

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja simulasi sistem monitoring suhu dan tekanan transformator daya berbasis ESP32 yang telah dirancang dan dibangun. Aspek yang dievaluasi meliputi uji validasi sensor dan uji sistem secara keseluruhan.

Uji validasi sensor terdiri dari dua bagian, yaitu kesesuaian pembacaan suhu antara tampilan lokal pada layar LCD dengan data yang diterima oleh *website* Node-RED menggunakan sensor termokopel tipe K, serta kesesuaian pembacaan tekanan antara tampilan lokal pada *Pressure Gauge* dengan data yang diterima oleh *website* Node-RED menggunakan sensor tekanan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang ditampilkan pada sistem monitoring jarak jauh sesuai dengan kondisi aktual yang terbaca secara langsung pada alat.

Uji sistem secara keseluruhan dilakukan untuk mengetahui apakah sistem yang telah dirancang dapat berjalan sesuai dengan perancangan, meliputi kinerja pembacaan sensor, tampilan informasi pada LCD, respons *buzzer* terhadap perubahan kondisi suhu dan tekanan, aktivasi *Relay* dan *Solenoid Valve* saat kondisi bahaya tercapai, serta kemampuan sistem dalam menjalankan seluruh alur kerja secara terintegrasi. Selain itu, dilakukan pula uji keberhasilan pencatatan data pada *website* dan Google Sheets, untuk memastikan data suhu dan tekanan yang terbaca oleh sensor dapat tersimpan dan ditampilkan dengan baik pada kedua media tersebut secara *real-time*.

Prosedur pengujian dilakukan secara bertahap agar setiap bagian sistem dapat diperiksa secara terpisah sebelum dilakukan pengujian sistem secara terintegrasi. Pengujian dilaksanakan dengan koneksi internet yang aktif untuk keperluan pengiriman data ke *website* Node-RED dan Google Sheets.

Alat dan bahan yang digunakan selama proses pengujian adalah sebagai berikut:

1. Prototipe tangki minyak transformator (ESP32 DOIT DevKit V1 + sensor termokopel tipe K + sensor tekanan + *Heater* + *solenoid valve* + *Pressure Gauge*).
2. Teko elektrik sebagai pengganti tangka minyak untuk pengujian validasi sensor.
3. Air biasa sebagai pengganti oli minyak trafo untuk pengujian monitoring suhu dan tekanan simulasi tangki trafo.
4. Thermometer digital dan *Pressure Gauge* digunakan untuk pengujian validasi sensor.
5. Teko ukur untuk mengukur volume air yang masuk ke tangka.
6. Laptop untuk mengakses *Google Sheets* dan *Note Red* sebagai *website*.
7. Laptop dengan Arduino IDE untuk proses pengunggahan program ke ESP32 (dilakukan sebelum pengujian dimulai).
8. *Handphone* sebagai alat dokumentasi selama pengujian berlangsung.
9. Jaringan WiFi aktif untuk koneksi internet pada ESP32.

Prosedur pengujian validasi sensor dan keseluruhan sistem dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

5.1.1 Validasi Sensor Suhu

1. Menyiapkan media uji berupa teko berisi air, yang dilengkapi dengan *Heater*, termometer sebagai alat ukur pembanding, serta sensor termokopel tipe K. Media uji terpisah ini digunakan khusus untuk proses validasi sensor suhu, karena struktur tangki simulasi sistem tidak menyediakan celah tambahan untuk memasukkan termometer sebagai alat ukur pembanding, sehingga pengujian dilakukan pada media yang representatif namun tetap terkendali kondisinya.
2. Menyalakan *Heater* untuk menaikkan suhu air secara bertahap hingga mencapai beberapa titik suhu uji yang telah ditentukan.
3. Mencatat nilai suhu yang ditampilkan oleh sensor termokopel tipe K, termometer pembanding, serta data yang diterima oleh *website* Node-RED pada setiap titik suhu uji secara bersamaan.
4. Membandingkan selisih (*error*) antara pembacaan sensor termokopel dengan termometer, serta dengan data pada *website* Node-RED, untuk mengetahui

tingkat akurasi dan konsistensi data.

5. Mengulangi langkah pengujian pada beberapa titik suhu yang berbeda guna memperoleh data validasi yang representatif.

5.1.2 Validasi Sensor Tekanan

1. Menyiapkan simulasi sistem tangki yang telah terpasang sensor tekanan dan *Pressure Gauge* pada titik pengukuran yang sama.
2. Menaikkan tekanan di dalam tangki secara bertahap melalui proses pemanasan yang berlangsung dalam ruang tertutup.
3. Mencatat nilai tekanan yang ditampilkan oleh sensor tekanan, *Pressure Gauge*, serta data yang diterima oleh *website* Node-RED pada setiap titik tekanan uji secara bersamaan.
4. Membandingkan selisih (*error*) antara pembacaan sensor tekanan dengan *Pressure Gauge*, serta dengan data yang ditampilkan pada *website* Node-RED, untuk mengetahui tingkat akurasi dan konsistensi data sensor tekanan.
5. Mengulangi langkah pengujian pada beberapa titik tekanan yang berbeda guna memperoleh data validasi yang representatif.

