

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Furnace adalah alat pemanas yang banyak digunakan dalam berbagai bidang industri dan penelitian, seperti industri manufaktur, metalurgi, kimia, dan banyak lainnya untuk proses peleburan, pemanasan, dan perlakuan panas lainnya pada material [1]. Sistem pengendalian dan monitoring yang baik diperlukan pada proses pemanas, terlebih pada pemanas temperatur tinggi agar prosesnya dapat berlangsung secara stabil dan efisien. Menurut kumar et al. (2021) sistem pengendali dapat mengatasi gangguan, sehingga meningkatkan kestabilan kecepatan respon, dan ketahanan sistem [2].

Furnace listrik merupakan jenis pemanas yang menggunakan energi listrik sebagai sumber panas. Jenis *furnace* listrik banyak digunakan karena memiliki keunggulan dalam penghematan bahan bakar yang digunakan, dibanding dengan *furnace* listrik yang masih menggunakan kayu atau batu bara sebagai bahan bakar atau sumber energi [3]. Namun, *furnace* listrik membutuhkan energi dalam jumlah besar, terutama ketika digunakan pada temperatur tinggi. Hal tersebut menjadikan konsumsi energi sebagai salah satu aspek yang perlu dipantau. Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2025 juga menekankan bahwa manajemen energi perlu dilakukan agar pemanfaatan energi dapat berlangsung secara efektif dan efisien [4].

Seiring dengan lamanya penggunaan *furnace* listrik, komponen di dalamnya, seperti elemen pemanas dan material refraktori, dapat mengalami perubahan karakteristik maupun penurunan performa. Kondisi tersebut dapat menyebabkan peningkatan rugi-rugi panas sehingga energi yang dibutuhkan untuk mencapai atau mempertahankan temperatur target menjadi lebih besar. Apabila perubahan penggunaan energi tidak terpantau, pengoperasian *furnace* dapat menjadi lebih boros dan meningkatkan risiko kerusakan alat maupun gangguan terhadap keselamatan pengguna [5]. Monitoring efisiensi operasional dapat digunakan untuk mengamati perubahan kebutuhan energi selama *furnace* beroperasi. Informasi

tersebut juga dapat mendukung pelaksanaan *predictive maintenance*, yaitu pemeliharaan berdasarkan kondisi aktual peralatan sehingga pemeriksaan atau penggantian komponen dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan operasional [6].

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem monitoring temperatur pada *furnace* dan proses industri bertemperatur tinggi dengan memanfaatkan mikrokontroler, sensor temperatur, komunikasi nirkabel, MQTT, maupun Node-RED. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa teknologi *Internet of Things* dapat digunakan untuk memantau kondisi temperatur dan menyampaikan data operasi secara lebih mudah [7]. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada monitoring temperatur, pengiriman data, atau penyajian kondisi *furnace*. Evaluasi penggunaan energi pada fase pemanasan dan fase mempertahankan temperatur belum banyak dibahas secara bersamaan. Selain itu, diperlukan sistem yang tidak hanya menampilkan data, tetapi juga memberikan klasifikasi mengenai kondisi efisiensi operasional serta tetap menyediakan fungsi alarm lokal ketika koneksi jaringan tidak tersedia.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini merancang sistem monitoring efisiensi operasional dan alarm pada *furnace* listrik menggunakan ESP32-S3. Temperatur ruang bakar dibaca menggunakan termokopel tipe K melalui modul MAX6675, sedangkan parameter kelistrikan berupa tegangan, arus, daya, dan energi listrik diukur menggunakan PZEM-004T. ESP32-S3 dipilih karena memiliki prosesor *dual-core*, konektivitas Wi-Fi terintegrasi, serta antarmuka SPI dan UART yang diperlukan untuk menghubungkan sensor, HMI Nextion, dan komunikasi MQTT [8]. Dibandingkan Arduino yang tidak seluruh variannya memiliki Wi-Fi terintegrasi, ESP32-S3 dapat menerapkan komunikasi MQTT tanpa modul jaringan tambahan. Penelitian yang dilakukan oleh F. Serepas *et al.* (2025) ESP32 sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan perangkat lebih ringan, konsumsi sumber daya lebih rendah, dan implementasi yang lebih sederhana, sedangkan *Raspberry Pi* lebih tepat digunakan untuk pekerjaan yang memerlukan pemrosesan lebih berat, seperti analitik tingkat lanjut, virtualisasi, dan aplikasi berbasis sistem operasi [9].

