

BAB II

DASAR TEORI

Pada bab ini membahas landasan teori yang digunakan sebagai dasar dalam perancangan dan pengembangan sistem *furnace* temperatur tinggi berbasis *Silicon Carbide* dengan penerapan metode kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) menggunakan ESP32. Teori-teori yang dibahas pada bab ini meliputi konsep dasar *furnace* sebagai pemanas, sistem kendali PID sebagai kontrol utama pada sistem, sensor termokopel tipe K untuk mengukur temperatur. Selain itu, membahas konsep implementasi pengendalian daya menggunakan *Solid State Relay* (SSR) dengan metode *Time Proportional Control* untuk menerjemahkan *output* PID ke aktuator.

2.1 Furnace

Furnace merupakan suatu sistem pemanas tertutup yang dirancang untuk menghasilkan temperatur tinggi secara terkendali guna mendukung berbagai proses industri, baik proses fisik maupun kimia. Menurut buku *Industrial and Process Furnaces*, *furnace* didefinisikan sebagai ruang tertutup yang mampu menghasilkan suhu tinggi melalui suatu sumber energi dan mentransfer panas tersebut ke material (*heat sink*) secara efisien. Dalam praktiknya, *furnace* tidak hanya berfungsi sebagai alat pemanas, tetapi juga sebagai sistem termal yang melibatkan interaksi antara sumber panas, media perpindahan panas, serta material yang diproses. Oleh karena itu, analisis *furnace* mencakup aspek termodinamika, perpindahan panas, serta efisiensi energi [14].

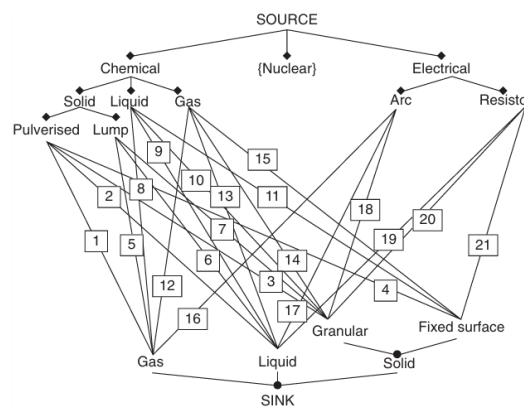
2.1.1 Klasifikasi Jenis Furnace

Berdasarkan buku *Industrial Furnaces*[14], teknologi *furnace* dapat diklasifikasikan secara mendalam ke dalam beberapa kategori utama seperti berdasarkan metode penanganan material (*material handling*), sumber energi pemanas, maupun aplikasinya.

Pada *furnace* dengan klasifikasi pergerakan dan penanganan materialnya, terdapat 2 cara yaitu pertama *Continuous Furnaces* (Tungku Kontinu). *Furnace* jenis ini memindahkan muatan secara terus-menerus melalui ruang bakar menggunakan

mekanisme adaptif seperti *roller hearth*, *pusher*, atau *walking beam*. *Furnace* ini umumnya digunakan untuk kapasitas produksi massal di industri besar. Kedua, *Batch Furnaces* (Tungku Periodik/Stasioner). *Furnace* jenis ini menerima muatan material secara berkala (per angkatan), di mana material tetap diam di dalam ruang bakar selama seluruh siklus pemanasan berlangsung.

Sumber energi pemanas menentukan efisiensi, kebersihan proses, serta batas temperatur maksimal yang dapat dicapai, berikut jenis sumber energi yang digunakan pada *furnace*.



Gambar 2. 1 Klasifikasi *Furnace* berdasarkan sumber daya

Pada **Gambar 2.1**[14] terdapat dapat *furnace* berbasis *chemical* (*combustion furnace*), *electrical furnace*, dan *nuclear furnace*. *Furnace* berbasis *chemical* menghasilkan panas melalui proses pembakaran bahan bakar seperti gas, minyak, atau batubara. Jenis *furnace* ini banyak digunakan dalam industri besar karena mampu menghasilkan temperatur sangat tinggi dengan kapasitas besar, namun memiliki kelemahan berupa emisi gas buang seperti CO₂ dan NO_x yang perlu dikendalikan [43]. *Furnace* jenis ini juga sangat bergantung pada rasio udara–bahan bakar (*air-fuel ratio*) serta efisiensi pembakaran. Sementara itu, terdapat *furnace* berbasis *nuclear* menggunakan energi panas dari reaksi fisi nuklir, yang umumnya diaplikasikan pada sistem pembangkit energi atau proses industri khusus dengan kebutuhan temperatur tinggi dan stabil, meskipun memerlukan sistem keselamatan yang kompleks [45].

Dalam sistem *furnace* berbasis pemanas listrik, panas dihasilkan melalui prinsip pemanasan Joule, yaitu konversi energi listrik menjadi panas pada elemen resistif seperti Silicon Carbide (SiC). Besarnya daya listrik dapat dinyatakan dengan persamaan dibawah, yaitu :

$$P = V \times I \text{ atau } P = I^2 R \quad (2.1)$$

Menunjukkan berapa daya yang disuplai ke sistem. Namun, pada kenyatannya rumus tersebut tidak lagi sepenuhnya berlaku karena pada *furnace* energi listrik berubah menjadi energi panas yang menyebabkan temperatur SiC naik. Ketika temperatur naik maka resistansi berubah, arus berubah dan tegangan efektif berubah.

Di dalam kategori *Electric Batch Furnace*, pemilihan jenis elemen pemanas menentukan rentang temperatur kerja operasional alat, berikut kategorinya yang pertama ialah Elemen Logam (*Metallic Elements*). Pemanas jenis elemen ini contohnya seperti *Nickel-Chromium* (NiCr) atau FeCrAl (*Kanthal*), yang umumnya memiliki batas temperatur operasi maksimal di bawah 1200°C karena risiko oksidasi dan penurunan titik lebur logam. Elemen kedua ialah Elemen Non-Logam (*Non-Metallic Elements*). Pemanas jenis elemen ini contohnya seperti *Silicon Carbide* (SiC) dan *Molybdenum Disilicide*, yang mampu bekerja pada temperatur ekstrem tinggi (di atas 1000°C hingga mencapai 1600°C) serta memiliki ketahanan mekanis yang sangat baik pada suhu tinggi.

2.1.2 Karakteristik *Furnace* Temperatur Tinggi

Dilansir dari [14], *furnace* temperatur tinggi khususnya yang beroperasi di atas 700°C memiliki beberapa karakteristik termal, struktural, dan operasional yang sangat khas. Karakteristik pertama yaitu transfer energi di dalam ruang bakar didominasi secara mutlak oleh radiasi termal gelombang elektromagnetik yang tunduk pada Hukum Stefan-Boltzmann. Artinya, laju perpindahan panas sebanding dengan pangkat empat temperatur absolutnya, sedikit saja perubahan suhu akan menyebabkan lonjakan energi radiasi yang masif. Hal inilah yang menjelaskan mengapa *furnace* temperatur

tinggi membutuhkan sistem kendali presisi seperti PID yang ada pada tugas akhir untuk meredam *overshoot*.

Kedua, kebutuhan refraktori (isolasi) bermassa rendah dan tahan suhu ekstrem. Dinding *furnace* temperatur tinggi tidak hanya berfungsi sebagai penahan panas, tetapi juga harus menahan beban struktural pada suhu ekstrem tanpa meleleh atau retak. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini digunakannya alumunium oksida sebagai reflektor panas sehingga dapat mencapai suhu target (*setpoint*) dengan lebih cepat dan merespon sinyal kontrol daya secara lebih tangkas.

Ketiga, Karakteristik ini menciptakan efek *thermal lag* (keterlambatan respons termal) yang besar. Ketika elemen pemanas dimatikan, dinding yang sudah terlanjur membara akan tetap memancarkan panas ke dalam ruang bakar. Tanpa algoritma kontrol yang pintar, karakteristik akumulasi panas ini akan selalu menyebabkan suhu ruang bakar melewati *setpoint* (*overshoot* tinggi).

Keempat, karakteristik dinamis secara *transient* (pada *batch furnace*) yang artinya, ruang bakar dan muatan di dalamnya mengalami siklus dari suhu ruang, naik ke suhu ekstrem, ditahan (*dwelling*), lalu didinginkan. Karakteristik ini menuntut fleksibilitas pasokan daya yang tinggi. Pemanas harus mampu menyuplai daya maksimal saat fase kenaikan suhu (*heating up*), namun harus mampu memodulasi daya seminimal mungkin saat mempertahankan suhu (*steady state*) agar konsumsi energi tetap efisien.

2.1.3 Jenis Pengoperasian Pada *Furnace*

Dalam pengoperasiannya, *furnace* terdapat beberapa sistem pengendalian yang dapat digunakan, yaitu :

Kontrol ON/OFF merupakan metode pengendalian paling sederhana yang banyak digunakan pada sistem pemanas dasar. Prinsip kerjanya adalah membandingkan suhu aktual dengan nilai *setpoint*, di mana elemen pemanas akan dinyalakan (ON) ketika suhu berada di bawah *setpoint* dan dimatikan (OFF) ketika suhu melebihi *setpoint*. Metode ini tidak menggunakan perhitungan matematis yang kompleks, sehingga mudah diimplementasikan dan memiliki biaya rendah. Namun, kelemahan utama dari

kontrol ON/OFF adalah terjadinya fluktuasi suhu yang cukup besar di sekitar setpoint akibat proses switching yang bersifat diskrit. Hal ini menyebabkan metode ini kurang cocok untuk aplikasi *furnace* yang membutuhkan kestabilan suhu tinggi atau presisi yang baik. Meskipun demikian, kontrol ON/OFF masih digunakan pada sistem sederhana atau sebagai bagian dari sistem proteksi (*safety cut-off*) [14].