5.1.3 Uji Sistem Secara Keseluruhan

1. Menyalakan seluruh simulasi sistem dalam kondisi terintegrasi, meliputi sensor termokopel tipe K, sensor tekanan, ESP32, LCD, *Relay*, *Solenoid Valve*, serta memastikan koneksi internet dalam keadaan aktif untuk keperluan pengiriman data ke *website* Node-RED dan Google *Spreadsheet*.
2. Menjalankan simulasi kenaikan suhu pada tangki simulasi sistem menggunakan *Heater* yang dayanya diatur melalui modul *Dimmer AC*, sehingga suhu dan tekanan di dalam tangki meningkat secara bertahap dan terkendali.
3. Mengamati dan mencatat respons sistem pada kondisi normal, yaitu ketika suhu dan tekanan masih berada di bawah ambang batas *warning*, meliputi tampilan data pada LCD serta kondisi *buzzer* dan *Solenoid Valve* yang seharusnya tidak aktif.
4. Mengamati dan mencatat respons sistem pada kondisi *warning*, yaitu ketika suhu dan/atau tekanan telah melewati ambang batas *warning* namun belum mencapai ambang bahaya, meliputi aktivasi *buzzer* sebagai peringatan dini serta

kondisi tampilan pada LCD.

5. Mengamati dan mencatat respons sistem pada kondisi bahaya, yaitu ketika suhu dan/atau tekanan telah melewati ambang batas bahaya, meliputi aktivasi *Relay* dan *Solenoid Valve* secara otomatis untuk melepaskan tekanan berlebih, serta kondisi *buzzer* dan tampilan LCD pada saat kondisi tersebut terjadi.
6. Memeriksa keberhasilan pengiriman dan pencatatan data pada *website* Node-RED dan *Google Spreadsheet*, dengan membandingkan data suhu dan tekanan yang ditampilkan pada kedua media tersebut terhadap kondisi aktual yang terbaca sistem, untuk memastikan tidak terjadi kehilangan data (*data loss*) maupun keterlambatan pembaruan (*delay*).
7. Mengulangi seluruh langkah pengujian sebanyak beberapa kali percobaan untuk memastikan konsistensi respons sistem pada setiap kondisi (normal, *warning*, dan bahaya).
8. Proses pengujian dinyatakan selesai apabila seluruh alur kerja sistem. Mulai dari pembacaan sensor, pengambilan keputusan berdasarkan ambang batas, aktivasi *output* (LCD, *buzzer*, *Relay*, *Solenoid Valve*), hingga pengiriman dan pencatatan data — telah berjalan sesuai dengan rancangan yang dibuat pada BAB III.

Parameter yang diamati pada keseluruhan pengujian ditunjukkan pada Tabel 5.1

Tabel 5. 1 Parameter Pengujian

Parameter	Satuan	Metode Pengukuran	Keterangan
Suhu	°C	Pembacaan Sensor Suhu Thermocouple Type K	Parameter Utama Kendali Sistem
Tekanan	Psi	Pembacaan Sensor Pressure	Parameter Utama Kendali Sistem
Kesesuaian suhu dan Tekanan dengan node red	-	Perbandingan tampilan node red dan aktual suhu dan tekanan	Validasi Konsistensi data pada sensor suhu dan tekanan
Waktu Proses Jalannya Sistem	Menit/Jam	Pencatatan durasi dari awal hingga akhir	Hasil kondisi perbandingan antar

Parameter	Satuan	Metode Pengukuran	Keterangan
		proses	skenario

Pengujian sistem ini dilakukan dengan dua skenario. Skenario pertama adalah pengujian validasi sensor menggunakan metode manual dengan cara membandingkan data pembacaan sensor suhu maupun tekanan dengan alat ukur konvensional seperti *thermometer* dan *Pressure Gauge*. Skenario kedua adalah pengujian keseluruhan sistem yang dilakukan menggunakan metode otomatis dengan cara melihat kinerja dari output sistem sesuai dengan konfigurasi logika program yang telah disusun. Ringkasan scenario pengujian disajikan pada Tabel 5.2

Tabel 5.2 Skenario Pengujian

No	Skenario	Metode	Pencatatan Data
1	Pengujian Validasi Sensor	Manual	Inputkan secara manual ke Excel berdasarkan pengujian yang telah dilakukan
2	Pegujian Keseluruhan Sistem	Otomatis	Otomatis dikirimkan ke Google Sheets

