

BAB II

DASAR TEORI

Bab ini membahas penelitian terdahulu dan dasar teori yang digunakan dalam perancangan sistem monitoring efisiensi operasional dan alarm pada *furnace* listrik berbasis ESP32-S3 menggunakan metode Fuzzy Sugeno. Penelitian terdahulu digunakan untuk mengetahui perkembangan sistem monitoring *furnace*, penerapan teknologi *Internet of Things*, pemantauan energi listrik, serta penggunaan metode fuzzy dalam evaluasi energi. Selanjutnya, dasar teori membahas *furnace* listrik, elemen pemanas *Silicon Carbide*, efisiensi operasional, *HEI*, *HER*, *baseline*, normalisasi, Fuzzy Sugeno, perangkat keras, komunikasi data, dan komponen pendukung yang digunakan dalam sistem.

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan untuk mengetahui perkembangan penelitian yang berkaitan dengan monitoring *furnace*, pengukuran temperatur, komunikasi berbasis *Internet of Things*, dan pemantauan energi listrik. Penelaahan penelitian terdahulu juga diperlukan untuk menunjukkan persamaan, perbedaan, dan posisi penelitian yang dilakukan terhadap sistem yang telah dikembangkan sebelumnya. Beberapa penelitian yang relevan disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Penelitian Terdahulu yang Relevan

Peneliti dan Tahun	Fokus Penelitian	Hasil dan Keterkaitan
Rancang Bangun Furnace Temperatur Tinggi dengan Pengendali Mikrokontrol ATMEGA 8535 Menggunakan Sumber Pemanas Silicon Carbide (Si-C) (Priyono et al.,2017)	Penelitian ini bertujuan membuat sebuah rancang bangun <i>furnace</i> temperatur tinggi dengan sumber panas silicon carbide yang dikontrol menggunakan ATMEGA 8535. Hasilnya menunjukkan bahwa <i>furnace</i> yang dikontrol Atmega dapat berfungsi dengan baik.	Penelitian ini hanya berfokus pada mengontrol suhu tanpa adanya sistem monitoring pada penggunaan energi dan tidak adanya sistem pengaman seperti alarm dalam keadaan genting.

Tabel 2.1. Lanjutan

Peneliti dan Tahun	Fokus Penelitian	Hasil dan Keterkaitan
Desain Monitoring Sistem pada Tungku Pembakaran dengan Pendekatan <i>Multi-level Digital Twin</i> (Taryana <i>et al.</i> , 2023)	Perancangan sistem monitoring temperatur tungku pembakaran menggunakan pendekatan <i>multi-level digital twin</i>	Sistem dapat memberikan informasi temperatur proses pembakaran secara <i>real-time</i> melalui antarmuka berbasis web. Penelitian ini menunjukkan pentingnya monitoring temperatur pada tungku, tetapi belum menganalisis penggunaan energi listrik maupun mengklasifikasikan efisiensi operasional.
<i>Temperature Monitoring of Muffle Furnace Based on Internet of Things</i> (Sulistyo <i>et al.</i> 2021)	Monitoring temperatur <i>muffle furnace</i> berbasis <i>Internet of Things</i>	Penelitian menerapkan teknologi IoT untuk mengamati temperatur <i>furnace</i> . Sistem tersebut menunjukkan bahwa data <i>furnace</i> dapat dipantau melalui jaringan, tetapi pembahasannya masih berfokus pada temperatur dan belum mengintegrasikan analisis efisiensi operasional.
<i>Design and Development of an IoT Smart Meter with Load Control for Home Energy Management Systems</i> (Muñoz <i>et al.</i> , 2022)	Pengembangan <i>smart meter</i> berbasis IoT untuk mengukur parameter kelistrikan	Sistem mampu mengukur dan mengirimkan data tegangan, arus, daya, faktor daya, dan energi listrik melalui jaringan. Penelitian tersebut mendukung penggunaan pengukuran kelistrikan dalam sistem monitoring energi, tetapi tidak diterapkan secara khusus untuk menganalisis fase operasi <i>furnace</i> .

Berdasarkan hasil perbandingan pada Tabel 2.1, terdapat ruang pengembangan berupa sistem yang mengintegrasikan monitoring temperatur dan parameter

kelistrikan dengan analisis penggunaan energi selama satu siklus *furnace*. Penelitian ini tidak hanya mengamati temperatur dan energi, tetapi juga membagi proses pengoperasian menjadi fase pemanasan dan fase *holding*. Penggunaan energi pada kedua fase tersebut dianalisis melalui *Heating Energy Index (HEI)* dan *Holding Energy Rate (HER)*, kemudian dibandingkan dengan *baseline* pada *setpoint* yang sama.

Posisi penelitian ini terletak pada pengembangan sistem monitoring efisiensi operasional yang menggabungkan ESP32-S3, termokopel tipe K, PZEM-004T, MQTT, dan Node-RED. Nilai *HEI* dan *HER* dinormalisasi menjadi I_{HEI} dan I_{HER} , kemudian diproses menggunakan metode Fuzzy Sugeno untuk menghasilkan klasifikasi efisien atau tidak efisien. Sistem juga dilengkapi alarm temperatur yang bekerja secara lokal berdasarkan batas *warning* dan *trip*, serta penyimpanan hasil analisis ke dalam *CSV*.

Dengan demikian, kebaruan penelitian ini bukan terletak pada penciptaan metode Fuzzy Sugeno maupun teknologi MQTT, melainkan pada integrasi monitoring temperatur, pencatatan energi berdasarkan fase operasi, pembentukan *baseline* sesuai *setpoint*, klasifikasi efisiensi operasional, alarm lokal, dan penyimpanan hasil dalam satu sistem *furnace* listrik. Pendekatan tersebut memungkinkan sistem memberikan informasi yang lebih lengkap daripada monitoring temperatur atau kelistrikan secara terpisah.

2.2 *Furnace* atau Tungku Pembakaran

Furnace yang secara bahasa berarti tungku pembakaran, merupakan sebuah alat pemanas yang dirancang secara khusus untuk memanaskan material pada suhu yang sangat tinggi. Alat ini dirancang tidak hanya menghasilkan suhu yang sangat tinggi, tetapi juga dapat mengurung panas tersebut dalam ruang tertutup yang diisolasi dengan material tahan api. Penahanan panas ini bertujuan untuk memastikan bahwa energi panas yang dihasilkan tidak terbuang ke lingkungan sekitar, melainkan diserap seluruhnya oleh material atau benda uji yang berada di dalam ruang bakar. Kestabilan pengurungan panas inilah yang membedakan *furnace* dari perangkat pemanas konvensional [2].

Dalam penerapannya di dunia industri dan laboratorium, instrumen pemanas ini memainkan peranan yang sangat penting. *Furnace* diaplikasikan untuk berbagai proses modifikasi material yang membutuhkan suhu tingkat tinggi, mulai dari proses peleburan logam dalam metalurgi, pembakaran keramik, hingga perlakuan panas (*heat treatment*) seperti *annealing*, *tempering*, dan *hardening* pada baja. Melalui paparan suhu yang dikontrol di dalam ruang tertutup, struktur molekul suatu material dapat berubah secara fisika maupun kimiawi untuk mencapai tingkat kekerasan, kelenturan, atau kekuatan mekanis sesuai kebutuhan standar produksi [1].

Furnace biasanya dibedakan dari sumber energi atau bahan bakar yang digunakan untuk memicu proses termal. Generasi awal alat ini umumnya menggunakan metode pembakaran langsung (*combustion furnace*), di mana panas dihasilkan dari reaksi kimia oksidasi antara bahan bakar fosil seperti batu bara, gas alam, atau minyak bumi dengan udara. Walaupun mampu menghasilkan suhu yang tinggi, *furnace* jenis bahan bakar ini memiliki kendala terkait gas buang atau emisi karbon yang mencemari lingkungan.

Kelemahan pada sistem pembakaran konvensional tersebut mendorong perkembangan teknologi di sektor industri menuju sistem pemanas yang lebih ramah lingkungan dan terukur. Tuntutan terhadap penurunan emisi karbon, ditambah dengan kebutuhan proses termal yang lebih presisi, membuat banyak instrumen pemanas konvensional mulai ditinggalkan. Industri perlahan beralih pada teknologi pemanasan yang memanfaatkan induksi gelombang maupun hambatan arus, yang mana perkembangan ini melahirkan era penggunaan instrumen berbasis tenaga listrik yang jauh lebih bersih, sunyi, dan mudah diintegrasikan dengan modul pengontrol suhu otomatis [11].

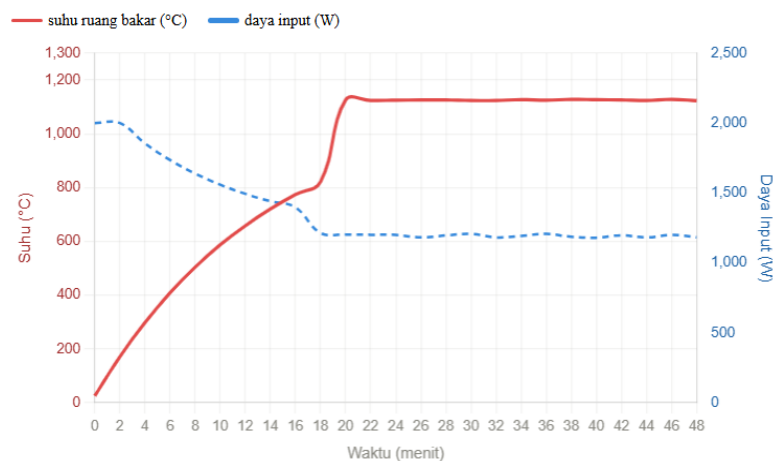
2.3 *Furnace* Listrik

Furnace listrik merupakan tungku pemanas yang menggunakan energi listrik untuk menghasilkan panas tinggi di dalam ruang pemanas. Panas yang dihasilkan biasa berasal dari elemen pemanas listrik (*heater*) atau melalui busur listrik/ proses induksi, tergantung jenisnya. Proses pemanasan yang terjadi didalam ditahan oleh

dinding berlapis bahan tahan api (*refractory brick*, *Alumunium Oksida* atau Alumina, dan lain lain) yang dapat menahan suhu didalam dan membuatnya bisa mencapai hingga ratusan bahkan ribuan derajat [12]. *Furnace* listrik pada bidang industri logam dan metarulgi biasanya digunakan dalam proses *anealing*, *normalizing*, *tempering*, serta perlakuan logam lainnya. Lalu pada bidang pendidikan dan laboratorium, alat ini biasa digunakan untuk praktik teknik pemanasan serta analisis perpindahan panas [13].

Penelitian ini menggunakan rancang bangun *furnace* listrik temperatur tinggi yang menggunakan pemanas dengan bahan *Silicon Cabrida (Si-C)* dengan ruang bakar yang berdinding *Aluminium Oksida* yang mampu menahan panas hingga 1700 derajat [14]. Bahan pemanas pada *furnace* ini dialiri listrik oleh SSR atau *Solid State Relay* sebesar 220 Volt 75 Ampere, Menurut Hussein *et al.* (2022), *furnace* listrik bekerja dengan prinsip konversi energi listrik menjadi energi panas melalui efek Joule, dimana arus listrik yang mengalir melalui elemen pemanas akan menghasilkan panas akibat resistansi material tersebut [15].

Karakteristik termal dari *furnace* listrik dapat dilihat pada profil kurva pemanasannya. Ketika *furnace* mulai dioperasikan, suhu ruang bakar meningkat secara bertahap hingga mencapai keadaan tunak (*steady state*). Kecepatan pemanasan ini dipengaruhi oleh daya *input*, massa termal elemen dan dinding *furnace*, serta insulasi termal yang digunakan [14]. Pada Gambar 2.1 dapat dilihat grafik perbandingan antatra suhu dan daya pada *furnace* listrik.

