

BAB IV

PEMBAHASAN

4. Hasil Pengujian

Pengujian sistem monitoring dan kendali suhu serta kelembaban tanah pada *Greenhouse* berbasis NodeMCU ESP32 untuk tanaman bayam menunjukkan hasil yang memuaskan. Sistem ini berhasil menjaga suhu yang telah ditetapkan pada *Greenhouse*, menjaga kelembaban tanah sesuai dengan yang telah ditetapkan, serta sistem dapat mengukur tinggi tanaman. Pengujian yang dilakukan yaitu :

4.2 Pengujian Sensor DHT

Pengujian sensor DHT dilakukan untuk memastikan performa sensor dalam mendeteksi suhu. Media uji berupa membandingkan suhu sensor DHT dengan hygrometer atau termometer digital, dan termometer kayu. Pengujian diawali dengan kalibrasi sensor dht untuk mendapatkan nilai suhu ruangan pada kondisi real time, kemudian nilai keluaran suhu dht tersebut dibandingkan dengan pengukur suhu lainnya, yaitu termometer digital dan termometer kayu. Hasil pengujian ini menjadi dasar untuk menentukan akurasi sensor dan memastikan keandalannya sebelum digunakan. Pengujian sensor bertujuan mengetahui tingkat keakuratan dari sensor suhu DHT11. Pengujian ini dilakukan menggunakan 3 alat temperature suhu yang berbeda.

Langkah awal pengujian ini adalah mengetahui suhu lingkungan pada *Greenhouse*, dilakukan pengujian dengan 3 alat ukur berbeda, Untuk melakukan pengukuran suhu menggunakan sensor dht maka perlu menggunakan program sebagai berikut :

```
void rd_suhu() {  
    float h = dht.readHumidity();      // Baca kelembaban udara (%)  
    float t = dht.readTemperature();   // Baca suhu dalam °C  
  
    if (isnan(h) || isnan(t)) {  
        Serial.println("Sensor suhu gagal dibaca!");  
        return;  
    }  
}
```

}

Dari pengujian yang dilakukan didapatkan data seperti pada tabel 4.1 yang mana dibagi atas 3 kategori alat pengukuran suhu yaitu, termometer kayu, termometer digital, serta sensor dht11. Pengujian dilakukan di dua waktu berbeda dengan interval 15 – 20 menit.

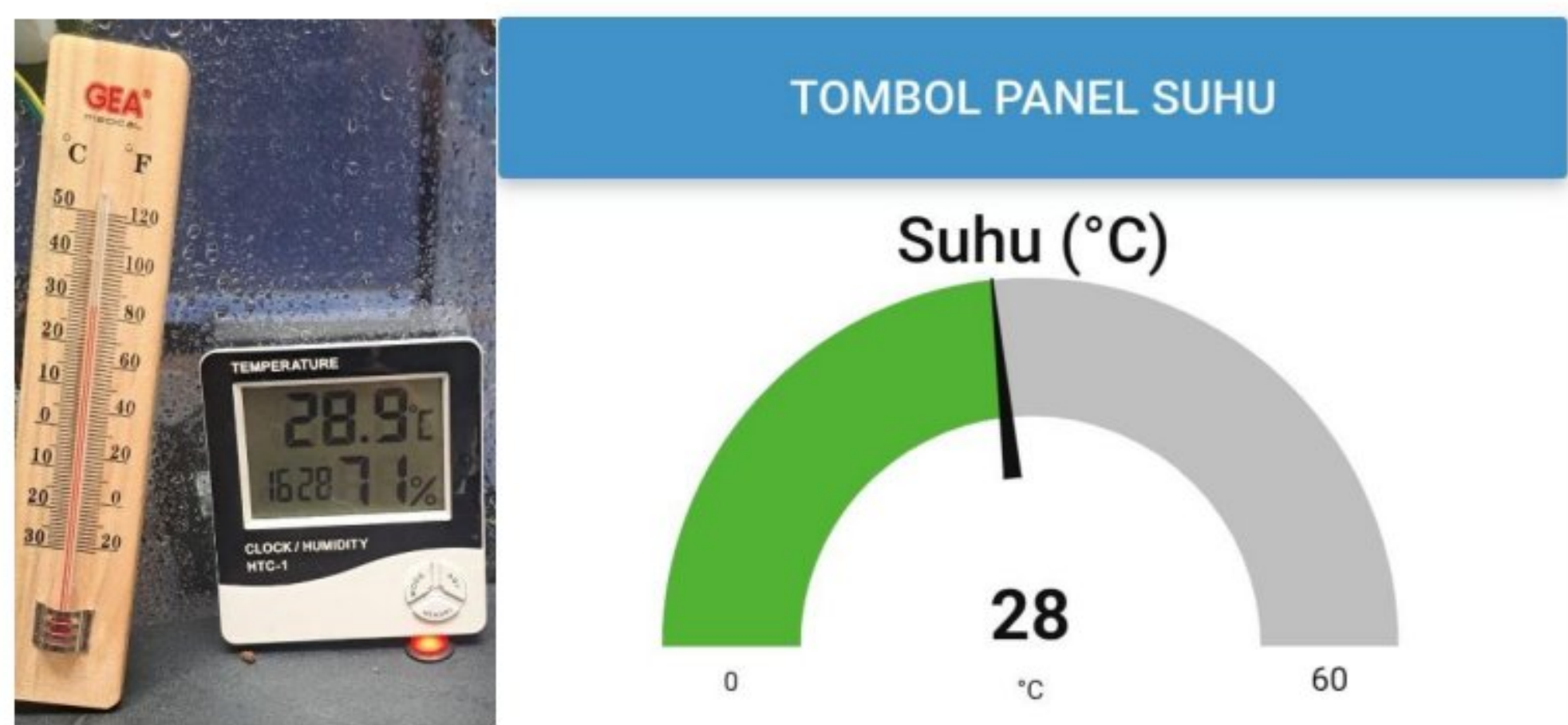
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Nilai ADC Sensor

Pukul (WIB)	Temperature Termometer Kayu	Temperature Termometer Digital	Temperature Sensor DHT11
16.13	29°C	28,9 °C	28,5 °C
16.28	29 °C	28,9 °C	28,0 °C
16.48	29 °C	28,9 °C	27,2 °C
21.28	26,5 °C	26,8 °C	26,7 °C
21.42	26,5 °C	26,6 °C	26,7 °C
22.01	26,5 °C	26,6 °C	26,7 °C

