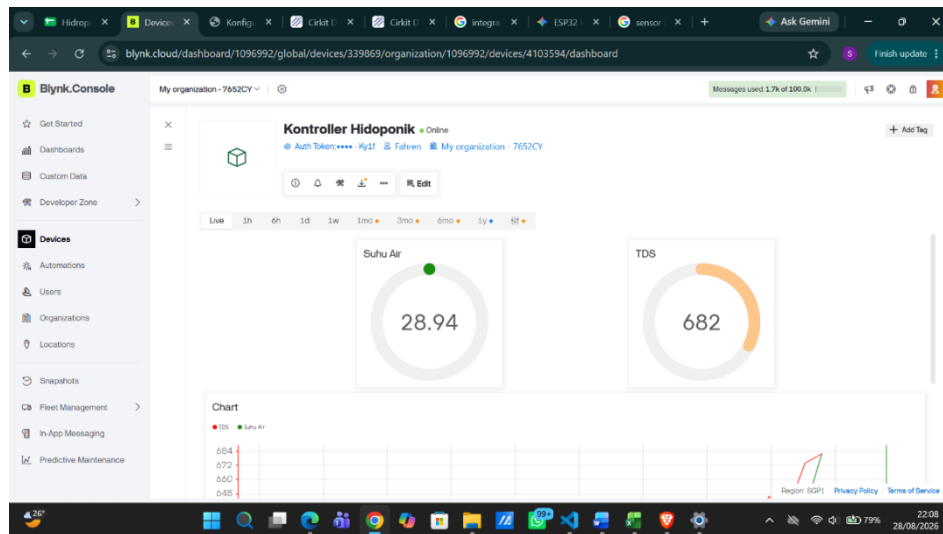
Pada fase awal pengujian, sistem telah mencapai kondisi tunak dan berada di sekitar titik target (450 ppm). Ketika gangguan berupa penambahan air baku diberikan, pembacaan sensor TDS menunjukkan penurunan nilai yang sangat tajam dan mendadak.

Dari pengolahan dan grafik data log, diperoleh beberapa metrik terkait pemulihan gangguan sebagai berikut:

- Titik Puncak Gangguan: Nilai konsentrasi nutrisi anjlok secara drastis hingga menyentuh nilai minimum sebesar 409,4 ppm.
- Waktu Pemulihan: Segera setelah penurunan terdeteksi, algoritma PID merespons dengan langsung mengaktifkan Pompa A dan Pompa B. Sistem membutuhkan waktu pemulihan yang sangat cepat, yakni hanya 96,5 detik sejak titik gangguan terendah hingga nilai TDS kembali masuk ke batas bawah deadband.
- Penyesuaian Gain Dinamis: Berbeda dengan PID statis, sistem adaptif merespons gangguan tiba-tiba ini dengan memvariasikan nilai konstanta secara otomatis. Nilai Proporsional K_p disesuaikan hingga kisaran 0,747, dan nilai Derivatif K_d dipertajam hingga maksimal 0,377 untuk meredam lonjakan error akibat gangguan yang sangat cepat tersebut.
- *Overshoot* dan Kondisi Tunak Akhir: Setelah menembus batas bawah toleransi, dorongan dari pompa aktuator menyisakan sedikit lonjakan momentum. Nilai kepekatan tertinggi (*overshoot*) sesudah masa pemulihan tercatat di angka 472,5 ppm, yang mana merupakan deviasi batas aman (tepat pada angka 5,00%). Sistem kemudian berhasil kembali mereda dengan rata-rata steady-state akhir berada pada 454,10 ppm.

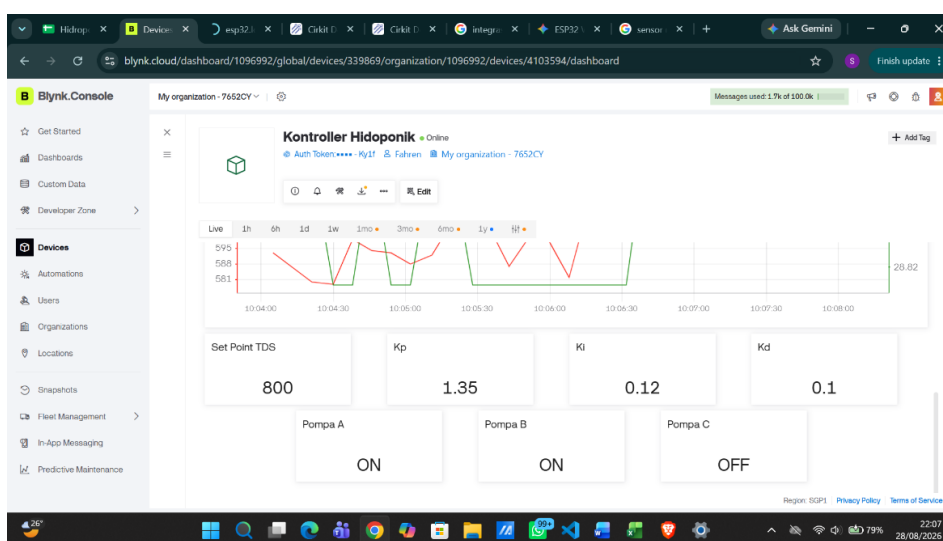
5.6 Pengujian Pemantauan Melalui Platform Blynk

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem pemantauan jarak jauh melalui Blynk dapat menampilkan data pembacaan sensor, kalkulasi parameter PID adaptif, serta status aktuator secara real-time. Selain itu, pengujian ini memvalidasi kemampuan cloud server dalam merekam dan memvisualisasikan tren perubahan kepekatan nutrisi hidroponik.



