

Rancangan Bangun Pengedali Otomatis pada Sistem Penyiraman Tanaman Tomat Buah Berbasis IoT dengan Menggunakan Kontrol PID

Tuah Sakti Palimo Putra Jambak¹, Ridwan²
Program Studi Teknologi Rekayasa Elektronika, Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
Batam, Indonesia
¹email@gmail.com, ²email@gmail.com

Abstrak —Budidaya tanaman tomat memerlukan manajemen irigasi yang presisi untuk menjaga stabilitas kelembaban tanah. Penelitian ini merancang dan menguji sistem penyiraman otomatis untuk tanaman tomat yang memadukan kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) loop tertutup dengan konektivitas Internet of Things (IoT) pada mikrokontroler ESP32. Sensor higrometer kelembaban tanah, sensor suhu DHT22, pompa air DC, pemanas keramik PTC, dan modul dual-relay diintegrasikan sehingga pengendali dapat menyiram tanah yang kering sekaligus menguapkan kelebihan air pada tanah yang terlalu basah, menjaga media tanam tetap mendekati *setpoint* kelembaban 50% yang dinaikkan secara adaptif menjadi 55% saat suhu lingkungan meningkat. Parameter PID ($K_p = 0,3$; $K_i = 0,1$; $K_d = 1,5$) diperoleh melalui penalaan *trial-and-error* terhadap dua belas kandidat konfigurasi. Hasil pengujian menunjukkan sistem mencapai 90% dari *setpoint* dalam 9 detik, menetap dalam rentang toleransi $\pm 5\%$ dalam 30 detik, menunjukkan *overshoot* sekitar 16%, dan mempertahankan *steady-state error* sekitar 3%. Pembacaan sensor disinkronkan ke basis data *real-time* Firebase, memungkinkan pemantauan jarak jauh melalui dasbor web. Dibandingkan dengan penyiraman manual, sistem berbasis PID ini menjaga kelembaban tanah lebih konsisten dan menggunakan air lebih efisien, dan pengamatan pertumbuhan tanaman selama tujuh minggu menunjukkan pertumbuhan bibit tomat yang stabil dan sehat di bawah rezim otomatis ini.

Kata kunci— IoT; kontrol PID; kelembaban tanah; irigasi otomatis; tomat; ESP32

Abstract *Tomato cultivation requires precise irrigation management to keep soil moisture stable. This study designs and evaluates an automatic watering system for tomato plants that combines closed-loop Proportional-Integral-Derivative (PID) control with Internet of Things (IoT) connectivity on an ESP32 microcontroller. A soil-moisture hygrometer, a DHT22 temperature sensor, a DC water pump, a PTC ceramic heater, and a dual-relay module were integrated so the controller can both irrigate dry soil and evaporate excess moisture from over-saturated soil, keeping the growing medium near a 50% moisture setpoint that is adaptively raised to 55% when ambient temperature rises. PID parameters ($K_p = 0.3$, $K_i = 0.1$, $K_d = 1.5$) were obtained through trial-and-error tuning across twelve candidate configurations. Testing shows the system reaches 90% of the setpoint within 9 seconds, settles within a $\pm 5\%$ tolerance band in 30 seconds, exhibits an overshoot of about 16%, and*

maintains a steady-state error of roughly 3%. Sensor readings are synchronized to a Firebase real-time database, enabling remote monitoring through a web dashboard. Compared with manual watering, the PID-based system keeps soil moisture more consistent and uses water more efficiently, and seven weeks of plant-growth observation show steady, healthy growth of the tomato seedlings under the automated regime.

Keywords— IoT; PID control; soil moisture; automatic irrigation; tomato; ESP32

I. PENDAHULUAN

Sektor pertanian dihadapkan pada tantangan yang semakin kompleks seiring meningkatnya permintaan pangan global akibat pertumbuhan populasi. Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO) memproyeksikan kebutuhan pangan dunia akan meningkat sekitar 60% pada tahun 2050 dibandingkan tahun 2006 [1]. Tanaman tomat (*Solanum lycopersicum*) merupakan salah satu komoditas hortikultura penting karena nilai ekonomi dan kandungan gizinya yang tinggi, kaya vitamin C, kalium, folat, dan vitamin K [2].