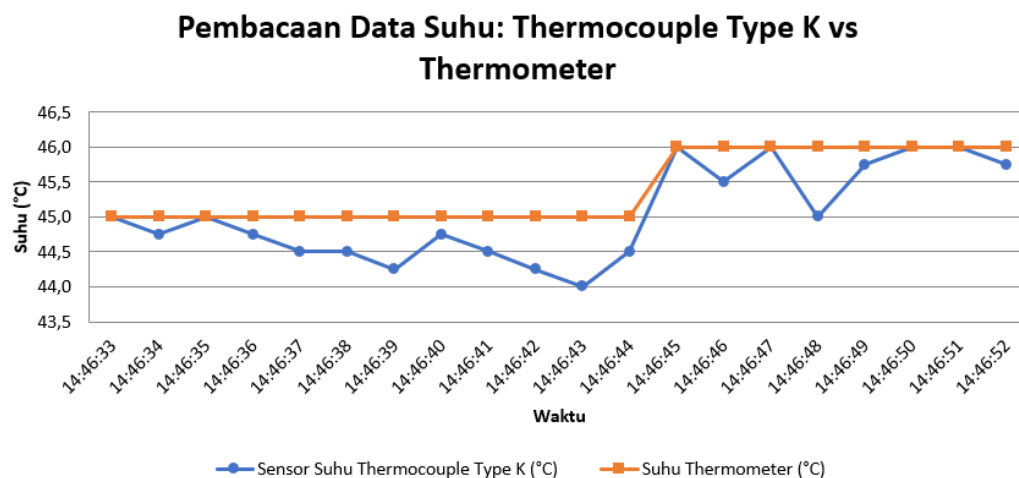
5.2 Pengujian dan Analisa Validasi Sensor Suhu Terhadap Alat Ukur Thermometer

Pengujian validasi sensor suhu dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan sensor suhu yang digunakan pada simulasi sistem dengan alat ukur thermometer sebagai alat ukur pembanding. Pengujian dilakukan dengan memberikan beberapa kondisi suhu kemudian mencatat hasil pembacaan dari sensor dan thermometer secara bersamaan. Data hasil pengukuran selanjutnya dibandingkan untuk mengetahui nilai selisih dan persentase error pembacaan sensor terhadap alat ukur pembanding.

Pengujian dilakukan dengan menempatkan sensor suhu dan thermometer pada kondisi pengukuran yang sama. Pada setiap kondisi, nilai suhu yang terbaca oleh sensor dicatat melalui sistem monitoring, sedangkan nilai pada thermometer digunakan sebagai nilai pembanding. Pengukuran dilakukan pada beberapa variasi suhu untuk memperoleh data yang dapat digunakan dalam proses validasi sensor. Kemudian hasil pengujian ditunjukkan pada table dibawah ini.

Tabel 5.3 Hasil Pengujian Validasi Sensor Suhu

NO	Waktu	PEMBACAAN DATA SUHU		Error (°C)	Error (%)	Akurasi (%)
		Sensor Suhu Thermocouple Type K (°C)	Suhu Thermometer (°C)			
1	14:46:33	45	45	0	0	100
2	14:46:34	44,75	45	0,25	0,55	99,45
3	14:46:35	45	45	0	0	100
4	14:46:36	44,75	45	0,25	0,55	99,45
5	14:46:37	44,5	45	0,5	1,1	98,9
6	14:46:38	44,5	45	0,5	1,1	98,9
7	14:46:39	44,25	45	0,75	1,6	98,4
8	14:46:40	44,75	45	0,25	0,55	99,45
9	14:46:41	44,5	45	0,5	1,1	98,9
10	14:46:42	44,25	45	0,75	1,6	98,4
11	14:46:43	44	45	1	2,22	97,78
12	14:46:44	44,5	45	0,5	1,1	98,9
13	14:46:45	46	46	0	0	100
14	14:46:46	45,5	46	0,5	1,9	98,92
15	14:46:47	46	46	0	0	100
16	14:46:48	45	46	1	2,17	97,83
17	14:46:49	45,75	46	0,25	0,54	99,46
18	14:46:50	46	46	0	0	100
19	14:46:51	46	46	0	0	100
20	14:46:52	45,75	46	0,25	0,54	99,46
RATA-RATA		45,04	45,40	0,36	0,83	99,21



Gambar 5.1 Grafik Validasi Sensor Suhu

Berdasarkan hasil pengujian validasi sensor suhu pada Tabel 5.3 dan Gambar grafik 5.1, tingkat kesesuaian antara pembacaan sensor *Thermocouple Type K* dengan termometer sebagai alat ukur pembandingan menunjukkan hasil yang sangat tinggi. Dari satu kali pengujian yang dilakukan diambil sebanyak 20 data terbaik secara berurutan pada rentang suhu 44 °C hingga 46 °C ini membuktikan bahwa pembacaan sensor beroperasi secara presisi dan tidak mengalami penyimpangan (*over-reading*) ekstrem. Pada rentang data pengujian nomor 1 hingga nomor 12 di mana sensor mampu membaca suhu pada kisaran sempit antara 44 °C hingga 45 °C. Dengan error pembacaan maksimal tercatat hanya sebesar 1 °C, bahkan mencapai tingkat akurasi sempurna tanpa selisih (0 °C) pada beberapa titik pengukuran.