Gambar 5. 9 Tampilan Dasboard Blynk 1

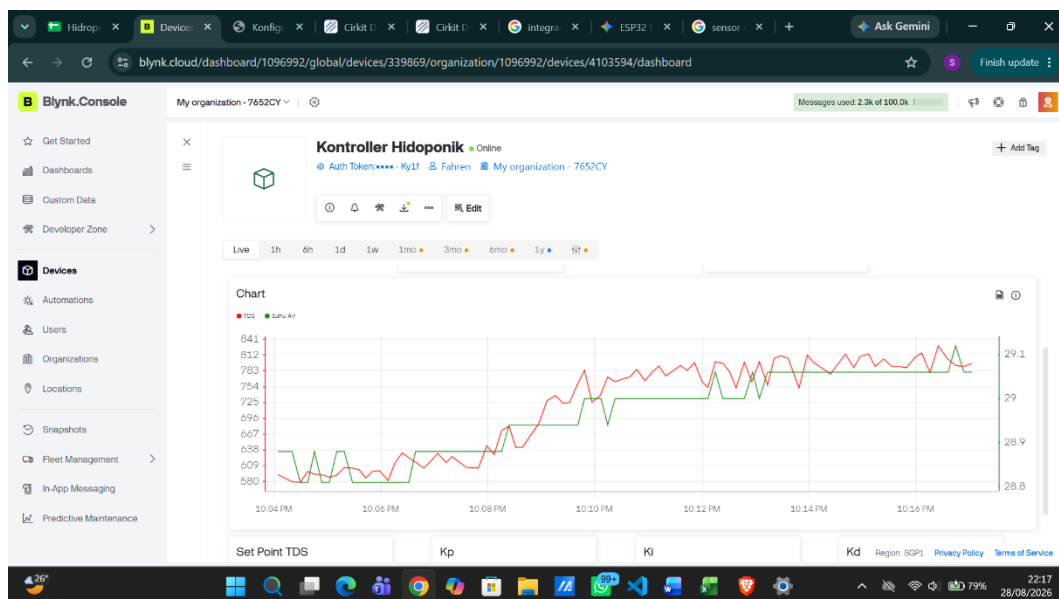
Pada halaman utama *dashboard*, pengguna disajikan dua indikator *radial gauge* utama, yaitu Suhu Air dan TDS. Data ini dikirimkan secara langsung dari mikrokontroler ESP32 melalui virtual pin V0 (Suhu) dan V1 (TDS) yang diperbarui setiap 15 detik. Pada salah satu contoh gambar, sistem menampilkan pembacaan Suhu Air sebesar 28,94 °C dan nilai TDS sebesar 682 ppm, memberikan informasi mikroklimat larutan nutrisi secara instan.



Gambar 5. 10 Tampilan Dasboard Blynk 2

Di bawah indikator utama, terdapat susunan *widget value display* yang berfungsi untuk memantau bekerjanya algoritma kontrol cerdas di dalam sistem. Tampilan ini memuat "Set Point TDS" (V2) yang menjadi target acuan, disandingkan dengan parameter gain PID hasil kalkulasi metode auto-tuning, yakni nilai Kp (V6), Ki (V7), dan Kd (V8). Sebagai contoh pada saat Set Point diatur ke angka 800 ppm, dashboard berhasil menampilkan parameter adaptif yang merespons dengan Kp bernilai 1.35, Ki bernilai 0.12, dan Kd bernilai 0.1. Hal ini membuktikan bahwa proses komputasi yang rumit di dalam ESP32 dapat terpantau secara transparan oleh pengguna.

Bagian kontrol dan pengawasan aktuator menampilkan status dari tiga pompa dosing utama: Pompa A (V3), Pompa B (V4), dan Pompa C / Air Baku (V5). Status ini berupa teks indikator "ON" atau "OFF" yang merepresentasikan keadaan fisik pin driver motor L298N. Merujuk pada gambar, ketika sistem sedang mengejar target TDS tinggi (menuju 800 ppm dari posisi 682 ppm), indikator menunjukkan Pompa A dan Pompa B menyala (ON) untuk menambah pekatan nutrisi, sementara Pompa C (Air Baku) dalam keadaan mati (OFF).



Gambar 5. 11 Tampilan Widget Chart pada Blynk

Untuk keperluan analisis jangka panjang, dashboard Blynk juga dilengkapi dengan *widget chart* bertumpuk yang memvisualisasikan pergerakan TDS (garis merah) dan Suhu Air (garis hijau) terhadap waktu. Melalui grafik interaktif ini, fluktuasi kepekatan nutrisi mulai dari titik awal, proses kenaikan (rise time) saat aktuator menyala, lonjakan (overshoot), hingga pencapaian kondisi stabil dapat direkam dan diobservasi dengan jelas (misalnya pada rentang pukul 10:04 PM hingga 10:16 PM).

Dengan konfigurasi widget tersebut, platform Blynk terbukti tidak hanya menyajikan pemantauan lingkungan fisik secara daring, namun juga memfasilitasi pengguna untuk melakukan observasi teknis terhadap kinerja controller PID adaptif. Hal ini sangat mendukung proses audit data dan evaluasi keandalan sistem otomasi dosing nutrisi dari mana saja selama perangkat terhubung ke internet.