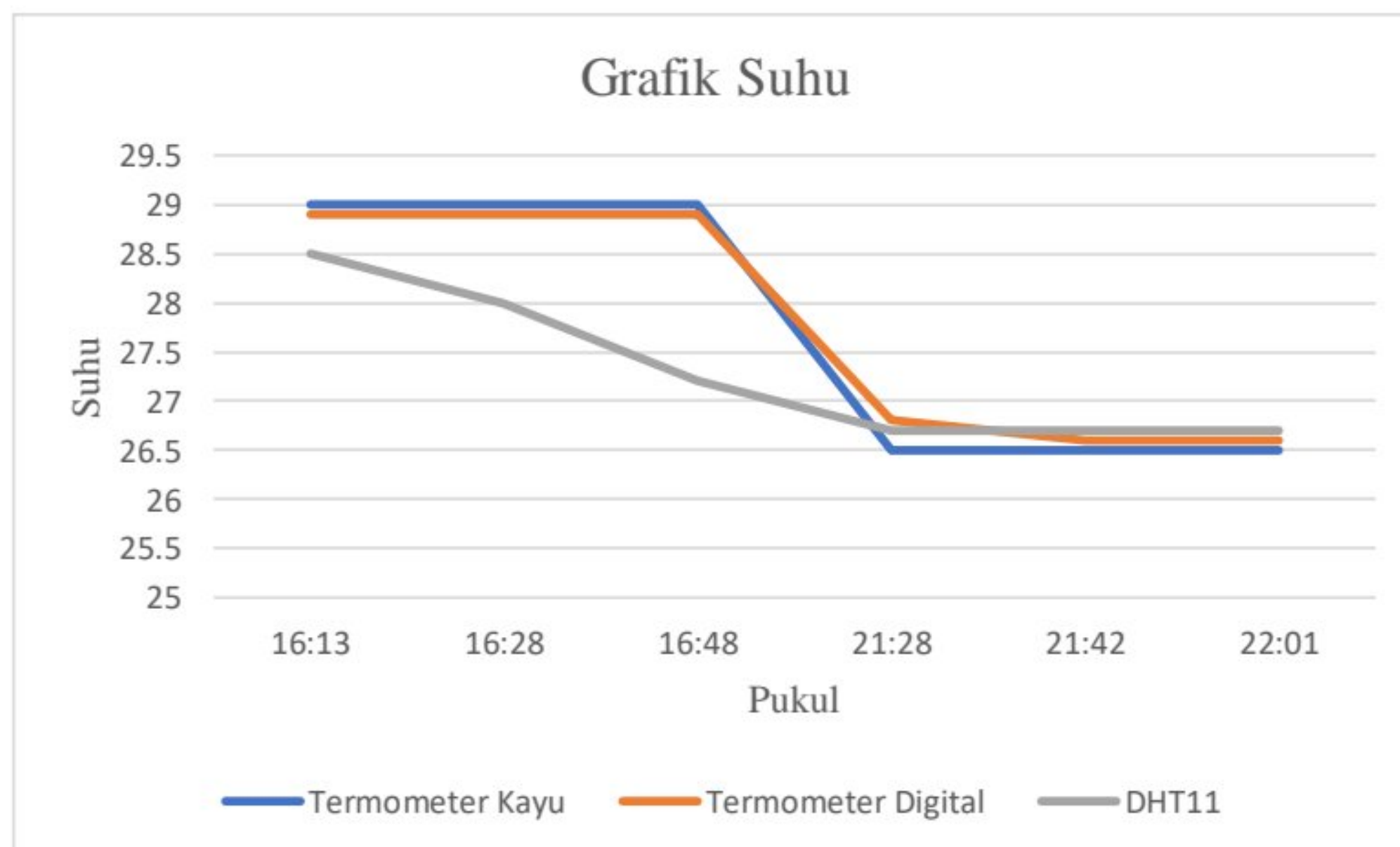
Hasil pengujian dari Tabel 4.1 diatas dapat dilihat berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan yang dilakukan, diketahui bahwa perbedaan atau jarak suhu yang terhitung pada masing masing alat ukur relatif kecil. Hasil pengujian tersebut membuktikan keakuratan sensor dht11. Pengujian validasi ini menggunakan metode pengukuran simultan di lokasi yang sama dengan interval waktu yang berbeda, untuk memastikan bahwa perbedaan pembacaan bukan disebabkan oleh faktor eksternal seperti perubahan kondisi lingkungan, melainkan benar-benar menunjukkan karakteristik akurasi masing-masing alat ukur.

Pada gambar 4.2 di bawah menunjukkan hasil perbandingan pembacaan suhu dari 3 alat ukur yang berbeda, pengujian ini dilakukan untuk memvalidasi akurasi dan reliabilitas sensor DHT11 yang digunakan dalam sistem monitoring *Greenhouse*. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa perbedaan nilai pembacaan antar alat ukur relatif kecil (error rata-rata di bawah 2%) yang membuktikan bahwa

sensor DHT11 layak dan dapat diandalkan untuk digunakan dalam sistem monitoring pada *Greenhouse*. Dengan demikian, keputusan kontrol otomatis yang diambil berdasarkan pembacaan sensor DHT11 dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.



Gambar 4. 1 Gambar hasil perbandingan suhu



Gambar 4. 2 Grafik hasil perbandingan sensor suhu

4.3 Pengujian Sensor Soil Moisture

Pengujian sensor soil moisture capacitive dilakukan untuk mengevaluasi performa sensor dalam mendeteksi tingkat kelembaban tanah. Media uji berupa tanah dengan kelembaban berbeda (kering dan basah), serta perangkat lunak Node

– RED untuk membaca dan menganalisis data. Pengujian diawali dengan kalibrasi sensor untuk mendapatkan nilai referensi kondisi kering dan basah. Sensor dimasukan ke tanah kering, kemudian keluarannya dicatat sebagai referensi kondisi kering. Pengujian ini juga mencakup evaluasi stabilitas pembacaan sensor, sensitifitas terhadap kadar kelembaban. Hasil pengujian ini menjadi dasar untuk menentukan akurasi sensor dan memastikan keandalannya sebelum digunakan. Pengujian sensor ini bertujuan untuk mengetahui tingkat keakuratan dari sensor soil moisture capacitive dengan menggunakan nilai yang ada pada datasheet sensor. Pengujian ini dilakukan pada 1 media tanam.

Langkah awal pengujian ini adalah untuk mengetahui nilai ADC terhadap masing masing perbandingan berat air dengan berat tanah yang akan dimasukan kedalam tanah media uji, pengujain dilakukan dengan 5 variasi uji yaitu dengan 20 mL, 40mL, 60Ml, 80Ml, dan 100 mL. setelahnya dilakukan pengukuran nilai ADC dengan menggunakan program sebagai berikut :

```

}

void rd_rh_tanah(){

    rh=analogRead(36);

    Serial.print(String()+"Rh "+rh+" , ");

    Serial.println(rh);
}

```

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Sensor Soil Capacitive

Massa Air	Massa Tanah	Kelembaban Tanah	Nilai ADC
0 ml	100	0%	2995
20 ml	100	30%	2416

40 ml	100	49%	2047
60 ml	100	64%	1722
80 ml	100	85%	1476
100 ml	100	100%	1095

Hasil pengujian dari tabel 4.2 diatas dapat dilihat berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan yang dilakukan, diketahui bahwa terdapat hubungan yang signifikan antara massa air yang ditambahkan ke dalam tanah dengan nilai ADC yang dibaca oleh sensor kelembaban tanah. Semakin banyak massa air yang ditambahkan, nilai ADC yang dihasilkan oleh sensor semakin menurun. Hal ini sejalan dengan prinsip kerja sensor resistif, di mana semakin basah tanah resistansinya menurun sehingga nilai ADC yang terbaca menjadi lebih kecil.

