pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v23i1.xxxxx

RANCANG BANGUN SISTEM DOSING NUTRISI OTOMATIS BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN KENDALI PID ADAPTIF DAN PEMANTAUAN IoT

Fahren Diaz[1)], **Fakhruddin Mangkusasmito**[2)]
[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
**E-mail : fakhm17@gmail.com*

ABSTRACT

Nutrient management in modern hydroponic systems requires a high degree of precision to optimize plant growth. Controlling nutrient concentration levels in parts per million (PPM)—whether manually or using conventional on/off systems—is often inefficient and prone to causing overshoot. This study aims to design and build a prototype of an automated nutrient dosing system using an ESP32 microcontroller equipped with an adaptive Proportional-Integral-Derivative (PID) control algorithm and integrated with Internet of Things (IoT) technology. The system uses a Total Dissolved Solids (TDS) sensor to measure solution concentration, a DS18B20 temperature sensor for water temperature compensation, and three DC peristaltic pump actuators controlled via an L298N driver module using PWM signals. A heuristic gain scheduling (auto-tuning) algorithm was implemented so that the PID parameters could dynamically adjust their values based on the magnitude of the actual error. Test results showed that the adaptive PID method was able to respond quickly and settle stably without excessive overshoot. In a rise test with a setpoint of 400 PPM, the system achieved a rise time of 215.6 seconds with minimal overshoot of 0.20% and a steady-state error of 5.07 PPM. This system also proved resilient in handling sudden external disturbances in the form of added distilled water, with a recovery time of 96.5 seconds and a maximum overshoot of 5.00%. The integration of IoT infrastructure via the Blynk platform, automatic logging to Google Spreadsheets, and the presence of a Local Web Server successfully enabled users to monitor operations in real-time from a distance. It can be concluded that the design of this device effectively addresses the weaknesses of static control systems and provides high operational efficiency in hydroponic cultivation.

Keywords: *Hydroponics, ESP32, Adaptive PID, TDS Sensor, Internet of Things (IoT), Automatic Dosing.*

I. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Perkembangan teknologi di sektor pertanian modern, seperti sistem hidroponik dan smart farming, menuntut pengelolaan parameter lingkungan yang sangat presisi guna mengoptimalkan hasil panen. Salah satu parameter paling krusial dalam metode budidaya tanpa media tanah adalah tingkat kepekatan nutrisi larutan yang direpresentasikan dalam satuan Part Per Million (PPM). Ketidaksesuaian nilai PPM dari batas toleransi yang direkomendasikan dapat memberikan dampak fatal bagi fisiologis tanaman, baik berupa defisiensi hara maupun keracunan ion pada akar.

Pada praktiknya, proses dosing larutan nutrisi ke dalam tandon masih banyak dilakukan secara manual maupun menggunakan sistem kontrol On/Off konvensional. Kedua metode ini memiliki kelemahan fundamental, yaitu akurasi rendah akibat human error serta karakteristik respons On/Off yang sering menimbulkan overshoot akibat sisa aliran fluida pada selang pompa dan keterlambatan difusi cairan dalam tandon.

Untuk meminimalisir overshoot dan meningkatkan presisi pencampuran, diperlukan sistem kontrol tertutup yang mengatur respons aktuator berdasarkan besar error terhadap setpoint. Penelitian ini menawarkan solusi melalui implementasi kendali Proportional-Integral-Derivative (PID) adaptif berbasis penjadwalan gain heuristik (heuristic gain-scheduling) pada mikrokontroler ESP32, sehingga parameter Kp, Ki, dan Kd dapat menyesuaikan diri secara dinamis terhadap besaran error tanpa memerlukan penalaan manual. Sistem ini juga diintegrasikan dengan teknologi Internet of Things (IoT) melalui platform Blynk, Google Spreadsheet, dan Local Web Server, sehingga nilai PPM aktual dan status aktuator dapat dipantau serta parameter setpoint dapat diubah dari jarak jauh.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini diangkat ke dalam laporan Tugas Akhir dengan judul "Rancang Bangun Sistem Dosing Nutrisi Otomatis Berbasis ESP32 Menggunakan Kendali PID dan Pemantauan IoT", dengan harapan rancangan ini dapat menjadi solusi rekayasa terapan yang aplikatif dan efisien.