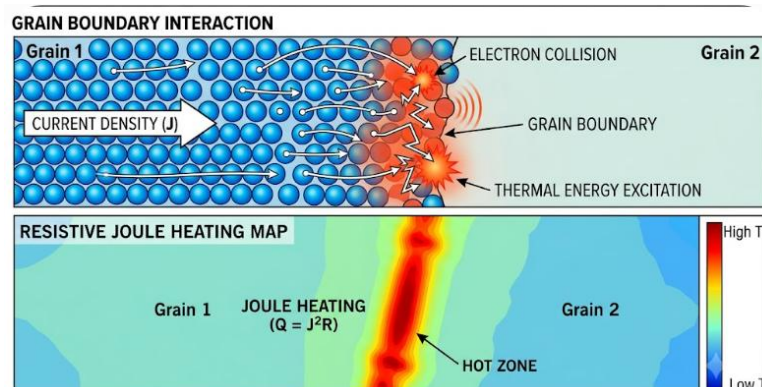
Kontrol PID merupakan metode pengendalian yang paling umum digunakan dalam sistem *furnace* karena kemampuannya dalam menghasilkan respon yang stabil dan presisi. PID bekerja dengan menghitung *error*, yaitu selisih antara suhu aktual dan setpoint, kemudian menghasilkan sinyal kontrol berdasarkan tiga komponen utama: proporsional (P), *Integral* (I), dan *Derivatif* (D). Komponen proporsional memberikan respons cepat terhadap perubahan *error*, komponen *Integral* berfungsi menghilangkan *error steady-state*, sedangkan komponen *Derivatif* digunakan untuk mengantisipasi perubahan *error* sehingga dapat mengurangi *overshoot*. Kombinasi ketiga komponen ini memungkinkan sistem mencapai kondisi stabil dengan waktu respon yang cepat dan kesalahan minimum. Dalam aplikasi *furnace*, *output* PID biasanya berupa sinyal kontinu yang kemudian dikonversi menjadi pengendalian daya menggunakan metode seperti *Time Proportional Control* (TPC) atau pengaturan sudut fasa dengan SCR [43], [44].

Kontrol *Fuzzy Logic* ini merupakan metode pengendalian berbasis logika linguistik yang tidak memerlukan model matematis yang presisi. Dalam metode ini, pengambilan keputusan dilakukan berdasarkan aturan-aturan berbentuk “IF-THEN” yang menyerupai cara berpikir manusia, misalnya “jika suhu terlalu rendah maka tingkatkan daya secara signifikan”. *Fuzzy logic* sangat cocok digunakan pada sistem *furnace* yang memiliki karakteristik non-linear atau sulit dimodelkan secara matematis, seperti perubahan resistansi elemen pemanas SiC terhadap suhu. Keunggulan utama dari metode ini adalah fleksibilitas dan kemampuannya dalam menangani ketidakpastian sistem. Namun, perancangan aturan fuzzy dan fungsi keanggotaan memerlukan pengalaman dan tidak selalu mudah untuk dioptimalkan secara matematis, sehingga implementasinya lebih kompleks dibandingkan PID [44].

MPC (*Model Predictive Control*) merupakan metode kontrol modern yang menggunakan model matematis sistem untuk memprediksi perilaku di masa depan dan menentukan aksi kontrol yang optimal. Pada setiap interval waktu, MPC akan menghitung respon sistem dalam horizon waktu tertentu dan memilih sinyal kontrol yang meminimalkan fungsi objektif, seperti *error* terhadap setpoint atau konsumsi energi. Metode ini sangat efektif untuk sistem multi-variabel dan proses dengan dinamika kompleks, termasuk *furnace* industri berskala besar. Keunggulan MPC terletak pada kemampuannya dalam mengantisipasi perubahan sistem sebelum terjadi, sehingga menghasilkan performa yang sangat optimal. Namun, metode ini membutuhkan komputasi yang tinggi dan model sistem yang akurat, sehingga implementasinya lebih kompleks dan jarang digunakan pada sistem *furnace* skala laboratorium [43], [44].

2.2 Mekanisme Pembentukan & Perpindahan Kalor(*Heat Transfer*)

Sebelum panas dapat berpindah, panas tersebut harus diciptakan terlebih dahulu. Proses di mana batang SiC menghasilkan panas saat dialiri listrik diklasifikasikan sebagai konversi energi (dari energi listrik menjadi energi panas) melalui pemanasan Joule (*Joule Heating*). *Silicon Carbide* (SiC) merupakan material keramik non-logam yang memiliki konduktivitas termal dan mekanis yang sangat baik sehingga sangat luas digunakan sebagai elemen pemanas elektrik. Ketika arus listrik dialirkan, panas dihasilkan melalui efek pemanasan yang disebabkan akibat tabrakan elektron pada batas butir kristal (*grain boundaries*).

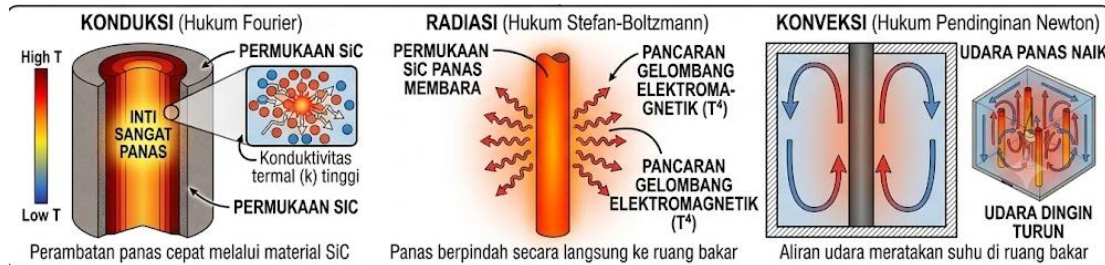


Gambar 2. 2 Ilustrasi proses pembentukan kalor

Selain itu, SiC merupakan material polikristalin yang artinya, material tersebut tidak terdiri dari satu kristal tunggal yang sempurna, melainkan tersusun atas jutaan kristal mikro berukuran sangat kecil yang disebut butir (*grains*). Material polikristalin juga memiliki kerapatan batas butir tinggi. Ketika arus listrik dialirkan melalui batang SiC, resistansi tinggi yang ditimbulkan oleh hamburan elektron di batas butir inilah yang memicu timbulnya panas secara instan, yang kemudian ditransfer ke ruang bakar *furnace* melalui radiasi termal. Tidak hanya itu, SiC menunjukkan karakteristik resistivitas listrik yang sangat khas terhadap perubahan temperatur. Pada rentang suhu rendah hingga menengah (di bawah 600°C, SiC berperilaku sebagai semikonduktor dengan koefisien resistansi negatif (*Negative Temperature Coefficient of Resistance / NTCR*), di mana nilai resistansinya menurun tajam seiring meningkatnya suhu. Namun, setelah melewati titik kritis tersebut, perilakunya berbalik menjadi koefisien resistansi positif (*Positive Temperature Coefficient / PTCR*). Nilai emisivitas (ϵ) yang sangat tinggi (berkisar antara 0,80 hingga 0,90). Karakteristik ini mendekati benda hitam sempurna (*blackbody*), sehingga sangat efisien dalam memancarkan energi panas dalam bentuk gelombang radiasi inframerah masif langsung menuju objek di dalam ruang *furnace*[25].

Ketika elemen SiC mulai membara akibat pemanasan Joule, perpindahan energi panas dari dalam elemen hingga sampai ke ruang bakar dan objek material melibatkan tiga mode perpindahan panas secara bersamaan[14]. Proses pertama konduksi termal (*Thermal Conduction*) merupakan panas dihasilkan di bagian inti masing-masing dari keempat batang SiC dan merambat keluar ke permukaan luar batang karena adanya perbedaan suhu. Proses ini berlangsung sangat cepat karena SiC memiliki konduktivitas termal tinggi. Kedua ialah radiasi termal (*Thermal Radiation*) ketika permukaan luar keempat batang SiC menjadi sangat panas dan membara, energi berpindah secara langsung ke ruang bakar tanpa perantara melalui gelombang elektromagnetik. Mode radiasi ini paling dominan karena suhu operasional *furnace* yang tinggi. Lalu yang terakhir, konveksi termal (*Thermal Convection*) yaitu udara di dalam ruang bakar yang bersentuhan dengan batang-batang SiC akan ikut memanaskan

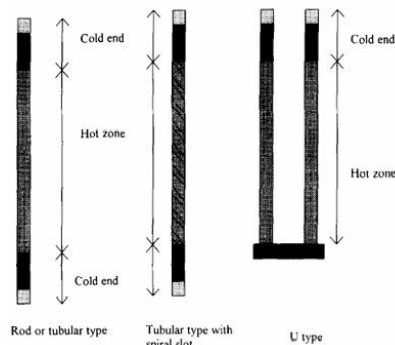
dan bergerak. Proses ini memberikan sedikit kontribusi pada perataan suhu di ruang bakar melalui mekanisme konveksi alami[53].