Konversi nilai ADC menjadi kelembaban tanah (%) menggunakan rumus ekponensial menghasilkan nilai kelembaban yang meningkat secara bertahap dan konsisten sesuai dengan kenaikan massa air. Nilai kelembaban dari perhitungan ini menunjukan kecenderungan yang realistis dan mendekati nilai kelembaban tanah berdasarkan pengukuran manual, meskipun nilai manual terkesan lebih diskret atau bertingkat. Perbedaan kecil yang muncul antara nilai manual dan hasil perhitungan dapat disebabkan oleh keterbatasan alat ukur, variasi distribusi air dalam tanah, atau ketidaktepatan pencampuran air dengan tanah selama proses uji coba.

Secara keseluruhan, rumus eksponensial yang digunakan mampu merepresentasikan hubungan antara kadar air dan pembacaan sensor dengan baik. Nilai kelembaban hasil rumus dapat digunakan untuk pengambilan keputusan otomatis dalam sistem monitoring, seperti pengontrol pompa air berbasis kelembaban tanah. Dengan kata lain, metode ini cukup akurat dan efektif untuk digunakan dalam aplikasi pertanian berbasis mikrokontroler.

Pada Tabel 4.2 menunjukan hubungan antara jumlah air yang ditambahkan ke tanah, kelembaban tanah yang diukur dalam persen, dan nilai air yang terbaca oleh sensor kelembaban tanah melalui ADC (Analog to Digital Converter). Dalam

setiap pengukuran, massa tanah dijaga tetap sebanyak 100 gram, sementara volume air yang ditambahkan memiliki 5 variasi yaitu dimulai dari penambahan air 20ml, 40ml, 60ml, 80ml, 100ml.



Gambar 4. 3 Grafik Hasil Pembacaan Nilai ADC Terhadap Kondisi Tanah

Peningkatan kelembaban ini memberikan dampak langsung terhadap nilai yang dibaca oleh sensor. Nilai ADC yang tercatat menunjukkan penurunan seiring dengan naiknya kadar air dalam tanah. Hal ini dikarenakan karakteristik sensor kelembaban tanah tipe kapasitif, dimana semakin basah tanah maka kapasitansinya meningkat dan menyebabkan nilai tegangan output sensor yang masuk ke ADC menjadi lebih rendah.

Pada Gambar 4.3 grafik menggambarkan hubungan antara nilai pembacaan ADC dari sensor kelembaban tanah pada sumbu X dan kelembaban tanah dalam persen pada sumbu Y. dari grafik tersebut terlihat bahwa terdapat hubungan linier negatif antara kedua variabel tersebut, yang berarti semakin tinggi nilai ADC maka semakin rendah tingkat kelembaban yang terukur. Dalam konteks ini, X adalah nilai ADC dan Y adalah kelembaban tanah dalam persen. Koefisien negatif menunjukkan bahwa saat nilai ADC meningkat, nilai kelembaban tanah menurun. Ini sesuai dengan prinsip kerja sensor kapasitif, di mana kapasitansi meningkat saat tanah lebih basah menyebabkan tegangan output menurun. Untuk mengkonversi nilai ADC menjadi persentase digunakan konversi linear, rumus linear dari ADC ke persentase sebagai berikut:

$$kelembaban = \frac{ADC_{kering} - ADC_{basah}}{ADC_{kering} - ADC_{basah}} \times 100$$

Sensor ini juga menunjukkan keandalan selama periode pengujian berkelanjutan, dengan kinerja yang konsisten. Pengujian ini mengkonfirmasi bahwa sensor soil moisture kapasitif cocok untuk digunakan dalam sistem irigasi otomatis, membantu menjaga keseimbangan kelembaban tanah dan memastikan kebutuhan air tanaman terpenuhi dengan efisien.

4.4 Pengujian Sensor VL53L0X

Pengujian sensor VL53L0X V2 dilakukan untuk mengevaluasi performa sensor dalam mendeteksi ukuran ketinggian tanaman. Media uji berupa beberapa tanaman dengan tinggi berbeda, serta perangkat lunak Node-RED untuk membaca dan menganalisis data. Pengujian diawali dengan kalibrasi sensor untuk mendapatkan nilai ketinggian tanaman. Lalu nilai yang keluar dibandingkan dengan nilai tanaman lainnya. Pengujian ini mencakup evaluasi stabilitas pembacaan sensor, serta konsistensinya dalam mengukur ketinggian tanaman. Hasil pengujian ini menjadi dasar untuk menentukan akurasi sensor dan memastikan keandalannya sebelum digunakan. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sensor VL53L0X V2 dalam mengukur ketinggian tanaman.

Uji validasi dan akurasi sensor ketinggian dilakukan dengan pengukuran perbandingan menggunakan penggaris manual pada 3 media tanam. Hasil pengukuran ditampilkan melalui dashboard dengan menggunakan program berikut:

```
}

void rd_tinggi(){
    Serial.print("Distance in cm: ");
    tinggi=lox.readRange();
    Serial.println(tinggi);
}
```

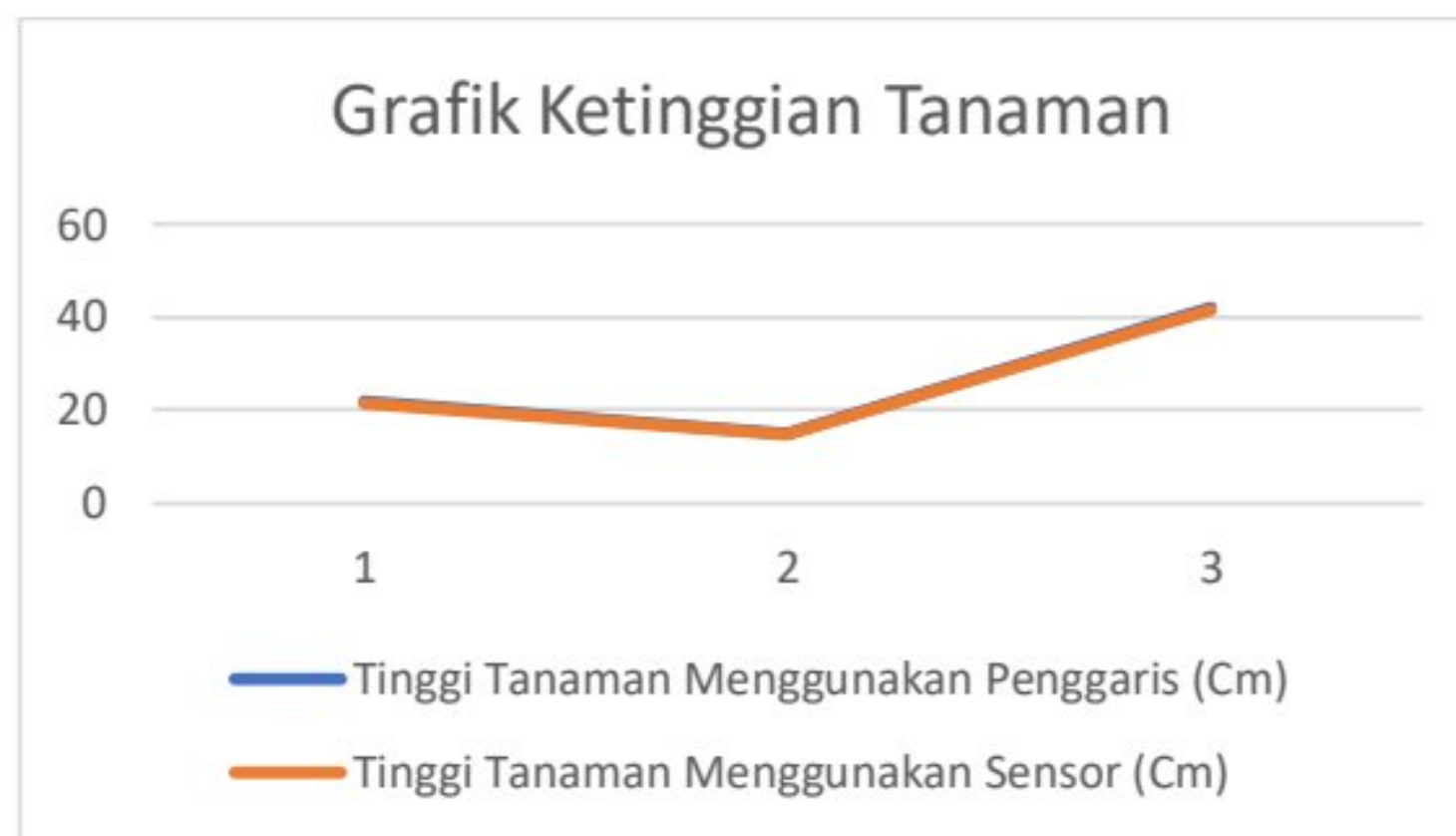
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Sensor Ketinggian