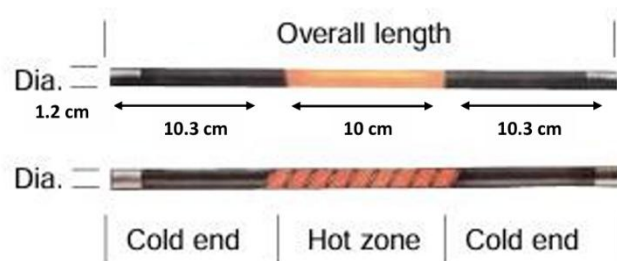


Gambar 2.1. Simulasi Kurva Pemanas Furnace Listrik

Gambar 2.1 menggambarkan tiga fase operasi termal pada *furnace* listrik. Fase pertama adalah periode pemanasan awal (*heating-up period*) di mana seluruh daya listrik digunakan untuk menaikkan suhu ruang bakar. Fase kedua adalah periode transisi ketika suhu mendekati set-point dan kontrol mulai memodulasi daya. Fase ketiga adalah keadaan tunak (*steady state*) di mana suhu dijaga konstan oleh sistem kontrol. Pemahaman terhadap profil kurva ini sangat penting untuk merancang sistem monitoring dan alarm yang responsif.

2.4 Elemen Pemanas Silicon Carbide

Silicon Carbide atau SiC merupakan material yang digunakan sebagai elemen pemanas resistif pada *furnace* bertemperatur tinggi. Ketika dialiri arus listrik, resistansi elemen SiC menghasilkan panas yang kemudian diradiasikan ke ruang *furnace*. Elemen SiC digunakan dalam berbagai *furnace*, mulai dari *furnace* laboratorium hingga *furnace* industri untuk pengolahan kaca, keramik, elektronik, logam, dan kegiatan penelitian. Elemen SiC memiliki kemampuan bekerja pada temperatur tinggi, ketahanan terhadap oksidasi, dan kemampuan menghasilkan densitas daya yang relatif besar. Namun, karakteristik resistansi elemen SiC dapat berubah akibat temperatur, waktu penggunaan, atmosfer *furnace*, dan proses penuaan. Perubahan resistansi tersebut dapat memengaruhi daya yang dikonsumsi serta waktu yang diperlukan *furnace* untuk mencapai *setpoint* [16]. Pada Gambar 2.2 dapat dilihat bentuk dari *Silicon Carbide* yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2.2. *Silicon Carbide (SiC) tipe Straight Hot Rod*

Berdasarkan Gambar 2.2 penelitian ini menggunakan elemen pemanas silikon karbida (SiC) tipe *straight hot rod*. Elemen ini merupakan salah satu jenis pemanas berbentuk batang lurus yang umum diaplikasikan pada *furnace* dengan temperatur operasi tinggi. Struktur elemen SiC terdiri atas bagian aktif atau *hot zone* yang

berfungsi menghasilkan panas dan bagian terminal atau *cold end* yang digunakan sebagai penghubung dalam rangkaian listrik. Elemen SiC yang digunakan dalam penelitian ini memiliki diameter 1,2 cm dan termasuk dalam kategori elemen pemanas temperatur tinggi yang mampu menghasilkan distribusi panas secara merata. Empat batang SiC selanjutnya disusun menjadi satu rangkaian pemanas untuk menghasilkan temperatur operasi yang dibutuhkan.

Prinsip kerja elemen SiC didasarkan pada pemanasan resistif atau *Joule heating*, yaitu proses perubahan energi listrik menjadi energi panas ketika arus listrik mengalir melalui material yang memiliki hambatan. Salah satu karakteristik utama elemen SiC adalah hubungan resistansinya yang bersifat nonlinier terhadap perubahan temperatur. Pada elemen SiC, nilai resistansi dapat berubah akibat temperatur dan kondisi operasinya sehingga hubungan antara tegangan dan arus tidak selalu bersifat linier [16]. Karakteristik hubungan tegangan dan arus pada elemen SiC dalam acuan yang digunakan pada penelitian ini dapat dinyatakan menggunakan Persamaan 2.1:

$$V = I^n \times \gamma \times R \quad (2.1)$$

Pada Persamaan 2.1, V merupakan tegangan pada elemen SiC, I merupakan arus yang mengalir, n merupakan eksponen yang menunjukkan karakteristik hubungan tegangan terhadap arus, γ merupakan faktor koreksi karakteristik elemen, sedangkan R merupakan resistansi acuan elemen SiC. Nilai n digunakan untuk menggambarkan tingkat nonlinieritas hubungan tegangan dan arus pada elemen, sedangkan γ digunakan sebagai faktor pengali yang mengoreksi nilai resistansi acuan berdasarkan karakteristik aktual elemen [16].

Nilai n dan γ pada penelitian ini diperoleh melalui pengujian hubungan tegangan dan arus. Untuk mempermudah penentuan kedua parameter tersebut, persamaan 2.1 diubah ke dalam bentuk logaritmik menjadi Persamaan 2.2:

$$\ln V = n \times \ln I + \ln(\gamma R) \quad (2.2)$$

Karena berlaku hubungan $\ln(\gamma R) = \ln \gamma + \ln R$ maka Persamaan 2.2 juga dapat dituliskan sebagai Persamaan 2.3 berikut:

$$\ln V = n \times \ln I + \ln \gamma + \ln R \quad (2.3)$$

Persamaan 2.3 tersebut mempunyai bentuk yang sama dengan persamaan regresi linier yaitu $y = mx + c$. Dalam analisis yang dilakukan, nilai $\ln V$ digunakan sebagai variabel y dan $\ln I$ digunakan sebagai variabel x . Dengan membandingkan persamaan regresi linier dengan persamaan karakteristik SiC, gradien m menunjukkan nilai eksponen n , sehingga diperoleh nilai n sama dengan m . Sementara itu, konstanta c menunjukan nilai $\ln(\gamma R)$, sehingga dapat diketahui nilai γ dengan Persamaan 2.4, sebagai berikut:

$$c = \ln(\gamma R) \quad (2.4)$$

Dengan demikian, nilai n diperoleh secara langsung dari gradien persamaan regresi hubungan $\ln I$ dan $\ln V$, sedangkan nilai γ diperoleh melalui perhitungan persamaan regresi dengan diketahui nilai c dari persamaan linear pada grafik antara $\ln V$ dan $\ln I$ pada pengujian batang SiC.

Berdasarkan karakteristik tersebut, elemen SiC tidak hanya berfungsi sebagai sumber panas, tetapi juga mempunyai karakteristik kelistrikan yang dipengaruhi oleh kondisi operasi. Oleh karena itu, pengujian hubungan tegangan dan arus diperlukan untuk memperoleh nilai n dan γ sebagai parameter karakteristik elemen. Pada penelitian ini, parameter tersebut ditentukan terlebih dahulu pada masing-masing batang SiC dan kemudian pada rangkaian empat batang SiC [16].

2.5 Efisiensi Operasional *Furnace* Listrik

Efisiensi merupakan salah satu aspek penting dalam pengoperasian *furnace* listrik karena berkaitan langsung dengan penggunaan energi selama proses pemanasan. Secara umum, efisiensi energi dapat dipahami sebagai perbandingan antara energi keluaran yang bermanfaat dengan energi masukan yang digunakan oleh suatu sistem. Pada *furnace* listrik, energi masukan berasal dari energi listrik yang dikonversi menjadi energi panas melalui elemen pemanas. Semakin besar energi listrik yang dibutuhkan untuk mencapai atau mempertahankan suhu tertentu, maka semakin rendah performa operasional sistem tersebut.

Pada *furnace* listrik, efisiensi tidak hanya dipengaruhi oleh besar daya listrik yang digunakan, tetapi juga oleh karakteristik termal ruang bakar, jenis elemen pemanas, kualitas isolasi termal, kondisi awal *furnace*, kestabilan tegangan, serta kemampuan sistem kontrol dalam menjaga suhu [5]. Furnace yang memiliki isolasi termal baik dan elemen pemanas yang bekerja optimal akan membutuhkan energi yang lebih rendah untuk mencapai suhu target dibandingkan *furnace* dengan rugi panas yang tinggi. Oleh karena itu, pengukuran konsumsi energi menjadi salah satu cara untuk mengevaluasi kinerja operasional *furnace* [15].

Efisiensi termal murni pada *furnace* umumnya dihitung berdasarkan perbandingan antara energi panas yang benar-benar diserap oleh beban atau material dengan energi listrik yang masuk ke sistem [5]. Efisiensi termal dapat dinyatakan pada Persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$\eta = \frac{Q_p}{Q_s} \quad (2.5)$$

Pada Persamaan 2.5, η merupakan nilai efisiensi yang dihasilkan selama proses pemanasan, Q_p merupakan energi keluaran atau energi panas yang berhasil diserap oleh beban atau material, sedangkan Q_s merupakan energi masukan yang diberikan ke dalam sistem selama proses pemanasan. Semakin besar bagian energi masukan yang dapat dimanfaatkan sebagai energi keluaran, maka semakin tinggi nilai efisiensi termal yang dihasilkan.

Untuk menghitung Q_p membutuhkan data seperti massa material, kalor jenis material, perubahan suhu material, serta distribusi panas yang terserap oleh beban. Selain itu, perhitungan lengkap membutuhkan identifikasi rugi panas pada dinding, bukaan, penyimpanan panas, kabel, dan komponen lain [11].

Namun, pada penelitian ini *furnace* digunakan sebagai sistem pemanas ruang bakar, sehingga fokus penelitian tidak diarahkan pada perhitungan efisiensi termal murni terhadap benda uji. Penelitian ini lebih difokuskan pada efisiensi operasional *furnace*, yaitu penilaian terhadap perilaku konsumsi energi listrik dan respons suhu selama satu siklus kerja *furnace*. Efisiensi operasional dalam penelitian ini

merupakan penilaian relatif terhadap penggunaan energi listrik selama *furnace* mencapai dan mempertahankan *setpoint*. Penilaian dilakukan dengan membandingkan kondisi suatu siklus terhadap *baseline furnace* pada *setpoint* yang sama. Efisiensi operasional tidak dinyatakan sebagai persentase energi panas keluaran terhadap energi listrik masukan. Efisiensi operasional dinyatakan sebagai hasil klasifikasi berdasarkan kebutuhan energi pada fase *heating* melalui *HEI*, laju energi pada fase *holding* melalui *HER*, perbandingan *HEI* dan *HER* aktual terhadap *baseline*, proses inferensi Fuzzy Sugeno. Pendekatan tersebut digunakan untuk mengetahui apakah siklus *furnace* menunjukkan penggunaan energi yang masih sesuai atau telah meningkat dibandingkan kondisi referensi.

2.6 Heating Energi index

Heating Energy Index (HEI) merupakan indikator operasional yang dirumuskan dalam penelitian ini untuk menggambarkan jumlah energi listrik yang digunakan *furnace* dalam menghasilkan setiap kenaikan temperatur selama fase pemanasan. *HEI* dikembangkan berdasarkan hubungan antara konsumsi energi listrik dan perubahan temperatur ruang bakar dari kondisi awal sampai mencapai *setpoint*. Indikator ini bukan merupakan standar universal maupun nilai efisiensi termal, tetapi digunakan sebagai variabel analisis yang disesuaikan dengan karakteristik operasional *furnace* pada penelitian ini.

Energi yang digunakan selama fase pemanasan diperoleh dari selisih pembacaan energi ketika temperatur mencapai *setpoint* dan energi pada saat proses pemanasan dimulai. Karena sensor PZEM-004T mencatat energi dalam satuan kWh, nilai tersebut dikonversi menjadi Wh dengan Persamaan 2.6 sebagai berikut:

$$E_{heat} = (E_{reach} - E_{start}) * 1000 \quad (2.6)$$

Pada Persamaan 2.6, E_{heat} merupakan energi yang digunakan selama fase *heating* dalam satuan Wh, E_{start} merupakan energi kumulatif yang terbaca pada awal siklus dalam satuan kWh, sedangkan E_{reach} merupakan energi kumulatif ketika temperatur pertama kali mencapai *setpoint* dalam satuan kWh. Faktor 1000 digunakan untuk mengubah hasil selisih energi dari satuan kWh menjadi Wh. Selanjutnya nilai *HEI* dihitung menggunakan Persamaan 2.7 sebagai berikut:

$$HEI = \frac{E_{heat}}{T_{set} - T_{awal}} \quad (2.7)$$

Pada Persamaan 2.7, *HEI* merupakan *Heating Energy Index* dalam satuan Wh/°C, E_{heat} merupakan energi yang digunakan selama fase *heating* dalam satuan Wh, T_{set} merupakan temperatur *setpoint* yang ditetapkan dalam satuan °C, sedangkan T_{awal} merupakan temperatur awal *furnace* sebelum proses pemanasan dimulai dalam satuan °C. Selisih antara T_{set} dan T_{awal} menunjukkan kenaikan temperatur yang dicapai selama fase pemanasan.