Gambar 2. 3 Ilustrasi Proses Perpindahan Kalor Yang Terjadi saat Pemanasan *Furnace*

2.2.1 Elemen Pemanas *Silicon Carbide* (SiC)

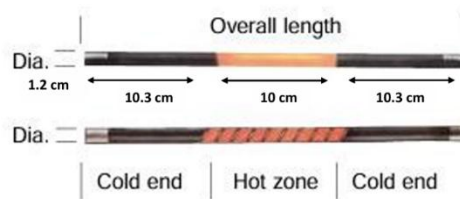
Silicon Carbide (SiC) merupakan material keramik non-okside yang banyak digunakan dalam aplikasi suhu tinggi karena memiliki sifat mekanik, termal, dan kimia yang sangat unggul. Material ini dikenal memiliki kekerasan tinggi, konduktivitas termal yang baik, serta ketahanan terhadap korosi dan kejutan termal sehingga banyak dimanfaatkan sebagai elemen pemanas *furnace* dan aplikasi industri lainnya[27]. Selain itu, SiC memiliki kemampuan bekerja pada temperatur tinggi hingga sekitar 1250°C atau lebih, serta tetap stabil secara mekanik dan kimia pada kondisi tersebut. Sifat konduktivitas termal yang tinggi dan koefisien ekspansi termal yang rendah membuat material ini mampu mempertahankan kestabilan pada perubahan temperatur yang cepat[28].



Gambar 2. 4 Berbagai Bentuk Elemen Pemanas *Silicon Carbide* Komersial

Pada **Gambar 2.4**[25] SiC yang digunakan tipe *straight hot rod* yang mana salah satu jenis elemen pemanas berbentuk batang lurus yang banyak digunakan pada

furnace temperatur tinggi. Elemen ini terdiri dari bagian aktif (*hot zone*) yang menghasilkan panas serta bagian terminal (*cold end*) yang berfungsi sebagai koneksi listrik. Pada penelitian ini digunakan elemen SiC tipe *straight hot rod* dengan diameter 1.2 cm yang dtertera pada **Gambar 2.5**[26], yang termasuk dalam kategori elemen pemanas untuk aplikasi temperatur tinggi dengan distribusi panas yang merata. Elemen SiC bekerja berdasarkan prinsip pemanasan resistif (*joule heating*), di mana arus listrik yang mengalir melalui material menghasilkan panas. Salah satu karakteristik utama dari elemen ini adalah sifat *non-linear* terhadap temperatur, di mana resistansi elemen meningkat seiring kenaikan temperatur. Hal ini menyebabkan perubahan arus dan daya selama proses pemanasan berlangsung, sehingga perlu diperhatikan dalam perancangan sistem kontrol[26].



Gambar 2. 5 *Silicon Carbide (SiC) Tipe Straight Hot Rod Untuk Elemen Pemanas*

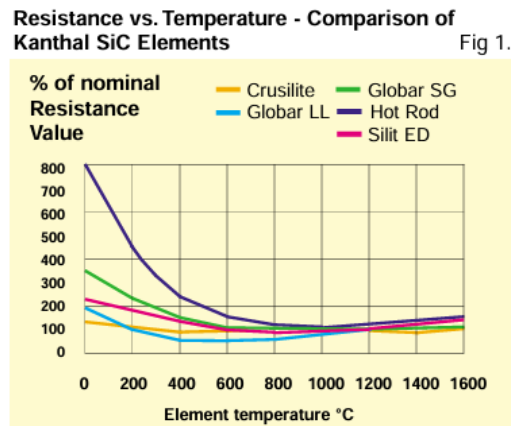
Elemen pemanas berbasis *Silicon Carbide* (SiC) memiliki karakteristik resistansi yang berubah terhadap temperatur, sehingga hubungan antara tegangan, arus, dan daya tidak bersifat konstan. Resistansi merupakan besaran yang menyatakan hambatan suatu material terhadap aliran arus listrik. Hubungan antara tegangan, arus, dan resistansi dijelaskan melalui Hukum Ohm, yang menyatakan bahwa resistansi dapat diperoleh dari perbandingan antara tegangan yang melintasi suatu penghantar dengan arus yang mengalir melaluinya[53].

$$V = I \times R \quad \text{atau} \quad (2.2)$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.3)$$

Pada penelitian ini, persamaan tersebut digunakan untuk menentukan nilai resistansi aktual elemen pemanas *Silicon Carbide* (SiC) berdasarkan hasil pengukuran

tegangan menggunakan multimeter dan arus menggunakan multimeter yang dihubungkan secara seri pada rangkaian. Nilai resistansi yang diperoleh kemudian digunakan untuk menganalisis perubahan karakteristik elemen pemanas selama proses pemanasan.



Gambar 2. 6 *Comparison of Kanthal SiC Elements*

Pada **Gambar 2.6**[26] grafik elemen pemanas *Silicon Carbide* (SiC) tipe *hot rod* menunjukkan nilai resistansi relatif yang sangat tinggi pada suhu rendah (kondisi awal). Hal ini terjadi karena SiC memiliki sifat semikonduktor, di mana pada temperatur rendah jumlah pembawa muatan (elektron) masih terbatas sehingga hambatan listrik menjadi besar. Akibatnya, nilai resistansi dapat mencapai beberapa kali lipat dari resistansi nominal yang didefinisikan pada suhu referensi sekitar 1000°C. Seiring dengan meningkatnya temperatur, energi termal yang diberikan menyebabkan jumlah pembawa muatan meningkat, sehingga konduktivitas material membaik dan resistansi menurun secara signifikan hingga mendekati nilai nominal. Setelah melewati suhu tertentu, biasanya di atas 1000°C, karakteristik material mulai menunjukkan perilaku seperti konduktor, sehingga resistansi kembali meningkat secara perlahan.

Fenomena ini menjelaskan bahwa nilai resistansi pada suhu rendah terlihat besar pada grafik bukan karena kesalahan pengukuran, melainkan merupakan sifat alami material SiC. Selain itu, karena grafik menunjukkan nilai resistansi dalam bentuk persentase terhadap resistansi nominal, maka nilai yang tinggi pada suhu rendah

menunjukkan bahwa resistansi aktual jauh lebih besar dibandingkan kondisi operasi normal. Karakteristik ini menyebabkan elemen SiC tidak mengalami lonjakan arus awal seperti elemen logam, melainkan memiliki arus yang relatif kecil pada awal pemanasan dan meningkat seiring kenaikan temperatur. Oleh karena itu, hubungan antara resistansi, arus, dan daya pada elemen SiC bersifat *non-linear* dan sangat dipengaruhi oleh temperatur, sehingga memerlukan sistem kontrol yang mampu menyesuaikan daya secara dinamis selama proses pemanasan berlangsung.

2.2.2 Thermocouple Tipe-K

Sensor termokopel tipe K merupakan sensor temperatur yang bekerja berdasarkan efek *seebeck*, yaitu fenomena terbentuknya tegangan listrik akibat perbedaan suhu antara dua logam yang berbeda. Termokopel tipe K tersusun dari dua material, yaitu Chromel (Ni-Cr) dan Alumel (Ni-Al), yang memungkinkan pengukuran suhu dalam rentang yang luas[13].

Sensor ini banyak digunakan pada sistem industri, termasuk *furnace* temperatur tinggi, karena memiliki beberapa keunggulan seperti ketahanan terhadap suhu tinggi, respon yang cepat, serta kestabilan yang baik dalam lingkungan ekstrem. *Thermocouple* tipe K mampu mengukur suhu dalam rentang -50°C hingga sekitar 1300°C [17]. Dengan *thermocouple* tipe K memiliki sensitivitas sekitar $41\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, sehingga mampu memberikan respon yang cukup baik terhadap perubahan suhu, meskipun sinyal keluarannya sangat kecil dan memerlukan penguat atau konverter tambahan seperti MAX6675.

Tabel 2. 1 Spesifikasi *Thermocouple* Tipe-K

Spesifikasi	Keterangan
Rentang suhu standar	-50°C hingga 1300°C
<i>Length</i>	22 cm
Sensitivitas	$\pm 41\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Akurasi standar	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ atau $\pm 0.75\%$
<i>Output</i>	Tegangan <i>analog</i> (μV)

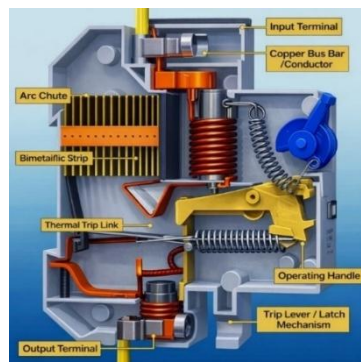
Dalam tugas akhir ini, thermocouple tipe K digunakan sebagai sensor utama untuk mengukur temperatur *furnace* berbasis *Silicon Carbide* (SiC). Data temperatur yang diperoleh akan digunakan sebagai umpan balik (*feedback*) dalam sistem kontrol PID untuk menjaga kestabilan suhu sesuai dengan nilai *setpoint*

2.3 Distribusi Daya Listrik

Dalam sistem elektrik *furnace*, kebutuhan daya dibagi menjadi dua, yaitu daya besar untuk elemen pemanas dan daya kecil untuk sistem kontrol seperti mikrokontroler dan sensor. Oleh karena itu, diperlukan sistem daya yang mampu menyediakan tegangan yang sesuai dan stabil agar seluruh sistem dapat bekerja dengan baik.