NO	Tinggi Tanaman Menggunakan Penggaris	Tinggi Tanaman Menggunakan Sensor	Selisih	Persentase Error
1	22 Cm	21,7 Cm	0,3	1,36 %
2	30 Cm	30.2 Cm	0.2	0,67%
3	42 Cm	41,5 Cm	0,5	1,19%

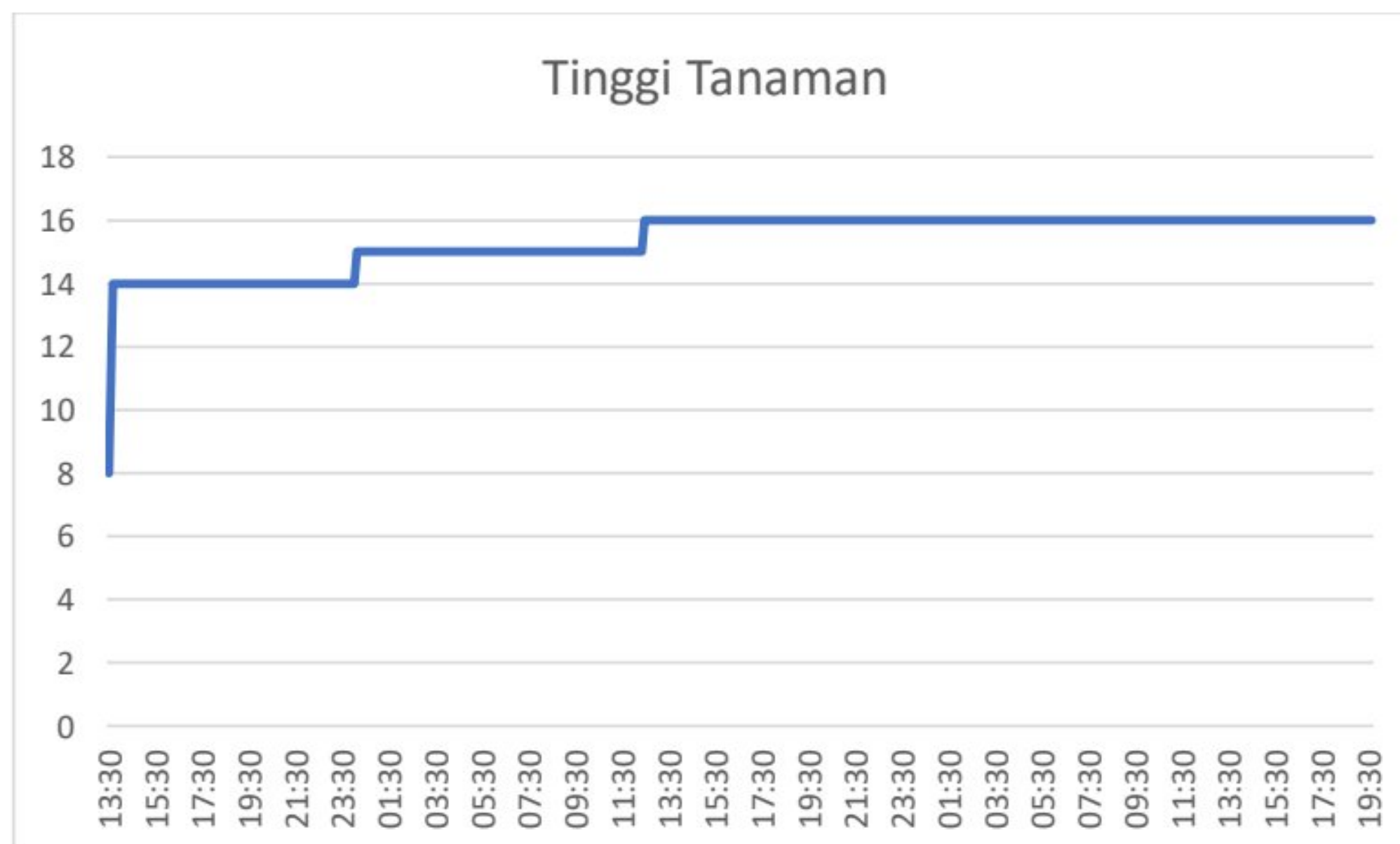
Berdasarkan data dari tabel 4.3 pengujian sensor ketinggian diatas, rata rata persentase error antara pengukuran sensor dan pengukuran manual adalah 1,29%. Menunjukan bahwa sensor VL53L0X V2 memiliki akurasi yang sangat baik dalam mengukur ketinggian tanaman. Berdasarkan standar ISO atau penelitian terkait, sensor pengukuran jarak untuk aplikasi pertanian dianggap akurat jika memiliki error <5%. Standar VL53L0XV2 dengan rata-rata error 1,29% jauh melampaui standar minimum ini.



Gambar 4. 4 Hasil pengukuran ketinggian



Gambar 4. 5 Grafik Hasil Pembacaan Nilai Ketinggian Tanaman



Gambar 4. 6 Grafik Pengujian Sensor Ketinggian

Pada gambar 4.5 di atas menunjukkan grafik hasil perbandingan antara tinggi tanaman yang diukur menggunakan penggaris manual dengan hasil yang diukur menggunakan pembacaan sensor VL53L0X V2. Dari grafik diatas terlihat bahwa kedua metode pengukuran menunjukkan tren yang konsisten dan memiliki selisih yang sangat kecil.