Nilai *HEI* menunjukkan kebutuhan energi listrik rata-rata untuk menghasilkan kenaikan temperatur sebesar 1°C selama fase pemanasan. Nilai *HEI* yang semakin besar menunjukkan bahwa *furnace* membutuhkan energi yang lebih besar untuk menghasilkan kenaikan temperatur yang sama. Namun, nilai *HEI* tidak dapat langsung dibandingkan pada *setpoint* yang berbeda karena kebutuhan energi *furnace* dipengaruhi oleh temperatur operasi, kondisi awal, rugi-rugi panas, dan karakteristik elemen pemanas. Oleh karena itu, *HEI* aktual dibandingkan dengan *baseline* pada *setpoint* yang sama sebelum digunakan dalam proses klasifikasi efisiensi.

Nilai *HEI* yang sangat rendah juga tidak selalu menunjukkan kondisi operasi yang efisien. Kondisi tersebut dapat terjadi apabila temperatur awal telah mendekati *setpoint*, pembacaan energi tidak lengkap, sensor memberikan data yang tidak sesuai, atau siklus dihentikan sebelum tahapan operasi selesai. Oleh sebab itu, nilai *HEI* hanya digunakan apabila data *START*, *REACH*, dan *STOP* telah dinyatakan valid.

2.7 Holding Energi Rate

Holding Energy Rate (HER) merupakan indikator operasional yang dirumuskan dalam penelitian ini untuk menggambarkan laju penggunaan energi listrik selama fase *holding*. Fase *holding* dimulai ketika temperatur pertama kali mencapai daerah *setpoint* dan berakhir ketika pengguna menghentikan proses atau sistem mengalami kondisi *trip*. Seperti *HEI*, *HER* bukan standar efisiensi termal universal, tetapi digunakan sebagai variabel analisis untuk mengevaluasi kebutuhan

energi *furnace* selama mempertahankan kondisi temperatur. Energi yang digunakan selama fase *holding* diperoleh dari selisih energi kumulatif pada saat *STOP* dan *REACH* dengan persamaan 2.8 sebagai berikut :

$$E_{hold} = (E_{stop} - E_{reach}) * 1000 \quad (2.8)$$

Pada Persamaan 2.8, E_{hold} merupakan energi yang digunakan selama fase *holding* dalam satuan Wh, E_{reach} merupakan energi kumulatif ketika temperatur pertama kali mencapai *setpoint* dalam satuan kWh, sedangkan E_{stop} merupakan energi kumulatif pada akhir periode *holding* dalam satuan kWh. Faktor 1000 digunakan untuk mengubah selisih energi dari satuan kWh menjadi Wh. Selanjutnya nilai *HER* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.9 sebagai berikut:

$$HER = \frac{E_{hold}}{t_{hold}} \quad (2.9)$$

Pada Persamaan 2.9, *HER* merupakan *Holding Energy Rate* dalam satuan Wh/menit, E_{hold} merupakan energi listrik yang digunakan selama fase *holding* dalam satuan Wh, sedangkan t_{hold} merupakan durasi fase *holding* dalam satuan menit. Dengan demikian, nilai *HER* menunjukkan besarnya energi listrik rata-rata yang digunakan setiap menit untuk mempertahankan temperatur *furnace* setelah mencapai *setpoint*. Semakin besar nilai *HER*, semakin besar energi per satuan waktu yang diperlukan selama fase *holding*. Peningkatan *HER* dapat dipengaruhi oleh rugi-rugi panas melalui dinding dan bukaan *furnace*, kondisi material refraktori, karakteristik elemen pemanas, temperatur lingkungan, serta kerja sistem pengendalian temperatur.

Secara dimensional, *HER* memiliki makna yang berkaitan dengan daya rata-rata karena menunjukkan penggunaan energi per satuan waktu. Satuan Wh/menit tetap digunakan agar sesuai dengan durasi *holding* yang diamati dalam menit. Nilai tersebut dapat dikonversi menjadi watt menggunakan persamaan 2.10 sebagai berikut:

$$P_{hold,avg} = HER * 60 \quad (2.10)$$

Seperti *HEI*, nilai *HER* tidak dibandingkan secara langsung antar *setpoint*. *HER* aktual dibandingkan dengan *baseline* pada *setpoint* yang sama agar kenaikan kebutuhan energi pada temperatur tinggi tidak langsung dianggap sebagai kondisi tidak efisien.

HEI dan *HER* merupakan indikator operasional yang dikembangkan dalam penelitian ini berdasarkan pembagian konsumsi energi pada fase pemanasan dan fase *holding*. Kedua indikator tersebut tidak dimaksudkan sebagai pengganti perhitungan efisiensi termal dan tidak dinyatakan sebagai persentase efisiensi. *HEI* dan *HER* digunakan untuk membandingkan penggunaan energi aktual terhadap kondisi referensi *furnace* pada *setpoint* yang sama. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh hanya berlaku sebagai indikator efisiensi operasional pada konfigurasi *furnace* dan prosedur pengujian yang digunakan dalam penelitian ini.

2.8 Baseline *HEI* dan *HER*

Baseline merupakan nilai referensi yang digunakan untuk menggambarkan karakteristik operasional *furnace* pada kondisi yang dianggap normal dan terkendali. Dalam penelitian ini, *baseline* berfungsi sebagai nilai pembanding antara hasil pengukuran aktual dengan kebutuhan energi yang diperoleh pada pengujian sebelumnya. Penentuan *baseline HEI* dan *HER* perlu dilakukan untuk setiap *setpoint* karena kebutuhan energi *furnace* dapat berbeda seiring perubahan temperatur operasi. *HEI* merepresentasikan penggunaan energi selama fase pemanasan menuju *setpoint*, sedangkan *HER* menunjukkan laju penggunaan energi selama fase *holding*. Dengan demikian, *baseline* dalam penelitian ini bukan merupakan nilai efisiensi absolut secara termal, melainkan referensi operasional yang digunakan untuk menilai apakah penggunaan energi suatu siklus lebih rendah, sama, atau lebih tinggi daripada kondisi acuan.

Baseline dalam penelitian ini tidak menunjukkan nilai efisiensi terbaik secara universal, tetapi menggambarkan kondisi referensi berdasarkan hasil pengujian *furnace* yang dianggap normal. Oleh karena itu, *baseline* hanya berlaku pada *furnace* dengan konfigurasi ruang bakar, susunan elemen pemanas, parameter pengendalian, kondisi pintu, dan prosedur pengujian yang sama. Perubahan

konfigurasi alat dapat menyebabkan kebutuhan energi yang berbeda sehingga *baseline* perlu ditentukan kembali.

Pembentukan *baseline* perlu dilakukan melalui pengujian berulang dengan kondisi yang dibuat relatif sama agar variasi hasil lebih banyak dipengaruhi oleh karakteristik proses daripada perubahan prosedur pengujian. Beberapa kondisi yang perlu dijaga meliputi nilai *setpoint*, parameter PID, durasi *holding*, konfigurasi elemen pemanas, kondisi pintu dan beban ruang *furnace*, interval *sampling*, serta prosedur awal dan akhir pengujian. Pada penelitian ini, setiap *setpoint* yang memiliki tiga kali pengujian menggunakan nilai median sebagai *baseline*. Median dipilih karena lebih tahan terhadap pengaruh satu nilai ekstrem dibandingkan rata-rata, sehingga dapat memberikan nilai tengah yang lebih mewakili ketika jumlah pengujian masih terbatas. Apabila temperatur pengujian berada di antara dua *setpoint baseline* yang telah tersedia, nilai referensinya dapat ditentukan menggunakan interpolasi linier yang dapat dilihat pada persamaan 2.11 sebagai berikut:

$$HEI_{ref}(T) = HEI_1 + \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} (HEI_2 - HEI_1) \quad (2.11)$$

Berdasarkan Persamaan 2.11, nilai $HEI_{ref}(T)$ dihitung berdasarkan posisi temperatur T terhadap dua titik referensi terdekat, yaitu T_1 dan T_2 . Prinsip yang sama digunakan untuk memperoleh nilai $HER_{ref}(T)$. Interpolasi linier menghasilkan nilai baru di dalam rentang titik data yang telah diketahui dengan menghubungkan dua titik referensi secara linier. Namun, penggunaan ekstrapolasi di luar rentang temperatur pengujian tidak disarankan karena karakteristik energi *furnace* pada wilayah tersebut belum dibuktikan melalui data eksperimental. Pada Tabel 2.2 dapat dilihat *baseline* pada setiap *setpoint*nya.

Tabel 2.2. *Baseline HEI & HER*

Setpoint	Baseline HEI ($Wh/^\circ C$)	Baseline HER ($Wh/menit$)
100	0.5034	0,66
200	0.3420	1,88

Tabel 2.2. Lanjutan

Setpoint	Baseline HEI ($Wh/^\circ C$)	Baseline HER ($Wh/menit$)
300	0.3963	6,47
400	0.3760	7,85
500	0.4106	13,00
600	0.5509	13,59
700	0.5102	15,78
800	0.8619	15,00

Dari Tabel 2.2 dapat kita lihat *baseline* yang digunakan pada penelitian ini, *baseline HEI* dan *HER* dibentuk berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan tiga kali pada beberapa *setpoint* yang digunakan. Nilai referensi tersebut disimpan pada Node-RED dan dipilih berdasarkan *setpoint* setiap siklus pemanasan. Jika nilai *setpoint* berada di antara dua titik referensi, Node-RED menghitung *baseline* melalui interpolasi linier. Selanjutnya, *HEI* dan *HER* aktual dibandingkan dengan nilai referensinya untuk menghasilkan I_{HEI} dan I_{HER} . Nilai indeks sebesar 100 menunjukkan kondisi yang sama dengan *baseline*, nilai di bawah 100 menunjukkan penggunaan energi yang lebih rendah, sedangkan nilai di atas 100 menunjukkan penggunaan energi yang lebih tinggi daripada kondisi referensi. Kedua indeks tersebut kemudian digunakan sebagai variabel masukan pada proses inferensi *fuzzy* Sugeno.

2.9 Normalisasi *HEI* dan *HER*

Normalisasi merupakan proses mengubah suatu nilai ke dalam skala tertentu agar beberapa parameter yang memiliki satuan dan rentang berbeda dapat digunakan secara bersama dalam proses analisis. Proses normalisasi mempertahankan hubungan utama dari data, tetapi mengubah penyajiannya menjadi nilai relatif terhadap suatu acuan sehingga perbandingan antardata dapat dilakukan secara lebih proporsional [17].

Salah satu bentuk normalisasi dapat dilakukan dengan membandingkan nilai aktual terhadap nilai referensi atau *baseline*. Pendekatan berbasis rasio

menghasilkan nilai tanpa satuan yang menunjukkan posisi kondisi aktual terhadap kondisi acuan. Nilai tersebut dapat disajikan dalam bentuk persentase agar penyimpangan antara hasil pengukuran dan *baseline* lebih mudah diinterpretasikan [18]. Dalam penelitian ini, indeks *HEI* dan *HER* dihitung menggunakan persamaan 2.12 dan 2.13 sebagai berikut:

$$I_{HEI} = 100 * \frac{HEI_{aktual}}{HEI_{baseline}(T_{set})} \quad (2.12)$$

$$I_{HER} = 100 * \frac{HER_{aktual}}{HER_{baseline}(T_{set})} \quad (2.13)$$

Pada Persamaan 2.12 dan Persamaan 2.13, I_{HEI} dan I_{HER} merupakan indeks hasil normalisasi *HEI* dan *HER*, sedangkan HEI_{aktual} dan HER_{aktual} merupakan nilai *HEI* dan *HER* yang diperoleh dari satu siklus pengoperasian *furnace*. Sementara itu, $HEI_{baseline}(T_{set})$ dan $HER_{baseline}(T_{set})$ merupakan nilai *baseline* *HEI* dan *HER* pada *setpoint* yang sama. Faktor 100 digunakan agar hasil perbandingan dinyatakan dalam bentuk indeks berbasis persentase terhadap *baseline*.

