

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi  
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional  
DOI: 10.22146/jnteti.v14i1.13032

# Rancang Bangun Sistem Hidroponik Otomatis Berbasis *Internet of Things*

Isyara Khairani<sup>1</sup>, Kiki Prawiroredjo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti, Jakarta Barat, DKI Jakarta 11440, Indonesia

[Diserahkan: 19 Juli 2024, Direvisi: 24 Oktober 2024, Diterima: 10 Januari 2025]  
Penulis Korespondensi: Kiki Prawiroredjo (email: kiki.prawiroredjo@trisakti.ac.id)

**INTISARI** — Seiring dengan peningkatan jumlah penduduk, kebutuhan pangan, termasuk sayuran dan buah-buahan makin meningkat. Namun, lahan pertanian makin terbatas akibat alih fungsi lahan. Menurunnya lahan sektor pertanian dapat mengancam ketahanan pangan nasional. Budidaya tanaman dengan sistem hidroponik merupakan salah satu upaya adaptasi terhadap keterbatasan lahan, penurunan kualitas lahan, dan dampak buruk perubahan iklim global. Sayangnya, budidaya hidroponik memerlukan perhatian yang kontinu terhadap nutrisi tanaman. Penelitian ini bertujuan membuat sebuah sistem hidroponik dengan sistem kendali otomatis pada proses pengaturan nutrisinya, mulai dari waktu penanaman sampai dengan waktu panen, sehingga mengefisienkan waktu dan tenaga penanam. Teknologi *internet of things* (IoT) memungkinkan budidaya hidroponik dilakukan secara otomatis dalam memantau umur tanaman, suhu, kelembapan, ketinggian air di reservoir, *total dissolved solids* (TDS), dan pH larutan nutrisi, serta pemantauan visual tanaman melalui aplikasi Android. Sistem hidroponik yang dibudidayakan adalah jenis *nutrient film technique* dengan jenis tanaman selada. Sistem dibuat menggunakan sensor DFRobot Analog Total Dissolved Solids untuk mengukur TDS pada larutan nutrisi, DFRobot Analog pH untuk mengukur pH larutan nutrisi, sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mengukur ketinggian air di reservoir, sensor suhu dan kelembapan ruangan DHT11, mikrokontroler ESP32, serta ESP32-CAM untuk memantau pertumbuhan tanaman secara visual dari jarak jauh. Berdasarkan hasil pengujian sistem selama 36 hari, diketahui bahwa TDS rata-rata adalah sekitar 600 ppm di minggu pertama hingga 900 ppm di minggu kelima; pH rata-rata adalah 6,19; dan ketinggian air rata-rata di reservoir adalah 20,89 cm. Semua parameter hasil pengujian berada pada jangkauan nilai yang dirancang.

**KATA KUNCI** — Hidroponik, *Internet of Things*, *Total Dissolved Solids*, Sistem Kendali Otomatis, *Nutrient Film Technique*.

## I. PENDAHULUAN

Seiring dengan terus bertambahnya populasi, kebutuhan manusia akan makanan juga terus meningkat. Namun, pertumbuhan lahan pertanian tidak mengikuti laju yang sama. Konsentrasi kawasan perkotaan di sektor industri mengganggu pertanian di Indonesia akibat alih fungsi lahan pertanian menjadi lahan industri, pariwisata, maupun perumahan. Petani beralih menjadi buruh pabrik, pedagang, dan mengembangkan usaha lainnya untuk memenuhi kebutuhan hidup [1]. Salah satu upaya untuk beradaptasi dengan keterbatasan lahan adalah dengan budi daya tanaman menggunakan sistem hidroponik.

Selain membutuhkan lahan yang terbatas, sistem hidroponik dapat menjaga kualitas lahan dan mengantisipasi dampak buruk perubahan iklim global. Nutrisi yang selalu tersedia secara konsisten memungkinkan sistem hidroponik meningkatkan pertumbuhan tanaman hingga 50% lebih cepat daripada menanam di atas tanah. Metode ini juga memberikan hasil yang lebih tinggi daripada metode konvensional [2].

Dalam rangka mewujudkan ketahanan pangan yang baik di masa mendatang, dengan jumlah penduduk yang makin bertambah, sedangkan lahan pertanian makin berkurang, diharapkan masyarakat dapat turut berpartisipasi menyediakan pangan secara mandiri dengan melakukan budidaya menanam sayur-sayuran dan buah-buahan. Melalui sistem hidroponik, masyarakat dapat turut berperan serta menyediakan pangan secara mandiri. Namun, sistem hidroponik membutuhkan ketekunan dan pengabdian dibandingkan dengan pertanian konvensional. Penanam harus mengamati tanaman setiap hari karena reaksi tanaman yang sangat cepat terhadap nutrisi yang baik maupun buruk [2]. Pemantauan ini harus dilakukan secara manual, yang dapat memakan waktu, mudah menyebabkan kesalahan, dan tidak terdeteksinya perubahan secara cepat [3].

Kelemahan-kelemahan ini dapat membatasi mobilitas dan fleksibilitas pembudi daya.

Melalui sistem hidroponik yang bersifat otomatis, masyarakat, khususnya di perkotaan, dapat menghemat waktu dan sumber daya, sehingga pertumbuhan tanaman menjadi optimal karena nutrisi dan kondisi lingkungan dapat diatur sesuai kebutuhan jenis tanaman. Risiko kesalahan pemberian nutrisi dapat dihindari karena dilakukan secara otomatis melalui sistem yang terprogram. Penggunaan air dan nutrisi juga dapat diatur sesuai kebutuhan, sehingga menghindari pemborosan. Dari budidaya sistem hidroponik otomatis akan didapat produksi hasil pertanian yang lebih banyak dan kualitas yang lebih baik. Sistem bekerja dengan stabil tanpa menggunakan pestisida, sehingga hasil produksi tanaman lebih aman dikonsumsi.

Di sisi lain, sistem hidroponik otomatis juga memiliki kekurangan, yaitu ketergantungannya pada teknologi modern. Kerusakan teknis, kegagalan jaringan, maupun pemadaman listrik dapat menyebabkan sistem tidak bekerja. Ketergantungan terhadap teknologi modern juga menyebabkan modal awal pembuatan sistem cukup besar.

Selada adalah salah satu tanaman yang paling banyak dibudidayakan menggunakan sistem hidroponik. Alasannya adalah masa panen yang singkat, yaitu sekitar 40 hingga 45 hari, dan budidayanya yang mudah. Selain itu, nilai jual selada juga relatif stabil. Nilai ekonomis selada sangat tinggi, mengikuti kubis krop, kubis bunga, dan brokoli [4].

Penelitian terdahulu tentang budidaya hidroponik otomatis telah dilakukan. Sebuah penelitian membuat sistem pemantau pH, *total dissolved solids* (TDS), suhu udara, dan volume air, kemudian menampilkan data-data tersebut dalam bentuk angka dan grafik pada platform Online Value of Realtime Data

(OVORD) [5]. Sistem ini dilengkapi kendali otomatis untuk kondisi pH dan TDS pada larutan. Penelitian lain membuat sebuah sistem pemantau ketinggian air, suhu, kelembapan udara, kelembapan tanah, dan nilai pH pada larutan nutrisi tanaman hidroponik yang ditampilkan pada aplikasi *internet of things* (IoT) *message queueing telemetry transport* (MQTT) [6]. Sistem ini dilengkapi kendali otomatis terhadap nilai pH larutan, sedangkan nilai TDS diukur secara manual.

