

## **BAB V**

### **PENGUJIAN DAN ANALISIS ALAT**

#### **5.1 Tujuan Pengujian**

Pengujian pada penelitian ini dilakukan untuk memvalidasi kinerja sistem deteksi dini titik panas dan proteksi otomatis pada PHB-TR berbasis sensor inframerah MLX90614 dan *Internet of Things* (IoT) secara kuantitatif dan terukur. Pengujian bertujuan untuk mengevaluasi akurasi pembacaan suhu pada masing-masing fasa melalui perbandingan dengan alat ukur referensi guna memperoleh nilai deviasi dan *error* sebagai indikator kelayakan sensor dalam aplikasi proteksi. Selain itu, dilakukan analisis waktu respon sistem, yaitu interval sejak suhu melebihi nilai ambang hingga sistem melakukan aksi trip dan mengirimkan notifikasi melalui Telegram Bot, serta menampilkan data *monitoring* suhu secara *real-time* pada web *dashboard* berbasis MQTT. Pengujian juga mencakup evaluasi pengaruh jarak terhadap akurasi pembacaan guna menentukan konfigurasi pemasangan yang optimal.

Indikator keberhasilan dalam penelitian ini ditetapkan berdasarkan tercapainya tingkat *error* pembacaan suhu yang rendah dan konsisten, waktu respon sistem yang cepat dan stabil, serta kemampuan sistem dalam mendeteksi dan merespon kondisi *overheat* secara tepat tanpa kegagalan fungsi, sehingga sistem dinyatakan layak untuk diimplementasikan pada kondisi operasional PHB-TR.

#### **5.2 Prosedur Pengujian**

Prosedur pengujian pada penelitian ini disusun untuk memastikan bahwa seluruh tahapan pengambilan data dilakukan secara sistematis dan terkontrol. Pengujian diawali dengan tahap persiapan alat dan bahan yang meliputi rancang bangun alat, *heat gun* sebagai sumber panas objek uji, alat ukur referensi berupa *thermo gun*, serta perangkat *smartphone* ataupun komputer yang terhubung dengan web *monitoring* berbasis MQTT dan aplikasi Telegram. Selanjutnya dilakukan konfigurasi sistem sesuai dengan rancangan, meliputi pemasangan sensor pada masing-masing titik pengukuran fasa, pengaturan jarak sensor terhadap objek, serta

inisialisasi komunikasi data antara ESP32, *broker* MQTT, *web monitoring*, dan Telegram Bot.

Pengujian dilaksanakan dengan mengacu pada variabel yang telah ditetapkan, yaitu variabel bebas berupa variasi suhu sumber panas dan jarak pengukuran, variabel terikat berupa hasil pembacaan suhu dan waktu respon sistem, serta variabel kontrol berupa kondisi lingkungan, posisi sensor, dan kestabilan catu daya. Adapun langkah-langkah pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyalakan seluruh sistem dan memastikan ESP32 berhasil terhubung ke jaringan WiFi, broker MQTT untuk *web monitoring*, serta Telegram Bot sebagai media notifikasi.
2. Menyiapkan sumber panas sebagai objek uji pada titik pengukuran baut yang merepresentasikan masing-masing fasa.
3. Menempatkan sensor MLX90614 pada jarak tertentu sesuai skenario pengujian.
4. Melakukan pembacaan suhu secara kontinu oleh sensor dan mencatat hasil yang ditampilkan pada LCD serta *web monitoring*.
5. Membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat ukur referensi untuk keperluan kalibrasi.
6. Meningkatkan suhu objek uji secara bertahap hingga melewati nilai ambang (*threshold*) yang telah ditentukan.
7. Mengamati dan mencatat waktu terjadinya deteksi suhu, aktivasi proteksi (*trip*), serta waktu diterimanya notifikasi melalui Telegram Bot.
8. Mengulangi proses pengujian untuk variasi suhu yang berbeda guna memperoleh data yang konsisten.
9. Mendokumentasikan seluruh hasil pengujian sebagai bahan analisis kinerja sistem.

Dengan prosedur pengujian yang terstruktur ini, diharapkan data yang diperoleh memiliki tingkat validitas dan reliabilitas yang tinggi sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi performa sistem secara komprehensif.