Nilai indeks sebesar 100 menunjukkan bahwa penggunaan energi aktual sama dengan *baseline*. Nilai di bawah 100 menunjukkan penggunaan energi aktual lebih rendah daripada kondisi referensi, sedangkan nilai di atas 100 menunjukkan penggunaan energi lebih tinggi daripada *baseline*. Angka 100 tersebut tidak menyatakan efisiensi termal *furnace* sebesar 100%, tetapi hanya menunjukkan kesetaraan antara nilai aktual dan nilai referensi [19].

Normalisasi dilakukan pada Node-RED setelah *HEI*, *HER*, dan *baseline* sesuai *setpoint* berhasil ditentukan. Nilai *HEI* dan *HER* mentah tetap disimpan sebagai data hasil satu siklus, sedangkan I_{HEI} dan I_{HER} digunakan sebagai variabel masukan pada sistem *Fuzzy Sugeno*. Pendekatan tersebut memungkinkan pengujian pada beberapa *setpoint* dibandingkan terhadap karakteristik referensinya masing-masing sehingga kebutuhan energi pada temperatur tinggi tidak langsung disamakan dengan kebutuhan energi pada temperatur yang lebih rendah [20].

2.10 Logika Fuzzy (*Fuzzy Logic*)

Logika fuzzy merupakan metode pengolahan data yang digunakan untuk menangani ketidakpastian dan nilai yang bersifat tidak pasti (*uncertain*). Berbeda dengan logika klasik (*crisp logic*) yang hanya mengenal dua kondisi yaitu benar (1) atau salah (0), logika fuzzy memungkinkan suatu nilai memiliki derajat keanggotaan di antara 0 hingga 1 [16]. Konsep ini diperkenalkan pertama kali oleh matematikawan Lotfi A. Zadeh dari *University of California*, Berkeley pada tahun 1965 melalui makalahnya berjudul "*Fuzzy Sets*" yang diterbitkan dalam jurnal *Information and Control* [21].

Metode Sugeno dikembangkan oleh Takagi, Sugeno, dan Kang pada pertengahan dekade 1980-an sebagai salah satu pengembangan sistem inferensi *fuzzy* yang menggunakan fungsi matematis pada bagian konsekuen aturan. Pada metode ini, setiap aturan disusun dalam bentuk IF–THEN, dengan bagian konsekuen tidak berupa himpunan *fuzzy* seperti pada metode Mamdani, tetapi berupa nilai konstanta pada Sugeno orde nol (*zero-order*) atau fungsi linier dari variabel *input* pada Sugeno orde satu (*first-order*). Karakteristik tersebut memungkinkan keluaran sistem dihitung secara langsung menggunakan metode *weighted average* dari setiap konsekuen aturan tanpa memerlukan proses defuzzifikasi yang kompleks. Oleh karena itu, metode Sugeno memiliki proses komputasi yang lebih sederhana dan cepat, sehingga sesuai diterapkan pada sistem *real-time* yang membutuhkan respons cepat terhadap perubahan beban maupun gangguan [22].

Dalam konteks sistem yang dirancang pada penelitian ini, logika fuzzy digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat efisiensi *furnace* yang bersifat kontinu dan mengandung ketidakpastian pengukuran, ke dalam kategori yang mudah difahami bagi operator: efisien dan tidak efisien. Pendekatan ini lebih fleksibel dan intuitif dibandingkan klasifikasi berbasis ambang batas (*threshold*) yang kaku [23]. Sebuah sistem inferensi fuzzy (*Fuzzy Inference System* / FIS) secara umum terdiri dari atas; variabel *input*, fungsi keanggotaan (*membership function*), basis aturan, proses perhitungan *output*.

2.10.1 Variabel Input

Sistem inferensi *fuzzy* Sugeno yang dirancang dalam penelitian ini menggunakan dua variabel masukan, yaitu Indeks *Heating Energy* (I_{HEI}) dan Indeks *Holding Energy Rate* (I_{HER}). Kedua variabel tersebut digunakan untuk merepresentasikan tingkat penggunaan energi aktual *furnace* secara relatif terhadap nilai *baseline*. Penggunaan nilai relatif memungkinkan kondisi operasi pada beberapa *setpoint* dibandingkan dengan acuan yang sama, sehingga evaluasi efisiensi tidak hanya didasarkan pada besarnya energi aktual, tetapi juga pada penyimpangannya terhadap karakteristik operasi normal *furnace*. Setiap variabel *input* dibagi menjadi tiga himpunan keanggotaan, yaitu kecil, sedang, dan besar. Pembagian tersebut menjadi dasar dalam proses fuzzifikasi dan penyusunan aturan untuk menghasilkan keputusan efisien atau tidak efisien. Pendekatan ini sesuai dengan prinsip sistem fuzzy Sugeno, yaitu mengolah sejumlah variabel *input* melalui fungsi keanggotaan dan aturan fuzzy untuk menghasilkan keluaran yang lebih terstruktur dan mudah diterapkan pada sistem kontrol [22].

Indeks I_{HEI} digunakan untuk menunjukkan penggunaan energi relatif selama fase pemanasan, yaitu sejak proses pemanasan dimulai hingga temperatur *furnace* mencapai *setpoint*. Nilai I_{HEI} yang semakin besar menunjukkan bahwa energi pemanasan aktual lebih tinggi dibandingkan energi *baseline*, sedangkan nilai yang lebih kecil menunjukkan penggunaan energi yang lebih rendah dari kondisi acuan. Sementara itu, indeks I_{HER} digunakan untuk menggambarkan penggunaan energi relatif selama fase *holding*, yaitu ketika temperatur *furnace* dipertahankan hingga *furnace* selesai/ *STOP* memanaskan. Semakin besar nilai I_{HER} , semakin tinggi penggunaan energi aktual selama fase *holding* dibandingkan dengan *baseline*.

2.10.2 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*)

Fungsi keanggotaan merupakan kurva matematis yang digunakan untuk memetakan suatu nilai *input* tegas ke dalam derajat keanggotaan pada interval 0 sampai 1. Nilai 0 menunjukkan bahwa suatu *input* tidak termasuk dalam himpunan *fuzzy*, sedangkan nilai 1 menunjukkan keanggotaan penuh. Nilai di antara 0 dan 1 menunjukkan tingkat keanggotaan parsial sehingga satu nilai *input* dapat menjadi anggota lebih dari satu himpunan secara bersamaan [10]. Konsep tersebut

memungkinkan sistem *fuzzy* merepresentasikan perpindahan kondisi secara bertahap dan tidak hanya membedakannya secara tegas menjadi benar atau salah.

Pada penelitian ini digunakan tiga bentuk fungsi keanggotaan, yaitu *reverse grade*, trapesium, dan *grade*. Fungsi *reverse grade* digunakan untuk merepresentasikan kategori kecil, fungsi trapesium digunakan untuk kategori sedang, sedangkan fungsi *grade* digunakan untuk kategori besar. Fungsi *reverse grade* dapat dinyatakan pada Persamaan 2.14 sebagai berikut:

$$\mu_{kecil}(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (2.14)$$

Pada Persamaan 2.14, $\mu_{kecil}(x)$ merupakan derajat keanggotaan *input* terhadap kategori kecil. Parameter a merupakan batas awal penurunan derajat keanggotaan, sedangkan b merupakan batas akhir penurunan. Nilai menunjukkan nilai *input* yang sedang dievaluasi. Apabila $x \leq a$, maka derajat keanggotaan bernilai 1 atau sepenuhnya termasuk kategori kecil. Ketika nilai berada di antara a dan b , derajat keanggotaannya menurun secara linier dari 1 menuju 0. Sementara itu, apabila $x \geq b$, maka derajat keanggotaan bernilai 0 sehingga *input* tersebut tidak lagi termasuk dalam kategori kecil. Selanjutnya Fungsi trapesium dapat dinyatakan pada Persamaan 2.15 sebagai berikut:

$$\mu_{sedang}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (2.15)$$

Pada Persamaan 2.15, $\mu_{sedang}(x)$ merupakan derajat keanggotaan *input* terhadap kategori sedang. Parameter a menunjukkan batas awal kenaikan, b batas awal keanggotaan penuh, c batas akhir keanggotaan penuh, dan d batas akhir penurunan. Nilai keanggotaan meningkat secara linier dari 0 menjadi 1 pada

rentang a sampai b , bernilai 1 pada rentang b sampai c , kemudian menurun kembali secara linier dari 1 menjadi 0 pada rentang c sampai d . Dan bernilai 0 jika lebih dari d . Lalu yang terakhir fungsi *grade* dapat dinyatakan pada Persamaan 2.16 sebagai berikut:

$$\mu_{besar}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (2.16)$$

Pada Persamaan 2.16, $\mu_{besar}(x)$ merupakan derajat keanggotaan *input* terhadap kategori besar. Parameter a menunjukkan batas awal kenaikan derajat keanggotaan, sedangkan b merupakan batas ketika *input* telah sepenuhnya masuk ke kategori besar. Jika $x \leq a$, derajat keanggotaan bernilai 0, kemudian meningkat secara linier pada rentang $a < x < b$, dan bernilai 1 ketika $x \geq b$.

Fungsi tersebut digunakan untuk merepresentasikan kondisi ketika semakin besar nilai *input*, semakin besar pula derajat keanggotaannya pada kategori besar. Bentuk fungsi keanggotaan yang digunakan pada penelitian disesuaikan dengan node *reverse grade*, *trapezoid*, dan *grade* pada flow Node-RED.

2.10.3 Basis Aturan Fuzzy Sugeno

Basis aturan merupakan sekumpulan aturan logika berbentuk *IF-THEN* yang digunakan untuk menghubungkan kondisi variabel *input* dengan nilai keluaran sistem *fuzzy* [24]. Pada penelitian ini, basis aturan disusun berdasarkan dua variabel *input*, yaitu Indeks *HEI* (I_{HEI}) dan Indeks *HER* (I_{HER}). Masing-masing variabel memiliki tiga kategori himpunan keanggotaan, yaitu kecil, sedang, dan besar. Dengan demikian, kombinasi kedua *input* menghasilkan sembilan aturan (3×3). Setiap aturan merepresentasikan kondisi penggunaan energi pada fase pemanasan dan *holding*, kemudian menghasilkan konsekuen berupa nilai konstan sesuai dengan karakteristik Sugeno orde nol. Nilai konsekuen $z_i = 100$ digunakan untuk merepresentasikan kondisi efisien, sedangkan $z_i = 0$ menunjukkan kondisi tidak efisien. Dalam metode Sugeno, keluaran setiap aturan dinyatakan dalam bentuk

konstanta atau persamaan matematis sehingga proses perhitungan keluaran akhir dapat dilakukan secara lebih sederhana dan sistematis [22].

Pada Fuzzy Sugeno orde nol, konsekuen setiap aturan dapat ditetapkan dalam bentuk nilai konstan sesuai dengan keluaran yang ingin direpresentasikan. Dalam penelitian ini, nilai konsekuen 100 digunakan untuk merepresentasikan aturan yang mengarah pada kondisi efisien, sedangkan nilai 0 digunakan untuk merepresentasikan aturan yang mengarah pada kondisi tidak efisien. Pemilihan kedua nilai tersebut merupakan bagian dari rancangan sistem dan digunakan sebagai batas atas serta batas bawah skor keputusan.

Nilai 100 tidak menunjukkan bahwa efisiensi termal *furnace* mencapai 100%, tetapi hanya berfungsi sebagai representasi numerik untuk keputusan efisien. Demikian pula, nilai 0 tidak menunjukkan bahwa seluruh energi hilang, tetapi digunakan sebagai representasi keputusan tidak efisien. Penggunaan rentang 0–100 memudahkan interpretasi hasil *weighted average* karena kontribusi aturan efisien dan tidak efisien dapat ditampilkan sebagai satu skor keputusan yang terukur.