Salah satu faktor utama keberhasilan budidaya tomat adalah pengelolaan kelembaban tanah yang presisi. Baik kekurangan maupun kelebihan air dapat menurunkan hasil panen; kekurangan air memicu stres fisiologis dan menurunkan hasil buah, sedangkan kelebihan air meningkatkan risiko penyakit akar dan menurunkan kualitas buah [3], [4]. Teknologi *Internet of Things* (IoT) menawarkan solusi pemantauan dan kendali kelembaban tanah secara *real-time* melalui sensor yang terhubung ke platform berbasis cloud [5], sementara kontrol *Proportional-Integral-*

Derivative (PID) dikenal luas mampu mempertahankan variabel proses pada nilai target dengan galat yang kecil dan respons yang cepat terhadap perubahan lingkungan.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan yang ingin dijawab pada penelitian ini adalah bagaimana merancang sistem pengendali otomatis berbasis IoT untuk penyiraman tanaman tomat, bagaimana mengimplementasikan kontrol PID agar kelembaban tanah tetap pada tingkat optimal, dan bagaimana pengaruh kontrol PID dalam mencegah kelebihan air guna menghindari risiko kebusukan akar. Penelitian ini merancang dan menguji sebuah sistem penyiraman otomatis berbasis ESP32 yang menggabungkan sensor kelembaban tanah, sensor suhu dan kelembaban udara DHT22, pompa air DC, serta pemanas PTC sebagai aktuatur evaporasi, yang

seluruhnya dikendalikan melalui algoritma PID dan terhubung ke basis data *cloud* untuk pemantauan jarak jauh.

Tujuan penelitian adalah (1) merancang dan membangun sistem irigasi otomatis berbasis IoT yang mampu menyiram tanaman tomat secara akurat berdasarkan kondisi kelembaban tanah dan suhu lingkungan, (2) mengimplementasikan kontrol PID agar kelembaban tanah tetap pada rentang optimal sesuai kebutuhan tanaman tomat, dan (3) menganalisis pengaruh parameter PID terhadap kecepatan, kestabilan, dan akurasi respons sistem, serta efektivitasnya dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air. Pengujian dibatasi pada skala laboratorium dengan media tanam dan kondisi lingkungan yang dikendalikan, dan algoritma kendali yang digunakan terbatas pada metode PID tanpa dibandingkan dengan metode kendali lain seperti *fuzzy logic* atau *machine learning*.

II. METODE

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengeksplorasi sistem irigasi otomatis berbasis IoT. Zuhijayanto dan Fadlil merancang sistem monitoring dan irigasi tomat yang menyiram tanaman ketika kelembaban tanah turun di bawah 60% dan berhenti pada 80% [6]. Mustopa dkk. mengembangkan sistem irigasi tetes non-sirkulasi yang memanfaatkan IoT dan analitik data besar untuk mengurangi pemborosan air [7]. Darmawan dkk. membangun pengukur kelembaban tanah berbasis *Arduino Uno* yang mengklasifikasikan lima kondisi tanah dari sangat kering hingga terlalu basah [8], sedangkan Pratama dan Hardani mengembangkan sistem pemantauan kelembaban dan suhu tanah untuk tanaman bawang merah yang dapat diadaptasi untuk tanaman lain dengan karakteristik pertumbuhan serupa [9]. Alamsyah dkk. menerapkan logika *fuzzy* pada sistem irigasi otomatis berbasis IoT dengan platform ESP8266 dan aplikasi Blynk [10], yang menunjukkan bahwa pendekatan kendali cerdas dapat dipadukan dengan berbagai jenis mikrokontroler untuk kebutuhan irigasi yang serupa.