Secara lebih rinci, pada rentang data pengujian nomor 1 hingga nomor 12, termometer digital menunjukkan suhu referensi yang konstan di angka 45 °C. Pada kondisi ukur yang statis ini, sensor *Thermocouple Type K* menunjukkan tingkat sensitivitas yang sangat baik dengan rentang pembacaan yang sangat sempit, yakni antara 44 °C hingga 45,00 °C. Error maksimum pada rentang ini tercatat hanya sebesar 1 °C (terjadi pada data pengujian nomor 11). Lebih dari itu, pada beberapa titik pengambilan data, seperti pada data pengujian nomor 1 dan nomor 3, sensor mampu membaca suhu tepat di angka 45 °C, yang berarti mencatatkan nilai selisih

0 °C atau menyentuh tingkat keakuratan sempurna sebesar 100%. Fluktuasi desimal yang sangat minim ini mengindikasikan bahwa pembacaan sensor tidak terpengaruh oleh derau (*noise*) sinyal secara berlebihan saat mengonversi data analog menjadi digital.

Kemampuan linearitas sensor semakin terbukti ketika suhu referensi mengalami transisi kenaikan. Mulai dari data pengujian nomor 13 hingga nomor 20, saat termometer menunjukkan kenaikan suhu konstan di angka 46 °C, sensor merespons perubahan termal tersebut secara proporsional. Pada fase ini, nilai yang terbaca oleh sensor berada pada kisaran 45,00 °C hingga 46 °C. Respons yang linier ini membuktikan bahwa selubung *stainless steel* (model *industrial head*) pada sensor mampu menghantarkan panas secara efektif, sehingga sensor dapat mengikuti dinamika perubahan suhu aktual dari alat ukur pembanding dengan tingkat keterlambatan (*lag*) yang sangat minim.

Secara keseluruhan dari akumulasi 20 data pengujian tersebut, didapatkan nilai rata-rata pembacaan sensor sebesar 45,04 °C, yang sangat identik dan mendekati nilai rata-rata termometer sebesar 45,40 °C. Parameter evaluasi akhir menunjukkan hasil yang sangat memuaskan, di mana rata-rata persentase kesalahan (*error*) tercatat sangat rendah, yakni hanya sebesar 0,83%, berbanding lurus dengan pencapaian rata-rata tingkat keakuratan yang mencapai 99,21%. Toleransi penyimpangan minor pada rentang $\pm 0,25$ hingga 1 °C ini sepenuhnya berada di bawah batas kewajaran resolusi konversi modul MAX6675 dan tidak akan mengganggu sensitivitas logika proteksi saling silang (*interlock*) pada mikrokontroler. Dengan tercapainya keakuratan sebesar 99,21%, keandalan sensor *Thermocouple Type K* telah tervalidasi secara komprehensif, sehingga sangat layak dan aman diimplementasikan sebagai parameter ukur utama pada sistem otomasi tangki prototipe transformator daya.

Untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor pada tahap validasi tersebut, digunakan perhitungan nilai persentase kesalahan (*error*). Perhitungan matematis ini sangat krusial untuk mengetahui seberapa besar tingkat penyimpangan antara besaran fisik yang dibaca oleh sistem prototipe dengan alat ukur pembanding konvensional. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

Perhitungan error relatif pada setiap pengujian dijabarkan sebagai berikut.

$$Error(\%) = \frac{|S_{suhu} - S_{pembanding\ suhu}|}{S_{pembanding\ suhu}} \times 100\%$$

Rata-rata error relatif dihitung dari seluruh hasil pengujian menggunakan persamaan berikut.

$$Error(\%) = \frac{|Error_{data1} + Error_{data2} + Error_{data3} + \dots + Error_{data20}|}{20}$$

$$Error(\%) = \frac{0 + 0,55 + 0 + \dots + 0,54}{20}$$

$$Error(\%) = \frac{16,62}{20}$$

$$Error = 0,83\%$$

Akurasi pengukuran ditentukan berdasarkan error relatif menggunakan persamaan berikut.