Perumusan Masalah

1. Bagaimana merancang perangkat keras dan perangkat lunak sistem dosing nutrisi otomatis berbasis mikrokontroler ESP32?
2. Bagaimana mengimplementasikan dan menganalisis respons kendali PID (Proportional-Integral-Derivative) pada aktuator motor DC untuk mencapai setpoint kepekatan nutrisi secara presisi dan meminimalisir overshoot?
3. Bagaimana mengintegrasikan pembacaan sensor dan kendali sistem dengan platform Internet of Things (IoT) agar dapat dipantau secara real-time?

Tujuan Tugas Akhir

1. Merancang dan merealisasikan prototipe sistem otomasi pencampuran nutrisi yang terintegrasi menggunakan ESP32.
2. Menerapkan algoritma kendali PID pada motor DC untuk mengatur laju penambahan nutrisi, sehingga nilai setpoint PPM dapat dicapai secara stabil dan meminimalisir overshoot.
3. Membangun sistem monitoring dan controlling jarak jauh berbasis IoT menggunakan aplikasi Blynk, Spreadsheet, dan local web untuk memudahkan pengguna memantau nilai PPM aktual dan mengubah parameter secara real-time.

Manfaat Penelitian

1. Mengembangkan dan meningkatkan keterampilan teknis dalam merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem pencampuran otomatis berbasis ESP32 dengan teknologi IoT.
2. Memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai penerapan sensor TDS (Total Dissolved Solids) dalam monitoring dan pengontrolan kebutuhan nutrisi air untuk tanaman.
3. Mengimplementasikan sistem kendali PID pada pengontrol otomatis untuk mengurangi risiko kekurangan atau kelebihan nutrisi dalam air.
4. Memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi di bidang pertanian, khususnya dalam meningkatkan efisiensi pemberian nutrisi tanaman dengan sistem otomatis berbasis mikrokontroler.

Batasan Masalah

1. Mikrokontroler utama yang digunakan sebagai pusat pemrosesan data adalah modul ESP32.
2. Parameter cairan yang dibaca dan dikendalikan hanya difokuskan pada tingkat kepekatan larutan nutrisi dalam satuan PPM menggunakan sensor TDS (Total Dissolved Solids).
3. Aktuator yang digunakan untuk pemompaan pekatan nutrisi adalah motor DC (pompa peristaltik) yang kecepatan putarannya diatur melalui sinyal PWM.
4. Metode kontrol tertutup yang digunakan terbatas pada algoritma PID adaptif berbasis penjadwalan gain heuristik.
5. Platform antarmuka IoT untuk pemantauan data dan pengaturan setpoint dibatasi menggunakan aplikasi Blynk, Google Spreadsheet, dan local web server.
6. Penelitian berfokus pada kinerja sistem kendali, aktuasi, dan instrumentasi elektronika; analisis dampak nutrisi terhadap pertumbuhan tanaman secara agronomis tidak termasuk dalam cakupan penelitian ini.

II. LANDASAN TEORI

Tinjauan Pustaka

Pengembangan sistem instrumentasi dan kendali pada sektor pertanian modern, khususnya dalam pengelolaan nutrisi hidroponik, terus mengalami evolusi untuk mencapai tingkat efisiensi dan presisi yang optimal. Pada sistem dosing nutrisi, keakuratan dalam mencapai setpoint kepekatan larutan menjadi tantangan teknis tersendiri karena dinamika fluida, viskositas pekatan, dan waktu tunda pelarutan sering memicu ketidakstabilan respons aktuator pompa. Sebelum melakukan perancangan sistem pada Tugas Akhir ini, dilakukan tinjauan terhadap beberapa penelitian terdahulu yang relevan.

Penelitian pertama dilakukan oleh Fuad dan Zuhrie (2019) yang merancang sistem pengontrolan pH dan nutrisi hidroponik menggunakan pengendali PID [3]. Penelitian tersebut membuktikan bahwa metode PID mampu meminimalisir overshoot dan menjaga kestabilan larutan, namun perangkat keras yang digunakan adalah Arduino Uno yang tidak dibekali modul Wi-Fi internal sehingga pemantauan jarak jauh menjadi kurang praktis.

Penelitian kedua dilakukan oleh Ferdiansyah, dkk. (2025) yang berfokus pada sistem monitoring dan kontrol tanaman hidroponik berbasis IoT menggunakan ESP32 [2]. Sistem ini unggul dalam kemudahan akses data real-time melalui fitur Wi-Fi bawaan ESP32, namun algoritma kontrol aktuator yang diterapkan masih bersifat On/Off konvensional sehingga rentan menimbulkan overshoot akibat sisa larutan yang menetes.