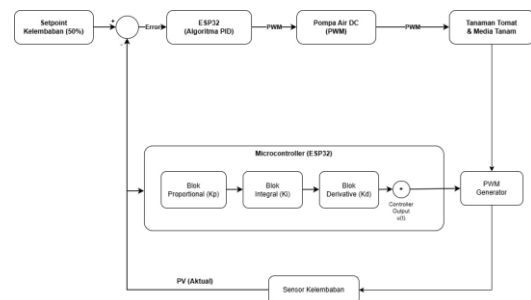
Kebutuhan air tanaman tomat berkisar antara 4 hingga 6 mm/hari tergantung tahap pertumbuhan dan kondisi lingkungan [11], [12]. Pada tahap awal pertumbuhan tanaman sangat sensitif terhadap kekurangan air yang dapat memperlambat pertumbuhan akar dan daun [13], sedangkan kelebihan air pada fase selanjutnya dapat menurunkan oksigenasi akar dan memicu pertumbuhan jamur maupun penyakit akar [14]. Hal ini menegaskan pentingnya kendali kelembaban yang presisi dan responsif sepanjang siklus pertumbuhan tanaman.

Kontrol PID banyak dipakai pada sistem irigasi karena mampu menekan *overshoot* dan mempercepat waktu stabil melalui penalaan parameter K_p , K_i , dan K_d [15]. Mikrokontroler ESP32 dipilih pada berbagai penelitian karena mendukung pemrosesan dua inti serta konektivitas Wi-Fi terintegrasi yang cocok untuk aplikasi IoT pertanian [16], [17]. Sensor higrometer kelembaban tanah berbasis kapasitif umumnya menunjukkan presisi dan umur pakai yang lebih baik dibanding jenis resistif, meski akurasinya tetap dipengaruhi jenis tanah, suhu, dan salinitas sehingga memerlukan kalibrasi [8], [18], [19]. Pompa air DC yang dikendalikan melalui modulasi lebar pulsa (PWM) terbukti mampu memberikan pengaturan kecepatan dan volume air

yang akurat berdasarkan data sensor kelembaban terintegrasi [20]. Studi-studi tersebut menjadi dasar bagi penelitian ini dalam memadukan kendali PID dan IoT secara terintegrasi pada satu purwarupa sistem irigasi tomat yang sekaligus mampu menangani kondisi tanah terlalu basah melalui aktuatur pemanas.

A. Perancangan Sistem Kendali

Sistem dirancang sebagai kendali *loop* tertutup (*closed-loop*). Sensor kelembaban tanah membaca nilai aktual secara kontinu dan mengirimkannya ke ESP32, yang membandingkannya dengan *setpoint* 50%. Selisih (*error*) diproses oleh algoritma PID untuk menghasilkan sinyal kendali PWM yang mengatur kecepatan pompa air, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok sistem kendali *loop* tertutup

Sinyal kendali PID dihitung dengan persamaan klasik:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

dengan $e(t)$ adalah selisih antara *setpoint* dan kelembaban aktual, sedangkan K_p , K_i , dan K_d berturut-turut adalah konstanta proporsional, integral, dan derivatif. *Setpoint* dinaikkan secara adaptif dari 50% menjadi 55% ketika suhu lingkungan meningkat, agar kebutuhan air tanaman tetap terpenuhi pada kondisi yang lebih panas. Sistem juga dilengkapi aktuatur pemanas PTC yang aktif ketika kelembaban melebihi ambang atas, sehingga penguapan dipercepat dan kelembaban tanah tidak berlarut-larut dalam kondisi jenuh air.

B. Parameter Evaluasi Performansi

Kinerja sistem kendali dievaluasi menggunakan empat parameter standar sistem orde-dua, yaitu *rise time* (T_r), *overshoot* (M_p), *settling time* (T_s), dan *steady-state error* (SSE). *Rise time* dihitung sebagai selisih waktu saat respons mencapai 90% dan 10% dari *setpoint*:

$$T_r = t(90\%) - t(10\%) \quad (2)$$

Settling time adalah waktu yang dibutuhkan respons untuk masuk dan menetap dalam rentang toleransi $\pm 5\%$ dari *setpoint*, sedangkan *steady-state error* dihitung sebagai selisih mutlak antara nilai kelembaban akhir pada kondisi tunak (Y_{steady}) dengan nilai *setpoint* ($Y_{setpoint}$):

$$SSE = |Y_{setpoint} - Y_{steady}| \quad (3)$$

Semakin kecil nilai *overshoot* dan *steady-state error*, semakin baik kemampuan sistem menjaga kelembaban tanah tepat pada target tanpa risiko kelebihan air.