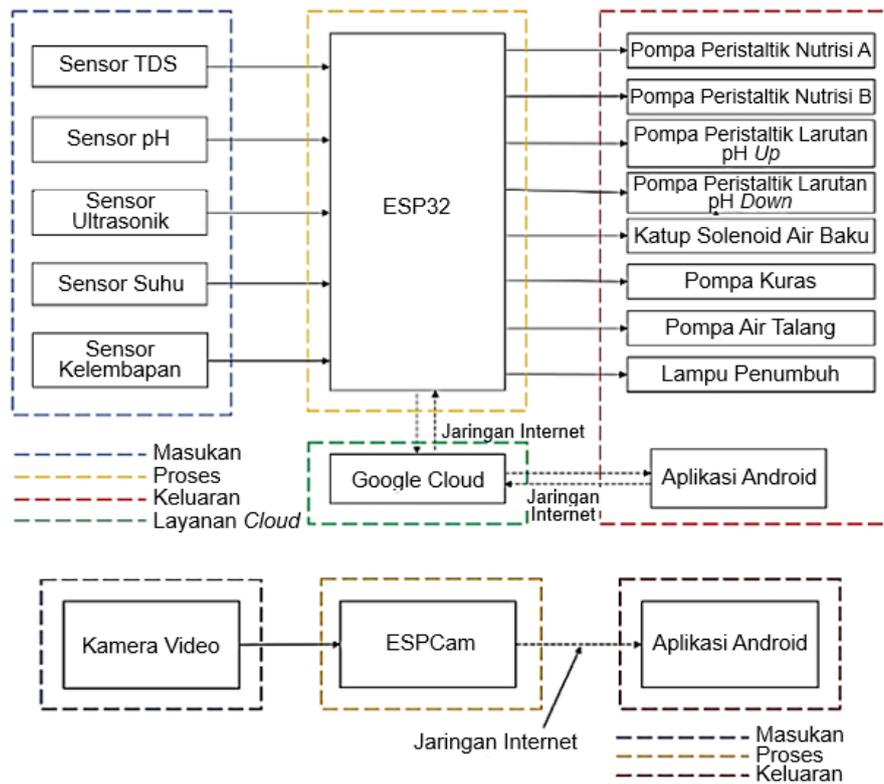
Sebuah penelitian membuat sistem kendali otomatis untuk menjaga nilai kepekatan nutrisi (TDS) yang terhubung dengan basis data dan akan ditampilkan pada *liquid crystal display* (LCD) serta *dashboard* web [7]. Pada penelitian ini tidak dilakukan pengendalian pH. Sementara itu, pada [8] dibuat sebuah sistem hidroponik berbasis IoT yang berfungsi untuk mengukur dan mengatur pemberian nutrisi dan jumlah air yang disematkan pada aplikasi Blynk. Pada penelitian ini tidak terdapat sistem pengendalian pH dan pemberian Nutrisi AB Mix hanya berdasarkan perbandingan volume air pada wadah nutrisi, sehingga tidak didapatkan nilai TDS yang akurat. Penelitian berikutnya membandingkan manfaat dari pertanian pintar yang menggunakan sistem hidroponik berbasis IoT dengan pertanian hidroponik konvensional, menggunakan kubis Cina [9]. Tujuan utama penelitian ini adalah mengotomatiskan pemantauan lingkungan, pengaturan tingkat pH, dan pemeliharaan konduktivitas listrik yang setara dengan nilai TDS melalui antarmuka ponsel atau komputer untuk penyesuaian larutan nutrisi dan asam-basa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai parameter-parameter yang penting pada tanaman, yaitu berat tanaman, tinggi tanaman, besar/luas daun, dan jumlah klorofil. Penelitian menekankan kemampuan teknologi IoT dalam meningkatkan produktivitas dan kualitas pertanian hidroponik.

Penelitian lain telah mengembangkan sistem hidroponik jenis *nutrient film technique* (NFT) yang dapat mengendalikan nutrisi (TDS) dan pH larutan serta membuat sistem untuk memantau suhu dan kecepatan aliran larutan pada sistem hidroponik [10]. Sistem yang dikembangkan ini dapat mengendalikan nutrisi dan pH larutan, tetapi nilai nutrisi yang dikendalikan selalu konstan, tidak mengikuti umur tanaman. Sistem tidak mengendalikan tinggi air pada reservoir, yang dapat menyebabkan permukaan air pada reservoir turun karena adanya penguapan, sehingga dapat menurunkan kecepatan aliran larutan pada sistem. Selanjutnya, pada [11] telah dikembangkan sebuah sistem hidroponik jenis NFT yang dapat mengendalikan pH larutan nutrisi ke sistem dan mengendalikan aliran larutan dengan menggunakan prinsip gravitasi. Namun, sistem ini tidak mengendalikan TDS dalam larutan. Kelebihan sistem yang dibuat adalah dapat menghemat penggunaan energi listrik karena pompa air tidak terus-menerus menyala untuk mengalirkan larutan nutrisi. Referensi [12] mengembangkan sistem hidroponik jenis NFT yang memantau kondisi lingkungan, yaitu suhu, kelembapan udara, dan intensitas cahaya, serta memantau parameter larutan nutrisi, yaitu pH dan TDS. Namun, sistem ini belum selesai dikembangkan untuk mengendalikan parameter-parameter tersebut. Sistem telah dibangun berdasarkan platform IoT yang digunakan sebagai *gateway* untuk mengirim data dari sensor melalui komunikasi ZigBee. Penelitian [13] mengembangkan sistem hidroponik jenis NFT yang memantau suhu, kelembapan lingkungan, pH, dan konduktivitas listrik yang sebanding dengan TDS dari larutan nutrisi. Sistem menggunakan mikrokontroler Node-MCU untuk menerima data dari sensor dan mengendalikan kerja pompa, katup, dan dispenser. Sistem ini tidak dapat mengendalikan pH maupun

konduktivitas listrik dan data hanya dipantau melalui aplikasi *mobile* menggunakan protokol MQTT.

Pada [14] dijelaskan sebuah sistem hidroponik jenis NFT yang diimplementasikan di dalam ruangan untuk daerah gurun yang beriklim kering. Sistem dibudidayakan di dalam ruangan dengan menggunakan *air conditioner* (AC) untuk mengatur suhu ruangan serta menggunakan cahaya lampu sebagai pengganti cahaya matahari. Sistem dapat mengendalikan suhu, pH, konduktivitas listrik atau TDS, ketinggian air pada reservoir, dan mendeteksi ada aliran larutan atau tidak. Pada sistem ini, nilai kadar TDS selalu konstan, tidak diatur sesuai usia tanaman. Selain itu, sistem tidak dilengkapi kamera untuk memantau tanaman. Penelitian lainnya membuat sebuah sistem hidroponik pintar berbasis web dengan IoT di daerah Bireun [15]. Sistem hidroponik yang digunakan adalah jenis NFT dengan parameter cahaya, pH, dan TDS yang dikendalikan oleh mikrokontroler NodeMCU. Sistem yang dibuat dapat mengendalikan pompa air, pompa nutrisi, cahaya, dan kipas sebagai aktuator. Sistem hidroponik ini tidak memantau pertumbuhan tanaman melalui kamera.