### 5.3 Pengujian Jarak Optimal Sensor MLX90614

Pengujian jarak optimal sensor MLX90614 dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi jarak terhadap akurasi pembacaan suhu, sekaligus menentukan posisi pemasangan sensor yang paling efektif pada sistem. Jarak awal sensor sebesar 2 cm diperoleh dari hasil perancangan pada Bab III, kemudian divalidasi melalui pengujian dengan validasi jarak dalam rentang waktu tertentu. Pada setiap variasi jarak dilakukan pengukuran suhu dengan kondisi yang sama, kemudian hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan alat ukur referensi. Selanjutnya dihitung nilai *error* untuk setiap jarak guna mengetahui deviasi pengukuran. Jarak optimal ditentukan berdasarkan nilai *error* yang paling kecil dan konsisten. Perhitungan *error* dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$Error(\%) = \frac{|T_{sensor} - T_{referensi}|}{T_{referensi}} \times 100\% \quad (4)$$

Pengujian jarak optimal dilakukan menggunakan satu sensor MLX90614 sebagai representasi, dengan pertimbangan bahwa seluruh sensor memiliki spesifikasi dan karakteristik yang identik serta berada pada kondisi operasional yang sama, sehingga hasil pengujian dapat mewakili kinerja sensor pada masing-masing fasa. Hasil pengujian ini digunakan sebagai dasar penentuan posisi pemasangan sensor pada sistem. Berikut tabel 5-1 hasil pengujian jarak sensor MLX90614:

Tabel 5-1 Pengujian Jarak Optimal Sensor MLX90614

| No. | Jarak (cm) | Suhu Sensor (°C) | Suhu Referensi (°C) | Selisih (°C) | Error (%) | Dokumentasi   |
|-----|------------|------------------|---------------------|--------------|-----------|---|
| 1   | 2          | 32,1             | 32,5                | 0,4          | 1,25%     |  |

| No. | Jarak (cm) | Suhu Sensor (°C) | Suhu Referensi (°C) | Selisih (°C) | Error (%) | Dokumentasi   |
|-----|------------|------------------|---------------------|--------------|-----------|---|
| 2   | 4          | 32               | 32,8                | 0,8          | 2,50%     |       |
| 3   | 6          | 31,8             | 32,8                | 1            | 3,14%     |       |
| 4   | 8          | 31,8             | 32,9                | 1,1          | 3,46%     |   |
| 5   | 10         | 31,7             | 33                  | 1,3          | 4,10%     |   |
| 6   | 12         | 32               | 33,5                | 1,5          | 4,69%     |   |

Berdasarkan hasil pengujian jarak optimal sensor MLX90614 yang ditunjukkan pada Tabel 5-1, diketahui bahwa variasi jarak mempengaruhi tingkat akurasi pembacaan suhu. Hal ini ditunjukkan dari perubahan nilai *error*, semakin

besar jarak antara sensor dan objek uji maka nilai *error* yang dihasilkan cenderung mengalami peningkatan. Kondisi tersebut disebabkan oleh semakin luasnya area pembacaan sensor (*field of view*), sehingga sensor tidak hanya membaca suhu pada titik objek utama, tetapi juga dipengaruhi oleh suhu di sekitar objek.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa jarak 2 cm menghasilkan nilai *error* paling kecil, yaitu sebesar 1,25% dengan selisih pengukuran sebesar 0,4°C antara suhu sensor dengan suhu referensi. Sementara ini, pada jarak yang lebih jauh, nilai *error* meningkat secara bertahap hingga mencapai 4,69% pada jarak 12 cm. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa akurasi pembacaan sensor menurun seiring bertambahnya jarak pengukuran.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat diketahui bahwa jarak 2 cm merupakan jarak pengukuran yang paling optimal untuk sistem yang dirancang. Hasil ini juga sesuai dengan hasil perhitungan jarak optimal pada Bab III Perancangan, sehingga dapat disimpulkan bahwa konfigurasi pemasangan sensor yang telah dirancang sebelumnya menunjukkan memberikan tingkat akurasi pembacaan suhu yang baik pada *prototype* sistem deteksi dini titik panas dan proteksi otomatis PHB-TR.

#### **5.4 Pengujian Kalibrasi Sensor Suhu MLX90614**











Pengujian kalibrasi sensor MLX90614 dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi pembacaan suhu yang dihasilkan sensor terhadap alat ukur referensi. Proses kalibrasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa data suhu yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan proteksi memiliki tingkat keandalan yang memadai, dalam penelitian ini, alat ukur referensi yang digunakan berupa *thermogun*. Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan hasil pembacaan suhu dari sensor MLX90614 terhadap suhu yang diukur dengan *thermogun* pada kondisi yang sama, serta mengacu pada jarak optimal hasil Subbab 5.3 untuk memastikan akurasi pengukuran. Pengambilan data dilakukan secara berulang pada saat suhu merepresentasikan pada kondisi normal. Selain itu, pengujian dilakukan pada masing-masing fasa (R, S, dan T) untuk mengetahui konsistensi pembacaan sensor pada setiap titik pengukuran. Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai kesalahan (*error*) untuk setiap pengukuran guna mengetahui deviasi antara suhu sensor dan suhu referensi.

$$Error(\%) = \frac{|T_{sensor} - T_{referensi}|}{T_{referensi}} \times 100\%$$

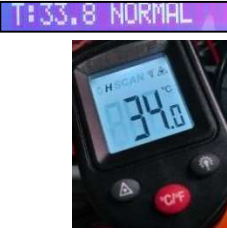
(5)

Hasil pengujian kalibrasi disajikan dalam bentuk tabel 5-2 berikut dengan perbandingan antara suhu sensor dan suhu referensi, serta nilai *error* yang dihasilkan.