C. Perangkat Keras dan Konfigurasi

Perangkat keras terdiri atas sensor *soil moisture hygrometer*, sensor DHT22, *mini water pump* DC 12V, PTC

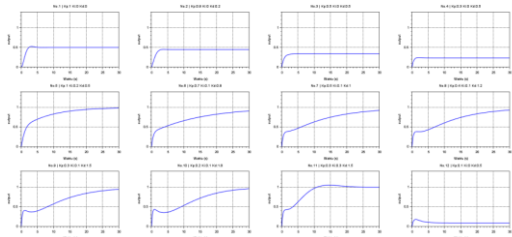
ceramic heater 12V, dan modul relay 2 channel sebagai driver pompa dan pemanas. Relay 1 mengaktifkan pompa saat tanah terlalu kering, sedangkan Relay 2 mengaktifkan pemanas untuk mempercepat evaporasi saat tanah terlalu basah. Konfigurasi pin utama dirangkum pada Tabel I.

TABEL I
KONFIGURASI PIN ESP32

Komponen	Pin ESP32	Fungsi
DHT22 (DATA)	GPIO 25	Digital Input
Soil Moisture (AO)	GPIO 34	Analog Input
Water Flow (SIG)	GPIO 27	Digital Input
Relay 1 - Pompa	GPIO 26	Digital Output
Relay 2 - Heater	GPIO 25	Digital Output

D. Parameter PID

Parameter PID ditentukan melalui pendekatan *trial and error* karena karakteristik media tanam bersifat non-linear dan sulit dimodelkan secara matematis. Dua belas kombinasi K_p , K_i , dan K_d diuji secara simulasi untuk mengamati kecepatan respons, kestabilan, dan potensi *overshoot*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil simulasi 12 variasi penalaan parameter PID

Konfigurasi tanpa unsur integral ($K_i = 0$) selalu berhenti di bawah target karena tidak memiliki tenaga kumulatif untuk mengoreksi galat, sedangkan nilai K_i dan K_d yang terlalu besar memicu *overshoot*. Tabel I merangkum karakteristik dari sebagian variasi yang diuji.

TABEL I
RINGKASAN VARIASI PENALAN PID TRIAL AND ERROR

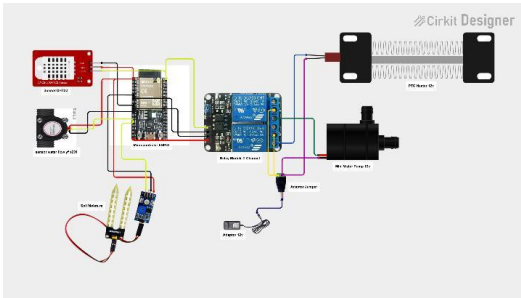
K_p ; K_i ; K_d	Karakteristik Respons	Catatan
1,0; 0,0; 0,0	Cepat, sedikit <i>overshoot</i> , mendatar di bawah target	Tanpa K_i , tidak capai target
0,5; 0,0; 0,5	Naik landai dan lambat	Gagal capai target
1,0; 0,2; 0,5	Naik perlahan, capai target ~detik ke-30	Kenaikan awal curam
0,3; 0,1; 1,5	Penurunan awal tipis, naik mulus, tidak keblabasan	Paling stabil — dipilih
0,3; 0,3; 1,5	Cepat sampai target, sempat <i>overshoot</i>	Kurang aman untuk sistem
0,1; 0,0; 0,5	Tenaga dorong sangat kecil, hampir tidak bergerak	Parameter terlalu kecil