Penelitian selanjutnya menanam kangkung menggunakan sistem hidroponik yang dapat mengendalikan TDS larutan dengan nilai yang meningkat sesuai usia tanaman [16]. Sistem juga mengendalikan suhu dan kelembapan ruangan dengan menggunakan kipas angin. Data dari sensor ditampilkan pada sebuah LCD dan ponsel melalui aplikasi Blynk dengan teknologi IoT. Pada sistem ini tidak ada notifikasi apabila waktu panen sudah tiba dan tidak ada sistem pemantauan pertumbuhan tanaman melalui kamera. Referensi [17] mengembangkan sebuah sistem hidroponik di dalam ruangan yang dapat mengendalikan suhu, kelembapan, pH, dan TDS larutan nutrisi dari sistem tersebut. Sistem menggunakan pompa sebagai aktuator untuk mengendalikan nilai larutan nutrisi. Raspberry Pi digunakan untuk mendistribusikan data dari sensor ke pengguna sistem. Pengguna dapat memantau kondisi lingkungan dari sistem melalui *web browser* pada ponsel atau laptop. Referensi [18] mengembangkan sebuah sistem hidroponik yang dapat mengendalikan parameter pH, TDS, dan suhu air dengan menggunakan sensor berbasis IoT. Untuk mengaktifkan kerja aktuator, digunakan algoritma *k-nearest neighbor* (KNN). Pada penelitian ini diperbaiki kerja aktuator yang bersamaan waktu dari penelitian sebelumnya, dengan memberikan interval dan lebar waktu tertentu untuk mencapai kondisi nutrisi yang ideal. Sistem ini menekankan penggunaan nilai parameter pH, TDS, dan suhu yang ideal pada tanaman. Pada sistem tidak ada pemantauan melalui kamera untuk melihat pertumbuhan tanaman. Penelitian lain mengembangkan dua sistem hidroponik, yaitu jenis NFT yang menyirkulasikan larutan nutrisi; dan jenis hidroponik yang tidak menyirkulasikan larutan, yaitu jenis sistem irigasi tetes atau sistem fertigasi [19]. Sistem NFT memantau suhu larutan, suhu dan kelembapan lingkungan tempat tanaman, intensitas cahaya, dan nilai konduktivitas listrik pada tangki pencampur. Sistem hanya mengendalikan konduktivitas listrik atau setara dengan mengatur TDS dan tidak mengendalikan nilai pH. Sistem juga menggunakan IoT untuk terhubung ke ponsel, sehingga dapat melakukan pemantauan dari jarak jauh. Namun, penelitian tersebut tidak menjelaskan tentang aplikasi pada ponsel. Pada [20] dikembangkan sebuah sistem hidroponik vertikal yang dapat mengendalikan TDS, pH, suhu, dan intensitas cahaya. Sistem berbasis IoT ini menggunakan Firebase untuk menyimpan data dari sensor melalui ESP32. Sistem dapat mengatur TDS sesuai usia tanaman serta



Gambar 1. Diagram blok sistem hidroponik dan ESPCam.

mengatur suhu dan intensitas cahaya, baik secara otomatis maupun manual, melalui ponsel.

Dari penelitian-penelitian terdahulu, tidak semua sistem dapat mengendalikan kondisi nutrisi TDS dan pH di dalam talang [5]–[20]. Beberapa penelitian tidak mengatur kondisi pH larutan nutrisi [7], [8], [16], [19], dan ada satu penelitian yang tidak mengatur kondisi TDS [11]. Penelitian [6] mengatur TDS secara manual, sedangkan dua penelitian lainnya menggunakan nilai TDS yang konstan sepanjang usia tanaman [10], [14]. Ada tiga penelitian yang mendeteksi keberadaan aliran air pada talang [7], [10], [11]. Kelebihan penelitian [11] adalah menggunakan gravitasi untuk mengalirkan air ke talang, sehingga pompa air tidak harus selalu menyala. Semua sistem pada penelitian terdahulu dilengkapi dengan sistem pemantauan, baik menggunakan LCD maupun melalui ponsel. Namun, hanya satu penelitian yang menggunakan kamera untuk merekam pertumbuhan tanaman, sehingga pemantauan dapat dilakukan dari jarak jauh [9]. Dari penelitian-penelitian tersebut belum ada penelitian yang memberikan notifikasi saat panen dan belum ada yang mengembangkan sistem untuk menguras air di reservoir setelah panen. Keunggulan penelitian ini terletak pada pemilihan sumber daya, termasuk *framework* yang digunakan, infrastruktur IoT, dan aplikasi Android yang dibangun secara mandiri. Hal tersebut membuat penelitian ini siap untuk dikembangkan dalam skala besar.

Pemrograman *firmware* dalam penelitian ini menggunakan Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF) yang ditulis dalam bahasa C, memungkinkan *low-level control* dengan memberikan akses langsung ke perangkat keras dan antarmuka ESP32. Selain itu, ESP-IDF mendukung *real-time operating system* (RTOS) yang dibangun di atas FreeRTOS, memungkinkan pembuatan aplikasi *multitasking*, yaitu beberapa proses (*task*) berjalan secara bersamaan. Sebagai pembanding, Arduino IDE dapat menyederhanakan banyak

detail perangkat keras untuk memudahkan pengodean, tetapi membatasi kontrol terhadap operasi yang kompleks. Arduino IDE juga tidak memberikan dukungan RTOS secara eksplisit, sehingga *multitasking* lebih sulit diatur. Selain itu, sketsa Arduino dirancang untuk berjalan dalam satu *loop*.

Infrastruktur IoT dalam penelitian ini menggunakan Google IoT Core yang lebih cocok untuk implementasi IoT skala besar dengan skalabilitas, keamanan, dan kinerja menjadi prioritas. Sementara itu, layanan seperti Blynk lebih sesuai untuk proyek-proyek kecil yang hanya memerlukan *dashboard* sederhana, kendali, dan visualisasi data *real-time* tanpa kebutuhan layanan *back-end* yang rumit.

Karena alasan tersebut, pada penelitian ini dirancang sebuah sistem budidaya hidroponik jenis NFT yang dapat mengendalikan secara otomatis kondisi nutrisi di talang air, yaitu TDS, pH, ketinggian air dalam reservoir sejak masa tanam sampai waktu panen, notifikasi saat mulai panen, dan dapat menguras air di reservoir melalui sistem penguras reservoir saat sudah panen [12], [13]. Melalui IoT, sistem ini dapat memantau TDS, pH, ketinggian air, suhu, dan kelembapan. Selain itu, menggunakan ESP Camera, sistem dapat memantau langsung kondisi tanaman secara jarak jauh melalui ponsel [14], [15].

## II. PERANCANGAN SISTEM

### A. PERANCANGAN DIAGRAM BLOK SISTEM

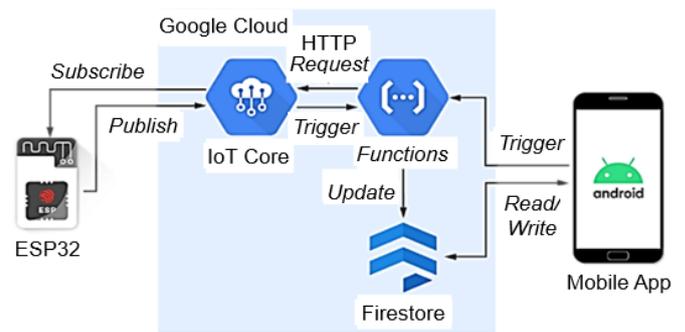
Gambar 1 memperlihatkan diagram blok sistem kendali hidroponik otomatis yang terbagi dalam empat bagian, yaitu masukan, proses, keluaran, dan layanan *cloud*. Pada bagian masukan, terdapat empat buah sensor yang masing-masing memiliki peran penting dalam operasional sistem hidroponik otomatis. Sensor TDS dari *board* sensor TDS DFRobot mengukur jumlah partikel terlarut di dalam larutan nutrisi untuk membantu mengatur konsentrasi nutrisi yang dibutuhkan tanaman untuk mendukung pertumbuhannya.