2.3.1 Miniature Circuit Breaker 1P 16A

Miniature Circuit Breaker (MCB) merupakan perangkat proteksi listrik tegangan rendah yang bekerja dengan prinsip kombinasi mekanisme termal dan elektromagnetik untuk melindungi sistem dari kondisi arus lebih (*overcurrent*) dan hubung singkat (*short circuit*). Berdasarkan **Gambar 2.8** yang ditampilkan, arus listrik masuk melalui *input terminal* kemudian mengalir melalui *copper bus bar* menuju elemen proteksi internal seperti *bimetallic strip* dan *electromagnetic coil*, sebelum akhirnya keluar melalui *output terminal* menuju beban. Pada kondisi normal, arus yang mengalir tidak menyebabkan perubahan signifikan pada elemen proteksi, sehingga *moving contact* dan *fixed contact* tetap dalam keadaan tertutup dan arus dapat mengalir secara kontinu [38].



Gambar 2.8 Komponen pada MCB digunakan untuk Proteksi Kelistrikan

Pada kondisi arus lebih, mekanisme proteksi termal mulai bekerja. Arus yang melebihi nilai nominal akan menyebabkan peningkatan suhu pada *bimetallic strip*, yang terbuat dari dua jenis logam dengan koefisien muai berbeda. Akibat pemanasan tersebut, bimetal akan melengkung dan mendorong *thermal trip link* yang terhubung dengan *trip lever (latch mechanism)*. Ketika gaya dorong cukup besar, mekanisme pengunci akan terlepas sehingga kontak listrik terbuka dan aliran arus terputus. Mekanisme ini memiliki karakteristik waktu tunda (*inverse time characteristic*), di mana semakin besar arus, semakin cepat waktu trip terjadi. Prinsip ini banyak dijelaskan dalam standar proteksi sistem tenaga listrik serta literatur teknik seperti pada [39].

Selain itu, MCB juga dilengkapi dengan mekanisme proteksi elektromagnetik yang bekerja pada kondisi hubung singkat. Ketika terjadi lonjakan arus yang sangat besar dalam waktu singkat, arus yang mengalir melalui *electromagnetic coil (solenoid)* akan menghasilkan medan magnet kuat yang menarik *plunger (inti besi)* secara instan. Pergerakan plunger ini langsung mengaktifkan *trip mechanism*, sehingga kontak terbuka dengan sangat cepat tanpa menunggu efek pemanasan seperti pada mekanisme termal. Mekanisme ini sangat penting untuk melindungi sistem dari kerusakan akibat arus hubung singkat yang dapat terjadi dalam orde milidetik [40].

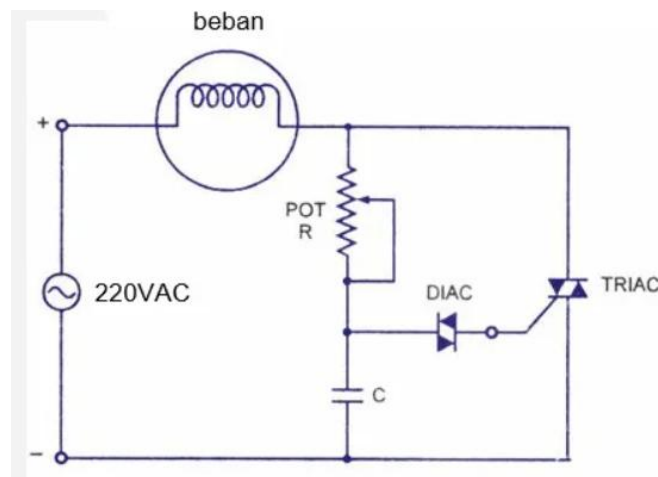
Saat kontak terbuka, terutama pada kondisi arus besar, akan muncul busur api (*electric arc*) akibat pemutusan arus listrik. Untuk mengatasi hal ini, MCB dilengkapi dengan *arc chute*, yaitu kumpulan pelat logam yang berfungsi untuk memecah dan mendinginkan busur api sehingga dapat dipadamkan dengan cepat. Proses ini penting untuk mencegah kerusakan pada kontak dan menjaga umur pakai MCB. Setelah terjadi trip, posisi kontak akan tetap terbuka hingga dilakukan reset secara manual melalui *operating handle*, yang juga berfungsi sebagai saklar ON/OFF pada MCB [40].

Dengan kombinasi antara mekanisme termal dan elektromagnetik MCB mampu memberikan proteksi yang andal terhadap berbagai jenis gangguan listrik. Pada aplikasi *furnace* berbasis Silicon Carbide (SiC), penggunaan MCB sangat penting untuk melindungi komponen seperti *heater*, *Solid State Relay (SSR)*, serta sistem

kontrol dari kerusakan akibat arus berlebih maupun hubung singkat. Oleh karena itu, pemilihan MCB dengan spesifikasi yang tepat, seperti tipe 2P 16A karakteristik C, menjadi faktor penting dalam memastikan keselamatan dan keandalan sistem secara keseluruhan [41].

2.3.2 PLN dan Pengatur Tegangan AC

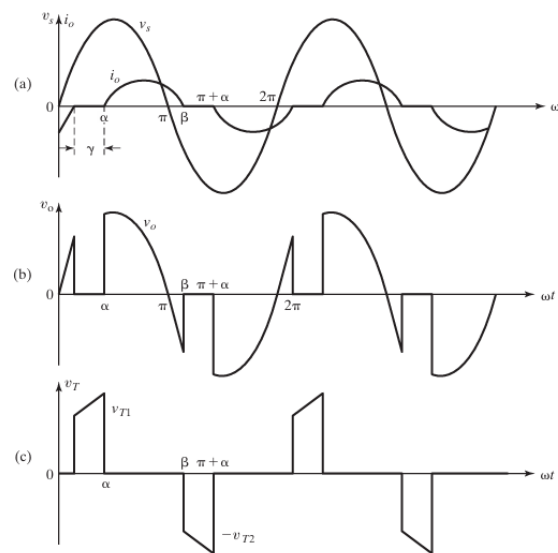
Pengatur tegangan merupakan perangkat elektronika daya yang digunakan untuk mengatur besar daya listrik AC yang disalurkan ke beban dengan metode *phase angle control*. Komponen ini banyak digunakan pada sistem pengaturan daya *heater, furnace*, lampu pijar, dan pengendalian kecepatan motor AC karena mampu mengubah tegangan efektif (RMS) yang diterima beban tanpa menggunakan transformator variabel. Pada aplikasi *furnace*, pengatur tegangan berfungsi sebagai pengatur daya pemanas sehingga laju kenaikan temperatur dapat disesuaikan dengan kebutuhan proses.



Gambar 2. 9 Skematik sederhana rangkaian Pengatur Tegangan untuk sumber SiC

Pada **Gambar 2.9**[56] menunjukkan rangkaian dasar pengatur tegangan AC yang bekerja menggunakan kombinasi TRIAC/SCR, DIAC, potensiometer (R), dan kapasitor (C) dengan metode *phase angle control*. Prinsip kerjanya dimulai ketika sumber tegangan AC 220 V diberikan ke rangkaian, dimana kapasitor akan mengisi muatan melalui potensiometer. Besarnya hambatan potensiometer menentukan kecepatan pengisian kapasitor, sehingga semakin kecil nilai hambatan maka kapasitor akan lebih cepat mencapai tegangan pemicu (*breakover voltage*) DIAC. Setelah

tegangan kapasitor mencapai nilai tersebut, DIAC akan menghantarkan arus sesaat menuju terminal gate TRIAC/SCR sehingga berubah dari kondisi OFF menjadi ON dan mulai menghantarkan arus ke beban hingga gelombang AC mencapai titik *zero crossing*. Pada setengah siklus berikutnya TRIAC kembali padam dan proses pengisian kapasitor akan berulang. Dengan mengubah posisi potensiometer, waktu penyalan TRIAC atau *firing angle* (α) dapat diatur, sehingga besar tegangan efektif (RMS) dan daya yang diterima beban dapat dikendalikan secara kontinu.



Gambar 2. 10 Contoh Keluaran Sinyal Gelombang Sinus yang telah diproses oleh Pengatur Tegangan

Pada **Gambar 2.10**[55] Keluaran gelombang sinus yang terpotong (*phase-cut waveform*) akibat penyalan TRIAC yang ditunda sebesar sudut penyalan (α). Pengaturan sudut penyalan ini mengubah nilai tegangan efektif (RMS) yang diterima beban tanpa mengubah frekuensi sumber. Semakin kecil nilai α (mendekati 0°), semakin besar daya yang disalurkan ke beban, sedangkan semakin besar nilai α (mendekati 180°), semakin kecil daya yang diterima beban. Pada tugas akhir ini, pengatur tegangan digunakan untuk mengatur batas daya maksimum yang diberikan ke elemen pemanas *Silicon Carbide* (SiC), sementara proses pengendalian temperatur dilakukan oleh *Solid State Relay* (SSR) menggunakan metode *Proportional Integral Derivative* (PID) dengan metode *Time Proportional Control* (TPC). Dengan demikian,

komponen pengatur tegangan ini berfungsi sebagai pengatur daya awal (*power limiter*), sedangkan SSR mengatur durasi penyalan elemen pemanas berdasarkan keluaran PID agar temperatur *furnace* dapat dipertahankan sesuai nilai *setpoint* yang diinginkan [52].