Dari seluruh variasi yang diuji, kombinasi $K_p = 0,3$; $K_i = 0,1$; dan $K_d = 1,5$ dipilih karena menghasilkan kenaikan yang mulus tanpa lonjakan berlebih dan paling stabil secara fisik terhadap alat di lapangan, sejalan dengan karakteristik media tanam berupa tanah yang bersifat non-linear sehingga

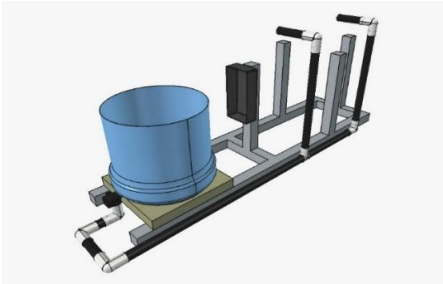
penyesuaian langsung lebih relevan dibandingkan metode analitis seperti Ziegler–Nichols.

E. Desain Elektrikal dan Mekanikal

Rangkaian elektrikal menghubungkan ESP32 dengan sensor DHT22, *soil moisture sensor*, *water flow sensor*, modul relay 2 channel, *mini water pump*, dan PTC heater, dengan catu daya diturunkan melalui modul step-down buck converter (Gambar 3). Struktur mekanikal menggunakan rangka besi hollow berukuran 90×25 cm yang menopang tangki penampung air, kotak kontrol elektronik, dan sistem perpipaan penyiraman (Gambar 4).



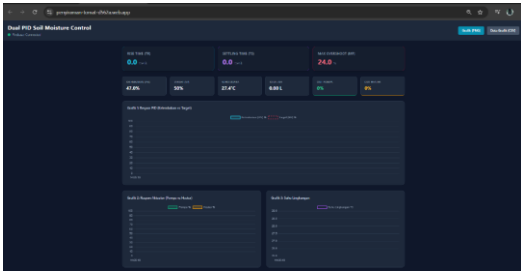
Gambar 3. Desain elektrikal sistem



Gambar 4. Desain mekanikal purwarupa

F. Desain IoT dan Monitoring

ESP32 mengirimkan data kelembaban tanah, suhu udara, volume air, serta PWM pompa dan heater ke basis data Firebase Realtime Database setiap 3 detik untuk pembaruan dasbor secara instan, dan setiap 1 menit untuk log historis. Dasbor web menampilkan nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, serta grafik kelembaban terhadap waktu secara *real-time* sehingga sistem dapat dipantau dan dievaluasi dari jarak jauh, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Tampilan dasbor monitoring IoT berbasis web

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

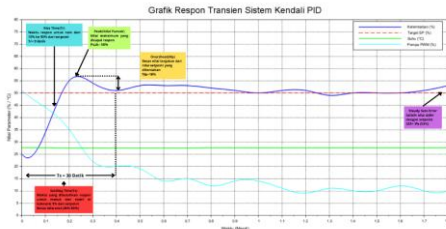
A. Akurasi Sensor

Pengujian menunjukkan sensor kelembaban tanah memiliki galat maksimum sebesar 7% pada kondisi basah dibandingkan alat ukur referensi, sedangkan sensor DHT22 menunjukkan selisih pembacaan suhu antara 1,1°C hingga

2°C. Tingkat akurasi ini dinilai memadai untuk kebutuhan kendali irigasi otomatis pada skala purwarupa..

B. Respon Transien Sistem Kendali PID

Gambar 6 memperlihatkan respons transien sistem selama pengujian dari menit ke-0 hingga 1,8. Kelembaban awal 25% naik dan melampaui *setpoint* hingga mencapai puncak 58% sebelum algoritma PID menurunkan daya pompa secara bertahap untuk mencegah kelebihan air.