Efisiensi yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan efisiensi operasional, bukan efisiensi termal absolut. Perhitungan efisiensi termal membutuhkan informasi tambahan berupa massa material, kalor jenis, perubahan temperatur material, serta energi panas yang benar-benar diserap oleh benda uji. Efisiensi operasional dalam penelitian ini dianalisis melalui dua parameter, yaitu *Heating Energy Index (HEI)* dan *Holding Energy Rate (HER)*. *HEI* digunakan untuk menunjukkan energi listrik yang dibutuhkan selama fase pemanasan untuk setiap kenaikan temperatur, sedangkan *HER* menunjukkan penggunaan energi per satuan waktu selama fase *holding*. Kedua parameter tersebut menggambarkan karakteristik penggunaan energi pada dua fase operasi *furnace* yang berbeda.

Nilai *HEI* dan *HER* tidak dapat dibandingkan secara langsung pada seluruh *setpoint* karena kebutuhan energi *furnace* berubah seiring dengan kenaikan temperatur. Oleh karena itu, nilai aktual dibandingkan dengan *baseline* pada *setpoint* yang sama untuk menghasilkan indeks I_{HEI} dan I_{HER} . Penggunaan *baseline* memungkinkan evaluasi dilakukan secara relatif terhadap karakteristik operasional *furnace* pada kondisi temperatur yang sebanding [4]. Nilai indeks tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan Fuzzy Sugeno orde nol karena hubungan antara penggunaan energi dan kondisi efisiensi tidak selalu dapat ditentukan menggunakan satu batas yang tegas. Metode Fuzzy Sugeno mampu mengolah nilai yang berada pada daerah peralihan antara kategori kecil, sedang, dan besar melalui aturan IF–THEN, kemudian menghasilkan keluaran tegas menggunakan metode *weighted average* [10].

Selain fungsi monitoring, sistem dilengkapi alarm berbasis batas temperatur yang bekerja secara lokal dan tidak menggunakan hasil inferensi fuzzy. Sistem alarm terdiri atas kondisi *low temperature alarm*, *warning*, dan *trip*. Kondisi *low temperature alarm* terjadi ketika setelah mencapai *setpoint*, kemudian temperatur aktual turun hingga 6% di bawah nilai *setpoint* ketika proses masih berlangsung. Pada kondisi tersebut, sistem mengaktifkan buzzer dan menampilkan pesan peringatan pada HMI Nextion. Kondisi *warning* terjadi ketika temperatur aktual melebihi *setpoint* lebih dari 50°C, sedangkan kondisi *trip* terjadi ketika temperatur

melebihi *setpoint* lebih dari 100°C. Pada kondisi *warning*, sistem mengaktifkan buzzer dan menampilkan pesan peringatan pada HMI Nextion. Sedangkan pada kondisi *trip*, sistem tidak hanya memperingatkan pengguna melalui tampilan HMI dan buzzer, tetapi juga menonaktifkan keluaran pemanas dan mengunci sistem hingga dilakukan RESET..

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem monitoring *furnace* berbasis ESP32 yang mampu melakukan analisis efisiensi daya secara *real-time* berdasarkan parameter temperatur dan konsumsi energi serta memiliki sistem alarm. Oleh karena itu penelitian ini mengambil judul ” Perancangan Sistem Monitoring Efisiensi Operasional Dan Alarm Pada *Furnace* Listrik Berbasis ESP32 Menggunakan Metode Fuzzy Sugeno”.