Sensor pH dengan *board* sensor pH model DFRobot [16] berfungsi untuk mengukur derajat keasaman dari larutan nutrisi. Sensor TDS dan pH dari DFRobot digunakan dalam sistem ini karena sensor tersebut sudah dikemas untuk pengukuran di dalam air. Modul sensor tersebut mempunyai rangkaian isolasi untuk melindungi mikrokontroler dari derau, kompatibel dengan mikrokontroler ESP32, menggunakan daya yang rendah, dan bentuknya ringkas. Sensor ultrasonik HC-SR04 mengukur ketinggian air di dalam reservoir agar kestabilan level air terjaga. Sensor ultrasonik HC-SR04 dipilih karena jangkauan yang dapat diukur cukup luas, yaitu dari 2 cm sampai dengan 400 cm, dengan tingkat kesalahan sekitar 3 mm, sehingga cocok untuk ukuran tangki air pada sistem hidroponik yang dibuat. Sensor suhu dan kelembapan DHT11 mengukur suhu dan kelembapan udara di tempat budidaya hidroponik [17], [18]. Sensor ini digunakan karena mempunyai jangkauan kerja suhu dari 0 °C sampai dengan 50 °C dengan akurasi  $\pm 1$  °C, yang berada dalam jangkauan suhu ruangan di tempat sistem hidroponik berada, yaitu 26 °C. Jangkauan kelembapan udara yang dapat diukur dengan DHT11 adalah dari 20% sampai dengan 90%, dengan akurasi  $\pm 1\%$ , yang masuk dalam jangkauan kelembapan udara di ruangan.

Pada bagian proses terdapat mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pengendali kerja seluruh sistem yang menerjemahkan masukan dari sensor dan menghasilkan sinyal keluaran untuk menggerakkan aktuator [19], [20]. ESP32-DevKit dipilih karena dilengkapi dengan Wi-Fi serta memiliki *pin* GPIO dalam jumlah besar, sehingga dapat dihubungkan dengan berbagai sensor eksternal dan aktuator, serta cocok untuk aplikasi yang membutuhkan penggunaan baterai dan komunikasi nirkabel.

Pada bagian keluaran terdapat beberapa pompa peristaltik. Pompa peristaltik Nutrisi A berfungsi untuk memompa Nutrisi A ke dalam reservoir, pompa peristaltik Nutrisi B berfungsi memompa Nutrisi B ke dalam reservoir, pompa peristaltik larutan pH *up* berfungsi memompa larutan yang dapat menaikkan pH larutan nutrisi dalam reservoir, sedangkan pompa peristaltik pH *down* berfungsi untuk memompa larutan yang dapat menurunkan pH larutan nutrisi dalam reservoir. Pompa peristaltik dipilih karena umum digunakan sebagai pompa dosis yang mampu mengalirkan larutan dalam jumlah konsisten pada rentang waktu yang terukur. Dalam penelitian ini, pompa peristaltik diuji selama 4 jam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pompa dapat secara konsisten memompakan 75 ml larutan setiap menit. Katup solenoid air baku adalah katup yang berfungsi untuk membuka atau menutup aliran air baku ke dalam reservoir, sedangkan pompa kuras berfungsi untuk memompa larutan nutrisi dari dalam reservoir ke pembuangan ketika perintah panen telah diterima. Pompa air talang memiliki dua keluaran, yang berfungsi untuk mengalirkan larutan nutrisi dari dalam reservoir ke talang-talang tanaman dan mengalirkan air di dalam reservoir sebagai pengaduk larutan nutrisi secara terus-menerus selama 24 jam. Lampu penumbuh diatur dengan *timer* sebagai sumber cahaya buatan untuk tanaman hidroponik. Sementara itu, aplikasi Android digunakan sebagai antarmuka untuk menampilkan informasi nilai pembacaan sensor-sensor, jumlah hari tanam, video *live-streaming*, dan perintah kuras.

Pada sistem video *live-streaming*, bagian masukan berupa video dari kamera yang digunakan untuk memantau keadaan atau pertumbuhan tanaman pada sistem hidroponik. Bagian proses menggunakan modul ESPCam yang menangkap rekaman video dan memproses data tersebut untuk ditampilkan



Gambar 2. Diagram blok layanan cloud.

secara langsung di aplikasi Android. Bagian keluaran merupakan aplikasi Android yang berfungsi sebagai antarmuka untuk menampilkan video *live-streaming*, sehingga pengguna dapat melihat pertumbuhan dan kondisi tanaman secara *real-time*.

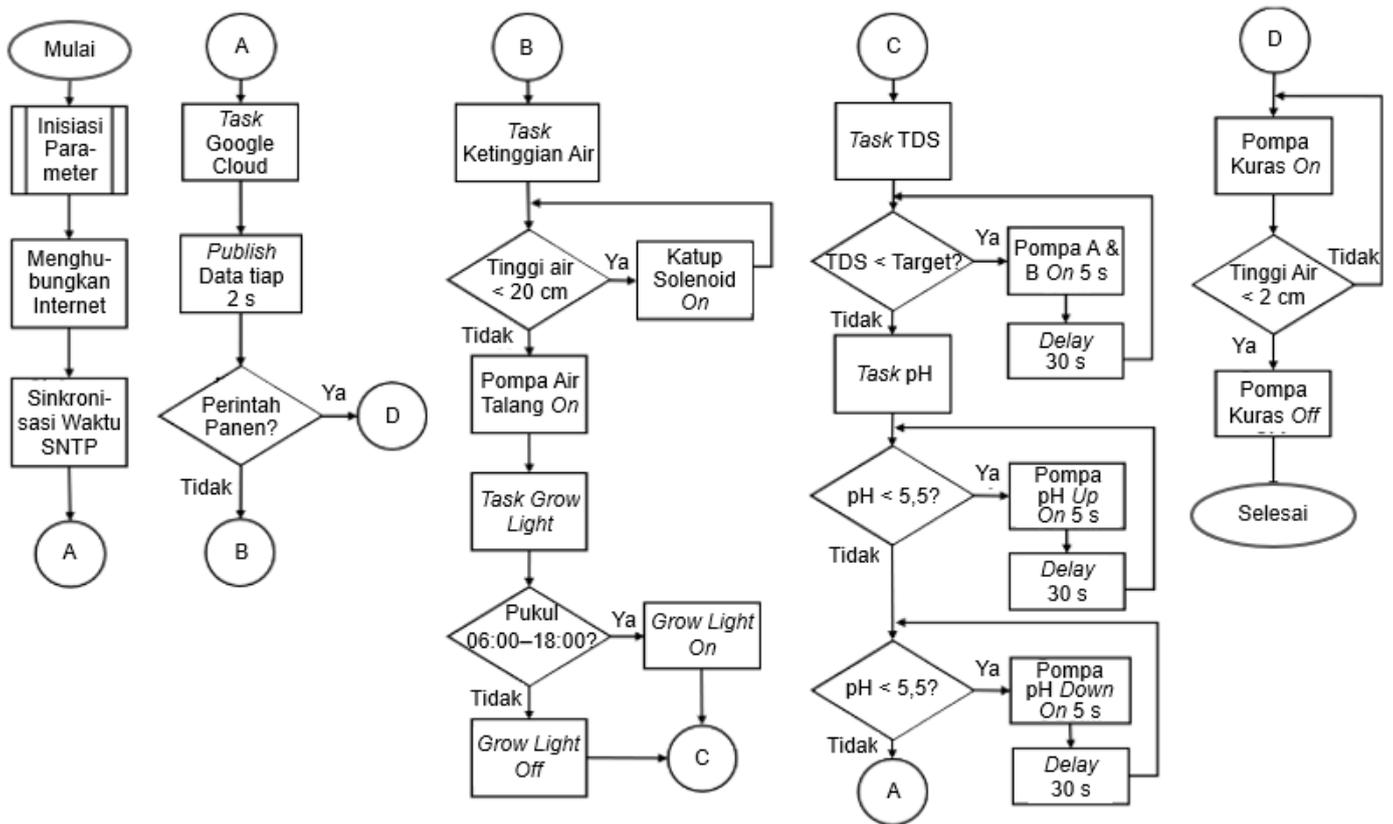
Layanan *cloud* dari Google Cloud digunakan untuk membangun infrastruktur IoT pada sistem kendali hidroponik otomatis. Pada Gambar 2 diperlihatkan diagram blok layanan *cloud*. Mikrokontroler ESP32 dihubungkan dengan *cloud* IoT Core menggunakan protokol MQTT agar dapat berkomunikasi melalui internet. MQTT menggunakan model komunikasi *publish-subscribe*, yaitu ESP32 berperan sebagai *publisher* untuk mengirim pesan ke topik tertentu di IoT Core dan *subscriber* untuk menerima pesan dari topik yang diikuti. Layanan basis data Cloud Firestore digunakan untuk menyimpan data pembacaan sensor secara *real-time* untuk ditampilkan pada aplikasi Android. Data ini disimpan dalam bentuk dokumen NoSQL yang diperbarui setiap ESP32 mengirim hasil pembacaan sensor.