Penyusunan aturan pada penelitian ini didasarkan pada prinsip bahwa penggunaan energi yang sama atau lebih rendah daripada kondisi *baseline* masih dikategorikan efisien. Oleh karena itu, kombinasi *input* kecil–kecil, kecil–sedang, sedang–kecil, dan sedang–sedang diberikan konsekuen efisien. Kombinasi sedang–sedang tetap dikategorikan efisien karena nilai indeks sekitar 100 menunjukkan bahwa penggunaan energi aktual berada pada kondisi yang sama dengan *baseline* atau kondisi operasional normal *furnace*. Sebaliknya, suatu siklus dikategorikan tidak efisien apabila sedikitnya salah satu *input* telah berada pada kategori besar, karena kondisi tersebut menunjukkan penggunaan energi aktual yang lebih tinggi daripada nilai acuan.

2.10.4 Aplikasi Fungsi Implikasi

Aplikasi fungsi implikasi merupakan tahap dalam sistem inferensi *fuzzy* yang digunakan untuk menentukan tingkat aktivasi atau *firing strength* dari setiap aturan berdasarkan derajat keanggotaan variabel masukan. Tahap ini berbeda dengan basis aturan, karena basis aturan berfungsi menetapkan hubungan logika IF–THEN

antara kondisi *input* dan konsekuen, sedangkan fungsi implikasi menentukan seberapa kuat aturan tersebut diaktifkan oleh nilai *input* yang sedang diproses. Semakin besar nilai *firing strength*, semakin besar pula pengaruh aturan tersebut terhadap perhitungan keluaran akhir sistem *fuzzy* Sugeno.

Pada penelitian ini, bagian anteseden setiap aturan menggunakan operator AND dengan metode MIN. Operator tersebut menentukan kekuatan aktivasi aturan ke-*i* dengan memilih nilai terkecil dari derajat keanggotaan I_{HEI} dan I_{HER} yang digunakan dalam aturan. Secara matematis, nilai *firing strength* dinyatakan melalui Persamaan 2.17 sebagai berikut:

$$w_i = \min[\mu_{HEI}, \mu_{HER}] \quad (2.17)$$

Pada Persamaan 2.17, w_i merupakan nilai *firing strength* atau kekuatan aktivasi aturan ke-*i*. Nilai tersebut diperoleh dengan mengambil nilai minimum dari derajat keanggotaan I_{HEI} dan I_{HER} yang digunakan pada aturan. Dengan demikian, besar kecilnya menunjukkan seberapa kuat suatu aturan aktif berdasarkan kombinasi kedua *input fuzzy*.

2.10.5 Komposisi Aturan

Komposisi aturan merupakan tahap penggabungan kontribusi seluruh aturan *fuzzy* yang aktif setelah proses implikasi selesai dilakukan. Setiap aturan menghasilkan pasangan nilai berupa kekuatan aktivasi atau *firing strength* w_i dan nilai konsekuen z_i . Pada sistem Sugeno orde nol, nilai konsekuen setiap aturan berbentuk konstanta sehingga proses komposisi tidak dilakukan dengan menggabungkan daerah fungsi keanggotaan keluaran seperti pada metode Mamdani. Kontribusi setiap aturan ditentukan berdasarkan hasil perkalian antara kekuatan aktivasi aturan dan nilai konsekuennya. Dengan demikian, aturan yang memiliki nilai w_i lebih besar akan memberikan pengaruh yang lebih kuat terhadap hasil akhir sistem. Konsep ini merupakan karakteristik sistem inferensi Sugeno yang menggunakan keluaran berbobot untuk menggabungkan hasil seluruh aturan [22].

Jumlah kekuatan aktivasi seluruh aturan dinyatakan dengan W , sedangkan jumlah kontribusi keluaran yang telah diberi bobot dinyatakan dengan Y . Karena sistem menggunakan sembilan aturan, kedua nilai tersebut dihitung menggunakan Persamaan 2.18 dan 2.19 sebagai berikut:

$$W = \sum_{i=1}^9 w_i \quad (2.18)$$

dan

$$Y = \sum_{i=1}^9 w_i z_i \quad (2.19)$$

Pada Persamaan 2.18, W merupakan jumlah seluruh nilai *firing strength* dari sembilan aturan fuzzy yang aktif, sedangkan w_i menunjukkan kekuatan aktivasi pada aturan ke-. Selanjutnya, pada Persamaan 2.19, Y merupakan jumlah kontribusi keluaran berbobot yang diperoleh dari hasil perkalian antara nilai w_i dengan konstanta konsekuen z_i pada masing-masing aturan. Nilai W dan Y selanjutnya digunakan dalam proses defuzzifikasi untuk memperoleh keluaran akhir sistem Fuzzy Sugeno.

Aturan dengan nilai $w_i = 0$ tidak memberikan kontribusi terhadap nilai W maupun Y karena kondisi pada bagian antesedennya tidak terpenuhi. Sebaliknya, semakin besar nilai w_i , semakin besar pula kontribusi nilai $w_i z_i$ terhadap keluaran sistem. Nilai W dan Y selanjutnya digunakan untuk menghitung keluaran tegas melalui metode *weighted average*.

Dalam penelitian ini, proses komposisi dilakukan pada Node-RED setelah seluruh kombinasi I_{HEI} dan I_{HER} diproses melalui sembilan aturan Sugeno. Setiap aturan menerima nilai *firing strength* dari tahap implikasi MIN dan memiliki konsekuen $z_i = 100$ untuk aturan efisien atau $z_i = 0$ untuk aturan tidak efisien. Hasil dari sembilan aturan tersebut kemudian dijumlahkan untuk memperoleh nilai W dan Y . Kedua nilai tersebut diteruskan menuju bagian perhitungan *Weighted Average Sugeno* untuk menghasilkan skor akhir efisiensi. Proses ini memastikan

bahwa keputusan akhir tidak hanya ditentukan oleh satu aturan, tetapi berdasarkan proporsi kekuatan aktivasi seluruh aturan yang aktif.

2.10.6 Penegasan atau Defuzzifikasi

Penegasan atau defuzzifikasi merupakan tahap untuk menghasilkan satu nilai keluaran tegas berdasarkan hasil komposisi seluruh aturan *fuzzy* yang aktif. Pada metode Sugeno, setiap aturan menghasilkan konsekuen berbentuk konstanta atau fungsi matematis, sehingga nilai akhir dapat dihitung menggunakan metode *weighted average*. Metode ini mempertimbangkan kekuatan aktivasi atau *firing strength* dari setiap aturan sebagai bobot bagi nilai konsekuennya. Dengan demikian, aturan yang memiliki derajat aktivasi lebih besar akan memberikan pengaruh lebih kuat terhadap keluaran akhir sistem. Pendekatan tersebut merupakan salah satu karakteristik utama sistem inferensi Sugeno.

Nilai keluaran akhir diperoleh dengan membagi jumlah kontribusi keluaran berbobot terhadap jumlah kekuatan aktivasi seluruh aturan. Karena sistem menggunakan sembilan aturan, persamaan defuzzifikasi dapat dinyatakan pada Persamaan 2.20 dan 2.21 sebagai berikut:

$$Z = \frac{\sum w_i z_i}{\sum w_i} \quad (2.20)$$

Atau:

$$Z = \frac{Y}{W} \quad (2.21)$$

Pada Persamaan 2.20, Z merupakan skor keluaran akhir Fuzzy Sugeno yang diperoleh dari perbandingan antara jumlah kontribusi keluaran berbobot $\sum w_i z_i$ dengan jumlah seluruh kekuatan aktivasi aturan $\sum w_i$. Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi Persamaan 2.21, yaitu $Z = Y/W$, dengan Y sebagai jumlah keluaran aturan berbobot dan W sebagai jumlah kekuatan aktivasi seluruh aturan. Nilai Z selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menentukan hasil klasifikasi efisiensi sistem.

Dalam penelitian ini, konsekuen aturan ditetapkan sebesar $z_i = 100$ untuk kondisi efisien dan $z_i = 0$ untuk kondisi tidak efisien, sehingga nilai Z berada pada rentang 0 sampai 100. Nilai tersebut selanjutnya diklasifikasikan menggunakan ketentuan berikut:

$$Klasifikasi = \begin{cases} Efisien, & Z \geq 60 \\ Tidak Efisien, & Z < 60 \end{cases}$$

Skor Z tidak menunjukkan persentase efisiensi termal *furnace*, melainkan skor keputusan yang terbentuk dari kombinasi aturan efisien dan tidak efisien. Klasifikasi hanya diberikan apabila data satu siklus telah dinyatakan valid. Apabila data *START-REACH-STOP* tidak lengkap, *setpoint* belum tercapai, energi kumulatif mengalami penurunan, atau durasi *holding* belum memenuhi batas minimum, sistem akan menampilkan status data tidak valid dan tidak menghasilkan klasifikasi *fuzzy*. Ambang nilai 60 masih menjadi batas keputusan operasional yang perlu diperiksa melalui pengujian validasi agar sesuai dengan kondisi aktual penggunaan energi *furnace*.

2.11 Node-RED

Node-RED merupakan platform pemrograman berbasis aliran (*flow-based programming*) dengan pendekatan *low-code* yang dirancang untuk membangun aplikasi berbasis peristiwa (*event-driven application*). Platform ini menyediakan editor visual berbasis peramban yang memungkinkan pengguna menyusun alur program dengan cara menempatkan sejumlah *node* pada area kerja, kemudian menghubungkannya menggunakan garis penghubung atau *wire*. Setiap *node* menjalankan fungsi tertentu, seperti menerima data, mengubah format data, melakukan perhitungan, menentukan kondisi, serta mengirimkan hasil ke sistem lain. Setelah seluruh alur selesai disusun, program dapat diterapkan ke *runtime* melalui proses *deploy*. Pendekatan tersebut membuat Node-RED sesuai digunakan dalam sistem *Internet of Things*, otomasi, pemantauan, dan pengolahan data waktu nyata karena proses integrasi perangkat keras, layanan, serta pengolahan data dapat dilakukan secara visual [25].

Cara kerja Node-RED didasarkan pada pertukaran pesan antarnode di dalam suatu *flow*. Pesan tersebut berbentuk objek JavaScript yang umumnya disebut *msg* dan dapat memuat berbagai properti sesuai kebutuhan sistem. Secara umum, informasi utama ditempatkan pada properti *msg.payload*, sedangkan properti lain dapat digunakan untuk menyimpan topik, status, waktu, identitas perangkat, atau hasil pengolahan tertentu. Pesan yang diterima oleh suatu *node* akan diproses sesuai fungsi yang telah dikonfigurasi, kemudian diteruskan ke *node* berikutnya. Struktur ini memungkinkan setiap tahapan pengolahan data dipisahkan ke dalam fungsi yang lebih kecil sehingga alur sistem menjadi lebih mudah dibaca, diuji, dikembangkan, dan diperbaiki [25].

Node-RED memiliki sejumlah *node* inti yang dapat digunakan untuk membangun alur pengolahan data, antara lain *Inject*, *Debug*, *Function*, *Change*, dan *Switch*. *Function node* memungkinkan pengguna menambahkan kode JavaScript untuk melakukan pengolahan yang lebih khusus terhadap pesan yang masuk, sedangkan *Debug node* digunakan untuk menampilkan isi pesan dan memeriksa hasil pemrosesan pada setiap tahapan. Selain itu, informasi tertentu dapat disimpan menggunakan fasilitas *context* agar dapat digunakan kembali oleh *node* lain tanpa harus selalu dikirim melalui pesan. Kombinasi antarnode tersebut mendukung pembentukan sistem yang modular, yaitu setiap bagian alur memiliki tugas yang jelas, tetapi tetap saling terhubung dalam satu proses pengolahan data [25].

Dalam penelitian ini, Node-RED digunakan sebagai pusat pengolahan data efisiensi operasional *furnace*. Data sensor yang dikirim oleh ESP32 terlebih dahulu diterima dalam bentuk *payload*, kemudian diubah menjadi data numerik dan diperiksa kelengkapannya. Sistem selanjutnya menghapus data dengan *timestamp* yang sama untuk mencegah perhitungan ganda serta mendeteksi fase *START*, *REACH*, dan *STOP* sebagai penanda proses pemanasan, pencapaian *setpoint*, dan berakhirnya fase *holding*. Berdasarkan data tersebut, Node-RED menghitung nilai *HEI* dan *HER*, mencari nilai *baseline* sesuai *setpoint*, lalu melakukan normalisasi untuk memperoleh I_{HEI} dan I_{HER} . Kedua indeks kemudian diproses melalui tahapan fuzzifikasi, sembilan aturan Sugeno, perhitungan *firing strength*, dan *weighted*

average. Hasil akhirnya berupa skor serta klasifikasi efisien atau tidak efisien, yang selanjutnya disimpan, ditampilkan, dan dapat digunakan sebagai dasar pemberian informasi atau alarm kepada pengguna.