Lebih lanjut lagi, Penelitian ini tidak berdiri sendiri, tetapi merupakan bagian dari pengembangan sistem *furnace* temperatur tinggi berbasis elemen pemanas *silicon carbide* (SiC) yang dikerjakan oleh tiga peneliti dengan fokus berbeda. Linggar Gusti Pratama yang berfokus pada penerapan sistem kontrol temperatur berbasis PID. Sementara itu, Muhammad Farih Mahfudz yang berfokus pada perancangan antarmuka HMI serta penerapan sistem SCADA berbasis IoT. Adapun penelitian ini berfokus pada pemantauan efisiensi operasional berdasarkan parameter HEI dan HER menggunakan metode Fuzzy Sugeno serta penerapan sistem alarm temperatur. Ketiga penelitian tersebut saling melengkapi dalam membentuk sistem *furnace* temperatur tinggi yang memiliki fungsi pengendalian, pemantauan, analisis efisiensi operasional, dan keselamatan.

Penelitian dinyatakan berhasil apabila sistem mampu membaca dan menampilkan temperatur serta parameter kelistrikan secara langsung, dengan hasil pembacaan sensor yang mendekati alat ukur pembanding. Sistem juga harus mampu mencatat data *START*, *REACH*, dan *STOP* secara lengkap, melakukan komunikasi dua arah antara ESP32-S3 dan Node-RED, serta menghasilkan nilai *HEI* dan *HER* yang sesuai dengan perhitungan manual. Selain itu, sistem Fuzzy Sugeno harus mampu melakukan normalisasi dan menghasilkan klasifikasi efisien atau tidak efisien, hasil analisis dapat disimpan ke dalam berkas *CSV*, serta alarm

dapat memberikan respons *low temperature alarm*, *warning*, dan *trip* sesuai batas temperatur yang telah ditetapkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, dirumuskan permasalahan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana mengintegrasikan sensor temperatur termokopel tipe K dan sensor daya listrik PZEM004T untuk memperoleh data temperatur dan konsumsi daya pada *furnace*?
2. Bagaimana menghitung parameter efisiensi operasional *furnace* berdasarkan data hasil pengukuran, yaitu *Heating Energy Index (HEI)*, dan *Holding Energy Rate (HER)*?
3. Bagaimana menerapkan metode Fuzzy Sugeno untuk mengklasifikasikan efisiensi operasional *furnace* listrik ke dalam kategori efisien dan tidak efisien berdasarkan parameter *HEI*, dan *HER*?
4. Bagaimana merancang sistem alarm berbasis temperatur untuk memberikan peringatan dan proteksi terhadap kondisi penurunan temperatur setelah *setpoint* tercapai serta kondisi temperatur berlebih pada *furnace*?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Sejalan dengan perumusan masalah diatas, tujuan tugas akhir ini adalah:

1. Merealisasikan dan menguji integrasi sensor *Thermocouple Type K* dan PZEM-004T berbasis ESP32-S3 untuk memperoleh data temperatur dan parameter kelistrikan pada *furnace*.
2. Menganalisis efisiensi operasional *furnace* berdasarkan data hasil pengukuran menggunakan parameter *Heating Energy Index (HEI)* dan *Holding Energy Rate (HER)*.
3. Menerapkan metode Fuzzy Sugeno untuk mengklasifikasikan efisiensi operasional *furnace* menjadi kategori efisien dan tidak efisien berdasarkan indeks *HEI* dan *HER*.

4. Merancang, mengintegrasikan, dan menguji sistem alarm berbasis temperatur sebagai fungsi peringatan dan keselamatan terhadap kondisi penurunan temperatur setelah *setpoint* tercapai serta kondisi temperatur berlebih pada *furnace*.