## B. DESAIN SISTEM DAN PERANGKAT LUNAK

Perancangan perangkat lunak *firmware* pada penelitian ini menggunakan Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF). ESP-IDF dibangun di atas FreeRTOS yang memungkinkan beberapa tugas berjalan secara bersamaan. Penjadwal dapat mendahului tugas yang sedang berjalan untuk beralih ke tugas dengan prioritas lebih tinggi, memastikan bahwa operasi penting ditangani tepat waktu. Meskipun beberapa variabel bersifat dependen terhadap variabel lainnya, ada beberapa proses dalam program yang ditulis secara paralel dan diberi prioritas, sehingga penentuan tugas berjalan sepenuhnya dijalankan oleh penjadwal. Diagram alir sistem diperlihatkan pada Gambar 3.

Ketika sistem mulai bekerja, inisialisasi parameter, seperti ketinggian air, nilai TDS, nilai pH, waktu pencahayaan lampu, dan aktivasi tombol panen, dimuat dengan nilai *default* yang telah diprogram, yang diatur sesuai Tabel I. Setelah inisialisasi parameter, sistem hidroponik otomatis menunggu disambungkan dengan internet, kemudian menyinkronkan waktu internal pada sistem dengan server Simple Network Time Protocol (SNTP) dari Google. Parameter ketinggian air, nilai pH, dan waktu lampu menyala diatur untuk tetap konsisten sepanjang periode tanam, sedangkan nilai TDS akan berfluktuasi sesuai dengan usia tanaman, menyesuaikan nutrisi yang dibutuhkan pada setiap tahap pertumbuhannya. Toleransi untuk TDS adalah  $\pm 50$  ppm, yang artinya nilai TDS dianggap rendah jika lebih kecil dari nilai inisiasi TDS -50 dan dianggap tinggi jika lebih besar dari nilai inisiasi TDS +50.

Pada *task* Google Cloud (bagian A pada Gambar 3), sistem akan mengirim data setiap 2 s dan memeriksa ada perintah



Gambar 3. Diagram alir sistem.

TABEL I  
PARAMETER TANAMAN HIDROPONIK

Minggu ke-	Ketinggian Air (cm)	TDS	pH	Waktu Lampu Menyala	Tombol Panen
1	20	600	5,5–6,5	06:00–18:00	Tidak ada
2	20	700	5,5–6,5	06:00–18:00	Tidak ada
3	20	800	5,5–6,5	06:00–18:00	Tidak ada
4	20	900	5,5–6,5	06:00–18:00	Tidak ada
5	20	900	5,5–6,5	06:00–18:00	Ada
6	20	900	5,5–6,5	06:00–18:00	Ada

panen atau tidak. Jika perintah panen tidak ada, sistem akan melakukan tugas berikutnya.

Task ketinggian air (bagian B pada Gambar 3) diawali dengan sistem membaca ketinggian air pada reservoir. Jika ketinggian air kurang dari 20 cm, katup solenoid akan terbuka dan mengisi air hingga ketinggian mencapai setidaknya 20 cm. Setelah ketinggian air reservoir memenuhi target, pompa air talang menyala dan mengalirkan larutan nutrisi ke talang-talang tanaman. Larutan nutrisi hanya akan dialirkan ke talang tanaman jika nilai ketinggian air sudah mencapai target. Setelah larutan nutrisi dialirkan ke talang tanaman, sistem akan memeriksa, waktu berada di rentang pukul 06:00–18:00 atau tidak. Jika waktu berada pada rentang tersebut, grow light akan menyala; dan akan mati di luar rentang waktu tersebut.

Pada task TDS (bagian C pada Gambar 3), sistem akan memeriksa, nilai TDS yang terbaca lebih kecil dari target atau tidak. Jika nilai TDS tidak memenuhi target, sistem akan secara otomatis mengaktifkan pompa Nutrisi A dan Nutrisi B untuk menambahkan larutan nutrisi selama 5 s, kemudian diberikan jeda 30 s sebelum pompa nutrisi dapat diaktifkan lagi hingga nilai TDS mencapai target.

Setelah nilai TDS sesuai, task pH akan dimulai dan sistem memeriksa nilai pH. Saat nilai pH di bawah 5,5, sistem

merespons dengan mengaktifkan pompa pH up yang akan menambahkan larutan kalium hidroksida dengan konsentrasi 10% selama 5 s, kemudian diberikan jeda 30 s sebelum pompa pH up dapat diaktifkan lagi hingga mencapai nilai pH target. Sebaliknya, jika nilai pH naik di atas 6,5, pompa pH down akan diaktifkan untuk menambahkan larutan asam fosfat 10% selama 5 s, kemudian diberikan jeda 30 s dan sebelum pompa pH down dapat diaktifkan lagi sampai pH larutan mencapai target.

Sistem hidroponik otomatis diharapkan mampu menaikkan nilai TDS per 100 ppm dalam waktu kurang dari 2 menit. Larutan AB Mix yang digunakan memiliki spesifikasi 5 ml A + 5 ml B + 1 l air menjadi 1.000 ppm, yang artinya jika volume reservoir adalah 38–42 l, setiap 100 ppm membutuhkan 20–21 ml larutan AB Mix. Dengan laju pompa peristaltik 75 ml/menit (1,25 ml/s) dan delay pengadukan 30 s, diperoleh waktu pompa peristaltik memompa larutan dalam satu siklus adalah 5 s.

$$120 = \frac{20(t+30)}{1,25t}$$

$$120 = \frac{16(t+30)}{t}$$

$$t = \frac{480}{104} \approx 4,62 \text{ s.}$$

Penentuan delay 30 s didasarkan pada waktu yang dibutuhkan agar larutan tercampur sempurna, yang diperoleh melalui percobaan dengan peningkatan bertahap nilai TDS. Hasil percobaan menunjukkan bahwa 30 s adalah waktu yang diperlukan agar larutan mencapai nilai yang stabil.