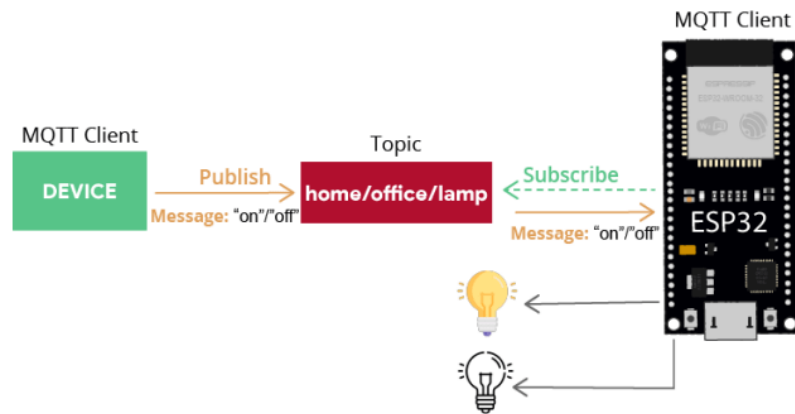
2.12 Protokol Komunikasi MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) merupakan protokol komunikasi berbasis pola *publish-subscribe* yang dirancang untuk pertukaran pesan antara perangkat dan aplikasi. MQTT memiliki karakteristik ringan, terbuka, serta relatif mudah diterapkan, sehingga sesuai digunakan pada komunikasi *Machine-to-Machine* (M2M) dan sistem *Internet of Things* (IoT). Protokol ini juga dirancang untuk lingkungan yang memiliki keterbatasan sumber daya perangkat, ukuran program, dan kapasitas jaringan. Oleh karena itu, MQTT banyak dimanfaatkan untuk mengirimkan data sensor dan status perangkat dengan kebutuhan *bandwidth* yang relatif rendah [26].

Komunikasi MQTT melibatkan *publisher*, *broker*, *subscriber*, dan *topic*. *Publisher* merupakan klien yang mengirimkan pesan, sedangkan *subscriber* adalah klien yang menerima pesan sesuai dengan topik yang telah dilanggan. *Broker* bertindak sebagai perantara yang menerima pesan dari *publisher*, memeriksa topik pesan, kemudian mendistribusikannya kepada seluruh *subscriber* yang berlangganan pada topik tersebut [27]. Sementara itu, *topic* berfungsi sebagai jalur logis untuk mengelompokkan pesan berdasarkan jenis data atau tujuan penggunaannya. Mekanisme tersebut membuat pengirim dan penerima tidak harus berkomunikasi secara langsung, sehingga hubungan antarkomponen menjadi lebih fleksibel dan mudah dikembangkan.

Pesan yang dikirimkan melalui MQTT terdiri atas nama *topic* dan muatan data atau *payload*. Format *payload* tidak ditentukan secara khusus oleh protokol, sehingga pengembang dapat menggunakan format yang sesuai dengan kebutuhan sistem, salah satunya *JavaScript Object Notation* (JSON). Penggunaan JSON memungkinkan beberapa parameter dikirimkan secara terstruktur dalam satu pesan dan mudah diolah oleh aplikasi penerima. Selain itu, MQTT menyediakan tingkat *Quality of Service* (QoS) untuk menentukan jaminan pengiriman pesan, yaitu QoS

0, QoS 1, dan QoS 2. Pemilihan tingkat QoS perlu mempertimbangkan kebutuhan keandalan komunikasi dan beban jaringan karena tingkat jaminan yang lebih tinggi membutuhkan proses pertukaran data yang lebih banyak [26]. Selanjutnya pada Gambar 2.3 dapat dilihat bagaimana mikrokontroler berkomunikasi dengan MQTT.



Gambar 2.3. Komunikasi MQTT dengan ESP32

Dapat dilihat pada Gambar 2.3 komunikasi MQTT menggunakan pola *publish–subscribe* yang menghubungkan beberapa *client* melalui suatu *topic*. Perangkat pada sisi kiri bertindak sebagai *publisher* dengan mengirimkan pesan, seperti perintah “on” atau “off”, ke topik *home/office/lamp*, sedangkan ESP32 pada sisi kanan bertindak sebagai *subscriber* yang berlangganan pada topik tersebut dan menerima pesan untuk mengendalikan kondisi lampu. Mekanisme ini menunjukkan bahwa perangkat pengirim dan penerima tidak berkomunikasi secara langsung, melainkan melalui topik yang dikelola oleh *broker* MQTT.

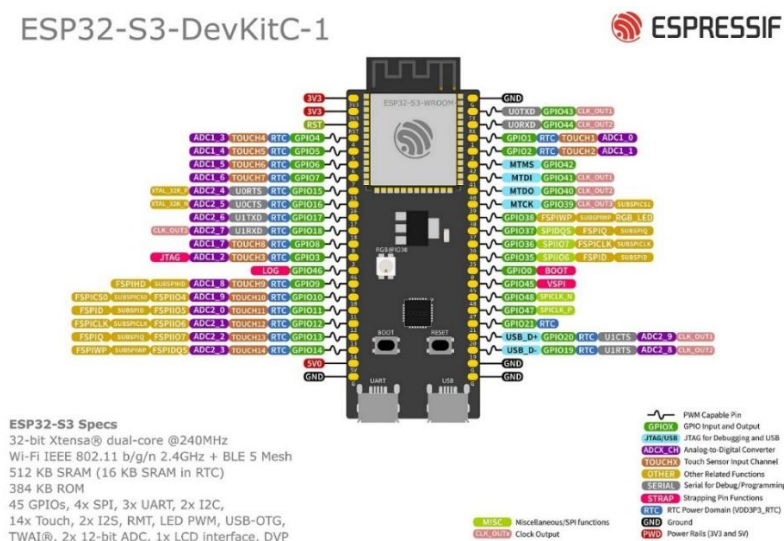
Dalam penelitian ini, ESP32-S3 bertindak sebagai *publisher* yang mengirimkan data operasional *furnace* menuju *broker* MQTT melalui topik yang telah ditentukan. Data yang dikirimkan dapat mencakup *timestamp*, *setpoint*, temperatur aktual, tegangan, arus, daya, energi, status pemanas, serta status alarm. Node-RED bertindak sebagai *subscriber* yang berlangganan pada topik tersebut, menerima *payload*, kemudian mengolahnya sebagai masukan untuk proses perhitungan *HEI*, *HER*, normalisasi, dan inferensi *fuzzy* Sugeno. Dengan arsitektur ini, ESP32-S3 berfokus pada pembacaan sensor dan pengiriman data, sedangkan proses analisis efisiensi dilakukan di Node-RED. Namun, karena MQTT

membutuhkan hubungan jaringan antara klien dan *broker*, terputusnya koneksi dapat menyebabkan data tidak segera diterima oleh Node-RED. Oleh sebab itu, fungsi utama pengendalian dan pengamanan *furnace* tetap dijalankan secara lokal pada ESP32-S3, sedangkan MQTT digunakan sebagai jalur komunikasi untuk pemantauan dan analisis data.

2.13 Mikrokontroler ESP32-S3

ESP32-S3 adalah sebuah System-on-Chip (SoC) produksi Espressif Systems yang mengintegrasikan prosesor, memori, antarmuka nirkabel, dan berbagai antarmuka periferil dalam satu chip tunggal. ESP32-S3 dirancang sebagai mikrokontroler berdaya rendah namun berperforma tinggi untuk aplikasi Internet of Things (IoT) dan embedded system [28].

Berdasarkan datasheet resmi Espressif Systems, ESP32-S3 memiliki spesifikasi utama sebagai berikut: prosesor dual-core Xtensa® 32-bit LX7 dengan frekuensi kerja yang dapat dikonfigurasi hingga 240 MHz, memori SRAM on-chip sebesar 512 KB, serta dukungan Wi-Fi 802.11 b/g/n pada frekuensi 2,4 GHz dan Bluetooth 5 (LE). SoC ini juga dilengkapi dengan 45 GPIO yang dapat diprogram, serta antarmuka serial SPI, I2C, UART, I2S, ADC, PWM, dan USB OTG [8]. Selanjutnya dapat dilihat konfigurasi pin pada ESP32-S3 pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4. Modul ESP32-S3 dan konfigurasi pin utama

Gambar 2.4 menampilkan modul ESP32-S3 yang digunakan dalam sistem ini. Modul ini memiliki layout pin yang terstandar dengan kelompok pin untuk antarmuka SPI (SCK, MISO, MOSI, CS) yang akan digunakan untuk komunikasi dengan modul MAX6675, serta pin UART (TX, RX) untuk komunikasi dengan modul PZEM-004T. Pin 3.3V dan GND digunakan sebagai referensi daya untuk semua modul sensor. Spesifikasi ESP32-S3 dapat dilihat pada Tabel 2.3 sebagai berikut.

Tabel 2.3. Spesifikasi ESP32-S3

Spesifikasi	ESP32-S3-DevKitC-1	Satuan
Prosesor	Xtensa® LX7 <i>dual-core</i>	–
Frekuensi CPU	hingga 240	MHz
SRAM	512	KB
Flash	8 <i>on board</i>	MB
Tegangan Operasi	3,0 – 3,6	V
Tegangan Input	5 (via USB / 5V pin)	V
GPIO	45	–
Timers	4 × 64-bit general purpose	–
ADC	12	Bit
Channel ADC	20	Channel
DAC	2 × 8-bit	Channel
PWM	8 (LED PWM controller)	Channel
Komunikasi Interface	UART, SPI, I ² C, I ² S, USB OTG, TWAI®	–
Wi-Fi	802.11 b/g/n (2,4 GHz)	–
Bluetooth	Bluetooth 5 (LE + Mesh)	–
Suhu Operasi	–40 s/d +85	°C
Dimensi Modul	55,0 × 27,0	mm
Debugger Program	USB (built-in JTAG)	–

Pada Tabel 2.3 ESP32-S3 memiliki prosesor yang mampu memproses data secara cepat dan *real-time* sesuai dengan kebutuhan sistem yang memiliki banyak perintah didalamnya. Lalu, mikrokontroler ini juga memiliki memori yang memungkinkan penyimpanan program yang cukup kompleks didalamnya, termasuk implementasi sistem alarm lokal dan pengiriman-penerimaan data. Jumlah pin *input/output* serta komunikasi yang memadai membuat mikrokontroler ini memiliki fleksibilitas tinggi untuk diintegrasikan dengan berbagai sensor serta

aktuator. Yang terakhir yaitu, keberadaan konektivitas WI-FI dan Bluetooth membuat ESP32-S3 mampu menjalankan sistem monitoring berbasis IoT.

2.14 Sensor Suhu: Termocouple Type K dan Modul ADC MAX6675

Thermocouple merupakan sensor suhu yang bekerja berdasarkan efek termoelektrik, di mana perbedaan suhu antara dua titik pada sepasang konduktor berbeda jenis menghasilkan tegangan listrik yang dapat diukur. Prinsip ini ditemukan oleh ilmuwan Jerman Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821, dan selanjutnya dikenal sebagai Efek Seebeck [29].