Tabel 5-2 Pengujian Kalibrasi Sensor Suhu MLX90614

| No. | Fasa | Suhu Sensor (°C) | Suhu Referensi (°C) | Selisih (°C) | Error (%) | Dokumentasi  |
|-----|------|------------------|---------------------|--------------|-----------|--|
| 1   | R    | 36               | 36,5                | 0,5          | 1,37%     |      |
| 2   | S    | 35,1             | 36                  | 0,9          | 2,50%     |   |
| 3   | T    | 34,4             | 34,9                | 0,5          | 1,43%     |   |
| 4   | R    | 35,1             | 35,6                | 0,5          | 1,40%     |   |
| 5   | S    | 35,1             | 35,8                | 0,7          | 1,96%     |   |

| No. | Fasa | Suhu Sensor (°C) | Suhu Referensi (°C) | Selisih (°C) | Error (%) | Dokumentasi   |
|-----|------|------------------|---------------------|--------------|-----------|---|
| 6   | T    | 34,4             | 34,5                | 0,1          | 0,29%     | <p>T: 34.4 NORMAL</p>    |
| 7   | R    | 34,8             | 35,4                | 0,6          | 1,69%     | <p>R: 34.8 NORMAL</p>    |
| 8   | S    | 34,5             | 35,5                | 1            | 2,82%     | <p>S: 34.5 NORMAL</p>   |
| 9   | T    | 34,1             | 34,5                | 0,4          | 1,16%     | <p>T: 34.1 NORMAL</p>  |
| 10  | R    | 34,8             | 35,4                | 0,6          | 1,69%     | <p>R: 34.8 NORMAL</p>  |
| 11  | S    | 34,8             | 35,4                | 0,6          | 1,69%     | <p>S: 34.8 NORMAL</p>  |

| No.                    | Fasa | Suhu Sensor (°C) | Suhu Referensi (°C) | Selisih (°C) | Error (%) | Dokumentasi  |
|------------------------|------|------------------|---------------------|--------------|-----------|--|
| 12                     | T    | 33,8             | 34                  | 0,2          | 0,59%     |  |
| Rata-Rata <i>Error</i> |      |                  |                     |              | 1,55%     |  |

Berdasarkan hasil pengujian kalibrasi sensor MLX90614 pada masing-masing fasa pada Tabel 5-2, diperoleh nilai pembacaan suhu yang relatif mendekati suhu referensi yang diukur menggunakan *thermogun*. Selisih pengukuran pada setiap pengujian berada pada rentang  $0,1^{\circ}\text{C} - 1^{\circ}\text{C}$ , sehingga menunjukkan bahwa sensor mampu membaca suhu dengan tingkat perbedaan yang relatif rendah. Hasil perhitungan *error* menunjukkan bahwa nilai *error* pada setiap pengujian berada pada rentang  $0,29\% - 2,82\%$ . Nilai *error* terkecil diperoleh pada pengujian fasa T sebesar  $0,29\%$ , sedangkan nilai *error* terbesar terjadi pada pengujian fasa S sebesar  $2,82\%$ . Perbedaan nilai *error* tersebut dipengaruhi oleh kondisi pengukuran, sensitivitas pembacaan sensor inframerah, serta pengaruh suhu lingkungan sekitar saat proses pengujian berlangsung.

Secara keseluruhan diperoleh rata-rata *error* sebesar  $1,55\%$  sehingga sensor MLX90614 dapat dikategorikan memiliki tingkat akurasi yang baik dengan perbedaan pengukuran yang relatif rendah terhadap suhu referensi. Nilai *error* tersebut masih berada dalam rentang toleransi yang layak untuk sistem *monitoring* suhu berbasis IoT, sehingga sensor dapat diketahui memberikan pembacaan yang cukup stabil dan andal pada *prototype* sistem deteksi dini titik panas dan proteksi otomatis PHB-TR.

### 5.5 Pengujian *Delay* Sistem Proteksi dan Notifikasi IoT

Pengujian *delay* sistem dilakukan untuk mengukur waktu tunda antara terjadinya aksi proteksi (*trip*) pada sistem dengan diterimanya notifikasi melalui Telegram Bot. Parameter ini penting untuk mengevaluasi kecepatan sistem dalam menyampaikan informasi gangguan kepada pengguna setelah proteksi dijalankan.

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan kondisi suhu melebihi nilai ambang hingga sistem mengaktifkan aktuator proteksi. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan pada kondisi bahaya (*danger*), yaitu saat suhu melebihi atau sama dengan 55°C sehingga sistem secara otomatis mengaktifkan mekanisme proteksi dan mengirimkan notifikasi kepada pengguna. Waktu dicatat pada dua kondisi utama, yaitu saat terjadinya trip ( $t_{trip}$ ) dan saat notifikasi diterima melalui Telegram Bot ( $t_{notifikasi}$ ). Nilai *delay* dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$t_{delay} = t_{notifikasi\ Telegram} - t_{trip} \quad (6)$$

Pengujian dilakukan pada jarak sensor optimal yang diperoleh dari hasil Subbab 5.3 yaitu 2 cm agar hasil pengujian merepresentasikan kondisi kerja sistem secara aktual. Data hasil pengujian sistem ditampilkan pada tabel 5-3 berikut.