$$Akurasi(\%) = 100\% - Error(\%)$$

$$Akurasi(\%) = 100\% - 0,55\% = 99,45\%$$

5.3 Pengujian dan Analisa Validasi Sensor *Pressure* Terhadap Alat Ukur *Pressure Gauge*

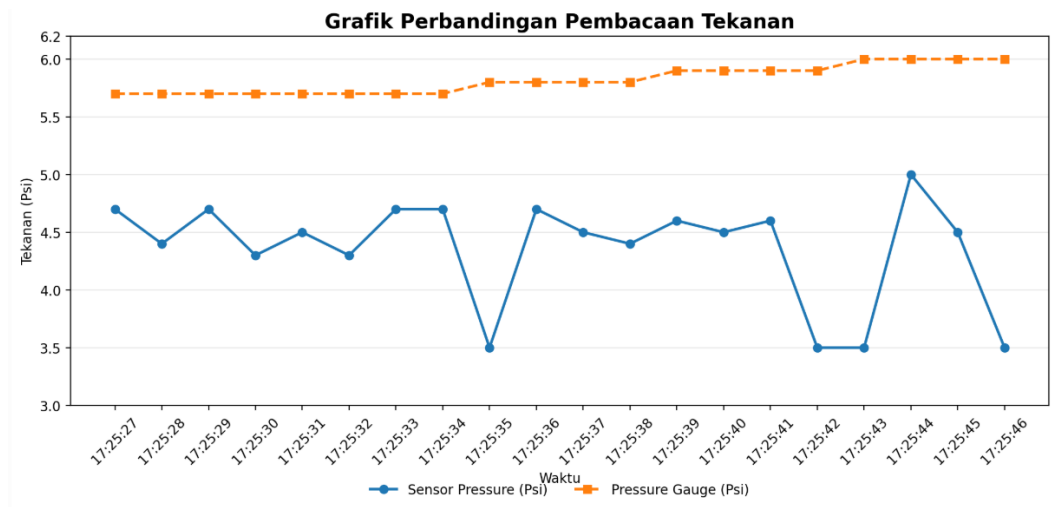
Pengujian validasi sensor *Pressure* dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil pembacaan sensor tekanan yang digunakan pada simulasi sistem terhadap *Pressure Gauge* sebagai alat ukur pembanding. Pengujian dilakukan dengan memberikan kondisi tekanan yang sama pada kedua alat ukur, kemudian hasil pembacaan sensor *Pressure* dan *Pressure Gauge* dicatat pada setiap waktu pengukuran. Data hasil pengujian selanjutnya dibandingkan untuk mengetahui selisih pembacaan, persentase error, dan tingkat akurasi sensor terhadap alat ukur pembanding.

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan sensor *Pressure* pada simulasi sistem dan menggunakan *Pressure Gauge* sebagai alat ukur referensi. Nilai tekanan yang terbaca oleh sensor *Pressure* diamati melalui sistem monitoring, sedangkan nilai pada *Pressure Gauge* diamati secara langsung pada waktu

pengukuran yang sama. Pengambilan data dilakukan sebanyak satu kali pengujian dan diambil 20 data terbaik dengan interval waktu pengukuran selama satu detik. Nilai Sensor *Pressure* selama pengujian berada pada rentang 3,5–5 Psi, sedangkan hasil pembacaan *Pressure Gauge* berada pada rentang 5,7–6,0 Psi.

Tabel 5.4 Hasil Pengujian Validasi Sensor Tekanan

NO	Waktu	PEMBACAAN DATA TEKANAN		Error (Psi)	Error (%)	Akurasi (%)
		Sensor <i>Pressure</i> (Psi)	<i>Pressure</i> <i>Gauge</i> (Psi)			
1	17:25:27	4,7	5,7	1	17,54	82,46
2	17:25:28	4,4	5,7	1,3	22,81	77,19
3	17:25:29	4,7	5,7	1	17,54	82,46
4	17:25:30	4,3	5,7	1,4	24,56	75,44
5	17:25:31	4,5	5,7	1,2	21,05	78,95
6	17:25:32	4,3	5,7	1,4	24,56	75,44
7	17:25:33	4,7	5,7	1	17,54	82,46
8	17:25:34	4,7	5,7	1	17,54	82,46
9	17:25:35	3,5	5,8	2,3	39,65	60,35
10	17:25:36	4,7	5,8	1,1	18,96	81,04
11	17:25:37	4,5	5,8	1,3	22,41	77,59
12	17:25:38	4,4	5,8	1,4	24,13	75,87
13	17:25:39	4,6	5,9	1,3	22,03	77,97
14	17:25:40	4,5	5,9	1,4	23,72	76,28
15	17:25:41	4,6	5,9	1,3	22,03	77,97
16	17:25:42	3,5	5,9	2,4	40,67	59,33
17	17:25:43	3,5	6,0	2,5	41,66	58,34
18	17:25:44	5,0	6,0	1	16,66	83,34
19	17:25:45	4,5	6,0	1,5	25,00	75,00
20	17:25:46	3,5	6,0	2,5	41,66	58,34
RATA-RATA		4,43	5,82	1,46	25,09	74,91