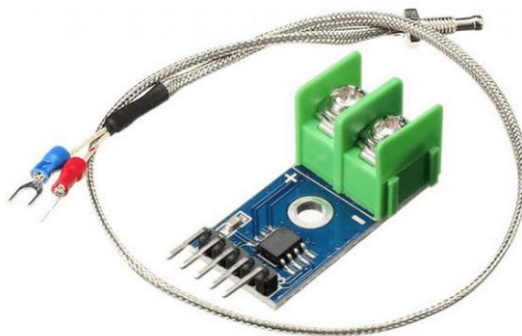
Efek Seebeck menyatakan bahwa apabila dua logam berbeda jenis disambungkan pada kedua ujungnya membentuk dua junction (titik sambungan), dan kedua junction tersebut berada pada suhu yang berbeda, maka akan muncul gaya gerak listrik (GGL / EMF) yang besarnya sebanding dengan perbedaan suhu antara hot junction dan cold junction [29]. Hubungan ini dinyatakan dengan Persamaan 2.23 sebagai berikut:

$$V = S \cdot \Delta T = S \cdot (T_{hot} - T_{cold}) \quad (2.22)$$

Pada Persamaan 2.23, V adalah tegangan keluaran dalam milivolt (mV), S adalah koefisien Seebeck dalam $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (merupakan konstanta karakteristik dari kombinasi dua logam), T_{hot} adalah suhu hot junction, dan T_{cold} adalah suhu *cold junction* [29].

Pada penelitian ini digunakan *Thermocouple Type K* yang tersusun dari Chromel (paduan Nikel-Kromium) sebagai konduktor positif dan Alumel (paduan Nikel-Aluminium) sebagai konduktor negatif. Termokopel tipe K banyak digunakan pada aplikasi industri karena mempunyai rentang pengukuran yang luas, respons yang relatif cepat, serta ketahanan yang baik terhadap kondisi temperatur tinggi dan oksidasi. Sensor ini memiliki rentang pengukuran sekitar -200°C hingga $+1350^\circ\text{C}$ dengan sensitivitas sekitar $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ [30]. Namun, sinyal listrik yang dihasilkan termokopel sangat kecil sehingga diperlukan modul pengondisi sinyal agar data temperatur dapat dibaca oleh mikrokontroler.

Pada sistem ini, sinyal termokopel diolah menggunakan modul MAX6675. Modul tersebut berfungsi sebagai *thermocouple-to-digital converter* yang melakukan pengondisian sinyal, kompensasi *cold junction*, dan konversi data temperatur menjadi data digital 12-bit. MAX6675 mempunyai resolusi pengukuran sebesar $0,25^{\circ}\text{C}$ dengan rentang pembacaan 0°C hingga 1024°C . Komunikasi data antara MAX6675 dan ESP32-S3 dilakukan melalui antarmuka SPI menggunakan tiga jalur utama, yaitu SCK (*clock*), CS (*chip select*), dan SO (*serial output*) [31]. Selain itu, modul memiliki fitur *open-circuit detection* untuk mendeteksi kondisi ketika termokopel tidak terhubung. Bentuk fisik dari sensor termokopel tipe K dan modul MAX6675 dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5. *Thermocouple Type K* dan Modul MAX6675

Berdasarkan Gambar 2.5, sistem pengukuran suhu terdiri atas probe *Thermocouple Type K* sebagai elemen pendeteksi temperatur dan modul MAX6675 sebagai pengolah sinyal. Ujung probe termokopel ditempatkan pada tengah ruang bakar *furnace*, sedangkan kedua kabel keluarannya dihubungkan pada terminal TH+ dan TH- pada MAX6675. Sinyal tegangan kecil yang dihasilkan akibat Efek Seebeck kemudian dikompensasi dan dikonversi oleh MAX6675 menjadi data digital yang selanjutnya dikirimkan melalui komunikasi SPI menuju ESP32-S3. Spesifikasi termokopel tipe K dan modul MAX6675 dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Spesifikasi *Thermocouple Type K* dan Modul MAX6675

Komponen	Spesifikasi	Nilai/Keterangan	Satuan
Thermocouple Type K	Rentang suhu	-200 hingga $+1350$	$^{\circ}\text{C}$
	Sensitivitas	≈ 41	$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
	Akurasi	$\pm 2,2$ atau $\pm 0,75\%$	$^{\circ}\text{C}$

Tabel 2.4. Lanjutan

Komponen	Spesifikasi	Nilai/Keterangan	Satuan
Thermocouple Type K	Ketahanan lingkungan	Tinggi terhadap oksidasi	–
	Keluaran	Tegangan analog (EMF)	mV
	Tipe modul	<i>Thermocouple-to-Digital Converter</i>	–
MAX6675	Resolusi ADC	12	bit
MAX6675	Resolusi suhu	0,25	°C
	Rentang suhu	0 hingga 1024	°C
	Akurasi	±3 pada rentang 0–700°C	°C
	Tegangan operasi	3,0–5,5	V
	Antarmuka komunikasi	SPI	–
	Pin komunikasi	SCK, CS, SO	–
	<i>Cold Junction Compensation</i>	Ada, internal	–
	Deteksi termokopel putus	Ada (<i>open-circuit detection</i>)	–

Berdasarkan Tabel 2.4, *Thermocouple Type K* memiliki rentang pengukuran yang luas sehingga sesuai digunakan untuk mendeteksi temperatur tinggi pada *furnace*. Sementara itu, MAX6675 memiliki resolusi pembacaan sebesar 0,25°C serta dilengkapi *cold junction compensation* dan antarmuka komunikasi SPI yang memudahkan pengiriman data menuju ESP32-S3. Meskipun termokopel mempunyai kemampuan pengukuran hingga sekitar 1350°C, rentang pembacaan sistem yang menggunakan MAX6675 dibatasi oleh kemampuan modul tersebut hingga sekitar 1024°C. Rentang tersebut tetap mencukupi untuk penelitian ini karena temperatur pengujian *furnace* dibatasi hingga 800°C.

2.15 Sensor Parameter kelistrikan : PZEM-004T

PZEM-004T (*Peacefair ZEM-004T*) merupakan modul pengukur energi listrik AC satu fasa yang mampu mengukur berbagai parameter kelistrikan secara simultan dan *real-time*. Modul ini dikembangkan oleh *Peacefair* dan banyak

digunakan dalam aplikasi monitoring daya, *smart metering*, dan sistem IoT berbasis Arduino/ESP32 [7]. Bentuk fisik dari modul sensor PZEM-004T V3 dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Sensor dan Modul PZEM-004T

Gambar 2.6 memperlihatkan fisik modul PZEM-004T yang terdiri dari dua bagian koneksi utama. Bagian pertama adalah terminal daya AC yang terdiri dari terminal L (fasa) dan N (Neutral), yang dihubungkan secara terpisah dengan beban yang akan diukur untuk pengukuran tegangan, sekaligus menjadi sumber daya modul itu sendiri. Bagian kedua adalah terminal CT (*Current Transformer*) yang berbentuk klem yang dipasang mengelilingi kabel fasa beban untuk pengukuran arus tanpa memutus rangkaian [7].

PZEM-004T menggunakan IC pengukur energi satu fasa dari *Vango Technologies* yang mengintegrasikan *Analog Front-End* (AFE), arsitektur pengukuran energi, inti mikrokontroler 8052, dan antarmuka komunikasi dalam satu chip. Tegangan AC dideteksi langsung dari terminal L-N melalui rangkaian pembagi tegangan resistif berisolasi, sedangkan arus AC diukur melalui *current tranformer* (CT) berukuran kecil. Sinyal dari kedua saluran ini diproses oleh IC untuk menghitung nilai RMS (*Root Mean Square*) tegangan dan arus, kemudian

dihitung daya aktif, faktor daya, frekuensi, dan energi kumulatif [32]. Spesifikasi PZEM-004T dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Spesifikasi PZEM-004T

Spesifikasi	PZEM-004T	Satuan
Tipe Modul	Energy Meter AC 1 Fasa	-
Tegangan Operasi	80 – 260	V AC
Arus Maksimum	100 (dengan CT)	A
Rentang Daya	0 – 23	kW
Rentang Energi	0 – 9999	kWh
Frekuensi	45 – 65	Hz
Akurasi Tegangan	± 0.5	%
Akurasi Arus	± 0.5	%
Akurasi Daya	± 1	%
Parameter yang Diukur	Tegangan, Arus, Daya, Energi, Frekuensi, Power Factor	-
Metode Pengukuran Arus	Current Transformer (CT)	-
Metode Pengukuran Tegangan	Direct AC (L-N)	-
Komunikasi	UART (TTL Serial)	-
Tegangan Kerja	5	V

Berdasarkan tabel 2.5 sensor daya PZEM-004T digunakan karena memiliki berbagai kemampuan parameter listrik yang lengkap yang sesuai dengan kebutuhan sistem ini, yaitu pembacaan tegangan, arus, dan daya yang besar. Di sisi lain, sensor ini juga memiliki tingkat akurasi tinggi yang dapat diandalkan untuk analisis efisiensi. Sensor ini menggunakan UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) sebagai media komunikasi yang dapat memudahkan perangkaian perangkat keras tanpa memerlukan rangkaian tambahan yang kompleks.

2.16 Sistem Alarm: *Buzzer* dan *LED*

Sistem alarm merupakan komponen kritis dalam infrastruktur monitoring dan pengendalian proses industri. Secara definisi, alarm adalah notifikasi atau peringatan yang dihasilkan oleh suatu sistem kendali ketika variabel yang dipantau mengalami penyimpangan dari nilai atau rentang operasi yang dianggap normal,

sehingga memerlukan perhatian atau tindakan dari operator [33]. Ada 2 komponen yang digunakan sebagai sistem peringatan pada penelitian ini yaitu *buzzer piezoelektrik* dan LED *pilot lamp*.

Buzzer Piezoelektrik merupakan komponen akustik yang mengubah sinyal listrik menjadi bunyi. *Buzzer piezoelektrik* bekerja dengan prinsip efek *piezoelektrik*: ketika tegangan listrik diterapkan pada elemen keramik *piezoelektrik*, elemen tersebut mengalami deformasi mekanik yang menghasilkan gelombang suara. ESP32-S3 dapat mengendalikan buzzer melalui sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk menghasilkan pola bunyi yang berbeda-beda [34]. Bentuk fisik dari *buzzer piezoelektrik* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7. *Buzzer Piezoelektrik*

Pada gambar 2.7 dapat dilihat komponen *buzzer piezoelektrik* yang digunakan sebagai sistem alarm pada alat ini. *Buzzer* ini bekerja dengan menghasilkan gelombang suara ketika diberikan tegangan listrik dari mikrokontroler. Dapat dilihat komponen ini memiliki dua terminal utama yaitu terminal positif berwarna merah, dan negatif berwarna hitam yang langsung terhubung dengan sistem kontrol. Setelah dihubungkan sistem kontrol hanya perlu mengirimkan sinyal listrik untuk membuat komponen ini bersuara. Spesifikasi buzzer piezoelektrik dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Spesifikasi Buzzer

Spesifikasi	Buzzer	Satuan
Tipe Komponen	Active Piezo Buzzer	-
Tegangan Operasi	3 – 24	V
Arus Operasi	≤ 30	mA
Frekuensi Bunyi	± 2.3	kHz
Intensitas Suara	≥ 85	dB

Tabel 2.6. Lanjutan

Spesifikasi	Buzzer	Satuan
Tipe Sinyal	DC (tanpa PWM eksternal)	-
Jenis Buzzer	Active (self-oscillating)	-
Polaritas	Ada (+ dan -)	-
Diameter	27	mm
Tinggi	± 15	mm
Suhu Operasi	-20 hingga +70	°C

Pada Tabel 2.6 *buzzer* ini digunakan didasarkan pada karakteristik dan spesifikasinya. *Buzzer* digunakan karena dapat menghasilkan bunyi hingga lebih dari 85 dB, suara nyaring yang dihasilkan buzzer diperlukan agar dapat terdengar dengan jelas oleh operator jika terjadi keadaan yang genting.