Tabel 5-3 Pengujian *Delay* Sistem Proteksi dan Notifikasi IoT

| No.                        | Fasa | Suhu Sensor (°C) | $t_{trip}$ (s) | $t_{notifikasi\ Telegram}$ (s) | $t_{delay}$ (s) |
|----------------------------|------|------------------|----------------|--------------------------------|-----------------|
| 1                          | R    | 57,9             | 11.18.05       | 11.18.06                       | 1               |
| 2                          | S    | 60,9             | 11.32.34       | 11.32.36                       | 2               |
| 3                          | T    | 70,9             | 12.33.32       | 12.33.33                       | 1               |
| Rata-Rata <i>Delay</i> (s) |      |                  |                |                                | 1,33            |

Berdasarkan hasil pengujian *delay* sistem proteksi dan notifikasi IoT pada Tabel 5-3, diperoleh bahwa sistem mampu mengirimkan notifikasi melalui Telegram Bot setelah terjadinya aksi proteksi (trip) dengan waktu tunda yang relatif cepat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa fasa R diperoleh *delay* selama 1 detik, pada fasa S sebesar 2 detik, dan pada fasa T sebesar 1 detik. Perbedaan waktu *delay* tersebut dipengaruhi oleh proses komunikasi data melalui jaringan internet, performa koneksi WiFi, serta waktu respon Telegram Bot dalam menerima dan menampilkan pesan notifikasi.

Secara keseluruhan, sistem menunjukkan waktu respon yang relatif stabil dengan rata-rata *delay* sebesar 1,33 detik. Nilai *delay* tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respon yang cukup cepat dalam menyampaikan informasi gangguan kepada pengguna setelah proteksi dijalankan. Hasil pengujian

menunjukkan bahwa sistem *monitoring* dan notifikasi berbasis IoT mampu bekerja secara optimal dan beroperasi sesuai fungsi yang dirancang.

## 5.6 Pengujian Simulasi Sambungan Longgar pada Terminal Baut PHB-TR

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh sambungan baut yang longgar terhadap kenaikan suhu terminal pada PHB-TR. Simulasi sambungan longgar dilakukan pada terminal baut sisi *input* beban *pilot lamp* secara bergantian pada Fasa R, Fasa S, dan Fasa T sedangkan dua fasa lainnya dipertahankan dalam kondisi normal sebagai pembanding. Setiap pengujian dilakukan selama 120 menit dengan beban pilot lamp yang sama pada setiap fasa, serta dengan nilai arus yang sama. Hasil pengujian ditunjukkan pada grafik tren kenaikan suhu masing-masing fasa.



Gambar 5.1 Grafik Tren Kenaikan Suhu Fasa R Terhadap Sambungan Longgar

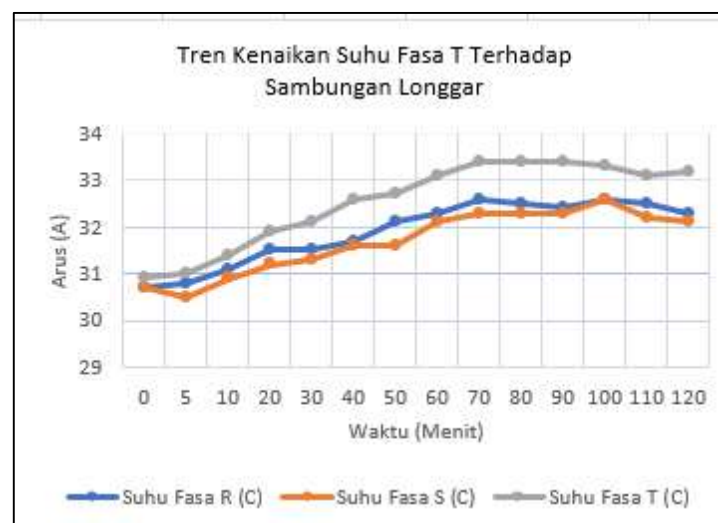
Berdasarkan Gambar 5.1 grafik tren kenaikan suhu pada pengujian sambungan longgar Fasa R, terlihat bahwa suhu Fasa R mengalami kenaikan paling tinggi dibandingkan Fasa S dan Fasa T. Suhu Fasa R terus meningkat seiring bertambahnya waktu pengujian hingga mencapai suhu tertinggi yaitu 33,5°C pada akhir pengujian. Sementara itu, suhu Fasa S dan Fasa T juga mengalami kenaikan, namun nilainya tetap lebih rendah dibandingkan Fasa R, yaitu berniali 32,4°C dan 32,3°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan hambatan kontak akibat

sambungan longgar menyebabkan panas lebih banyak terakumulasi pada terminal Fasa R.