Gambar 5.2 Grafik Validasi Sensor Tekanan

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel, dilakukan validasi terhadap sensor pressure dengan cara membandingkan hasil pembacaan sensor pressure terhadap pressure gauge sebagai alat pembanding. Pengujian dilakukan sebanyak satu kali dan diambil 20 data terbaik dengan waktu pengukuran yang berlangsung dari pukul 17:25:27 sampai 17:25:46. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kesesuaian hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur pembanding serta mengetahui besarnya nilai error dan akurasi sensor pressure yang digunakan. Dari hasil pengujian, pembacaan sensor *pressure* berada pada rentang 3,5 Psi sampai 5,0 Psi, sedangkan *pressure gauge* menunjukkan nilai pada rentang 5,7 Psi sampai 6,0 Psi. Perbedaan nilai pembacaan antara kedua alat tersebut menunjukkan adanya selisih pengukuran, tetapi secara umum perubahan nilai yang terbaca pada sensor mengikuti perubahan nilai pada *pressure gauge*.

Pada data pengujian nomor 1, sensor *pressure* menunjukkan nilai 4,7 Psi, sedangkan *pressure gauge* menunjukkan 5,7 Psi, sehingga terdapat selisih sebesar 1 Psi dengan error sebesar 17,54% dan akurasi sebesar 82,46%. Kondisi yang hampir sama juga terlihat pada beberapa data pengujian berikutnya. Pada data pengujian nomor 2, sensor membaca 4,4 Psi dan *pressure gauge* sebesar 5,7 Psi, menghasilkan error 22,81% dengan akurasi 77,19%. Sementara itu, pada data pengujian nomor 3 sensor membaca 4,7 Psi dan *pressure gauge* 5,7 Psi, dengan error 17,54% dan akurasi 82,46%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada tekanan sekitar 4,7 Psi, selisih pembacaan sensor terhadap *pressure gauge* relatif kecil, yaitu

sekitar 1 Psi.

Pada data pengujian nomor 1 sampai data pengujian nomor 8, *Pressure Gauge* berada pada nilai 5,7 Psi, sedangkan sensor *Pressure* memberikan pembacaan antara 4,3–4,7 Psi. Error pembacaan pada kondisi tersebut berada pada rentang 1,0–1,4 Psi. Meskipun *Pressure Gauge* menunjukkan nilai yang relatif konstan, pembacaan sensor mengalami perubahan dari 4,3 Psi hingga 4,7 Psi. Hal ini menunjukkan bahwa sensor belum menghasilkan pembacaan yang sepenuhnya stabil pada kondisi tekanan referensi yang sama.

Pada data pengujian nomor 9 sampai dengan nomor 12, *Pressure Gauge* menunjukkan nilai 5,8 Psi. Nilai sensor *Pressure* berada pada rentang 3,5–4,7 Psi, dengan kesalahan pembacaan sebesar 1,1–2,3 psi. Penyimpangan paling besar pada rentang ini terjadi pada data hasil pengujian nomor 9 ketika sensor membaca 3,5 Psi, sedangkan *Pressure Gauge* menunjukkan 5,8 Psi. Kondisi tersebut menghasilkan error sebesar 2,3.

Pada data hasil pengujian nomor 13 sampai data nomor 16, nilai *Pressure Gauge* meningkat menjadi 5,9 Psi. Sensor *Pressure* memberikan pembacaan antara 3,5–4,6 Psi. kesalahan pembacaan berada pada rentang 1,3–2,4 Psi. Pada data hasil pengujian nomor 16, sensor kembali menunjukkan nilai 3,5 Psi ketika *Pressure Gauge* menunjukkan 5,9 Psi.

Pada data hasil pengujian nomor 17 sampai data hasil pengujian nomor 20, *Pressure Gauge* menunjukkan tekanan sebesar 6,0 Psi. Sensor *Pressure* memberikan pembacaan 3,5–5,0 Psi. Kesalahan error terbesar terjadi pada data hasil pengujian nomor 17 dan data hasil pengujian nomor 20, yaitu sebesar 2,5 Psi, ketika sensor membaca 3,5 Psi dan *Pressure Gauge* menunjukkan 6,0 Psi. Dengan demikian, persentase error pada kedua pengujian tersebut mencapai 2,5 sedangkan akurasi sebesar 58,34%. Sebaliknya, pada data hasil pengujian nomor 18 sensor mampu membaca 5,0 Psi pada *Pressure Gauge* sebesar 6,0 Psi sehingga kesalahan pembacaan menjadi 1,0 Psi dengan akurasi 83,34%.

Secara keseluruhan, nilai rata-rata pembacaan sensor *Pressure* adalah 4,43 Psi, sedangkan rata-rata pembacaan *Pressure Gauge* adalah 5,82 Psi. Rata-rata kesalahan pembacaan kedua alat sebesar 1,46 Psi, dengan rata-rata persentase

akurasi sebesar 74,91%.