Sensor TDS dan pH menggunakan analog to digital converter (ADC) yang diatur agar melakukan 32 pembacaan (NUM\_SAMPLES) dengan delay 50 ms pada tiap pembacaan (SAMPLE\_DELAY). Ini berarti sensor akan melakukan pembacaan, lalu menunggu selama 50 ms sebelum melakukan

pembacaan berikutnya. Setelah 32 pembacaan (dengan jarak masing-masing 50 ms), program akan menghitung rata-rata pembacaan ini untuk memastikan hasil yang lebih akurat dan mengurangi gangguan. Total waktu untuk mengumpulkan 32 pembacaan, atau mendapatkan satu nilai, adalah  $32 \times 50 \text{ ms} = 1.600 \text{ ms}$  atau 1,6 s.

Pada hari tanam ke-30, pengguna dapat memilih untuk panen (bagian D pada Gambar 3) dan sistem akan mengaktifkan fungsi menguras air pada reservoir, yaitu dengan mengaktifkan pompa kuras hingga pembacaan ketinggian air minimum atau kosong. Lalu, semua informasi dan *task* dalam sistem hidroponik direset. Sebaliknya, jika pengguna menolak untuk panen, sistem akan terus beroperasi.

Penelitian ini juga mengembangkan sebuah aplikasi Android. Tampilan antarmuka pada layar ponsel dibuat menggunakan Android Studio. Aplikasi Android menampilkan berbagai informasi, di antaranya informasi hari ke-xx penanaman atau hari setelah tanam (HST); waktu pematangan informasi terakhir berupa nilai TDS, pH, suhu, kelembapan, ketinggian air; dan tampilan video langsung yang diterima dari ESP32-CAM. Aplikasi Android juga dilengkapi dengan tombol panen. Tombol ini tidak dapat ditekan sebelum hari tanam mencapai 30 hari.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. IMPLEMENTASI RANCANG BANGUN

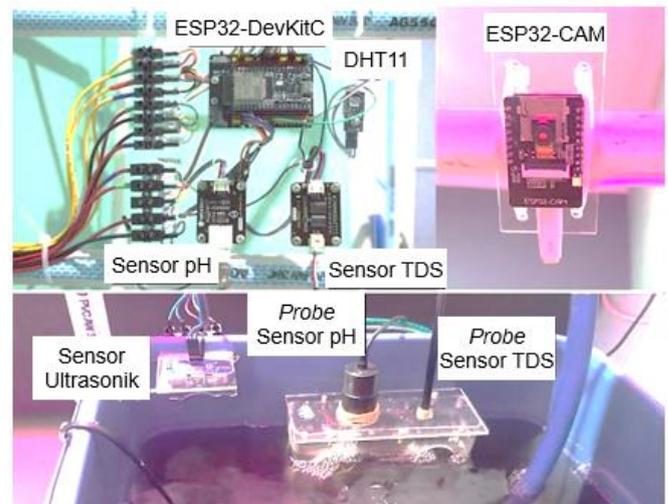
Pengujian sistem dilakukan di dalam ruangan dengan suhu yang diatur dengan *air conditioner* (AC) pada suhu 26 °C dan menggunakan cahaya lampu sebagai pengganti cahaya matahari. Seperti yang terlihat pada Gambar 4, panel kendali dan modul sensor terdiri atas ESP32-DevKitC sebagai otak utama sistem, DFRobot TDS Sensor Board untuk pengukuran TDS, DFRobot pH Sensor Board untuk pengukuran pH larutan, sensor DHT11 untuk memantau suhu dan kelembapan udara, sensor ultrasonik untuk mengukur tinggi air dalam tangki, dan ESP32-CAM untuk pemantauan visual secara *real-time*.

Modul aktuator terdiri atas dua modul relay empat kanal, yang setiap relainya terhubung ke sebuah komponen aktuator, seperti tampak pada Gambar 5. Modul Relay 1 terdiri atas empat relay yang bertugas mengendalikan pengoperasian pompa Nutrisi A, pompa Nutrisi B, pompa larutan pH *up*, dan pompa larutan pH *down*. Modul Relay 2 terdiri atas empat relay yang mengaktifkan lampu penumbuh, katup solenoid air baku, pompa kuras, dan pompa air talang. Kedua modul tersebut diintegrasikan ke sistem hidroponik otomatis, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 6.

#### B. PENGUJIAN SENSOR TDS

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan sistem hidroponik dalam mengendalikan dan mempertahankan nilai TDS dalam kisaran yang diinginkan. Grafik hasil pembacaan nilai TDS selama periode tersebut ditunjukkan pada Gambar 7, berupa tren dan stabilitas nilai TDS dalam larutan nutrisi selama pengujian berlangsung.

Dari hasil pengujian sensor TDS, dapat disimpulkan bahwa hasil pengukuran dan pengendalian nilai TDS telah sesuai dengan target yang ditetapkan untuk setiap minggunya, seperti yang disajikan pada Tabel I. Nilai TDS pada minggu pertama berada di sekitar 600 ppm, lalu meningkat menjadi 700 ppm pada minggu kedua, mencapai 800 ppm pada minggu ketiga, dan menjadi sekitar 900 ppm pada minggu keempat dan kelima.



Gambar 4. Panel kendali dan modul sensor sistem hidroponik otomatis.



Gambar 5. Modul aktuator sistem hidroponik otomatis.



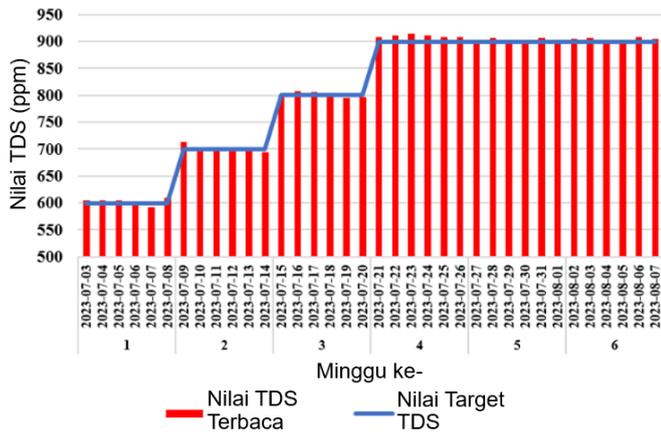
Gambar 6. Sistem hidroponik otomatis terintegrasi modul.

#### C. PENGUJIAN SENSOR pH

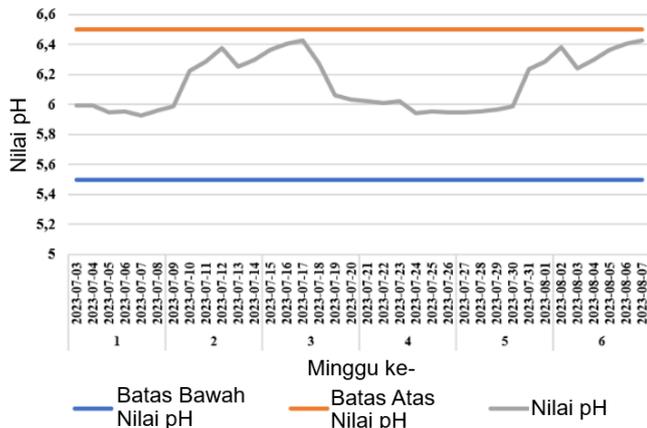
Tujuan pengujian sensor pH adalah menilai kemampuan sistem hidroponik menjaga nilai pH dalam rentang nilai yang diinginkan. Gambar 8 memperlihatkan grafik nilai pH hasil pengukuran selama periode pengujian, yaitu 36 hari. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa sistem hidroponik telah berhasil, baik dalam mengukur maupun mengendalikan nilai pH yang sesuai dengan rentang yang telah ditentukan, yaitu antara 5,5 sampai dengan 6,5. Rata-rata nilai pH sistem selama pengujian adalah 6,19.