Gambar 6. Grafik respon transien sistem kendali PID

TABEL II
CUPLIKAN DATA PENGUJIAN KELEMBABAN DAN SUHU

Waktu (menit)	Kelembaban (%)	Suhu (°C)	PWM Pompa (%)
0,0	25	27,6	51
0,2	58	27,5	35
0,5	54	27,5	19
1,0	50	27,6	14
1,4	50	27,6	10
1,8	53	27,6	10

Berdasarkan data pada Tabel II, kelembaban naik dari 25% pada menit ke-0 melampaui *setpoint* hingga puncak 58% pada menit ke-0,2 (*overshoot* $\approx 16\%$), kemudian daya pompa diturunkan secara bertahap oleh algoritma PID hingga kelembaban menetap pada kisaran 50–53% mulai menit ke-1,0.

TABEL III
RINGKASAN PARAMETER PERFORMANSI PID

Parameter	Nilai
Rise Time (Tr)	9 detik
Peak / Overshoot (Mp)	58% / 16%
Settling Time (Ts)	30 detik
Steady-State Error (SSE)	$\approx 3\%$

C. Pengaruh Parameter PID terhadap Karakteristik Sistem

Rise time yang relatif cepat (di bawah 9 detik) menunjukkan debit pompa cukup untuk menaikkan kelembaban secara instan begitu sinyal kendali diberikan. *Overshoot* yang muncul disebabkan oleh inersia sisa air pada selang setelah pompa dimatikan, bukan oleh kesalahan penalaan parameter, namun nilai puncaknya tidak menimbulkan kejenuhan lama pada media tanam sehingga tetap dikategorikan aman bagi akar tanaman. Komponen proporsional (K_p) berperan menentukan kecepatan respons awal sistem terhadap galat kelembaban; nilai K_p yang terlalu besar tanpa didukung K_i yang memadai justru membuat

sistem mandek di bawah target, sebagaimana teramati pada beberapa variasi tanpa unsur integral pada Tabel I.

Komponen integral (K_i) terbukti efektif menekan *steady-state error* hingga mendekati nol dengan cara mengakumulasi galat dari waktu ke waktu, sedangkan komponen derivatif (K_d) meredam osilasi dan mempercepat *settling time* dengan memperhitungkan laju perubahan galat. Kombinasi ketiganya pada nilai $K_p = 0,3$; $K_i = 0,1$; dan $K_d = 1,5$ menghasilkan keseimbangan terbaik antara kecepatan respons dan kestabilan, tanpa menimbulkan lonjakan yang membahayakan komponen mekanik seperti selang dan sambungan pipa. Secara keseluruhan sistem mencapai akurasi rata-rata di atas 93% dalam menjaga kelembaban pada rentang target selama periode pengujian.

D. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Tabel V membandingkan pendekatan kendali dan karakteristik utama sistem pada penelitian ini dengan beberapa penelitian irigasi otomatis sejenis. Dibandingkan dengan pendekatan ambang batas sederhana (on/off) pada [6] maupun logika fuzzy pada [10], kontrol PID pada penelitian ini memberikan respons pompa yang lebih presisi karena kecepatan pompa disesuaikan secara proporsional terhadap besar galat, bukan hanya menyalakan atau mematikan aktuatur secara biner.

TABEL V
PERBANDINGAN DENGAN PENELITIAN IRIGASI OTOMATIS TERDAHULU

Penelitian	Metode Kendali	Fitur Utama
[6]	Ambang batas (60–80%)	Monitoring IoT dasar
[10]	Logika fuzzy	ESP8266 + Blynk
[15]	PID + Bat Algorithm	Penalaan otomatis
Penelitian ini	PID (<i>trial and error</i>) dual aktuatur	Pompa + heater, cloud logging

Keunggulan lain dari sistem yang diusulkan adalah kombinasi dua aktuatur (pompa dan pemanas) yang memungkinkan sistem menangani baik kondisi tanah terlalu kering maupun terlalu basah dalam satu purwarupa, serta integrasi langsung dengan basis data cloud yang menyediakan riwayat data untuk analisis lebih lanjut, sebuah fitur yang tidak selalu tersedia pada penelitian pembanding.