2.3.3 Power supply DC

Power supply merupakan perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengubah energi listrik dari satu bentuk ke bentuk lain agar sesuai dengan kebutuhan beban. Pada umumnya, *power supply* dalam sistem kontrol dan industri berfungsi untuk mengubah tegangan AC (*Alternating Current*) dari jaringan listrik menjadi DC (*Direct Current*) yang stabil. Proses ini melibatkan beberapa tahapan utama, yaitu penyearahan (*rectification*), penyaringan (*filtering*), dan pengaturan tegangan (*regulation*).



Gambar 2. 11 Power supply DC 12V 10A untuk supplai ke sistem kontrol

Power supply jenis *Switch Mode Power supply* (SMPS) bekerja dengan mengubah tegangan AC menjadi DC melalui beberapa tahapan utama. Pertama, tegangan AC dari sumber listrik disearahkan menggunakan rangkaian dioda (*rectifier*) menjadi tegangan DC tidak stabil. Tegangan ini kemudian disaring menggunakan kapasitor untuk mengurangi *ripple*. Selanjutnya, tegangan DC tersebut diubah menjadi sinyal berfrekuensi tinggi melalui proses *switching* menggunakan transistor, sehingga memungkinkan penggunaan transformator berukuran kecil untuk menurunkan atau menyesuaikan tegangan. Setelah itu, tegangan kembali disearahkan dan difilter untuk menghasilkan tegangan DC yang lebih stabil. Tahap terakhir adalah proses regulasi menggunakan rangkaian kontrol umpan balik (*feedback control*) untuk menjaga

tegangan *output* tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban atau tegangan input [47], [48]. Dalam aplikasinya pada sistem tugas akhir ini sebagai *input* ke *buck converter* yang nantinya sebagai akan disuplai ke mikrokontroller.

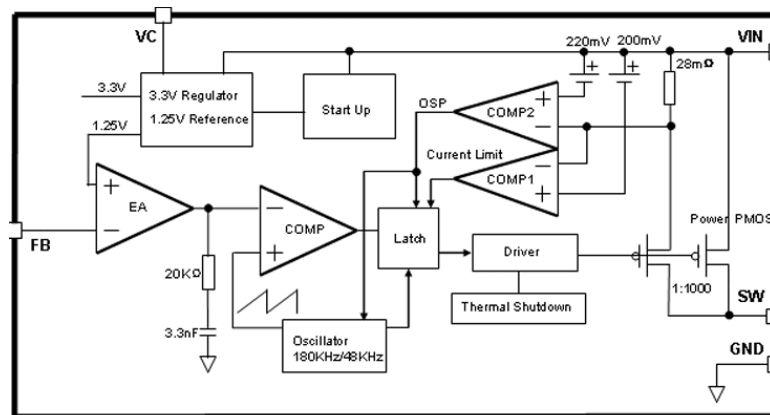
Tabel 2. 2 Spesifikasi PSU 12V 10A yang digunakan untuk suplai ke sistem kontrol

Parameter	Spesifikasi
Tegangan input	100–240 VAC
Frekuensi input	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 2.2** menunjukkan spesifikasi *Power Supply Unit* (PSU) 12 V 10 A yang digunakan sebagai sumber tegangan DC pada sistem. PSU ini memiliki rentang tegangan masukan 100–240 VAC dengan frekuensi 50/60 Hz, sehingga dapat digunakan pada jaringan listrik standar. Tegangan keluarannya sebesar 12 VDC dengan arus maksimum 10 A, sehingga mampu menyuplai daya hingga 120 W. Selain itu, PSU memiliki efisiensi sebesar 85–88%, nilai ripple & noise kurang dari 120 mV untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran, serta dilengkapi fitur proteksi terhadap hubung singkat (*short circuit*), arus lebih (*overcurrent*), dan tegangan lebih (*overvoltage*). PSU ini juga dapat beroperasi pada rentang suhu -10°C hingga 50°C dan menggunakan teknologi *Switching Mode Power Supply* (SMPS) yang memiliki efisiensi tinggi serta ukuran yang lebih ringkas dibandingkan catu daya linier.

2.3.4 Buck Converter XL4015

Buck converter merupakan salah satu jenis konverter DC-DC yang berfungsi untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan *output* yang lebih rendah dengan efisiensi tinggi. Berbeda dengan *regulator linear*, *buck converter* bekerja menggunakan prinsip *switching* sehingga kehilangan daya (*power loss*) lebih kecil dan efisiensi sistem menjadi lebih tinggi[23].



Gambar 2. 12 Daigram Blok Fungsi *Buck Converter* XL4015 untuk aplikasi konversi tegangan DC-DC

Gambar 2.12[49] ialah diagram blok *buck converter* menunjukkan cara kerja IC dalam menurunkan tegangan DC masukan menjadi tegangan DC keluaran yang lebih rendah dan stabil. Tegangan keluaran dipantau melalui pin *Feedback* (FB) dan dibandingkan dengan tegangan referensi internal 1,25 V oleh *Error Amplifier* (EA). Selisih antara tegangan keluaran dan tegangan referensi akan menghasilkan sinyal kesalahan (*error signal*) yang digunakan untuk mengatur lebar pulsa (*Pulse Width Modulation/PWM*) sehingga tegangan keluaran tetap konstan meskipun terjadi perubahan beban atau tegangan masukan. Sinyal dari *Error Amplifier* selanjutnya diproses oleh *Comparator* (COMP) yang bekerja bersama *Oscillator* berfrekuensi sekitar 180 kHz untuk menghasilkan sinyal PWM. Sinyal ini diteruskan ke *Latch* dan *Driver* yang berfungsi mengendalikan Power PMOS sebagai saklar utama buck converter. Ketika PMOS aktif (ON), energi disalurkan ke induktor dan beban, sedangkan ketika PMOS mati (OFF), energi yang tersimpan pada induktor tetap mengalir ke beban melalui dioda sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang lebih

rendah dan stabil. Selain rangkaian pengendali, IC juga dilengkapi beberapa fitur proteksi, seperti *Current Limit* untuk membatasi arus berlebih, *Thermal Shutdown* untuk menghentikan operasi saat suhu IC terlalu tinggi, serta *Start-Up* yang memastikan proses penyalan berlangsung secara bertahap (*soft-start*). Dengan adanya sistem umpan balik dan berbagai fitur proteksi tersebut, *buck converter* mampu menghasilkan tegangan keluaran yang efisien, stabil, dan aman untuk menyuplai rangkaian elektronik. [49]–[51].

Tabel 2. 3 Spesifikasi *Buck Converter* XL4015 untuk menurunkan tegangan PSU 12VDC

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan <i>input</i>	8V – 38V
Tegangan <i>output</i>	1.25V – 36V (<i>adjustable</i>)
Arus <i>output</i> maksimum	hingga 5A
Frekuensi <i>switching</i>	144-216 kHz
<i>Max. Duty Cycle</i>	100%

Pada **Tabel 2.3** menunjukkan spesifikasi *buck converter* XL4015 yang digunakan untuk menurunkan tegangan keluaran PSU 12 VDC sesuai kebutuhan rangkaian. Modul ini memiliki rentang tegangan masukan 8–38 VDC dan mampu menghasilkan tegangan keluaran 1,25–36 VDC yang dapat diatur (*adjustable*), sehingga memberikan fleksibilitas dalam penyediaan tegangan untuk berbagai perangkat elektronik. Selain itu, XL4015 mampu mengalirkan arus keluaran hingga 5 A dengan frekuensi *switching* 144–216 kHz, sehingga proses konversi daya berlangsung lebih efisien dengan ukuran komponen yang relatif kecil. Modul ini juga memiliki *duty cycle* maksimum 100%, yang memungkinkan pengaturan tegangan keluaran secara optimal sesuai kebutuhan sistem. Pada tugas akhir ini, *buck converter* XL4015 digunakan untuk menurunkan tegangan keluaran PSU 12 VDC menjadi 3,3 VDC sebagai catu daya mikrokontroler

Modul XL4015 memiliki kemampuan untuk mengatur tegangan *output* secara *adjustable* menggunakan potensiometer. Selain itu, beberapa modul juga dilengkapi dengan fitur pembatas arus (*current limiting*) dan proteksi termal yang meningkatkan keamanan dalam penggunaan. *Buck converter* XL4015 ini digunakan untuk

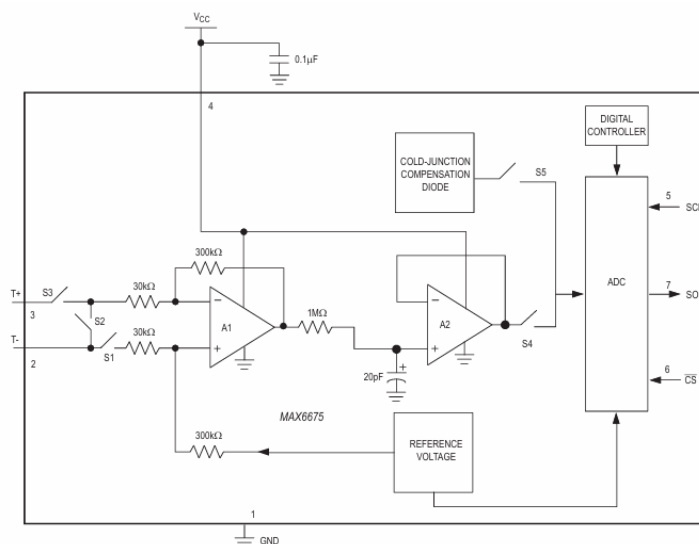
menurunkan tegangan dari *power supply* menjadi 5V yang digunakan untuk mensuplai mikrokontroler ESP32-S3, sensor MAX6675, sensor PZEM-004T, dan HMI Nextion. Penggunaan *buck converter* sangat penting untuk menjaga kestabilan tegangan serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