Penelitian ketiga dilakukan oleh Veda, dkk. (2022) yang mengimplementasikan sistem kontrol dan monitoring menggunakan ESP32, metode kendali PID, dan platform IoT Blynk [5]. Sistem tersebut dirancang untuk pemupukan NPK padat/cair pada media tanam tanah, sehingga karakteristik dinamika pencampurannya berbeda dengan sistem sirkulasi air pada tandon nutrisi hidroponik yang menuntut respons aktuator lebih dinamis.

Berdasarkan tinjauan tersebut, Tugas Akhir ini diusulkan untuk menutupi kelemahan-kelemahan penelitian terdahulu dengan memadukan ESP32 sebagai pusat kendali yang terintegrasi langsung dengan platform IoT Blynk, serta menerapkan metode PID adaptif berbasis penjadwalan gain heuristik untuk mengatur putaran aktuator motor DC secara halus pada tandon air, sehingga dihasilkan sistem dosing nutrisi yang presisi, stabil, tanpa overshoot berlebih, dan dapat dipantau dari mana saja.

Dasar Teori

1. Nutrisi Hidroponik dan Parameter Part Per Million (PPM)

Hidroponik merupakan metode budidaya pertanian yang tidak menggunakan media tanah, sehingga seluruh kebutuhan nutrisi tanaman disuplai melalui aliran air [1]. Tingkat konsentrasi larutan nutrisi direpresentasikan dalam satuan Part Per Million (PPM), yaitu rasio bagian per juta yang ekuivalen dengan 1 miligram padatan terlarut dalam 1 liter air. Dalam instrumentasi elektronik, nilai PPM tidak diukur langsung berdasarkan massa, melainkan dideduksi dari nilai konduktivitas listrik (Electrical Conductivity/EC) larutan; semakin banyak ion nutrisi yang terlarut, semakin tinggi daya hantar listriknya.

2. Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan System on a Chip (SoC) berbiaya rendah dan hemat daya yang dikembangkan oleh Espressif Systems, diotaki prosesor Tensilica Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 dengan frekuensi hingga 240 MHz [8]. Arsitektur dual-core memungkinkan satu inti mengeksekusi tugas kritis (pembacaan sensor dan pembaruan PWM aktuator) secara real-time, sementara inti lainnya menjaga stabilitas komunikasi Wi-Fi. ESP32 juga dilengkapi modul Wi-Fi 802.11 b/g/n dan Bluetooth on-board, serta beragam peripheral I2C, SPI, UART, ADC, dan PWM.

3. Sensor Total Dissolved Solids (TDS) dan Sensor Suhu DS18B20

Sensor TDS mengukur konduktivitas listrik larutan melalui sepasang elektroda, yang kemudian dikonversi secara linier menjadi estimasi nilai TDS dalam satuan PPM [9]. Sinyal analog keluaran sensor dibaca oleh ESP32 menggunakan fungsi analogReadMilliVolts() yang memanfaatkan kurva kalibrasi ADC bawaan pabrik agar hasil pembacaan lebih linier. Untuk mengurangi noise akibat riak air, program menerapkan median filter dengan mengambil 15 sampel data per siklus pembacaan dan mengambil nilai tengah setelah pengurutan (insertion sort). Sensor suhu waterproof DS18B20 digunakan untuk mengukur temperatur larutan secara presisi melalui komunikasi satu jalur (1-Wire), karena konduktivitas air sangat dipengaruhi oleh suhu. Nilai suhu ini digunakan sebagai faktor kompensasi pada konversi tegangan ke PPM, dengan rasio kompensasi sebesar 2% per derajat Celsius terhadap referensi suhu 25°C.

4. Aktuator Pompa Peristaltik dan Driver Motor L298N

Aktuator yang digunakan adalah pompa peristaltik DC yang bekerja dengan memeras selang fleksibel menggunakan roller berputar, sehingga cairan nutrisi hanya bersentuhan dengan dinding selang dan tidak mengontaminasi komponen elektronik [11]. Kecepatan putaran motor DC diatur menggunakan teknik Pulse Width Modulation (PWM) melalui persamaan berikut:

$$Vavg = D \times Vs$$

dengan Vavg adalah tegangan rata-rata keluaran menuju motor (Volt), D adalah duty cycle (0–1), dan Vs adalah tegangan suplai maksimal (Volt). Karena pin GPIO ESP32 hanya mampu mensuplai tegangan 3,3V dengan arus kecil, diperlukan driver motor L298N sebagai sakelar daya elektronik yang menyalurkan tegangan dan arus besar dari sumber eksternal ke motor DC sesuai frekuensi sinyal PWM [12].