#### D. PENGUJIAN SENSOR ULTRASONIK

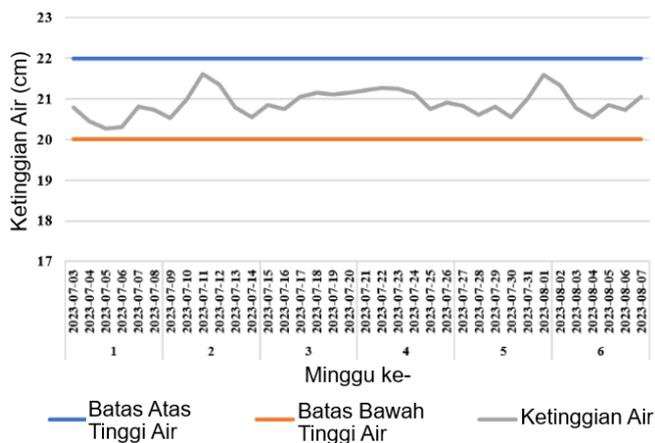
Pengujian sensor ultrasonik bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem hidroponik otomatis dalam menjaga ketinggian



Gambar 7. Grafik nilai TDS hasil pengujian.



Gambar 8. Grafik nilai pH hasil pengujian.



Gambar 9. Grafik tinggi air hasil pengujian.

air di reservoir pada nilai 20 cm sampai dengan 22 cm [21]. Gambar 9 memperlihatkan grafik hasil ukur nilai tinggi air pada pengujian selama 36 hari. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sistem hidroponik telah berfungsi dengan baik dalam pengukuran maupun pengendalian ketinggian air pada jangkauan 20 cm sampai dengan 22 cm, dengan ketinggian air rata-rata selama pengujian mencapai 20,89 cm.

**E. PENGUJIAN SISTEM PEMANTAUAN**

Tujuan pengujian sistem pemantauan adalah untuk menilai kemampuan sistem hidroponik dalam mengirimkan hasil pembacaan nilai-nilai sensor secara *real-time*. Pengujian dilakukan dengan menghitung *end-to-end latency* atau waktu kirim, dengan menghitung selisih waktu pengiriman pada

TABEL II  
HASIL PENGUJIAN SISTEM PEMANTAUAN

Waktu (WIB)	Telemetri Dikirim	Telemetri Diterima	Rerata Waktu Kirim (ms)	Data Loss (%)
00:00–01:00	1.800	1.800	133,58	0
01:00–02:00	1.800	1.800	127,34	0
02:00–03:00	1.800	1.800	131,94	0
03:00–04:00	1.800	1.800	134,92	0
04:00–05:00	1.800	1.800	129,44	0
05:00–06:00	1.800	1.800	117,37	0
06:00–07:00	1.800	1.800	118,11	0
07:00–08:00	1.800	1.800	121,95	0
08:00–09:00	1.800	1.800	121,50	0
09:00–10:00	1.800	1.800	125,40	0
10:00–11:00	1.800	1.800	122,68	0
11:00–12:00	1.800	1.800	122,14	0
12:00–13:00	1.800	1.800	118,10	0
13:00–14:00	1.800	1.800	132,95	0
14:00–15:00	1.800	1.800	128,48	0
15:00–16:00	1.800	1.800	130,63	0
16:00–17:00	1.800	1.800	135,84	0
17:00–18:00	1.800	1.800	130,45	0
18:00–19:00	1.800	1.800	116,27	0
19:00–20:00	1.800	1.800	117,94	0
20:00–21:00	1.800	1.800	122,35	0
21:00–22:00	1.800	1.800	120,30	0
22:00–23:00	1.800	1.800	124,88	0
23:00–00:00	1.800	1.800	123,40	0
Rata-rata waktu kirim			125,33	0

mikrokontroler saat pengiriman data dan waktu penerimaan dalam Google Cloud Function saat menerima data dalam rentang waktu 24 jam.

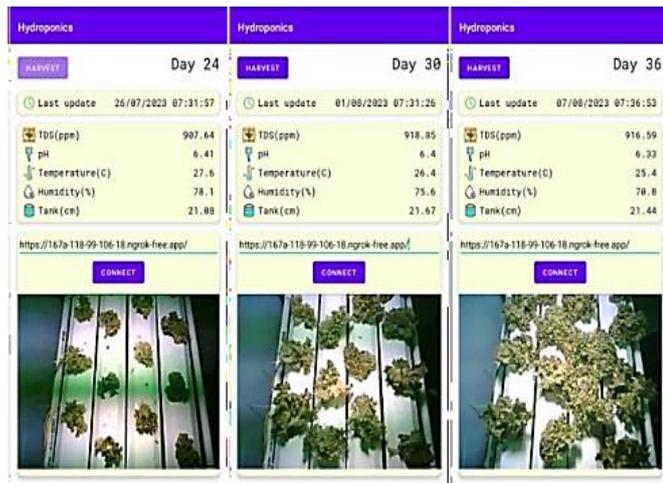
Hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk mengirim data dari ESP32 ke IoT Core adalah 125,33 ms dengan 0% *data loss*, seperti yang tersaji pada Tabel II. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan pemantauan secara *real-time* dengan waktu kirim yang cukup rendah.

**F. PENGUJIAN APLIKASI ANDROID DAN VIDEO LIVE-STREAMING**

Pengujian aplikasi Android pada sistem hidroponik otomatis bertujuan untuk memastikan bahwa aplikasi berfungsi dengan baik. Aplikasi ini dirancang untuk menyediakan tampilan data sensor, seperti nilai TDS, pH, suhu, kelembapan, serta informasi tambahan, seperti jumlah hari sistem berjalan dan waktu pembaruan terakhir. Selain itu, aplikasi juga memungkinkan pengguna untuk melihat video *live-streaming* dari sistem hidroponik. Pengujian aplikasi Android dan video *live-streaming* langsung dilakukan di lokasi penelitian, menggunakan jaringan Wi-Fi dengan kecepatan 100 Mbps setiap hari pada pukul 07.00. Perangkat Android yang digunakan ditempatkan dalam jarak sekitar lima meter dari sistem hidroponik untuk menguji kualitas transmisi video dalam kondisi praktis. Hasil pengujian diperlihatkan pada Gambar 10.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa aplikasi Android dapat menampilkan data sensor secara konsisten dan akurat, serta mampu mengirimkan video *live-streaming* dengan baik melalui jaringan internet. Informasi yang ditampilkan pada aplikasi Android adalah jumlah hari atau HST, waktu pembaruan terakhir, nilai TDS, nilai pH, nilai suhu udara, nilai kelembapan udara, tinggi air, dan video *live-streaming*.

Pada HST ke-30, tombol panen telah tersedia, memungkinkan pengguna untuk mengaktifkan perintah panen,



Gambar 10. Hasil video *live-streaming* dengan ESP32-CAM.

yang secara otomatis akan menggerakkan pompa kurus untuk mengosongkan reservoir larutan nutrisi jika diperlukan.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, sistem hidroponik otomatis ini telah berhasil menjalankan fungsi pemantauan secara *real-time* dengan waktu kirim yang cukup rendah, yaitu rata-rata sebesar 125,33 ms dengan 0% *data loss*. Penelitian ini juga telah berhasil melaksanakan fungsi kendali, menjaga nilai TDS sesuai target selama lima minggu pengujian, dengan nilai TDS dari minggu pertama hingga minggu kelima yaitu 600, 700, 800, 900, dan 900 ppm. Selain itu, sistem berhasil menjaga konsistensi nilai pH dalam rentang 5,5–6,5, dengan rata-rata nilai pH sebesar 6,19, serta menjaga ketinggian air sesuai target 20–22 cm, dengan rata-rata pembacaan 20,89 cm. Sistem ini juga mampu menjalankan fungsi pengurasan reservoir saat panen. Hasil pengujian aplikasi Android dan video *live-streaming* menunjukkan bahwa aplikasi Android berhasil menampilkan nilai-nilai pembacaan sensor dan ESP32-CAM dapat menampilkan video secara *real-time*. Dengan keberhasilan mengendalikan parameter-parameter sistem hidroponik selama 36 hari, sistem ini dapat diimplementasikan secara otomatis dari masa tanam hingga panen.