2.4 Sistem Kontrol Elektrik *Furnace*

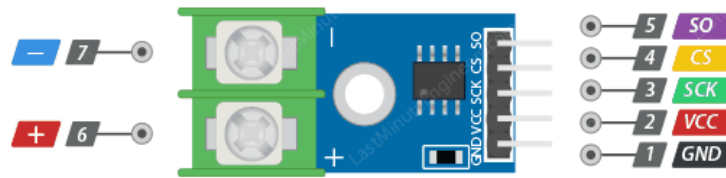
Sistem kontrol elektrik pada *furnace* ini merupakan kesatuan yang berfungsi untuk mengatur *input* daya listrik yang kemudian dikontrol sehingga suhu ruang bakar dapat mencapai pemanasan yang diinginkan. Integrasi sistem kontrol ini mencakup pembacaan sensor, *controller*, aktuator elektronika daya, algoritma kendali, hingga sistem pemantauan data..

2.4.1 Modul MAX6675

Modul MAX6675 merupakan konverter termokopel ke digital yang dirancang khusus untuk membaca sensor suhu tipe K. *Thermocouple* bekerja berdasarkan efek *seebeck*, yaitu menghasilkan tegangan listrik yang sangat kecil (orde milivolt) akibat adanya perbedaan temperatur antara junction *hot junction* dan junction referensi (*cold junction*). Dengan prinsip *cold-junction compensation* (CJC) dan *analog-to-digital conversion* (ADC) internal sehingga mampu menghasilkan pembacaan suhu yang stabil dan akurat[16].



Gambar 2. 13 Blok Diagram Modul MAX6675 untuk *converter* sinyal sensor *thermocouple*



Gambar 2. 14 Jumlah Pin Modul MAX6675

Modul MAX6675 bekerja dengan mengubah tegangan analog yang dihasilkan oleh termokopel tipe-K menjadi data digital yang dapat dibaca oleh mikrokontroler melalui komunikasi SPI. Berdasarkan diagram blok internal pada **Gambar 2.13**[16], tegangan kecil dari termokopel terlebih dahulu masuk melalui terminal T+ dan T–, kemudian melewati rangkaian proteksi dan saklar internal (S1–S3) yang dikendalikan oleh *Digital Controller* untuk proses pemilihan jalur pengukuran dan deteksi kondisi *open thermocouple*. Selanjutnya sinyal diperkuat oleh penguat diferensial A1, kemudian difilter menggunakan rangkaian RC yang terdiri dari resistor 1 M Ω dan kapasitor 20 pF untuk meredam gangguan atau *noise*. Setelah itu, sinyal diteruskan ke penguat A2 yang berfungsi sebagai buffer agar sinyal tetap stabil sebelum diproses lebih lanjut.

Tahap berikutnya adalah *Cold Junction Compensation* (CJC), yaitu kompensasi suhu sambungan dingin menggunakan sensor dioda internal sehingga suhu yang diperoleh merupakan suhu aktual pada ujung termokopel, bukan hanya selisih suhu antara kedua sambungan. Setelah proses kompensasi selesai, sinyal analog dikonversi menjadi data digital oleh *Analog-to-Digital Converter* (ADC) 12-bit dengan resolusi pengukuran sebesar 0.25°C. Seluruh proses dikendalikan oleh *Digital Controller*, yang kemudian mengirimkan data suhu beserta bit status kesalahan melalui antarmuka SPI menggunakan pin CS (*Chip Select*), SCK (*Serial Clock*), dan SO (*Serial Output*). Dengan adanya penguatan sinyal, penyaringan *noise*, kompensasi suhu sambungan dingin, dan konversi analog ke digital dalam satu IC, MAX6675 mampu menghasilkan pembacaan suhu yang akurat, stabil, dan mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti ESP32 maupun Arduino.

Tabel 2. 4 Spesifikasi MAX6675

Spesifikasi	Keterangan
Rentang pengukuran suhu	0°C - 1024°C
Resolusi	0.25°C
Akurasi	±2°C
Tegangan kerja	3.0 V – 5.5 V
Interface komunikasi	SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)
Format data <i>output</i>	Digital 12-bit
Waktu konversi	±220 ms
Arus konsumsi	±1.5 mA (operasi)

Oleh karena itu, pada tugas akhir ini modul MAX6675 digunakan sebagai antarmuka antara sensor *thermocouple* tipe K dan ESP32. Penggunaan modul ini sangat penting karena sinyal keluaran *thermocouple* yang sangat kecil tidak dapat langsung dibaca oleh mikrokontroler tanpa proses penguatan dan konversi.

2.4.2 *Proportional Integral Derivative (PID)*

Kendali *Proportional Integral Derivative (PID)* ialah salah satu metode pengendalian yang paling umum dan banyak digunakan dalam berbagai macam sistem industri karena kemampuannya dalam menghasilkan respon sistem yang cepat, stabil, dan akurat serta implementasinya yang cukup sederhana. Penggunaan kontrol *Proportional Integral Derivative (PID)* pada sistem *furnace* industri dapat membantu mempertahankan suhu pada nilai yang diinginkan secara lebih stabil[6]. Metode ini bekerja dengan memanfaatkan nilai *error* sebagai dasar dalam menentukan aksi kontrol, yaitu selisih antara nilai *setpoint* dan nilai keluaran sistem yang terukur oleh sensor(*feedback*). Secara umum, *error* dinyatakan sebagai:

$$e(t) = T_{setpoint} - T(t) \quad (2.4)$$

Keluaran kontrol PID dinyatakan sebagai:

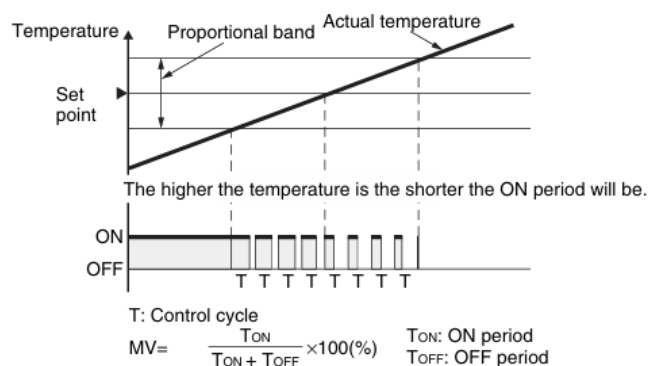
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

di mana K_p , K_i , dan K_d merupakan konstanta propotional, *Integral*, dan *Derivatif*. Komponen proporsional berfungsi untuk mempercepat respon sistem terhadap *error*, komponen *Integral* digunakan untuk menghilangkan *error steady-state*, sedangkan

komponen *Derivatif* berfungsi untuk meredam *overshoot* dan meningkatkan kestabilan sistem[21] [9].

Seperti yang dibahas sebelumnya, bahwa perubahan resistansi tersebut menyebabkan hubungan antara *input* daya dan temperatur tidak bersifat linier. Selain itu, adanya inersia termal dan mekanisme perpindahan panas seperti konduksi, konveksi, dan radiasi menyebabkan respon sistem menjadi lambat dan memiliki waktu tunda (*delay*) yang signifikan [2]. Kondisi *non-linear* ini menyebabkan metode kontrol sederhana seperti ON-OFF tidak mampu menghasilkan kestabilan temperatur yang baik. Oleh karena itu, diperlukan metode kontrol yang mampu menyesuaikan aksi kontrol secara dinamis terhadap perubahan sistem. Kontrol PID menjadi pilihan yang tepat karena mampu mengakomodasi perubahan *error* secara kontinu melalui kombinasi aksi *Proportional*, *Integral*, dan *Derivatif*[21].

Pada implementasinya, keluaran PID berupa sinyal kontinu (0–100%) tidak dapat langsung digunakan untuk mengontrol aktuator seperti *Solid State Relay* (SSR), yang hanya bekerja dalam kondisi on atau off. Oleh karena itu, digunakan metode *Time Proportional Control* (TPC) sebagai jembatan antara keluaran PID dan aktuator.