5. Sistem Kendali PID Adaptif (Heuristic Gain-Scheduling)

Sistem kendali Proportional-Integral-Derivative (PID) merupakan sistem kontrol umpan balik (closed-loop) yang bekerja dengan menghitung nilai error e(t) antara setpoint dan process variable, kemudian diproses melalui tiga aksi kendali sesuai persamaan berikut [6]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Aksi Proporsional (Kp) mempercepat rise time namun berisiko menimbulkan overshoot bila terlalu besar; aksi Integral (Ki) menghilangkan steady-state error dengan mengakumulasi error dari waktu ke waktu, namun nilai yang berlebihan dapat menimbulkan integral windup; aksi Derivatif (Kd) meredam laju perubahan error untuk mengurangi overshoot, namun sensitif terhadap noise frekuensi tinggi. Pada penelitian ini, parameter Kp, Ki, dan Kd tidak ditetapkan secara statis (hardcoded), melainkan disesuaikan secara otomatis melalui metode penjadwalan gain heuristik (heuristic gain-scheduling): nilai error dan laju perubahannya dinormalisasi ke skala 0,0–1,0, kemudian dipetakan ke rentang gain aman melalui fungsi mapf(). Kp dan Kd akan membesar secara agresif ketika error besar atau berubah cepat, sedangkan Ki hanya menguat saat error sudah kecil dan stabil untuk melakukan koreksi halus tanpa memicu windup.

6. Internet of Things (IoT), Platform Blynk, dan Google Spreadsheet

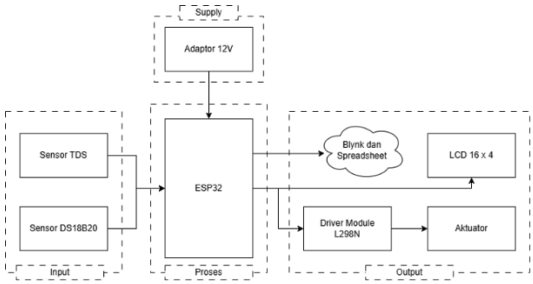
Internet of Things (IoT) memungkinkan perangkat keras tertanam saling terhubung dan bertukar data melalui jaringan internet tanpa intervensi manusia secara langsung [13]. Penelitian ini memanfaatkan platform Blynk sebagai Platform as a Service (PaaS) untuk antarmuka kendali dan pemantauan real-time melalui aplikasi ponsel pintar [14], serta Google Spreadsheet sebagai media data logging melalui protokol HTTP POST menuju Google Apps Script (GAS) [15]. Selain itu, ESP32 juga menyediakan Local Web Server dan mode fallback Access Point (AP) sebagai

jalur konfigurasi darurat ketika koneksi Wi-Fi utama tidak tersedia.

III. METODE PENELITIAN

Diagram Blok Sistem

Sistem dosing nutrisi otomatis ini terdiri dari tiga bagian utama, yaitu input, proses, dan output. Sumber daya berasal dari adaptor 12V yang dibagi menjadi dua jalur: satu jalur menyuplai aktuator (motor DC 12V) secara langsung, dan satu jalur diturunkan melalui buck converter untuk menyuplai mikrokontroler ESP32. Pada bagian input terdapat sensor TDS untuk membaca kepekatan nutrisi dan sensor DS18B20 untuk membaca suhu larutan. ESP32 berperan sebagai pusat pemrosesan yang mengolah data sensor, menjalankan algoritma PID adaptif, serta mengirimkan data ke Blynk dan Google Spreadsheet melalui jaringan Wi-Fi. Pada bagian output terdapat driver motor L298N yang mengaktifkan tiga pompa peristaltik (nutrisi A, nutrisi B, dan air baku) serta LCD 16x4 untuk menampilkan status sistem secara local.



Gambar 1 Diagram Blok Alat

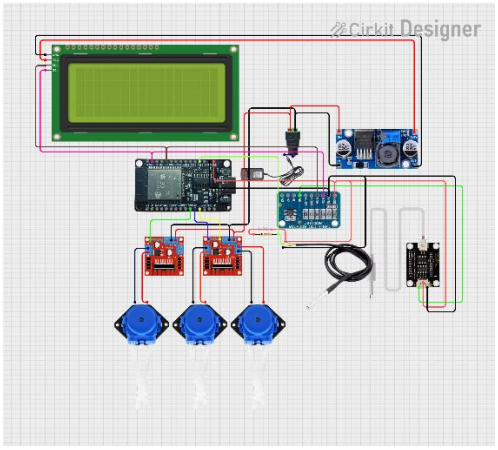
Spesifikasi Komponen

Daftar komponen utama yang digunakan dalam perancangan perangkat keras ditunjukkan pada Tabel 1.