Gambar 5.2 Grafik Tren Kenaikan Suhu Fasa S Terhadap Sambungan Longgar

Berdasarkan Gambar 5.2 grafik tren kenaikan suhu pada pengujian sambungan longgar Fasa S, suhu Fasa S menjadi yang tertinggi dibandingkan kedua fasa lainnya. Suhu maksimum Fasa S mencapai sekitar 33,4°C, sedangkan suhu maksimum Fasa R dan Fasa T berada pada 32,4°C dan 32,5°C dengan kenaikan suhu yang hampir sama. Hasil ini menunjukkan bahwa pengaruh utama sambungan longgar terjadi pada terminal yang mengalami gangguan, sehingga suhu pada Fasa S menjadi lebih tinggi dibandingkan fasa normal.



Gambar 5.3 Grafik Tren Kenaikan Suhu Fasa T Terhadap Sambungan Longgar

Selanjutnya pada pengujian sambungan longgar pada Fasa T berdasarkan Gambar 5.3 suhu Fasa T menunjukkan kenaikan yang paling tinggi dibandingkan Fasa R dan Fasa S. Meskipun suhu pada kedua fasa lainnya juga meningkat seiring bertambahnya waktu operasi, suhu maksimum Fasa T mencapai  $33,4^{\circ}\text{C}$ , sedangkan Fasa R dan Fasa S berada pada  $32,6^{\circ}\text{C}$ . Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan hambatan kontak akibat sambungan longgar menghasilkan pemanasan lokal pada terminal yang mengalami gangguan.

Berdasarkan ketiga pengujian yang telah dilakukan, fasa yang mengalami sambungan longgar selalu menunjukkan suhu tertinggi dibandingkan dua fasa lainnya dengan selisih suhu berkisar antara  $0,8^{\circ}\text{C}$  hingga  $1,1^{\circ}\text{C}$ . Selain itu, seluruh fasa mengalami kenaikan suhu seiring bertambahnya waktu pengujian. Namun, kenaikan suhu terbesar selalu terjadi pada fasa yang mengalami sambungan longgar.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sambungan longgar meningkatkan hambatan kontak pada terminal. Sesuai dengan Hukum Joule, peningkatan hambatan kontak menyebabkan energi listrik lebih banyak terkonversi menjadi panas pada titik sambungan. Oleh karena itu, suhu pada terminal yang mengalami sambungan longgar menjadi lebih tinggi dibandingkan terminal normal meskipun arus beban yang digunakan relatif sama.

## 5.7 Pengujian Sistem Secara Keseluruhan

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem deteksi dini titik panas dan proteksi otomatis berupa pemutusan beban (trip) secara terintegrasi pada setiap kondisi suhu yang telah ditentukan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem mengindikasikan respon perubahan kondisi suhu dengan baik, mulai dari kondisi normal, peringatan (*warning*), hingga kondisi bahaya (*danger*), sesuai dengan logika kerja sistem yang telah dirancang.

Pada penelitian ini, klasifikasi kondisi suhu dibagi menjadi tiga kondisi, yaitu suhu  $T < 40^{\circ}\text{C}$  dikategorikan sebagai kondisi normal, kondisi peringatan (*warning*) pada rentang  $40^{\circ}\text{C} \leq T < 55^{\circ}\text{C}$ , dan suhu  $T \geq 55^{\circ}\text{C}$  sebagai kondisi bahaya (*danger*) yang memicu mekanisme proteksi (trip). Pengujian dilakukan

dengan memberikan kenaikan suhu secara bertahap pada masing-masing fasa, kemudian mengamati respon sistem terhadap setiap perubahan kondisi tersebut.

Pada kondisi normal, sistem melakukan *monitoring* suhu secara kontinu tanpa mengaktifkan proteksi maupun notifikasi bahaya. Ketika suhu memasuki kondisi *warning*, sistem akan menampilkan status peringatan pada web *monitoring* serta LCD, dan mengirimkan notifikasi peringatan melalui Telegram Bot tanpa melakukan trip. Selanjutnya, saat suhu mencapai kondisi *danger*, sistem akan mendeteksi kondisi bahaya, mengaktifkan aktuator proteksi (trip), menampilkan status *danger* pada web *monitoring* berbasis MQTT dan LCD, serta mengirimkan notifikasi bahaya melalui Telegram Bot secara *real-time*. Parameter yang diamati pada pengujian ini meliputi keberhasilan sistem dalam mendeteksi kondisi suhu, respon aktuator proteksi, keberhasilan tampilan *monitoring* lokal pada layar LCD, keberhasilan tampilan *monitoring* pada web, serta keberhasilan pengiriman notifikasi Telegram. Hasil pengujian digunakan untuk mengetahui tingkat integrasi dan keandalan sistem secara keseluruhan dalam menjalankan fungsi *monitoring* dan proteksi pada *prototype* PHB-TR.