E. Perbandingan dengan Penyiraman Manual

Sebagai pembanding, dilakukan pula penyiraman manual menggunakan gayung dan selang tanpa mempertimbangkan data sensor kelembaban. Hasilnya menunjukkan bahwa metode manual cenderung kurang akurat karena bergantung pada perkiraan operator, sehingga lebih sering menyebabkan kelebihan atau kekurangan air dan secara keseluruhan lebih boros dibandingkan sistem otomatis berbasis PID yang menyesuaikan volume air secara proporsional terhadap kebutuhan aktual tanaman.

F. Pengaruh Terhadap Pertumbuhan Tanaman

Efektivitas sistem juga dievaluasi melalui pengamatan pertumbuhan tanaman tomat selama tujuh minggu (3 Juni–26 Juli), sebagaimana dirangkum pada Tabel IV. Tinggi tanaman meningkat secara konsisten setiap minggunya, dari fase adaptasi awal hingga penebalan batang dan

perkembangan daun yang semakin baik, sejalan dengan kelembaban media yang terjaga stabil oleh sistem penyiraman otomatis.

TABEL IV
PERKEMBANGAN TINGGI TANAMAN TOMAT SELAMA
PENGAMATAN

Minggu	Tinggi (cm)	Catatan Pertumbuhan	Dokumentasi
ke-1	5–7	Fase adaptasi awal	
ke-2	10–13	Pertumbuhan mulai aktif	
ke-3	15–20	Kenaikan tinggi signifikan	
ke-4	20–25	Fokus daun & percabangan	
ke-5	25–30	Penebalan batang signifikan	
ke-6/7	35–42	Batang & daun tumbuh baik	

Laju pertambahan tinggi paling cepat terjadi pada minggu kedua hingga ketiga, kemudian melambat pada minggu-minggu berikutnya seiring pergeseran energi tanaman ke pembentukan daun dan penebalan batang — pola yang konsisten dengan kondisi kelembaban tanah yang terjaga stabil sepanjang periode pengamatan.

IV. KESIMPULAN

Sistem penyiraman otomatis berbasis IoT dan kontrol PID yang dirancang pada penelitian ini berhasil menjaga kelembaban tanah pada rentang target dengan akurasi rata-rata di atas 93%. Sistem memiliki *rise time* rata-rata di bawah 9 detik, *settling time* 30 detik, *overshoot* sekitar 16%, dan *steady-state error* sekitar 3%. Parameter PID $K_p = 0,3$; $K_i = 0,1$; dan $K_d = 1,5$ terbukti menghasilkan respons yang paling stabil dan aman bagi purwarupa. Integrasi dengan Firebase memungkinkan seluruh parameter sensor dan status aktuator terpantau secara *real-time* melalui dasbor web. Dibandingkan penyiraman manual, sistem otomatis ini lebih efisien dalam penggunaan air dan lebih konsisten menjaga kelembaban, yang tercermin dari pertumbuhan tanaman tomat yang stabil