No	Komponen/Bahan	Jumlah
1	ESP32 DevKit	1 buah
2	Sensor TDS (Total Dissolved Solids)	1 buah
3	Sensor suhu DS18B20 (waterproof)	1 buah
4	LCD 16x4 dengan modul I2C	1 buah
5	Modul Buck Converter	1 buah
6	Driver motor DC L298N	2 buah
7	Adaptor 12V	1 buah
8	Motor DC 12V (pompa peristaltik)	3 buah
9	Connector	3 buah

Tabel 1. Daftar Komponen Utama Perangkat Keras

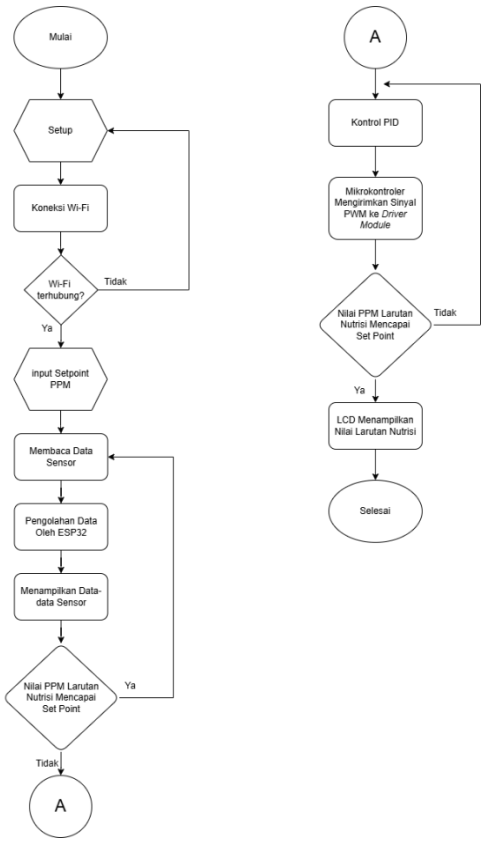
Wiring Sensor



Gambar 2 Wiring Alat

Sensor TDS dihubungkan dengan pin VCC ke 3V3, GND ke GND, dan pin analog (A) ke pin GPIO35 ESP32 yang merupakan salah satu jalur ADC. Sensor DS18B20 dihubungkan dengan pin VCC ke VIN (5V), GND ke GND, dan pin DATA ke GPIO15 dengan tambahan resistor pull-up antara jalur VCC dan DATA agar protokol komunikasi 1-Wire dapat berjalan stabil pada level logika HIGH saat tidak ada transmisi data.

Flowchart Sistem



Gambar 3 Flowchart Alat

Alur kerja sistem diawali dengan inisialisasi perangkat dan koneksi Wi-Fi. Jika koneksi Wi-Fi gagal dalam 15 detik, ESP32 beralih ke mode Access Point (SSID "Hidroponik-Setup") agar pengguna tetap dapat melakukan konfigurasi melalui Web Server lokal. Setelah terhubung, sistem menerima setpoint PPM, membaca data sensor TDS dan DS18B20, kemudian menghitung error terhadap setpoint. Selama error berada di luar batas toleransi (deadband 10 PPM), algoritma PID adaptif menghitung ulang parameter Kp, Ki, dan Kd berdasarkan besar error, lalu mengonversinya menjadi sinyal PWM yang dikirim ke driver L298N untuk mengaktifkan pompa nutrisi (jika PPM kurang) atau pompa air baku (jika PPM berlebih). Proses ini berulang secara kontinu sembari data ditampilkan pada LCD dan dikirimkan ke Blynk serta Google Spreadsheet setiap 15 detik.

Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor TDS dilakukan dengan metode komparasi terhadap TDS meter komersial yang telah terkalibrasi pabrik. Faktor kalibrasi (calibrationFactor) pada program disesuaikan secara iteratif hingga pembacaan sensor sistem mendekati nilai acuan TDS meter. Kalibrasi sensor DS18B20 dilakukan dengan membandingkan pembacaannya terhadap fitur pengukur suhu pada TDS meter digital pada sampel air yang sama, dan diperoleh selisih pembacaan yang sangat kecil (26,5°C berbanding 26,6°C), menunjukkan akurasi sensor yang baik untuk mendukung kompensasi suhu pada perhitungan PPM.