Perhitungan error relatif pada setiap pengujian dijabarkan sebagai berikut.

$$Error(\%) = \frac{|S_{pressure} - S_{pembanding\ pressure}|}{S_{pembanding\ pressure}} \times 100\%$$

Rata-rata error relatif dihitung dari seluruh hasil pengujian menggunakan persamaan berikut.

$$Error(\%) = \frac{|Error_{data1} + Error_{data2} + Error_{data3} + \dots + Error_{data20}|}{20}$$

$$Error(\%) = \frac{0,18 + 0,23 + 0 + \dots 0,42}{20}$$

$$Error(\%) = \frac{5,02}{20}$$

$$Error = 0,25\%$$

Akurasi pengukuran ditentukan berdasarkan error relatif menggunakan persamaan berikut.

$$Akurasi(\%) = 100\% - Error(\%)$$

$$Akurasi(\%) = 100\% - 17,54\% = 82,46\%$$

5.4 Pengujian dan Analisa Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk mengetahui kemampuan simulasi sistem dalam menjalankan seluruh fungsi monitoring dan kendali secara terintegrasi. Pengujian meliputi proses pembacaan suhu dan tekanan oleh sensor, pengolahan data oleh ESP32, pengiriman data melalui komunikasi MQTT, penentuan kondisi sistem berdasarkan batas parameter yang telah ditetapkan, serta pengendalian perangkat keluaran berupa *buzzer*, *valve*, dan *heater*. Selain itu, pengujian dilakukan untuk memastikan informasi kondisi sistem dapat diteruskan dan ditampilkan pada antarmuka website sesuai dengan kondisi aktual simulasi sistem.

Pengujian dilakukan dengan memberikan perubahan kondisi suhu dan tekanan secara bertahap sehingga sistem mengalami tiga kondisi operasi, yaitu AMAN, WARNING, dan DANGER. Setiap perubahan kondisi diamati berdasarkan nilai suhu, tekanan, status sistem, serta respons perangkat keluaran yang tercatat pada data pengujian.

Metode pengujian dilakukan dengan mengoperasikan simulasi sistem secara keseluruhan dan mencatat data sistem secara berkala. Data pengujian terdiri atas waktu pengambilan data, nilai suhu, nilai tekanan, batas aman, batas peringatan, batas bahaya, serta kondisi *buzzer*, *valve*, *heater*, dan status sistem. Nilai batas yang digunakan dalam pengujian ditetapkan sebesar 55 °C untuk batas aman suhu, 65 °C untuk batas peringatan suhu, dan 80 °C untuk batas bahaya suhu. Sementara itu, batas tekanan yang digunakan masing-masing sebesar 2 Psi untuk batas aman, 4 Psi untuk batas peringatan, dan 6 Psi untuk batas bahaya.

Pengamatan dilakukan terhadap perubahan respons sistem ketika nilai suhu dan tekanan mengalami peningkatan. Pada setiap kondisi, dicatat hubungan antara parameter masukan dan respons keluaran untuk mengetahui apakah sistem dapat berpindah kondisi sesuai dengan batas yang telah ditentukan. Selain fungsi monitoring, diamati pula respons *buzzer*, *valve*, dan *heater* sebagai perangkat keluaran yang digunakan dalam mekanisme pengamanan sistem.

Tabel 5.5 Uji Keseluruhan Sistem

NO	Suhu (°C)	Tekanan (Psi)	Kondisi			Status
			<i>Buzzer</i>	<i>Solenoid Valve</i>	<i>Heater</i>	
1	54.00	0	OFF	OFF	ON	AMAN
2	54.25	0	OFF	OFF	ON	AMAN
3	54.75	0	OFF	OFF	ON	AMAN
4	55.00	0	OFF	OFF	ON	AMAN
5	55.25	0	OFF	OFF	ON	AMAN
6	71.00	4	ON	OFF	ON	WARNING
7	71.00	4	ON	OFF	ON	WARNING
8	70.00	4	ON	OFF	ON	WARNING
9	74.75	4	ON	OFF	ON	WARNING
10	70.25	4	ON	OFF	ON	WARNING
11	84.25	6	OFF	ON	OFF	DANGER
12	87.25	6	OFF	ON	OFF	DANGER
13	84.25	6	OFF	ON	OFF	DANGER
14	84.75	6	OFF	ON	OFF	DANGER
15	83.25	6	OFF	ON	OFF	DANGER

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5.5, simulasi sistem mampu memberikan respons yang berbeda sesuai dengan kondisi suhu dan tekanan yang diberikan. Didapatkan 15 data terbaik dari 210 data dalam satu kali pengujian, diperoleh tiga kelompok kondisi sistem, yaitu 5 data pengujian dengan kondisi AMAN, 5 data pengujian dengan kondisi WARNING, dan 5 data pengujian dengan kondisi DANGER. Pembagian tersebut menunjukkan bahwa sistem telah diuji pada masing-masing tingkat kondisi untuk mengetahui perubahan respons perangkat keluaran. Dimana untuk batas suhu AMAN berada di 55 °C, WARNING 65°C, DANGER >80°C. Sedangkan untuk batas aman tekanan adalah 2 Psi, warning dalam angka 4 Psi, dan DANGER pada 6 Psi.