LED *Pilot Lamp* Indikator berfungsi sebagai alarm visual yang memberikan informasi status secara instan tanpa memerlukan perhatian aktif dari operator. Dalam sistem ini, LED dengan warna berbeda (merah untuk kondisi tidak efisien, kuning untuk kondisi awal pemanasan, dan hijau untuk kondisi efisien) dikontrol langsung oleh ESP32-S3. Bentuk fisik dari *pilot lamp* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Pilot Lamp 12V

Pada gambar 2.8 dapat kita ketahui bahwa pada penelitian ini digunakan pilot lamp 12V berjumlah 3 yang memiliki warna yang berbeda. Komponen ini digunakan sebagai penanda operasional *furnace*, dengan warna tertentu yang dapat mewakili kondisi sistem, seperti merah untuk menunjukkan kondisi saat alarm berfungsi (lebih dari 50 derajat dari *setpoint* dan kondisi *overheat* lebih dari 100 derajat dari *setpoint*) dan kondisi tidak efisien, warna kuning sebagai penanda bahwa sistem

sedang proses memanaskan, dan warna hijau menandakan bahwa kondisi furnace efisien. Spesifikasi pilot lamp yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7. Spesifikasi *Pilot Lamp* 12V

Spesifikasi	Pilot Lamp	Satuan
Tipe Komponen	LED Indicator / Pilot Lamp	-
Diameter Lubang Panel	22	mm
Tegangan Operasi	5 – 24	V DC
Tegangan Nominal	12	V
Warna Cahaya	Merah	-
Jenis Lampu	LED	-
Arus Operasi	≤ 20	mA
Intensitas Cahaya	Tinggi (<i>High Brightness</i>)	-
Jenis Terminal	Screw / Pin Terminal	-
Material Housing	Plastik / Metal (<i>industrial grade</i>)	-
Suhu Operasi	-20 hingga +60	°C

Pada tabel 2.7 dapat diketahui bahwa pemilihan pilot lamp selain berdasarkan pada fungsinya sebagai indikator, pilot lamp 12V juga digunakan karena tegangan *inputnya* yang beroperasi pada rentang yang sesuai dengan sistem, hal ini membuat pemanfaatan komponen dengan maksimal tanpa harus menambahkan komponen lainnya. Selain itu pilot lamp 12V juga memiliki intensitas cahaya yang tinggi, hal ini membuat operator atau pengguna dapat melihat kondisi yang sesuai dengan *furnace* dengan jelas.

2.17 Power Supply dan Buck Converter

Power supply merupakan perangkat elektronik yang digunakan untuk mengonversi energi listrik agar memiliki karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan beban. Dalam sistem kontrol dan aplikasi industri, *power supply* umumnya berfungsi mengubah tegangan AC (*Alternating Current*) dari jaringan listrik menjadi tegangan DC (*Direct Current*) yang stabil. Proses konversi tersebut dilakukan melalui beberapa tahapan, meliputi penyearahan (*rectification*) untuk mengubah tegangan AC menjadi DC, penyaringan (*filtering*) untuk mengurangi gelombang riak, serta pengaturan tegangan (*regulation*) agar nilai tegangan keluaran tetap berada pada kondisi yang dibutuhkan oleh perangkat [34].

Jenis *Switch Mode Power Supply* (SMPS) bekerja dengan mengubah tegangan AC menjadi DC melalui proses pensaklaran berfrekuensi tinggi. Pada tahap awal, tegangan AC dari sumber listrik disearahkan menggunakan rangkaian dioda atau *rectifier* sehingga menghasilkan tegangan DC yang masih belum stabil. Tegangan tersebut kemudian disaring menggunakan kapasitor untuk mengurangi *ripple*. Selanjutnya, transistor melakukan proses *switching* untuk mengubah tegangan DC menjadi sinyal berfrekuensi tinggi, sehingga transformator berukuran lebih kecil dapat digunakan untuk menurunkan atau menyesuaikan tegangan. Setelah melewati transformator, tegangan kembali disearahkan dan disaring agar menghasilkan keluaran DC yang lebih stabil. Tahap akhir dilakukan melalui sistem kendali umpan balik (*feedback control*) untuk mempertahankan tegangan keluaran tetap konstan meskipun terjadi perubahan tegangan masukan maupun beban. Pada sistem tugas akhir ini, keluaran *power supply* digunakan sebagai masukan bagi *buck converter*, yang selanjutnya menurunkan dan menyesuaikan tegangan sebelum disalurkan ke mikrokontroler [34]. Spesifikasi sumber daya yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.8.

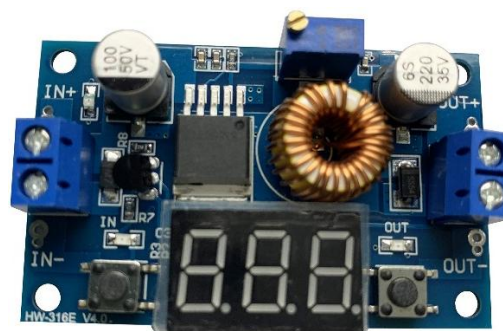
Tabel 2.8. Spesifikasi *Power Supply* 12 V DC

Parameter	Spesifikasi
Tegangan <i>input</i>	100–240 VAC
Frekuensi <i>input</i>	50/60 Hz
Tegangan <i>output</i>	12 V DC
Arus <i>output</i>	10 A
Daya maksimum	120 W
Efisiensi	$\geq 85\text{--}88\%$
<i>Ripple & noise</i>	$< 120\text{ mV}$
Proteksi	<i>Short circuit, overcurrent, overvoltage</i>
Suhu operasi	-10°C hingga 50°C
Tipe	<i>Switching</i> (SMPS)

Pada tabel 2.8 dapat kita lihat bahwa *power supply* yang digunakan memiliki tegangan *input* 100–240 VAC dengan frekuensi 50/60 Hz, sehingga dapat dioperasikan menggunakan sumber listrik PLN. Perangkat ini menghasilkan tegangan keluaran sebesar 12 V DC dengan arus maksimum 10 A dan daya

maksimum 120 W. Spesifikasi tersebut dipilih karena mampu menyediakan daya yang cukup untuk memasok *buck converter* dan perangkat kontrol yang digunakan dalam sistem. Selain itu, efisiensi sebesar $\geq 85\text{--}88\%$ menunjukkan bahwa sebagian besar energi listrik dapat dikonversi menjadi daya keluaran dengan rugi-rugi yang relatif rendah. Nilai *ripple and noise* kurang dari 120 mV juga mendukung kestabilan tegangan bagi rangkaian elektronika. Adanya perlindungan terhadap *short circuit*, *overcurrent*, dan *overvoltage* turut meningkatkan keamanan sistem apabila terjadi hubungan singkat, arus berlebih, atau kenaikan tegangan selama pengoperasian.

Buck converter, yang juga dikenal sebagai *step-down converter* atau DC-DC *switching regulator*, adalah rangkaian konverter daya yang berfungsi menurunkan tegangan DC dari nilai *input* yang lebih tinggi menjadi nilai *output* yang lebih rendah dengan efisiensi yang tinggi. Berbeda dengan regulator linier yang mendisipasikan kelebihan tegangan sebagai panas, buck converter menggunakan komponen penyimpan energi (induktor dan kapasitor) dan saklar berkecepatan tinggi untuk melakukan konversi energi [35]. Bentuk fisik dari *buck converter* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Buck Converter*

Pada Gambar 2.9 dapat dilihat komponen penurun tegangan yang digunakan pada sistem ini yaitu modul *buck converter*. Dapat dilihat pada gambar pada modul ini terdapat beberapa bagian utama seperti terminal *input*, terminal *output*, trimpot yang digunakan untuk mengatur besar tegangan keluar, dan komponen lainnya yang berfungsi dalam menjaga kestabilan tegangan kerja setiap komponen.

Sebuah *buck converter* pada dasarnya terdiri dari empat komponen utama yang bekerja sama dalam mengonversi energi, empat komponen utama tersebut ialah; MOSFET, *Dioda Freewheeling*, Induktor, Kapasitor *Output*. Paragraf selanjutnya akan menjelaskan empat komponen utama pada *buck converter* ini. Spesifikasi *buck converter* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9. Spesifikasi *Buck Converter*

Spesifikasi	<i>Buck Converter</i>	Satuan
Tipe Modul	DC-DC <i>Step-Down (Buck Converter)</i>	-
IC Utama	XL4015	-
Tegangan Input	5 – 36	V DC
Tegangan Output	1.25 – 32 (<i>adjustable</i>)	V DC
Arus Output Maksimum	5	A
Arus Disarankan	≤ 4	A
Proteksi	<i>Overcurrent, Thermal Protection</i>	-
Pendinginan	<i>Heatsink</i> bawaan	-
Ukuran Modul	$\pm 65 \times 36 \times 23$	mm
Suhu Operasi	-40 hingga +85	°C

Dalam Tabel 2.9 dapat diketahui bahwa pemilihan *buck converter* didasarkan pada spesifikasinya yang mampu menyediakan tegangan rendah untuk pengoprasian komponen yang membutuhkannya. Selain itu komponen ini juga mampu menyediakan beberapa komponen sekaligus. *Buck converter* juga memiliki beberapa fitur pengaman seperti kelebihan arus dan panas.

Dalam sistem penelitian ini, *buck converter* digunakan untuk meregulasi tegangan dari sumber 12V DC ke 5V DC yang menjadi tegangan suplai utama sistem. Modul ESP32-S3 memiliki regulator 3,3V internal (LDO) yang mengonversi lebih lanjut dari 5V menjadi 3,3V untuk kebutuhan inti SoC dan GPIO. Modul MAX6675 beroperasi pada 3,3V–5,5V (kompatibel dengan tegangan 3,3V ESP32-S3), sedangkan modul PZEM-004T membutuhkan suplai 5V DC.

2.18 Aluminium Oksida

Aluminium oksida (Al_2O_3), yang dikenal sebagai alumina, merupakan material keramik oksida yang banyak digunakan pada aplikasi bertemperatur tinggi. Material ini tergolong sebagai bahan refraktori karena mempunyai titik lebur sekitar $2050^{\circ}C$, kekuatan mekanis yang baik, kestabilan kimia, serta ketahanan terhadap oksidasi dan korosi. Refraktori dengan kandungan alumina tinggi umumnya digunakan pada bagian *furnace* yang berhadapan langsung dengan temperatur tinggi, seperti ruang pembakaran, kiln keramik, *furnace* pemanasan ulang, dan tangki peleburan kaca. Peningkatan kandungan alumina juga cenderung meningkatkan kemampuan material dalam mempertahankan kekuatan dan kestabilannya pada temperatur operasi yang tinggi [11].

Pada konstruksi *furnace*, aluminium oksida dapat digunakan sebagai lapisan refraktori pada sisi dalam dinding ruang bakar atau *hot face*. Lapisan tersebut berfungsi melindungi struktur luar *furnace* dari paparan temperatur tinggi, mempertahankan bentuk ruang pemanasan, dan membantu membatasi perpindahan panas menuju lingkungan. Dinding *furnace* yang dirancang dengan baik harus mampu meminimalkan kehilangan panas melalui radiasi dan konveksi agar energi yang dihasilkan elemen pemanas lebih banyak dimanfaatkan di dalam ruang bakar. Literatur perancangan *furnace* juga menunjukkan bahwa lapisan dinding umumnya disusun secara bertingkat, yaitu menggunakan material refraktori pada sisi panas dan material isolasi dengan konduktivitas termal lebih rendah pada bagian belakangnya [11].

Kemampuan aluminium oksida dalam menahan panas dipengaruhi oleh komposisi, ketebalan, densitas, dan tingkat porositasnya. Alumina dalam kondisi padat memiliki ketahanan temperatur dan korosi yang tinggi, tetapi konduktivitas termalnya relatif lebih besar dibandingkan material isolasi berpori. Oleh karena itu, peningkatan porositas pada material alumina dapat menurunkan konduktivitas termalnya dan meningkatkan kemampuan isolasi panas. Semakin kecil panas yang diteruskan melalui dinding, semakin rendah energi yang terbuang ke lingkungan. Pada Gambar 2.10 dapat dilihat bentuk dari aluminium oksida.



Gambar 2. 10. Alumunium Oksida Sebagai Dinding Ruang Bakar

Dalam penelitian ini, aluminium oksida ditempatkan pada bagian dalam ruang bakar dan mengelilingi elemen pemanas *Silicon Carbide* (SiC), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.10. Posisi tersebut memungkinkan lapisan alumina menerima energi radiasi dari elemen SiC, kemudian menyerap dan memancarkan kembali sebagian energi panas ke dalam ruang bakar. Mekanisme tersebut membantu penyebaran temperatur menjadi lebih merata sekaligus mengurangi perpindahan panas secara langsung menuju dinding luar *furnace*. Dengan berkurangnya kehilangan panas, energi listrik yang diberikan kepada elemen pemanas dapat digunakan secara lebih efektif untuk menaikkan dan mempertahankan temperatur ruang bakar.