IV. PENGUJIAN ALAT DAN ANALISA

Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan pada wadah penampungan air berkapasitas 5 liter dengan TDS awal sekitar 240 PPM. Pengujian bertujuan mengevaluasi keakuratan sensor TDS dan DS18B20 sebagai umpan balik kendali, mengevaluasi respons sistem kendali PID baik pada penalaan manual maupun adaptif, mengevaluasi ketahanan sistem terhadap gangguan eksternal, serta mengevaluasi fungsi pemantauan IoT melalui platform Blynk dan Google Spreadsheet. Batas toleransi (deadband) yang digunakan pada seluruh pengujian adalah 10 PPM.

Pengujian Respons Sistem dengan Penalaan PID Manual

Pengujian pertama menggunakan tiga variasi parameter PID statis untuk mencapai setpoint 400 PPM dari TDS awal sekitar 240 PPM. Rangkuman hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.

No	Kp ; Ki ; Kd	Rise Time	Overshoot	SS Error
I	0,867 ; 0,001 ; 28,0	451,8 detik	2,33 %	2,29 PPM
II	1,489 ; 0,001 ; 28,0	255,3 detik	1,53 %	2,89 PPM
III	0,867 ; 0,150 ; 30,0	209,3 detik	2,75 %	5,63 PPM

Tabel 2. Hasil Pengujian PID Manual pada Setpoint 400 PPM

Percobaan I dengan Kp rendah (0,867) menghasilkan respons paling lambat (451,8 detik) namun overshoot dan steady-state error paling kecil. Peningkatan Kp pada Percobaan II mempercepat rise time menjadi 255,3 detik dengan sedikit peningkatan overshoot menjadi 1,53%. Pada Percobaan III, peningkatan Ki dan Kd secara ekstrem menghasilkan respons paling cepat (209,3 detik), namun akumulasi error pada aksi integral menyebabkan overshoot tertinggi (2,75%) hingga memicu aktivasi pompa air baku sebagai kompensasi darurat. Hasil ini menunjukkan trade-off klasik antara kecepatan respons dan kestabilan pada parameter PID statis.

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

Pengujian kedua mengevaluasi algoritma penjadwalan gain heuristik pada tiga sesi kenaikan setpoint yang berbeda (400, 600, dan 800 PPM) secara berkesinambungan. Rangkuman hasil ditunjukkan pada Tabel 3.

Sesi (Setpoint)	Rise Time	Overshoot	SS Error
1 (400 PPM)	215,6 detik	0,20 %	5,07 PPM
2 (600 PPM)	196,2 detik	2,53 %	1,08 PPM
3 (800 PPM)	255,2 detik	3,53 %	3,52 PPM

Tabel 3. Hasil Pengujian PID Adaptif pada Tiga Sesi Setpoint

Pada seluruh sesi, algoritma adaptif memberikan nilai Kp dan Kd yang agresif di awal proses ketika error masih besar, kemudian secara otomatis menurunkannya seiring mengecilnya error sementara Ki menguat untuk koreksi halus pada kondisi mendekati steady-state. Pada sesi 1 (setpoint 400 PPM), sistem mencapai rise time 215,6 detik dengan overshoot hanya 0,20% dan steady-state error 5,07 PPM. Pada sesi 2 (kenaikan ke 600 PPM), rise time tercatat 196,2 detik dengan overshoot 2,53% dan rata-rata TDS akhir 600,84 PPM. Pada sesi 3 (kenaikan ke 800 PPM), sistem bekerja lebih berhati-hati dengan rise time 255,2 detik, overshoot 3,53%, dan steady-state error 3,52 PPM.

Perbandingan Kinerja PID Adaptif dan PID Manual

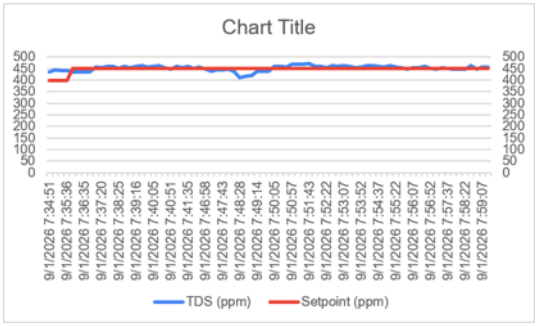
Untuk memvalidasi efektivitas algoritma adaptif, dilakukan perbandingan kinerja terhadap ketiga skenario PID manual pada kondisi awal yang identik (setpoint 400 PPM). Perbandingan ditunjukkan pada Tabel 4.