Gambar 2. 15 Grafik hubungan antara keluaran kontrol dan *duty cycle*

Pada **Gambar 2.15**[30] secara prinsip menunjukkan bahwa semakin mendekati *setpoint*, maka durasi ON akan semakin kecil sehingga daya yang diberikan ke sistem berkurang secara proporsional. Prinsip dasar TPC adalah mengubah keluaran PID

menjadi durasi waktu aktif (ON) dan tidak aktif (OFF) dalam suatu periode tertentu. Hubungan tersebut dinyatakan sebagai:

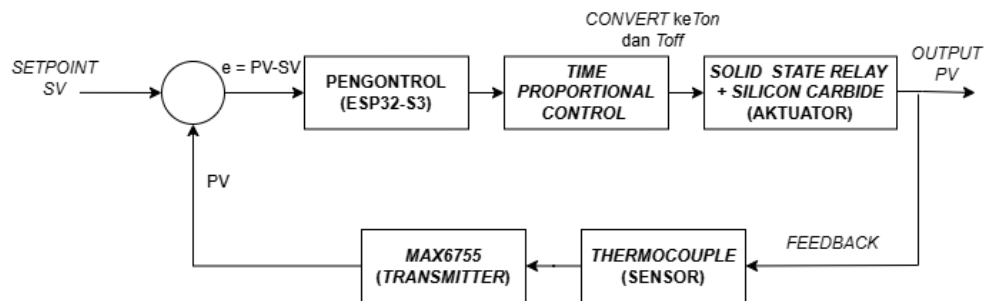
$$T_{on} = \frac{u(t)}{100} \times T \quad (2.6)$$

$$T_{off} = T - T_{on} \quad (2.7)$$

$$u(t) = \frac{T_{on}}{T} \times 100\% \quad (2.8)$$

Dari persamaan di atas adalah bahwa $u(t)$ merupakan keluaran dari pengendali PID yang dinyatakan dalam persentase antara 0% hingga 100%. Variabel T menyatakan periode kontrol yang digunakan dalam metode *Time Proportional Control* (TPC). Selanjutnya, T_{on} merupakan durasi waktu di mana *Solid State Relay* (SSR) berada dalam kondisi aktif (ON), sedangkan T_{off} merupakan durasi waktu ketika SSR berada dalam kondisi tidak aktif (OFF). Pembagian waktu ON dan OFF ini ditentukan berdasarkan nilai keluaran PID sehingga menghasilkan pengaturan daya yang proporsional terhadap kebutuhan sistem.

Dengan pendekatan ini, rasio waktu ON terhadap periode total mencerminkan besarnya sinyal kontrol yang dihasilkan oleh PID. Secara fisik, metode ini memungkinkan sistem menghasilkan daya rata-rata yang sebanding dengan keluaran PID, sehingga meskipun aktuator bekerja secara ON/OFF, sistem tetap dapat dikontrol secara proporsional dan stabil[30].



Gambar 2. 16 Diagram Blok Kontrol PID untuk Sistem *Furnace*

Berdasarkan **Gambar 2.16**, sistem kontrol PID pada tugas akhir ini terdapat beberapa bagian, yaitu :

Pada *Setpoint* dan *Error*, bagian ini merupakan nilai suhu target yang diinginkan dalam sistem *furnace*. Nilai ini ditentukan oleh pengguna sebagai acuan utama dalam proses pengendalian. Sistem akan bekerja untuk mencapai dan mempertahankan suhu sesuai dengan nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Kemudian saat sistem *looping* maka akan dibandingkan dengan suhu aktual *Process Variable*(PV) yang dihasilkan oleh sistem untuk memperoleh nilai *error* (e), yaitu selisih antara PV dan SV. *Error* ini menunjukkan seberapa jauh kondisi suhu aktual dari target yang diinginkan. Jika nilai *error* besar, maka sistem akan memberikan aksi kontrol yang lebih besar, sedangkan jika *error* mendekati nol, maka aksi kontrol akan semakin kecil.

Pada bagian Pengontrol (ESP32-S3 / PID *Controller*) ini berfungsi sebagai pusat pengolahan data dalam sistem. Mikrokontroler ESP32-S3 menjalankan algoritma PID untuk mengolah nilai *error* menjadi sinyal kontrol dalam bentuk persentase (0–100%). *Output* ini merepresentasikan kebutuhan daya yang harus diberikan ke elemen pemanas agar suhu dapat mencapai *setpoint* secara stabil.

TPC(*Time Proportional Control*) merupakan metode yang digunakan untuk mengubah *output* PID menjadi sinyal ON dan OFF berbasis waktu. Dalam metode ini, nilai persentase *output* PID dikonversi menjadi durasi waktu aktif (T_{on}) dan tidak aktif (T_{off}) dalam satu periode kontrol, sehingga daya yang diberikan ke sistem dapat diatur secara proporsional.

Selanjutnya, pada bagian aktuator ini berfungsi sebagai bagian yang mengeksekusi sinyal kontrol. SSR bekerja sebagai saklar elektronik yang mengatur aliran listrik ke elemen pemanas berdasarkan sinyal dari TPC. Elemen *Silicon Carbide* (SiC) kemudian mengubah energi listrik menjadi panas yang digunakan untuk meningkatkan suhu *furnace*. Hasil dari proses pemanasan yang terjadi di dalam *furnace* ini yang menjadi parameter utama yang dikendalikan.

Lalu, bagian sensor berfungsi untuk mengukur suhu di dalam *furnace* secara langsung. Sensor ini menghasilkan sinyal tegangan kecil yang sebanding dengan

perubahan temperatur, sehingga dapat digunakan untuk memonitor kondisi suhu secara *real-time*.

Modul MAX6675 ini digunakan untuk mengolah sinyal(*Transmitter*) dari *thermocouple*. Modul ini menguatkan sinyal, mengkonversi dari analog ke digital, serta mengirimkan data suhu ke mikrokontroler agar dapat diproses lebih lanjut. Setelah itu, terjadi proses pengiriman kembali nilai suhu yang telah diukur ke pengontrol. Dengan adanya *feedback*, sistem dapat membandingkan kondisi aktual dengan *setpoint* secara terus-menerus, sehingga memungkinkan pengendalian suhu yang lebih akurat dan stabil.

2.4.3 Metode Penalaan (*tuning*) Parameter PID

Sifat *non-linear* pada *furnace* dengan SiC sering didekati menggunakan model linear sederhana pada rentang operasi tertentu, seperti model *First Order Plus Dead Time (FOPDT)*. Pendekatan ini memungkinkan penggunaan metode kontrol *linear* seperti PID untuk mengatur sistem secara efektif, meskipun sistem sebenarnya bersifat *non-linear*[18].

Model *First Order Plus Dead Time (FOPDT)* merupakan salah satu pendekatan matematis yang digunakan dalam pemodelan sistem proses industri, khususnya sistem yang memiliki karakteristik dinamis lambat dan terdapat waktu tunda (*dead time*). Model ini banyak digunakan karena mampu merepresentasikan perilaku sistem nyata secara sederhana namun cukup akurat, terutama pada sistem termal seperti *furnace*[18] [19].

Secara matematis, model FOPDT dinyatakan dalam bentuk fungsi alih sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (2.9)$$

di mana K adalah *gain* sistem yang menunjukkan perbandingan antara perubahan *output* terhadap *input*. τ adalah konstanta waktu (*time constant*) yang menunjukkan kecepatan respon sistem. Selanjutnya L adalah waktu tunda (*dead time*) yang merepresentasikan keterlambatan respon sistem terhadap perubahan input.

Nilai – nilai parameter tersebut digunakan untuk menentukan tuning awal K_p , K_i dan K_d pada saat menggunakan metode IMC *lambda tuning*. Nilai gain sistem (K) ditentukan dari perubahan temperatur antara kondisi awal dan kondisi akhir sistem. Secara matematis, gain sistem dapat dinyatakan sebagai perbandingan perubahan *output* terhadap perubahan *input* sebagai berikut[54] :

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta u} \text{ atau } K = \frac{T_{akhir} - T_{awal}}{\text{input}} \quad (2.10)$$

Pada sistem ini, keluaran pengendali PID dinyatakan dalam rentang 0–100%, kemudian digunakan oleh metode *Time Proportional Control* (TPC) untuk menentukan proporsi waktu ON dan OFF pada SSR. Oleh karena itu, perubahan masukan proses dinyatakan dalam satuan persen. Dengan demikian, apabila pengujian *open loop* dilakukan dengan memberikan masukan maksimum sebesar 100%, maka $\Delta u = 100\%$. Selanjutnya, waktu tunda (L) merupakan waktu yang dibutuhkan sistem sejak *input* diberikan hingga respon sistem mulai mengalami perubahan. Nilai ini diperoleh dengan mengamati grafik temperatur terhadap waktu dan menentukan titik awal kenaikan temperatur.