#### KONFLIK KEPENTINGAN

Tim Penulis menyatakan bahwa artikel yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Hidroponik Otomatis Berbasis *Internet of Things*” ditulis dengan bebas dari konflik kepentingan.

#### KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Isyara Khairani; metodologi, Isyara Khairani; perangkat lunak, Isyara Khairani; validasi, Isyara Khairani dan Kiki Prawiroredjo; analisis formal, Isyara Khairani; investigasi, Isyara Khairani; sumber daya, Isyara Khairani dan Kiki Prawiroredjo; kurasi data, Isyara Khairani; penulisan—penyusunan draf asli, Isyara Khairani; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Isyara Khairani dan Kiki Prawiroredjo; visualisasi, Isyara Khairani dan Kiki Prawiroredjo; pengawasan, Kiki Prawiroredjo; administrasi proyek, Isyara Khairani dan Kiki Prawiroredjo; akuisisi pendanaan, Isyara Khairani dan Kiki Prawiroredjo.

#### REFERENSI

[1] F. Gultom dan S. Harianto, “Luntarnya sektor pertanian di perkotaan,” *J. Anal. Sociol.*, vol. 11, no. 1, hal. 49–72, Jan. 2022, doi: 10.20961/jas.v11i1.56324.

- [2] A. Swain dkk., “Hydroponics in vegetable crops: A review,” *Pharma Innov. J.*, vol. 10, no. 6, hal. 629–634, Jun. 2021.
- [3] S. Mashumah dan E.K. Pramartaningthyas, “Sistem monitoring tanaman pakcoy hidroponik nutrient film technique (NFT) berbasis internet of things,” *Multitek Indones.*, vol. 16, no. 1, hal. 24–37, Jul. 2022, doi: 10.24269/mtkind.v16i1.4342.
- [4] E.P. Utami dan N.M.R. Anwar, “Analisis usahatani budidaya tanaman selada kepala secara konvensional,” *Media Agribisnis*, vol. 5, no. 2, hal. 150–161, Nov. 2021, doi: 10.35326/agribisnis.v5i2.1393.
- [5] F.B. Assa, A.M. Rumagit, dan M.E.I. Najooan, “Internet of things-based hydroponic system monitoring design,” *J. Tek. Inform.*, vol. 17, no. 1, hal. 129–138, Jan.-Mar. 2022, doi: 10.35793/jti.v17i1.34230.
- [6] I.Z.T. Dewi dkk., “Smart farming: Sistem tanaman hidroponik terintegrasi IoT MQTT panel berbasis Android,” *J. Keteknikan Pertanian. Trop. dan Biosist.*, vol. 9, no. 1, hal. 71–78, Apr. 2021, doi: 10.21776/ub.jkptb.2021.009.01.08.
- [7] I.W.S. Putra, K.A. Yasa, dan A.G.N.G. Saptaka, “Sistem kontrol otomatis kepekatan air nutrisi hidroponik berbasis Internet of things (IoT),” dalam *Proc. Semin. Nas. Terap. Ris. Inov. (SENTRINOV)*, 2021, hal. 286–293.
- [8] R. Nandika dan E. Amrina, “Sistem hidroponik berbasis internet of things (IoT),” *Sigma Tek.*, vol. 4, no. 1, hal. 1–8, Jun. 2021, doi: 10.33373/sigmateknika.v4i1.3253.
- [9] A. Promwee, S. Nijbulat, dan H.H. Nguyen, “Enhancing Chinese cabbage production and quality through IoT-based smart farming in NFT-hydroponics,” *Agronomy*, vol. 14, no. 3, hal. 1–28, Mar. 2024, doi: 10.3390/agronomy14030579.
- [10] F.H. Azimi dkk., “IoT monitoring in NFT hydroponic system using Blynk- an android platform,” *Int. J. Synergy Eng. Technol.*, vol. 1, no. 1, hal. 1–10, Jun. 2020.
- [11] V. Wibisono dan Y. Kristyawan, “An efficient technique for automation of the NFT (nutrient film technique) hydroponic system using Arduino,” *Int. J. Artif. Intell. Robot. (IJAIR)*, vol. 3, no. 1, hal. 44–49, Mei 2021, doi: 10.25139/ijair.v3i1.3209.
- [12] H.C. Nguyen, B.T.V. Thi, dan Q.H. Ngo, “Automatic monitoring system for hydroponic farming: IoT-based design and development,” *Asian J. Agric. Rural Dev.*, vol. 12, no. 3, hal. 210–219, Okt. 2022, doi: 10.55493/5005.v12i3.4630.
- [13] N. Patil, S. Patil, A. Uttekar, dan A.R. Suryawanshi, “Monitoring of hydroponics system using IoT technology,” *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*, vol. 7, no. 6, hal. 1455–1458, Jun. 2020.
- [14] M.E.H. Chowdhury dkk., “Design, construction and testing of IoT based automated indoor vertical hydroponics farming test-bed in Qatar,” *Sensors*, vol. 20, no. 19, hal. 1–24, Okt. 2020, doi: 10.3390/s20195637.
- [15] T.I. Fajri, Mustaqim, dan Rahmad, “Design of a hydroponic smart farm system with web-based IoT in Bireuen regency,” *Int. J. Res. Rev.*, vol. 9, no. 9, hal. 391–397, Sep. 2022, doi: 10.52403/ijrr.20220945.
- [16] D.K. Hadi dkk., “Desain smart nutrition monitoring system teknik budidaya hidroponik kangkung berbasis internet of things,” *J. Penelit. IPTEKS*, vol. 8, no. 2, hal. 99–109, Jul. 2023, doi: 10.32528/ipteks.v8i2.7727.
- [17] M. Niswar, “Design and implementation of an automated indoor hydroponic farming system based on the Internet of things,” *Int. J. Comput. Digit. Syst.*, vol. 15, no. 1, hal. 337–346, Jan. 2024, doi: 10.12785/ijcds/150126.
- [18] D. Adidrana dkk., “Simultaneous hydroponic nutrient control automation system based on internet of things,” *JOIV, Int. J. Inform. Vis.*, vol. 6, no. 1, hal. 124–129, Mar. 2022, doi: 10.30630/joiv.6.1.865.
- [19] A.V. Hartanto, F.S. Kristiady, W. Atmadja, dan J. Linggarjati, “Automatic hydroponic nutrient mixing for hydroponic NFT and fertigation,” dalam *4th Int. Conf. Eco Eng. Dev. 2020*, 2021, hal. 1–11, doi: 10.1088/1755-1315/794/1/012128.
- [20] R.S.N. Adiihah binti Raja Aris dkk., “Front-end development of nutrient film technique for hydroponic plant with IoT monitoring system,” *Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 1.3, hal. 9–14, Jun. 2020, doi: 10.30534/ijatcse/2020/0291.32020.
- [21] S.J. Yue dkk., “IoT based automatic water level and electrical conductivity monitoring system,” dalam *2020 IEEE 8th Conf. Syst. Process Control (ICSPC)*, 2020, hal. 95–100, doi: 10.1109/ICSPC50992.2020.9305768.