

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, integrasi *Thermocouple Type K* dengan modul MAX6675 dan PZEM-004T berbasis ESP32-S3 mampu menyediakan data temperatur dan parameter kelistrikan yang dibutuhkan dalam sistem monitoring *furnace*. Pengujian *thermocouple* menghasilkan rata-rata *error* sebesar 0,31% terhadap *thermogun*, sedangkan pembacaan tegangan PZEM-004T menghasilkan rata-rata *error* sebesar 1,39% terhadap multimeter. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi sensor yang digunakan telah mampu memberikan data pengukuran yang mendekati alat ukur pembanding dan dapat digunakan sebagai dasar pencatatan kondisi operasi serta analisis penggunaan energi *furnace*.

Efisiensi operasional *furnace* dapat dianalisis menggunakan dua parameter, yaitu *Heating Energy Index* (HEI) dan *Holding Energy Rate* (HER). HEI mampu menggambarkan kebutuhan energi selama proses pemanasan terhadap kenaikan temperatur, sedangkan HER menunjukkan laju penggunaan energi selama fase *holding*. Kedua parameter tersebut memungkinkan karakteristik penggunaan energi pada setiap siklus dibandingkan terhadap *baseline* pada *setpoint* yang sama, sehingga perubahan kebutuhan energi dapat diamati tanpa menggunakan perhitungan efisiensi termal absolut.

Metode Fuzzy Sugeno dapat diterapkan untuk mengklasifikasikan kondisi efisiensi operasional *furnace* berdasarkan indeks HEI dan HER hasil normalisasi terhadap *baseline*. Sistem mampu mengolah kedua parameter tersebut melalui fungsi keanggotaan dan basis aturan untuk menghasilkan keluaran berupa kategori efisien atau tidak efisien. Dengan demikian, Fuzzy Sugeno dapat digunakan sebagai metode pengambilan keputusan untuk memberikan informasi mengenai kondisi penggunaan energi *furnace* berdasarkan karakteristik operasional yang telah ditentukan.

Sistem alarm berbasis temperatur berhasil memberikan peringatan dan proteksi terhadap penyimpangan temperatur selama pengoperasian *furnace*. *Low*

temperature alarm memberikan peringatan ketika temperatur turun lebih dari 6% di bawah *setpoint* setelah *setpoint* sebelumnya telah tercapai, sedangkan *warning* memberikan peringatan ketika temperatur melebihi *setpoint* lebih dari 50°C. Pada kondisi yang lebih berbahaya, *trip* bekerja ketika temperatur melebihi *setpoint* lebih dari 100°C dengan menghentikan keluaran pemanas. Ketiga fungsi tersebut dijalankan secara lokal oleh ESP32-S3, sehingga sistem alarm tetap dapat memberikan peringatan dan proteksi tanpa bergantung pada komunikasi MQTT maupun Node-RED.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat digunakan sebagai dasar pengembangan sistem pada penelitian selanjutnya antara lain adalah:

1. Sistem Fuzzy Sugeno perlu diuji menggunakan lebih banyak kondisi *furnace* yang secara sengaja dibuat efisien dan tidak efisien, misalnya melalui variasi kondisi insulasi, elemen pemanas, tegangan masukan, atau bukaan ruang bakar. Hasil pengujian tersebut dapat digunakan untuk memvalidasi dan menyempurnakan fungsi keanggotaan, basis aturan, serta batas klasifikasi fuzzy.
2. Sistem penyimpanan data dapat dikembangkan dengan menambahkan media penyimpanan lokal, seperti kartu SD atau memori non-volatile pada ESP32. Pengembangan tersebut diperlukan agar ringkasan siklus tidak hilang ketika komunikasi MQTT atau Node-RED terputus dan dapat dikirimkan kembali setelah koneksi tersedia.
3. Sistem keselamatan dapat dikembangkan dengan menambahkan kondisi alarm lain, seperti kegagalan sensor temperatur, arus berlebih, kegagalan SSR, pintu *furnace* terbuka, dan terputusnya komunikasi antarkomponen. Penambahan interlock perangkat keras juga dapat dilakukan untuk meningkatkan tingkat keamanan sistem pada penggunaan temperatur tinggi.