Skenario	Kp;Ki;Kd	Rise Time	Overshoot	SS Error
PID Adaptif	Dinamis (auto-tuning)	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	0,867 ; 0,150 ; 30,0	209,3 detik	2,75 %	5,63 PPM

Tabel 4. Perbandingan Kinerja PID Adaptif dan PID Manual

PID Adaptif menghasilkan rise time (215,6 detik) yang hampir setara dengan skenario manual paling agresif (Manual III, 209,3 detik), tetapi dengan overshoot yang jauh lebih kecil (0,20% berbanding 2,75%). Hal ini membuktikan bahwa algoritma penjadwalan gain heuristik berhasil mengatasi dilema trade-off antara kecepatan respons dan kestabilan yang terjadi pada parameter PID statis: sistem adaptif bekerja secepat skenario agresif namun tetap mendarat selembut skenario konservatif.

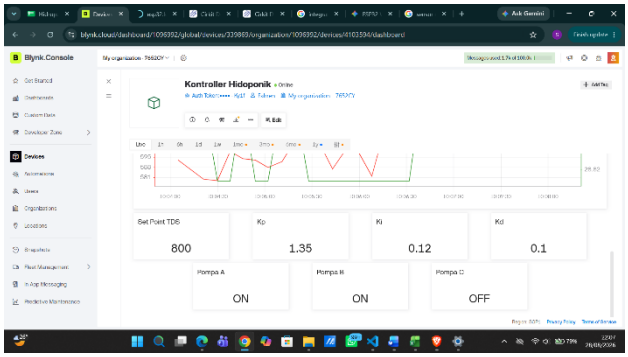
Pengujian Penolakan Gangguan pada PID Adaptif



Gambar 4 Grafik pengujian Gangguan

Pengujian dilakukan dengan menyimulasikan gangguan berupa penambahan air murni ke dalam tangki yang telah berada pada kondisi tunak di sekitar setpoint 450 PPM (deadband 440–460 PPM). Gangguan tersebut menyebabkan nilai TDS anjlok hingga titik minimum 409,4 PPM. Algoritma PID adaptif merespons dengan segera mengaktifkan pompa nutrisi A dan B, menyesuaikan Kp hingga kisaran 0,747 dan mempertajam Kd hingga 0,377 untuk meredam lonjakan error akibat gangguan. Sistem berhasil kembali ke batas bawah deadband dalam waktu pemulihan 96,5 detik, dengan overshoot pemulihan tercatat pada 472,5 PPM (setara 5,00% dari target, masih pada batas aman) dan steady-state akhir stabil pada rata-rata 454,10 PPM. Hasil ini menunjukkan ketahanan (robustness) algoritma adaptif terhadap gangguan eksternal mendadak.

Pengujian Pemantauan Melalui Platform IoT



Gambar 5 Monitoring BLYNK

Pengujian pemantauan IoT dilakukan untuk memastikan data pembacaan sensor, parameter PID hasil auto-tuning, dan status aktuator dapat diakses secara real-time. Pada dashboard Blynk, dua indikator radial gauge menampilkan Suhu Air dan TDS yang diperbarui setiap 15 detik melalui virtual pin (V0 dan V1); pada salah satu momen pengujian tercatat suhu 28,94°C dan TDS 682 PPM. Widget value display menampilkan Set Point TDS (V2) beserta parameter Kp (V6), Ki (V7), dan Kd (V8) hasil kalkulasi auto-tuning — sebagai contoh pada setpoint 800 PPM, sistem menampilkan Kp = 1,35, Ki = 0,12, dan Kd = 0,1. Status tiga pompa dosing (Pompa A/V3, Pompa B/V4, Pompa C-Air Baku/V5) ditampilkan sebagai indikator ON/OFF, serta widget chart historis memvisualisasikan tren TDS dan suhu terhadap waktu. Data yang sama juga dicatat secara otomatis pada Google Spreadsheet melalui Google Apps Script, sehingga tersedia riwayat data untuk keperluan analisis jangka panjang meskipun pengguna tidak memantau secara langsung.

V. KESIMPULAN

1. Mikrokontroler ESP32 mampu membaca data kepekatan nutrisi dari sensor TDS secara akurat berkat penerapan median filtering dan kompensasi suhu dari sensor DS18B20, serta mampu mengendalikan tiga aktuator pompa dosing (A, B, dan Air Baku) secara halus dan proporsional melalui sinyal PWM pada driver motor L298N.