selama tujuh minggu pengamatan. Pengembangan selanjutnya disarankan mencakup penalaan ulang parameter derivatif, penggunaan selang tetes untuk mengurangi *overshoot* akibat inersia air, serta pengujian pada berbagai jenis media tanam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Raxbaroy, "Optimizing irrigation and soil moisture management in Uzbekistan's agricultural sector through modern technologies," *American Journal of Applied Science and Technology*, vol. 4, no. 10, pp. 26-28, Oct. 2024.
- [2] L. Garcia et al., "Deployment strategies of soil monitoring WSN for precision agriculture irrigation scheduling in rural areas," *Sensors*, vol. 21, no. 5, pp. 1-30, Mar. 2021.
- [3] F. Kamaruddin et al., "IoT-based intelligent irrigation management and monitoring system using Arduino," *TELKOMNIKA*, vol. 17, no. 5, pp. 2378-2388, Oct. 2019.
- [4] V. Paradkar et al., "Improving yield of tomatoes grown in greenhouses using IoT based nutrient management system," *Int. J. Environ. Clim. Change*, vol. 13, no. 10, pp. 2349-2365, 2023.
- [5] V. Ramachandran et al., "Exploiting IoT and its enabled technologies for irrigation needs in agriculture," *Water*, vol. 14, no. 5, 719, 2022.
- [6] Zulhijayanto and A. Fadlil, "Desain sistem monitoring dan penyiraman tanaman tomat berbasis Internet of Things (IoT)," *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, vol. 4, no. 2, pp. 94-104, Dec. 2022.
- [7] A. Mustopa, A. Sujada, and I. L. Kharisma, "Pengembangan sistem irigasi tetes non circulation menggunakan IoT dan analisis big data," *Smart Comp*, vol. 13, no. 1, 2024.
- [8] I. G. E. Darmawan, E. Yadie, and H. Subagyo, "Rancang bangun alat ukur kelembaban tanah berbasis Arduino Uno," *PoliGrid*, vol. 1, no. 1, p. 31, Jun. 2020.
- [9] S. R. Pratama and D. N. K. Hardani, "Rancang bangun sistem monitoring kelembaban dan suhu tanah untuk tanaman bawang merah di Kabupaten Brebes," *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, vol. 3, no. 2, Dec. 2021.
- [10] R. Alamsyah, E. Ryansyah, A. Y. Permana, and R. Mufidah, "Sistem penyiraman tanaman otomatis menggunakan logika fuzzy dengan teknologi Internet of Things berbasis ESP8266 dan aplikasi Blynk," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 2, 2024.
- [11] R. Ginanjar, R. Candra, and S. B. Kembaren, "Kendali dan pemantauan kelembaban tanah, suhu ruangan, cahaya untuk tanaman tomat," *Jurnal Ilmiah Informatika Komputer*, vol. 23, no. 3, pp. 166-174, Dec. 2018.
- [12] G. O. Nkansah et al., "Influence of topping and spacing on growth, yield, and fruit quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse condition," *Front. Sustain. Food Syst.*, vol. 5, Dec. 2021.
- [13] X. K. Yuan, Z. Q. Yang, Y. X. Li, Q. Liu, and W. Han, "Effects of different levels of water stress on leaf photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of greenhouse tomato," *Photosynthetica*, vol. 54, no. 1, pp. 28-39, Mar. 2016.
- [14] H. Ata, N. Papuangan, and B. Bahtiar, "Identifikasi cendawan patogen pada tanaman tomat (*Solanum lycopersicum* L.)," *Jurnal Bioedukasi*, vol. 4, no. 2, Oct. 2016.
- [15] M. H. Al Isbilly, M. Siswanto, and M. Ali, "Optimasi PID controller pada sistem pengaturan irigasi menggunakan metode Bat Algorithm," *Jurnal JEETech*, vol. 3, no. 2, pp. 78-83, Oct. 2022.
- [16] R. Jalaludin and D. Laksmiati, "Perancangan sistem kendali irigasi otomatis dan pengusir hama burung dengan menggunakan sensor PIR," *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro*,

Sipil dan Teknik Informasi, vol. 6, no. 2, pp. 122-134, Sep. 2023.

- [17] A. Noerifanza, "Analisa kelayakan modul ESP32 sebagai kamera untuk pengenalan objek sehari-hari," *Journal of Computer Electronic and Telecommunications*, vol. 3, no. 2, Dec. 2022.
- [18] J. F. Canja et al., "Statistical characterization of a capacitive soil moisture probe, integrated into the water balance system in agriculture in a semi-arid region," *Ambiente e Agua*, vol. 20, pp. 1-19, Mar. 2025.
- [19] L. Galezewski et al., "Analysis of the need for soil moisture, salinity and temperature sensing in agriculture: a case study in Poland," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021.
- [20] H. Satria, R. T. Gulo, V. Sihombing, M. Idris, and M. Mingkin, "Pemanfaatan PV dengan rancangan kendali otomatis dalam pengatur sistem irigasi tetes pada budidaya sayuran pakcoy," *Elemen: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 40-47, Aug. 2022.