Pada tampilan LCD, sistem menampilkan informasi nilai suhu yang terbaca pada masing-masing fasa beserta status kondisi suhu yang terdeteksi, yaitu NORMAL, WARNING, atau DANGER. LCD juga menampilkan informasi waktu secara *real-time* berdasarkan Waktu Indonesia Barat (WIB), sehingga pengguna dapat mengetahui waktu terjadinya perubahan kondisi suhu secara langsung pada alat.



Gambar 5.4 Tampilan LCD saat Kondisi Suhu Normal

Gambar 5.4 menunjukkan tampilan LCD pada sistem saat kondisi suhu berada pada status normal. Pada tampilan LCD ditampilkan informasi waktu secara *real-time* serta nilai suhu pada masing-masing fasa. Seluruh fasa berada di bawah batas suhu *warning*, sehingga sistem menampilkan status NORMAL pada setiap fasa.



Gambar 5.5 Tampilan LCD saat Kondisi Suhu Peringatan

Gambar 5.5 menunjukkan tampilan LCD saat sistem berada pada kondisi peringatan (*warning*). Pada pengujian ini, fasa R terdeteksi memiliki suhu  $40,1^{\circ}\text{C}$  sehingga status berubah menjadi WARNING, sedangkan fasa lainnya masih dalam

kondisi NORMAL. Pada kondisi ini, sistem *monitoring* tetap bekerja dan beban belum mengalami trip, yang ditandai dengan indikator lampu pada masing-masing fasa masih menyala.



Gambar 5.6 Tampilan LCD saat Kondisi Suhu Bahaya

Kondisi sistem saat terdeteksi status bahaya (*danger*) pada salah satu fasa ditunjukkan pada Gambar 5.6. Pada pengujian ini, fasa S terdeteksi memiliki suhu  $87,2^{\circ}\text{C}$  sehingga sistem mengubah status menjadi DANGER dan proteksi bekerja melakukan trip pada beban, yang ditandai dengan indikator lampu padam. Meskipun proteksi aktif berupa pemutusan beban (trip), sistem *monitoring* suhu pada LCD dan web *monitoring* tetap berjalan sehingga nilai suhu dan status kondisi masih dapat ditampilkan pada LCD secara *real-time*.

Selanjutnya, web *monitoring* berbasis MQTT menampilkan informasi nilai suhu dan status kondisi pada setiap fasa secara langsung. Perubahan kondisi suhu ditunjukkan melalui indikator warna, yaitu hijau untuk NORMAL, kuning untuk WARNING, dan merah untuk DANGER. Selain menampilkan nilai suhu dan status kondisi, web monitoring juga menampilkan informasi waktu *real-time* dan fitur reset sistem.



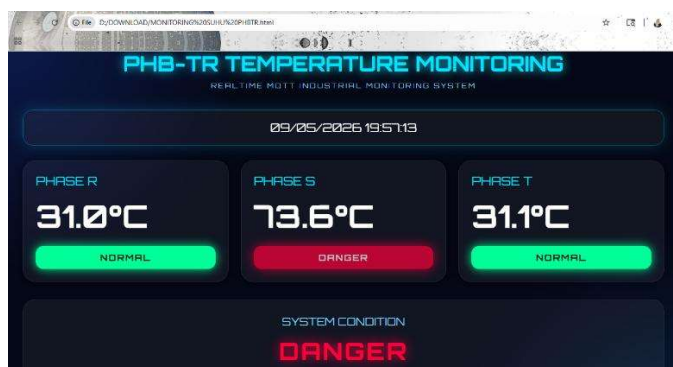
Gambar 5.7 Tampilan Web *Monitoring* saat Kondisi Suhu Normal

Gambar 5.7 menunjukkan tampilan web *monitoring* saat sistem berada pada kondisi normal. Nilai suhu pada masing-masing fasa masih berada di bawah batas peringatan (*warning*), sehingga seluruh indikator menampilkan status NORMAL berwarna hijau. Selain menampilkan nilai suhu setiap fasa, web *monitoring* juga menampilkan kondisi sistem secara keseluruhan.



Gambar 5.8 Tampilan Web *Monitoring* saat Kondisi Suhu Peringatan

Gambar 5.8 menunjukkan tampilan web *monitoring* saat suhu berada pada kondisi peringatan (*warning*). Pada pengujian ini, fasa R memiliki suhu 40,0°C sehingga indikator berubah menjadi warna kuning dengan status WARNING, sedangkan fasa S dan T masih berada pada kondisi NORMAL. Tampilan ini menunjukkan bahwa sistem *monitoring* mampu mendeteksi kenaikan suhu dan menampilkan perubahan status secara *real-time*.