Pada data pengujian nomor 1 hingga data nomor 5, tekanan tercatat sebesar 0 Psi, sedangkan suhu berada pada rentang 54,00–55,25 °C. Pada seluruh pengujian tersebut, sistem menunjukkan status AMAN. Kondisi keluaran yang dihasilkan adalah *buzzer* OFF, *valve* OFF, dan *heater* ON.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa ketika sistem berada pada kondisi awal atau kondisi normal, tidak terdapat tindakan peringatan maupun pengamanan yang diaktifkan. *Heater* tetap dalam kondisi ON, sedangkan *valve* dan *buzzer* berada dalam kondisi OFF. Meskipun terdapat pembacaan suhu sebesar 55.25°C yang telah melewati batas aman suhu sebesar 55 °C, status sistem masih berada pada kondisi AMAN karena tekanan masih berada pada 0 Psi. Hal ini menunjukkan bahwa penentuan status sistem dipengaruhi oleh logika pengendalian yang melibatkan parameter suhu dan tekanan, sehingga kenaikan suhu saja belum secara langsung menyebabkan sistem berpindah ke kondisi WARNING.

Perolehan data pengujian nomor 6 hingga data nomor 10, tekanan meningkat menjadi 4 Psi, dengan suhu berada pada rentang 70,00–74,75 °C. Pada seluruh pengujian tersebut, sistem menunjukkan status WARNING. Respons perangkat yang dihasilkan adalah *buzzer* ON, *valve* OFF, dan *heater* ON.

Perubahan tersebut menunjukkan bahwa ketika kondisi sistem memasuki tingkat peringatan, *buzzer* diaktifkan sebagai indikator adanya kondisi yang perlu diperhatikan oleh pengguna. Sementara itu, *valve* masih dalam kondisi OFF dan *heater* tetap ON sehingga sistem belum menjalankan tindakan pengamanan tingkat

tinggi. Konsistensi respons pada 5 data tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kondisi WARNING pada rentang parameter tersebut.

Pada pengujian nomor 11 hingga nomor 15, tekanan meningkat menjadi 6 Psi, sedangkan suhu berada pada rentang 83,25–87,25 °C. Pada kondisi tersebut, seluruh hasil pengujian menunjukkan status DANGER. Respons keluaran berubah menjadi *buzzer* OFF, *valve* ON, dan *heater* OFF.

Perubahan kondisi keluaran ini menunjukkan bahwa sistem telah memasuki tingkat bahaya dan menjalankan mekanisme pengamanan. *Heater* dimatikan untuk menghentikan sumber pemanasan, sedangkan *valve* diaktifkan sebagai bagian dari tindakan pengamanan yang dirancang. *Buzzer* kembali berada pada kondisi OFF sesuai dengan logika kendali sistem pada kondisi DANGER. Respons yang sama pada lima data dalam pengujian yang sama menunjukkan bahwa sistem dapat mempertahankan konfigurasi pengamanan selama berada pada kondisi tekanan 6 Psi.

Jika dibandingkan antara ketiga kondisi tersebut, terlihat adanya perubahan respons yang konsisten pada perangkat keluaran. Pada kondisi AMAN, sistem berada pada kondisi operasi normal. Ketika kondisi berubah menjadi WARNING, *buzzer* aktif sebagai indikator peringatan tanpa mengubah kondisi *valve* dan *heater*. Selanjutnya, ketika mencapai kondisi DANGER, sistem mengubah konfigurasi keluaran dengan mengaktifkan *valve* dan mematikan *heater*.

Dengan demikian, pengujian menunjukkan bahwa simulasi sistem telah mampu menerapkan logika kendali bertingkat, yaitu membedakan kondisi AMAN, WARNING, dan DANGER berdasarkan parameter yang dibaca. Perubahan status juga diikuti perubahan perangkat keluaran sehingga sistem tidak hanya berfungsi sebagai monitoring, tetapi juga memberikan respons kendali terhadap kondisi yang terdeteksi.

Berdasarkan 15 data pengujian keseluruhan sistem, simulasi sistem mampu mendeteksi dan membedakan tiga kondisi operasi, yaitu AMAN, WARNING, dan DANGER. Pada kondisi AMAN, sistem mempertahankan *buzzer* dan *valve* dalam keadaan OFF serta *heater* ON. Pada kondisi WARNING, *buzzer* berubah menjadi ON sebagai indikator peringatan, sedangkan *valve* tetap OFF dan *heater* tetap ON.

Pada kondisi DANGER, sistem menjalankan tindakan pengamanan dengan mengaktifkan *valve* dan mematikan *heater*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fungsi monitoring dan pengendalian pada simulasi sistem telah terintegrasi dan memberikan respons sesuai dengan kondisi yang diuji.