2. Metode penjadwalan gain heuristik (heuristic gain-scheduling) terbukti mampu menalar parameter Kp, Ki, dan Kd secara otomatis dan dinamis berdasarkan skala error, menghasilkan overshoot yang aman (di bawah 5%): 2,53% pada kenaikan 400 ke 600 PPM dan 3,53% pada kenaikan 600 ke 800 PPM, dengan rata-rata steady-state error di bawah 4 PPM.
3. Berdasarkan pengujian komparatif, PID Adaptif berhasil mengatasi dilema trade-off antara kecepatan dan kestabilan pada parameter statis: rise time 215,6 detik hampir setara dengan sistem manual paling agresif (209,3 detik), namun dengan overshoot yang jauh lebih kecil (0,20% berbanding 2,75%) dan steady-state error yang tetap aman (5,07 PPM).
4. Sistem PID adaptif terbukti tangguh terhadap gangguan eksternal; saat terjadi penurunan kepekatan nutrisi mendadak lebih dari 40 PPM akibat penambahan air murni, sistem mampu memulihkan kondisi ke ambang batas aman dalam waktu 96,5 detik dengan overshoot maksimal 5,00%.
5. Penggunaan deadband sebesar 10 PPM efektif mencegah aktuator menyala-mati secara terus-menerus, sehingga menjaga umur pakai mekanis pompa sekaligus mencegah overdosing nutrisi.
6. Sistem pemantauan jarak jauh berhasil diimplementasikan melalui pengiriman data setiap 15 detik ke platform Blynk dan pencatatan riwayat pada Google Spreadsheet, diperkuat dengan fitur Web Server lokal dan mode fallback Access Point yang menjaga sistem tetap dapat dikonfigurasi meskipun jaringan internet utama mengalami gangguan.

VI. DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Hendriany, "Pengaruh PPM dan pH Pada Pertumbuhan Daun Mint (Mentha pipperita L.) Dalam Sistem Hidroponik," *Prosiding SEMNASBIO (Seminar Nasional Biologi)*, vol. 8, pp. 585-590, 2024, Universitas Negeri Padang.

[2] V. Ferdiansyah, S. A. Oktavia, Y. Mulyanto, dan Y. W, "Rancang Bangun Prototype Sistem Monitoring Dan Kontrol Tanaman Hidroponik Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan Microcontroller ESP32," *Jurnal BIT*, vol. 22, no. 1, 2025, Universitas Teknologi Sumbawa.

[3] A. N. Fuad dan M. S. Zuhrie, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Dan Pengontrolan pH Nutrisi Pada Hidroponik Sistem Nutrient Film Technique (NFT) Menggunakan Pengendali PID Berbasis Arduino Uno," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 3, pp. 797, 2019, Universitas Negeri Surabaya.

[4] S. Bahri, H. A. Lestari, dan A. Kurniawan, "Monitoring Greenhouse Berbasis Internet of Things (IoT) Menggunakan ESP32-Cam Pada Tanaman Cabai Hidroponik Dutch Bucket," *J-ABET (Journal of Agricultural and Biosystem Engineering Technology)*, vol. 4, no. 1, 2023, Universitas Nahdlatul Ulama Purwokerto.

[5] J. Veda, M. Rivai, dan S. Suwito, "Sistem Kontrol dan Monitoring Pemupukan NPK Tanaman dengan Mikrokontroler ESP32," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 11, no. 2, 2022.

[6] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Boston, MA, USA: Prentice Hall, 2010.

[7] R. Cameron dan M. Wilkins, *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*, 8th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2022.

[8] Espressif Systems, *ESP32 Series Datasheet V4.3*. Shanghai, China: Espressif Systems, 2023.

[9] D. P. Purnomo, *Sensor dan Transduser dalam Industri Pertanian*. Yogyakarta: Andi Publisher, 2021

[10] Texas Instruments, *ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator Datasheet*. Dallas, TX: Texas Instruments, 2018.

[11] J. P. Bentley, *Principles of Measurement Systems*, 4th ed. Harlow, England: Pearson Prentice Hall, 2005.

[12] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications*, 4th ed. Pearson, 2013.

[13] R. Buyya dan A. V. Dastjerdi, *Internet of Things: Principles and Paradigms*. Cambridge, MA: Morgan Kaufmann, 2016.

[14] Blynk Inc., *Blynk IoT Platform Documentation: Architecture and Components*. New York: Blynk Inc., 2023.

[15] M. R. Effendi, R. R. A. Siregar, dan H. S. Maulana, "Sistem Datalogger Internet of Things (IoT) Berbasis Web Menggunakan Google Sheets," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika*, vol. 7, no. 2, pp. 150-158, 2021.