Gambar 5.9 Tampilan Web *Monitoring* saat Kondisi Suhu Bahaya

Gambar 5.9 menunjukkan tampilan web *monitoring* saat salah satu fasa berada pada kondisi bahaya (*danger*). Pada pengujian ini, fasa S tercatat memiliki suhu sebesar 73,6°C sehingga statusnya berubah menjadi DANGER dan ditandai dengan indikator berwarna merah. Sementara itu, fasa R dan T masih berada pada kondisi NORMAL. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi suhu bahaya secara *real-time* dan menampilkan perubahan status sebagai indikator aktifnya mekanisme proteksi sistem.

Selain proses *monitoring* dilakukan, sistem juga mengirimkan notifikasi melalui Telegram Bot sebagai media pemberitahuan kepada pengguna ketika terdeteksi kondisi suhu peringatan maupun bahaya. Notifikasi yang dikirim memuat informasi kondisi suhu pada masing-masing fasa, status kondisi sistem, serta waktu kejadian secara *real-time* WIB. Dengan adanya notifikasi tersebut, pengguna dapat mengetahui kondisi kenaikan suhu dan potensi bahaya pada *prototype* PHB-TR secara cepat tanpa melakukan pengecekan langsung pada sistem.



Gambar 5.10 Notifikasi Pesan Telegram saat Kondisi Suhu Peringatan

Saat kondisi berada pada peringatan (*warning*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.10, sistem mengirimkan notifikasi melalui Telegram Bot sebagai peringatan dini tanpa melakukan trip pada beban. Berdasarkan pengujian ini, suhu fasa R mencapai suhu 40,1°C sehingga status yang tertera adalah WARNING, kemudian pada fasa yang lainnya menampilkan status kondisi NORMAL.



Gambar 5.11 Notifikasi Pesan Telegram saat Kondisi Suhu Bahaya

Saat suhu mencapai kondisi bahaya (*danger*), Telegram Bot mengirimkan notifikasi bahaya secara *real-time* seperti pada Gambar 5.11 yang menandakan sistem proteksi telah aktif melakukan trip pada beban. Berdasarkan tampilan pada gambar, suhu fasa S telah mencapai 65,1°C sehingga pesan notifikasi menampilkan status DANGER, sedangkan pada fasa lainnya berda pada kondisi NORMAL.

Tabel 5-4 Pengujian Sistem Secara Keseluruhan

| No. | Fasa | Kondisi        | Suhu (°C) | Status Trip | Status Monitoring LCD | Status Monitoring Web | Status Notifikasi Telegram | Keterangan |
|-----|------|----------------|-----------|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|------------|
| 1   | R    | Normal         | 31,0      | OFF         | ✓                     | ✓                     | –                          | Berhasil   |
| 2   | S    | Normal         | 32,7      | OFF         | ✓                     | ✓                     | –                          | Berhasil   |
| 3   | T    | Normal         | 31,8      | OFF         | ✓                     | ✓                     | –                          | Berhasil   |
| 4   | R    | <i>Warning</i> | 40,1      | OFF         | ✓                     | ✓                     | ✓                          | Berhasil   |
| 5   | S    | <i>Warning</i> | 40,2      | OFF         | ✓                     | ✓                     | ✓                          | Berhasil   |
| 6   | T    | <i>Warning</i> | 40,4      | OFF         | ✓                     | ✓                     | ✓                          | Berhasil   |

| No. | Fasa | Kondisi       | Suhu (°C) | Status Trip | Status <i>Monitoring</i> LCD | Status <i>Monitoring</i> Web | Status Notifikasi Telegram | Keterangan |
|-----|------|---------------|-----------|-------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------|
| 7   | R    | <i>Danger</i> | 56,2      | ON          | ✓                            | ✓                            | ✓                          | Berhasil   |
| 8   | S    | <i>Danger</i> | 65,1      | ON          | ✓                            | ✓                            | ✓                          | Berhasil   |
| 9   | T    | <i>Danger</i> | 58,2      | ON          | ✓                            | ✓                            | ✓                          | Berhasil   |

Berdasarkan hasil pengujian sistem secara keseluruhan pada Tabel 5-4, sistem mampu bekerja sesuai dengan kondisi suhu yang telah ditentukan, yaitu *normal*, *warning*, dan *danger*. Pada kondisi normal, sistem menampilkan status NORMAL pada LCD dan web *monitoring* tanpa mengaktifkan proteksi maupun mengirimkan notifikasi Telegram. Ketika suhu mencapai kondisi *warning*, sistem mampu mendeteksi kenaikan suhu dan memberikan peringatan melalui Telegram Bot, LCD, dan web *monitoring* tanpa melakukan trip terhadap beban. Selanjutnya, ketika suhu mencapai kondisi *danger*, sistem mampu mendeteksi kondisi bahaya, menampilkan status danger pada LCD dan web *monitoring*, serta mengirimkan notifikasi bahaya melalui Telegram Bot secara *real-time*. Pada kondisi bahaya, aktuator proteksi bekerja dengan melakukan trip pada beban sesuai dengan logika kerja sistem yang telah dirancang.