Berdasarkan hasil pengujian berkelanjutan pada gambar 4.6, peningkatan tinggi tanaman dari 14 cm hingga 16 cm selama periode pengujian menunjukkan bahwa kondisi lingkungan yang dijaga oleh sistem (suhu dan kelembaban optimal) berhasil mendukung pertumbuhan tanaman dengan baik. Sensor VL53L0XV2

terbukti efektif dalam mendokumentasikan pertumbuhan ini secara akurat dan objektif, sehingga dapat menjadi salah satu parameter penting dalam evaluasi keberhasilan sistem pada *Greenhouse* ini.

4.5 Pengujian Pada Relay

Pengujian relay dilakukan untuk memastikan bahwa komponen ini berfungsi dengan baik dalam mengendalikan aliran arus listrik pada rangkaian elektronik atau listrik. Proses pengujian dimulai dengan menyiapkan relay, sumber daya, perangkat pengontrol (ESP32) serta beban listrik yang akan dikendalikan (pompa 12v, 5v). pengujian dilakukan dengan memeriksa koneksi pada pin relay, yaitu pin koil (untuk mengaktifkan relay) dan pin kontak (NO, NC, dan COM) setelahnya dilanjutkan dengan mengukur konektivitas pada pin kontak menggunakan multimeter untuk memastikan bahwa pin NO (*Normally Open*) terhubung dengan in COM (Common) saat relay aktif, dan pin NC (*Normally Closed*) terputus.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Relay

No	Trigger	Kondisi Awal	Kondisi Akhir
1	HIGH	NO	Close
2	LOW	NO	Open
3	HIGH	NC	Close
4	LOW	NC	Open

Dari hasil pengujian pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa relay berfungsi dengan baik sesuai spesifikasi dasar. Ketika sinyal trigger HIGH diberikan, relay aktif dan mengubah kondisi kontaknya (NO menjadi close dan NC menjadi open). Sebaliknya, ketika sinyal trigger LOW diberikan, relay tidak aktif dan kembali ke kondisi normal (NO tetap open dan NC tetap close). Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme switching relay berjalan dengan stabil dan sesuai dengan prinsip kerja relay elektromekanism.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Relay Kontrol Pompa

No	Trigger	Kondisi Awal	Pompa
1	HIGH	NO	ON
2	LOW	NO	OFF
3	HIGH	NC	OFF
4	LOW	NC	ON

Tabel 4.5 merupakan hasil pengujian relay untuk kontrol pompa. Dari hasil pengujian yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa relay ini dapat diandalkan untuk digunakan dalam sistem kontrol yang membutuhkan switching listrik. Berdasarkan sinyal trigger dalam hal pengujian ini adalah pompa.

5. Pengujian Relay pada Pompa Suhu dan Pompa Kelembaban Tanah

Pengujian relay bertujuan untuk mengetahui apakah relay bekerja sesuai dengan perintah yang diberikan melalui program. Pada alat ini relay pompa suhu akan aktif apabila suhu diatas 28°C dan relay pompa Kelembaban dibawah 40%. Hasil pengujian relay dapat dilihat pada Tabel 4.8

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Kontrol Pompa Suhu dengan Relay

SUHU (°C)	STATUS POMPA SUHU	RELAY
27,9	OFF	TIDAK AKTIF
27,9	OFF	TIDAK AKTIF
27,9	OFF	TIDAK AKTIF
28	ON	AKTIF
28	ON	AKTIF
28	ON	AKTIF

28	ON	AKTIF
27,9	OFF	TIDAK AKTIF
27,9	OFF	TIDAK AKTIF
27,8	OFF	TIDAK AKTIF
27,8	OFF	TIDAK AKTIF

Dari hasil pengujian pada Tabel 4.6 dapat dikatakan bahwa relay dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan sistem, yaitu apabila suhu diatas 28°C maka relay akan mengaktifkan pompa hingga suhu > 28°C. Selanjutnya pengujian yang sama dilakukan pada kontrol Pompa air untuk kelembaban tanah. Pada alat ini relay akan aktif apabila kelembaban dibawah 40%. Hasil pengujian relay dapat dilihat pada Tabel 4.7

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Kontrol Pompa Air dengan Relay

KELEMBABAN	STATUS POMPA KELEMBABAN	RELAY
45	OFF	TIDAK AKTIF
44	OFF	TIDAK AKTIF
43	OFF	TIDAK AKTIF
42	OFF	TIDAK AKTIF
41	OFF	TIDAK AKTIF

40	OFF	TIDAK AKTIF
39	ON	AKTIF
40	ON	AKTIF
41	ON	AKTIF
42	ON	AKTIF

Dari hasil pengujian tabel 4.7 dapat dikatakan bahwa relay dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan pada sistem, yaitu apabila kelembaban dibawah 40% maka relay akan mengaktifkan pompa hingga kelembaban >60%.

- Sensor DHT11 berhasil mendeteksi suhu ruangan secara akurat. Ketika suhu ruangan melebihi batas yang telah ditetapkan ($>28^{\circ}\text{C}$), sistem secara otomatis mengaktifkan pompa air dan menurunkan suhu ruangan dengan cara pendinginan evaporatif.
- Sistem mampu menjaga suhu udara didalam *Greenhouse* pada kisaran yang optimal untuk pertumbuhan.
- Pada pengujian dengan kondisi suhu lingkungan diatas 28°C , waktu penurunan suhu tidak dapat ditentukan, tergantung dengan kondisi awal suhu saat alat dinyalakan.
- Soil moisture berhasil mendeteksi tingkat kelembaban tanah secara akurat. Ketika kadar tanah turun dibawah ambang batas yang telah ditetapkan ($<40\%$), sistem secara otomatis mengaktifkan pompa air dan menyirami tanaman bayam.
- Pada pengujian dengan kondisi tanah yang kering, waktu aktivasi pompa air rata – rata memakan waktu sekitar 15 detik hingga mencapai tingkat kelembaban optimal (40% - 60%)