1.4 Manfaat Tugas Akhir

Manfaat dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan sistem yang dapat membantu pengguna memantau temperatur dan parameter kelistrikan *furnace* selama proses pengoperasian.
2. Membantu pengguna mengetahui indikasi peningkatan konsumsi energi atau penurunan performa *furnace* sehingga dapat mendukung pelaksanaan *predictive maintenance*.
3. Meningkatkan keselamatan pengoperasian *furnace* melalui sistem alarm yang mampu memberikan peringatan *low temperature alarm* ketika temperatur turun setelah *setpoint* tercapai, peringatan *warning* ketika temperatur berlebih, serta menjalankan fungsi proteksi *trip* pada kondisi temperatur yang melebihi batas keselamatan.
4. Menjadi referensi bagi pengembangan sistem *smart furnace*, monitoring energi, dan sistem keselamatan berbasis mikrokontroler pada penelitian berikutnya.

1.5 Batasan Masalah

Agar tidak menyimpang dari tujuan semula, penelitian ini memiliki beberapa batasan masalah sebagai berikut :

1. *Furnace* yang digunakan merupakan *furnace* listrik dengan elemen pemanas Silicon Carbide (SiC), dengan temperatur pengujian maksimum sebesar 800°C.
2. Parameter yang diakuisisi dan dianalisis dibatasi pada suhu aktual *furnace* menggunakan sensor *Thermocouple* tipe K dan konsumsi daya listrik menggunakan sensor PZEM-004T.
3. Analisis efisiensi difokuskan pada efisiensi operasional berdasarkan penggunaan energi selama fase pemanasan dan fase *holding*, bukan pada perhitungan efisiensi termal absolut.

4. Pengujian *furnace* dilakukan pada rentang suhu 0 hingga 800 derajat celcius.
5. Sistem alarm dibatasi pada kondisi penurunan temperatur setelah *setpoint* tercapai dan kondisi temperatur berlebih.

1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir

Penulisan tugas akhir ini disusun secara sistematis ke dalam lima bab. BAB I merupakan bagian pendahuluan yang membahas latar belakang, rumusan masalah, tujuan tugas akhir, manfaat tugas akhir, batasan masalah, dan sistematika penulisan. BAB II memuat penelitian terdahulu serta teori yang mendukung penelitian, meliputi *furnace* listrik, elemen pemanas *Silicon Carbide*, efisiensi operasional, *Heating Energy Index (HEI)*, *Holding Energy Rate (HER)*, *baseline*, normalisasi, Fuzzy Sugeno, ESP32-S3, sensor temperatur dan kelistrikan, Node-RED, MQTT, HMI, serta sistem alarm. BAB III membahas perancangan sistem yang mencakup blok diagram, flowchart, desain mekanik, dimensi dan konfigurasi ruang bakar, perancangan perangkat keras, perangkat lunak, elektrikal, komunikasi data, pencatatan *START-REACH-STOP*, perhitungan *HEI* dan *HER*, pembentukan *baseline*, normalisasi, serta implementasi *Fuzzy Sugeno* pada Node-RED. BAB IV membahas hasil pengujian dan analisis terhadap masing-masing komponen maupun sistem secara terintegrasi, meliputi pengujian sensor, catu daya, elemen pemanas, komunikasi MQTT, pencatatan siklus, sistem alarm, perhitungan *HEI* dan *HER*, klasifikasi Fuzzy Sugeno, serta penyimpanan hasil analisis ke dalam berkas *CSV*. BAB V merupakan bagian penutup yang memuat kesimpulan berdasarkan hasil perancangan dan pengujian untuk menjawab tujuan tugas akhir, serta saran yang dapat digunakan sebagai rekomendasi pengembangan sistem pada penelitian berikutnya. Bagian akhir laporan dilengkapi dengan daftar pustaka dan lampiran yang memuat data serta dokumen pendukung penelitian.