Selain *monitoring* dan notifikasi, sistem juga dilengkapi alarm lokal melalui buzzer. Berdasarkan hasil pengujian, buzzer menunjukkan bekerja sesuai dengan kondisi suhu yang terdeteksi oleh sistem. Pada kondisi *warning*, buzzer menghasilkan bunyi putus-putus sebagai indikator adanya kenaikan suhu namun sistem proteksi belum melakukan trip. Sementara itu, pada kondisi *danger*, buzzer menghasilkan bunyi panjang secara kontinu yang menandakan sistem telah memasuki kondisi bahaya dan mekanisme proteksi telah aktif. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fungsi alarm lokal pada sistem mengindikasikan berjalan dengan baik sesuai dengan logika pengujian yang telah dirancang.

Setelah sistem melakukan proteksi (*trip*), proses reset dapat dilakukan melalui push button pada panel maupun secara jarak jauh melalui web monitoring

berbasis MQTT. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mekanisme reset hanya dapat mengaktifkan kembali sistem apabila seluruh suhu fasa telah kembali berada pada kondisi normal ( $T < 40^{\circ}\text{C}$ ). Apabila masih terdapat fasa yang berada pada kondisi *danger*, kontaktor tetap berada pada kondisi OFF meskipun perintah reset diberikan. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme *safety interlock* telah bekerja dengan baik untuk mencegah sistem kembali beroperasi sebelum kondisi suhu kembali normal.



Gambar 5.12 Tampilan LCD saat Reset Sistem

Tampilan proses reset ditunjukkan pada Gambar 5.12. Setelah reset dilakukan, ESP32 memverifikasi kondisi suhu seluruh fasa. Apabila seluruh suhu telah berada pada kondisi normal ( $T < 40^{\circ}\text{C}$ ), sistem kembali ke status Normal, kontaktor aktif kembali, dan proses *monitoring* suhu dapat berjalan sebagaimana mestinya.

Hasil pengujian sistem secara keseluruhan menunjukkan bahwa seluruh bagian sistem mengindikasikan bekerja sesuai dengan logika perancangan yang telah ditetapkan. Pada kondisi normal, sistem mampu melakukan *monitoring* suhu tanpa mengaktifkan proteksi. Saat suhu memasuki kondisi peringatan (*warning*), sistem mampu memberikan peringatan melalui tampilan LCD, web *monitoring*, buzzer, dan Telegram Bot tanpa melakukan trip. Selanjutnya, ketika suhu mencapai kondisi bahaya (*danger*), sistem berhasil mengaktifkan proteksi secara otomatis berupa pemutusan beban (trip), menampilkan status bahaya, mengaktifkan alarm

buzzer, serta mengirim notifikasi kepada pengguna secara *real-time* dengan *delay* rata-rata 1,33 detik.

Fitur reset pada web *monitoring* juga berhasil bekerja dengan baik sehingga sistem dapat kembali beroperasi secara normal setelah suhu kembali berada pada kondisi normal ( $T < 40^{\circ}\text{C}$ ). Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa mekanisme *safety interlock* telah berjalan sesuai konsep perancangan, yaitu sistem tidak dapat diaktifkan kembali selama kondisi suhu abnormal masih terdeteksi. Selain itu, meskipun terdapat pengaruh kondisi lingkungan terhadap pembacaan sensor inframerah, sistem tetap mampu menjalankan fungsi *monitoring* dan proteksi sesuai dengan logika yang telah dirancang.

## 5.8 Evaluasi Kelayakan Sistem

Berdasarkan seluruh pengujian yang telah dilakukan, *prototype* sistem deteksi dini titik panas dan proteksi otomatis pada PHB-TR telah bekerja sesuai dengan tujuan perancangan. Hasil kalibrasi menunjukkan sensor MLX90614 memiliki rata-rata error sebesar 1,55% sehingga masih layak digunakan untuk monitoring suhu. Pengujian delay sistem menunjukkan notifikasi Telegram dapat diterima dengan rata-rata waktu tunda 1,33 detik, sehingga informasi kondisi sistem dapat disampaikan secara *real-time*.

Pengujian simulasi sambungan longgar pada terminal input beban pilot lamp menunjukkan bahwa terminal dengan kondisi sambungan longgar cenderung memiliki suhu lebih tinggi dibandingkan terminal normal, sementara arus beban pada ketiga fasa tetap relatif stabil. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan suhu akibat perbedaan kondisi sambungan terminal. Selain itu, pengujian sistem secara keseluruhan membuktikan bahwa fungsi monitoring suhu, penentuan status normal, *warning*, dan *danger*, pengiriman notifikasi Telegram, pengaktifan buzzer, proteksi otomatis melalui relay dan kontaktor magnetik, serta fitur *safety interlock* dan reset manual dapat bekerja sesuai dengan logika yang dirancang.