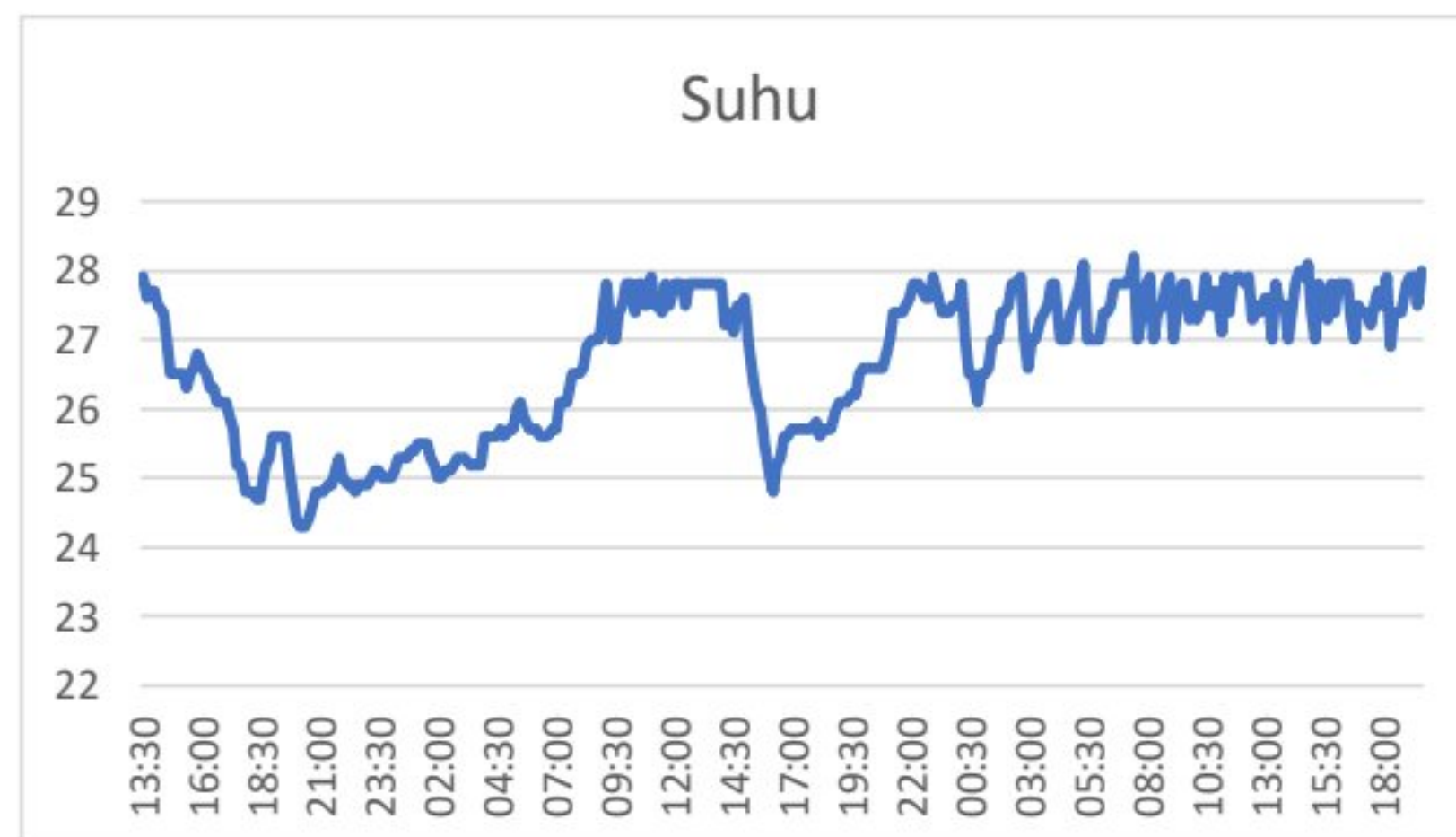
- Sistem mampu menjaga kelembaban tanah di sekitar tanaman bayam pada kisaran yang optimal untuk pertumbuhan, dengan siklus penyiraman yang konsisten.

4.6 Pengujian Alat Keseluruhan

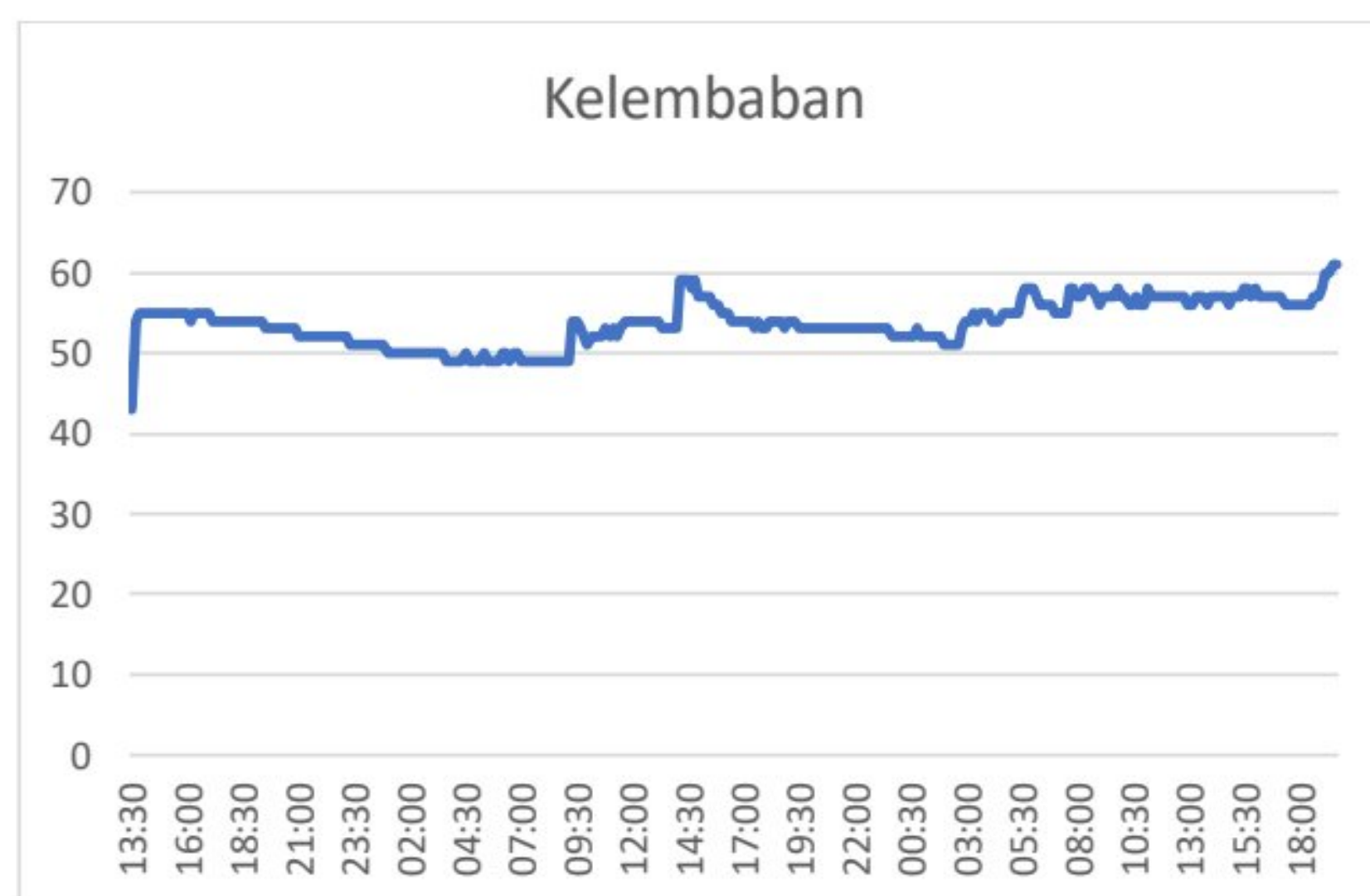
Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah sistem monitoring dan kendali suhu dapat berjalan secara otomatis serta andal dalam situasi apapun. Pengujian dilakukan dengan menyalakan alat seharian penuh. Data realtime yang terkirim akan tercatat di logger agar bisa dilihat hasilnya atau dapat di monitoring secara realtime. Data yang terkirim di logger dibuat menjadi per 10 menit.

Sistem yang dirancang pada *prototype* ini menerapkan sistem kontrol *close loop* (*closed-loop control system*) atau sistem kontrol umpan balik. Sistem close loop memiliki kemampuan untuk membaca kondisi aktual melalui sensor, membandingkan dengan setpoint yang telah ditentukan, mengambil keputusan kontrol berdasarkan selisih antara kondisi aktual dan setpoint, mengaktifkan aktuator untuk mengoreksi penyimpangan, memantau hasil koreksi secara kontinyu dan melakukan penyesuaian kembali jika diperlukan.

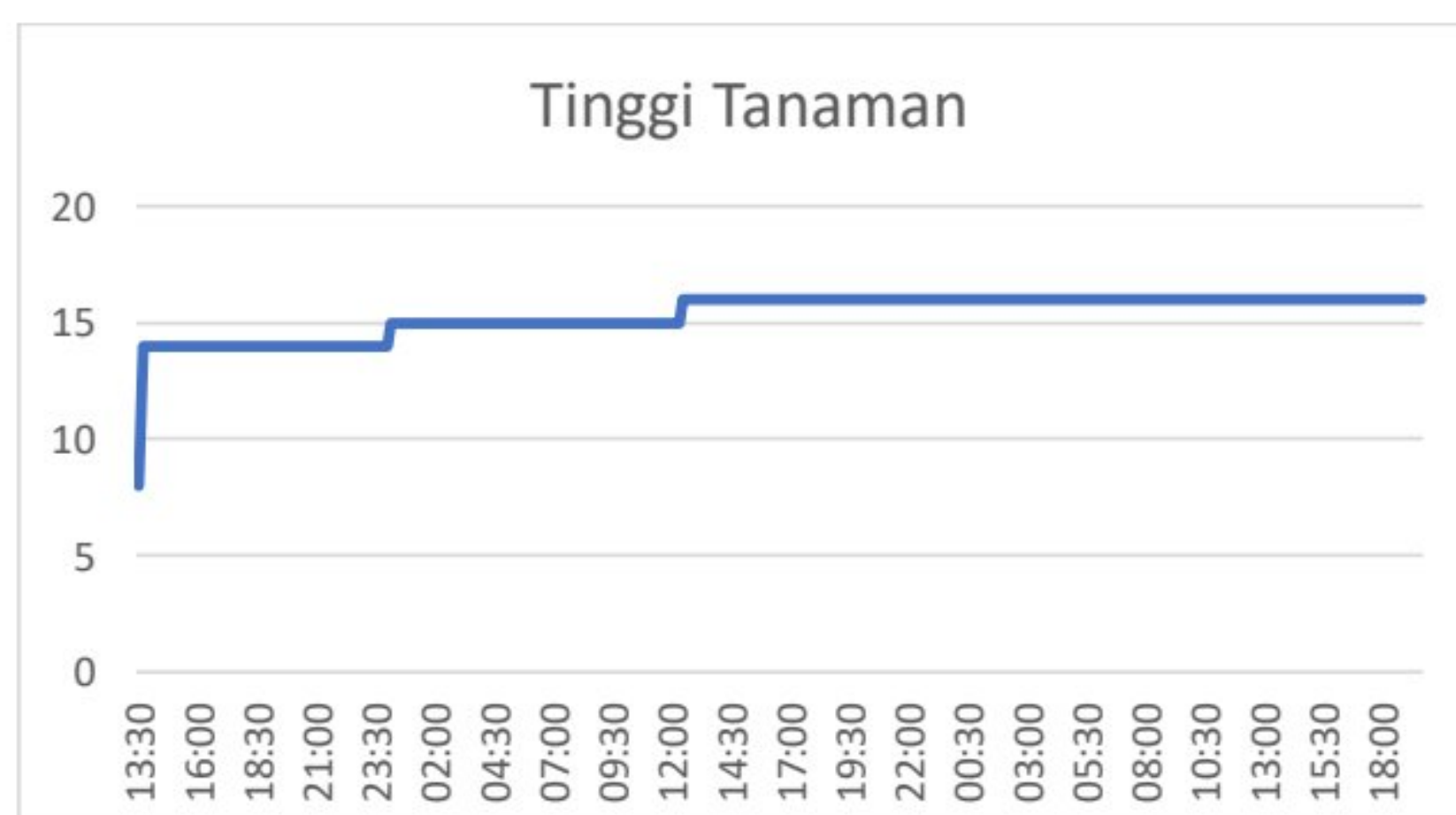
Sistem kontrol *close loop* pada penelitian ini diimplementasikan pada dua parameter utama, yaitu kontrol suhu udara dan kontrol kelembaban tanah. Keunggulan sistem closeloop dalam penelitian ini adalah sistem dapat secara otomatis mendeteksi penyimpangan dari kondisi optimal, tidak memerlukan intervensi manual untuk penyesuaian, lalu sistem dapat mengatasi perubahan kondisi lingkungan yang dinamis, feedback kontinyu memastikan kondisi lingkungan selalu mendekati setpoint, error steady state minimal karena koreksi terus menerus. Efisiensi energi karena aktuator hanya aktif saat diperlukan, hysteresis mencegah switching yang terlalu sering, semua data sensor dan aktuator tercatat pada data logger.



Gambar 4. 7 Grafik Suhu Hasil Pengujian Alat Keseluruhan



Gambar 4. 8 Grafik Kelembaban Hasil Pengujian Alat Keseluruhan



Gambar 4. 9 Grafik Tinggi Tanaman Hasil Pengujian Alat Keseluruhan

Sistem yang dirancang dalam penelitian ini menerapkan mekanisme kontrol close-loop dengan feedback kontinu yang memastikan kondisi pada *Greenhouse* selalu mendekati nilai optimal. Mekanisme feedback ini berlangsung secara otomatis tanpa memerlukan intervensi manual, dimana sensor membaca kondisi aktual, membandingkannya dengan setpoint yang telah ditentukan, kemudian mengaktifkan aktuator yang sesuai untuk melakukan koreksi.

Pada kontrol suhu, sensor DHT11 membaca suhu aktual secara real-time setiap satu detik. Data suhu yang terbaca kemudian dibandingkan dengan nilai setpoint sebesar 28°C. ketika suhu terukur melebihi 28°C, sistem akan mengaktifkan relay pompa misting yang kemudian menyemburkan kabut air untuk menurunkan suhu melalui proses pendinginan evaporatif. Sensor terus memantau perubahan suhu yang terjadi, dan ketika suhu sudah turun hingga 27°C atau dibawahnya, sistem akan menonaktifkan pompa. Penggunaan hysteresis sebesar 1°C antara 27°C dan 28°C sangat penting untuk mencegah switching yang terlalu sering, karena aktivasi relay yang berlebihan dapat memperpendek umur komponen dan menyebabkan ketidakstabilan sistem.

Mekanisme serupa juga diterapkan pada kontrol kelembaban tanah. Sensor capacitive soil moisture membaca tingkat kelembaban tanah setiap satu detik dengan mengukur nilai ADC yang kemudian dikonversi menjadi persentase kelembaban menggunakan formula linear. Ketika kelembaban terukur kurang dari 40%, sistem akan mengaktifkan relay pompa sehingga air mengalir ke tanaman menggunakan irigasi tetes dan meningkatkan kelembaban. Sensor terus memantau peningkatan kelembaban yang terjadi, dan pompa akan dimatikan secara otomatis setelah kelembaban mencapai 60%. Range operasi antara 40% hingga 60% ini dipilih berdasarkan literatur untuk memastikan tanah tidak terlalu kering yang dapat menghambat pertumbuhan, namun juga tidak tergenang yang dapat menyebabkan pembusukan akar.

Selain kedua parameter kontrol tersebut, sistem juga dilengkapi dengan monitoring pertumbuhan tanaman menggunakan sensor VL53L0XV2 yang membaca jarak setiap setengah detik. Sistem menghitung tinggi tanaman dengan

cara mengurangi tinggi pemasangan sensor dengan jarak yang terukur oleh sensor. Informasi pertumbuhan ini sangat membantu dalam evaluasi efektivitas sistem secara keseluruhan.

Relevansi sistem ini dapat dilihat dari validasi kondisi optimal berdasarkan literatur ilmiah yang ada. Penelitian yang dilakukan oleh Ekoputranto pada tahun 2016 menyatakan bahwa suhu optimal untuk pertumbuhan bayam adalah 28°C. Pada gambar 4.7 pengujian sistem menunjukkan bahwa rata-rata suhu dapat dijaga pada 27,7°C dengan standar deviasi plus minus 0,5°C. sistem berhasil mencegah suhu melebihi 28°C selama periode pengujian. Data ini membuktikan bahwa sistem mampu menjaga stabilitas suhu sesuai dengan rekomendasi literatur.

Literatur yang ditulis oleh Rahman dan Santika tahun 2022 menyebutkan bahwa kelembaban tanah optimal untuk bayam berada pada kisaran 40% hingga 60%. Pada gambar 4.8 menunjukkan kelembaban rata-rata sebesar 53,8% yang berada tepat di tengah range optimal. Selama periode pengujian tidak ada kejadian dimana kelembaban turun dibawah 35% atau naik diatas 65%, yang menunjukkan bahwa siklus penyiraman otomatis berjalan dengan efektif dalam menjaga konsistensi kelembaban tanah.

Data yang dikumpulkan dari sensor juga memberikan kontribusi terhadap pengetahuan ilmiah, khususnya dalam memahami korelasi antara suhu dengan pertumbuhan tanaman. Data menunjukkan bahwa periode dimana suhu stabil antara 26°C hingga 27°C, pertumbuhan tanaman dapat mencapai dua sentimeter dalam waktu 48 jam. Temuan ini mendukung hipotesis bahwa stabilitas suhu lebih penting daripada nilai absolut suhu itu sendiri, karena fluktuasi suhu yang besar menyebabkan stress pada tanaman meskipun rata-ratanya berada pada nilai optimal.

Hasil output tanaman selama periode pengujian menunjukkan indikator pertumbuhan yang sehat. Secara visual dan morfologi, tanaman bayam menunjukkan tinggi dari 14 cm menjadi 16 cm dalam waktu 48 jam, yang merupakan pertambahan sebesar 14,3%. Kondisi daun hijau segar tanpa ada tanda-tanda klorosis atau layu yang biasanya muncul ketika tanaman mengalami stress

lingkungan. Tekstur daun terasa empuk yang menandakan bahwa tanaman mendapat hidrasi yang optimal, tidak kekurangan air namun juga tidak tergenang. Batang tanaman tumbuh kokoh tanpa menunjukkan gejala etiolasi yaitu pemanjangan batang yang abnormal akibat kekurangan cahaya atau kondisi lingkungan yang tidak sesuai. Yang lebih penting lagi, tanaman tidak menunjukkan tanda-tanda bolting atau pembungaan prematur yang biasanya terjadi pada tanaman bayam ketika suhu terlalu tinggi yaitu diatas 30°C.

Perbandingan antara kondisi tanaman di dalam *Greenhouse* yang terkontrol dengan pengamatan umum tanaman di luar *Greenhouse* menunjukkan perbedaan yang signifikan. Pertumbuhan tinggi tanaman di dalam *Greenhouse* mencapai 2 cm dalam dua hari, sementara berdasarkan pengamatan umum, tanaman di luar *Greenhouse* hanya tumbuh sekitar 1 hingga 1,5 cm dengan pola yang tidak teratur. Warna daun tanaman di dalam *Greenhouse* tampak hijau seragam pada semua bagian tanaman, sedangkan tanaman di luar *Greenhouse* cenderung menunjukkan warna yang pucat atau kekuningan terutama pada daun-daun tua. Tekstur daun tanaman *Greenhouse* terasa empuk, berbeda dengan tanaman luar yang sering terlihat layu terutama pada siang hari ketika suhu tinggi dan penguapan meningkat.

Dari segi kelembaban media tanam, sistem *Greenhouse* mampu menjaga konsistensi pada kisaran 40% hingga 60%, sementara tanaman di luar *Greenhouse* mengalami fluktuasi kelembaban yang sangat besar antara 20% hingga 80% tergantung cuaca dan frekuensi penyiraman manual. Suhu di sekitar tanaman juga jauh lebih stabil di dalam *Greenhouse* dibandingkan dengan kondisi diluar yang tidak terkontrol dengan fluktuasi antara 22°C hingga 35°C. Tingkat stres lingkungan yang dialami tanaman di dalam *Greenhouse* sangat minimal karena terlindungi dari angin kencang, hujan deras, dan paparan sinar matahari langsung yang berlebihan, sementara tanaman di luar *Greenhouse* menghadapi semua faktor stress tersebut secara langsung.

Sebagai kesimpulan dari bagian ini, sistem monitoring dan kendali yang dirancang terbukti efektif dalam menjaga kondisi lingkungan optimal untuk pertumbuhan bayam. Mekanisme feedback *closed-loop* yang diterapkan memastikan respons

yang cepat dan akurat terhadap setiap perubahan kondisi lingkungan, sementara data yang dikumpulkan dari berbagai sensor memberikan bukti empiris yang kuat untuk mendukung literatur yang ada terkait kondisi optimal pertumbuhan bayam. Pertumbuhan bayam sebesar 14,3% dalam waktu 48 jam dan kondisi morfologi yang sangat sehat mengindikasikan bahwa sistem ini mampu mendukung produktifitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Perbandingan dengan kondisi tanaman di luar *Greenhouse* menunjukkan keunggulan yang signifikan dalam hal stabilitas lingkungan, kesehatan tanaman, dan prediktabilitas hasil panen. Dengan demikian, sistem ini memiliki potensi besar untuk diaplikasikan dalam skala yang lebih luas sebagai solusi untuk meningkatkan produktivitas pertanian tanaman sayuran khususnya bayam.