Setelah itu, konstanta waktu (τ) merupakan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai 63.2% dari perubahan total temperatur. Nilai ini dihitung dengan menentukan temperatur pada titik 63,2% dari selisih temperatur awal dan akhir, kemudian dikurangi dengan waktu tunda.

$$T_{63.2\%} = T_{awal} + 0.632(T_{akhir} - T_{awal}) \quad (2.11)$$

Sehingga, parameter PID dihitung menggunakan rumus *lambda tuning* sebagai berikut:

$$K_p = \frac{\tau}{K(\lambda + L)} \quad (2.12)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau} \quad (2.13)$$

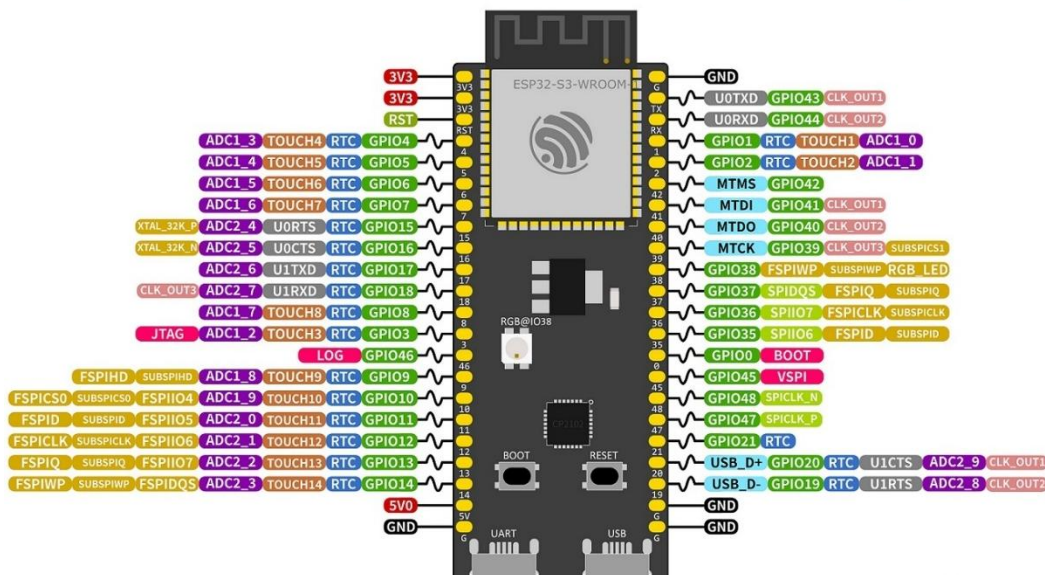
$$K_d = K_p \cdot L \quad (2.14)$$

Hasil perhitungan ini kemudian digunakan sebagai parameter awal dalam implementasi kontrol PID pada sistem *furnace*[32]. Setelah mendapatkan nilai K_p , K_i dan K_d ,

selanjutnya sistem akan mengkonversi menjadi nilai satuan persen $u(t) = 0-100\%$ yang mana nilai tersebut akan menjadi input untuk mencari nilai T_{on} dan T_{off} .

2.4.4 ESP32-S3

ESP32-S3 merupakan mikrokontroler berbasis *System-on-Chip* (SoC) yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dengan kemampuan pemrosesan tinggi, konsumsi daya rendah, serta fitur konektivitas nirkabel berupa Wi-Fi dan *Bluetooth*. ESP32-S3 menggunakan prosesor *dual-core* Xtensa LX7 dengan frekuensi hingga 240 MHz yang mampu menangani proses komputasi secara *real-time*. Pada tugas akhir, ESP32-S3 digunakan sebagai pengendali utama untuk menjalankan algoritma kontrol PID pada *furnace* temperatur tinggi berbasis *Silicon Carbide* (SiC), di mana data temperatur dari sensor diolah secara cepat untuk menghasilkan sinyal kontrol yang stabil dan akurat[11].



Gambar 2. 17 I/O ESP32-S3 yang digunakan untuk Pengontrol Pada Sistem

Pada Gambar 2.17[57] merupakan pin ESP32-S3, pemilihan mikrokontroler juga didasarkan pada kemampuannya dalam mendukung integrasi sistem dengan penelitian lain yang saling terhubung. Pada penelitian ini yang memiliki fokus pada *Human*

Machine Interface (HMI) menggunakan Nextion serta implementasi sistem SCADA berbasis IoT menggunakan Node-RED, ESP32-S3 berfungsi sebagai pusat pengolahan dan distribusi data. ESP32-S3 mampu mengirimkan data temperatur, *setpoint*, dan status sistem melalui jaringan Wi-Fi untuk keperluan monitoring dan pengendalian *furnace* secara *real-time*[10]. Selain itu, komunikasi dengan HMI Nextion dilakukan melalui antarmuka UART sehingga pengguna dapat memantau kondisi sistem secara langsung.

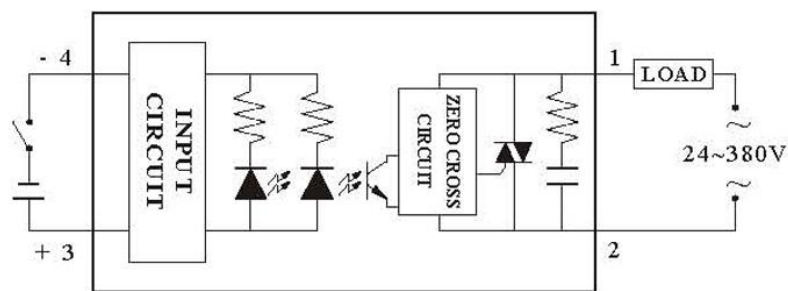
Tabel 2. 5 Spesifikasi ESP32-S3

Parameter	Spesifikasi
CPU	Dual-core Xtensa LX7
Frekuensi CPU	240 MHz
Wi-Fi	802,11 b/g/n (2,4 GHz)
<i>Bluetooth</i>	BLE 5,0
SRAM	±512 KB
Flash	Hingga 16 MB (eksternal)
Tegangan operasi	3,0 – 3,6 V
GPIO	Hingga 45 pin
ADC	12-bit
<i>Interface</i> komunikasi	UART, SPI, I2C, I2S
USB	USB OTG (<i>Full Speed</i>)
AI acceleration	Ya (<i>vector instructions</i>)
Suhu operasi	−40°C - 85°C

Di sisi lain, ESP32-S3 juga mendukung integrasi dengan penelitian yang berkaitan dengan sistem alarm dan analisis efisiensi daya menggunakan klasifikasi *fuzzy*. Data temperatur, status *heater*, serta parameter kontrol yang dihasilkan oleh ESP32-S3 digunakan sebagai input dalam proses analisis fuzzy untuk menentukan tingkat efisiensi energi serta mendeteksi kondisi abnormal seperti *over-temperature*. Dengan ini, ESP32-S3 berperan sebagai pusat kendali yang mengintegrasikan sistem kontrol PID, monitoring berbasis IoT, antarmuka pengguna, serta analisis *fuzzy* dalam satu sistem *furnace* yang terintegrasi, *real-time*, dan efisien.

2.4.5 Solid State Relay -40 DA

Solid State Relay (SSR) merupakan perangkat *switching* elektronik yang digunakan untuk mengontrol beban listrik tanpa menggunakan kontak mekanik. SSR bekerja dengan memanfaatkan komponen semikonduktor seperti TRIAC yang dikendalikan melalui isolasi optik (optocoupler), sehingga mampu memberikan isolasi antara rangkaian kontrol dan rangkaian daya[29].



Gambar 2. 18 *Solid State Relay* 40-DA untuk saklar menyalurkan listrik dari Pengatur Tegangan

Pada penelitian ini digunakan *Solid State Relay* (SSR) AC tipe *Zero Cross*, pada **Gambar 2.18**[20] SSR bekerja dengan menerima sinyal kontrol DC pada terminal input (3 dan 4). Saat sinyal diberikan, LED pada optocoupler menyala dan mengaktifkan phototriac, sehingga sinyal diteruskan ke rangkaian *Zero Cross Circuit*. Rangkaian ini tidak langsung mengaktifkan TRIAC, tetapi menunggu hingga gelombang AC melewati titik nol (*zero crossing*). Setelah itu, TRIAC menghantarkan arus dari terminal 2 ke terminal 1 menuju beban. Ketika sinyal input dimatikan, TRIAC tetap menghantarkan arus hingga gelombang AC kembali mencapai titik nol, kemudian beban akan padam. Metode *zero cross* ini menghasilkan proses *switching* yang lebih halus, mengurangi lonjakan arus (*inrush current*) dan gangguan elektromagnetik (EMI), sehingga sangat sesuai digunakan untuk pengendalian beban pemanas pada sistem furnace berbasis PID dan *Time Proportional Control* (TPC). Metode tersebut mengatur durasi waktu ON dan OFF SSR dalam satu periode tertentu berdasarkan

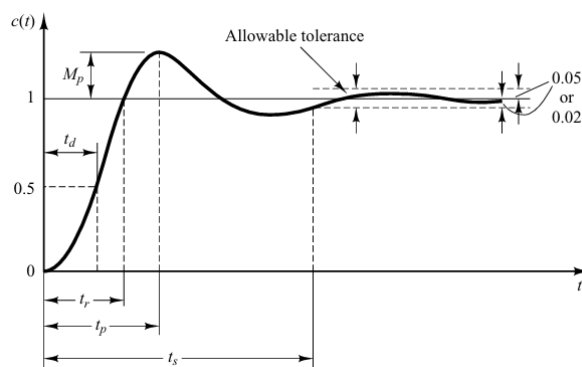
keluaran PID, sehingga daya rata-rata yang diberikan ke *heater* dapat dikontrol secara halus[20].

Tabel 2. 6 Spesifikasi SSR-40 DA

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan operasi	3 – 32 V DC
Trigger Arus	7,5 mA / 12 V
Tegangan output	24 – 380 V AC
Arus beban maksimum	40 A
Tipe switching	Zero-cross
Suhu operasi	-20°C hingga 80°C
Waktu respon	< 10 ms
Tegangan drop output	±1,6 V

2.4.6 Karakteristik Respon Sistem

Karakteristik respon sistem merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi performa sistem kendali berdasarkan respon transien atau respon keadaan tunak (*steady-state response*). Parameter-parameter ini menunjukkan seberapa cepat sistem mencapai nilai acuan (*setpoint*), seberapa besar penyimpangan yang terjadi selama proses transien, serta kemampuan sistem mempertahankan kondisi stabil setelah mencapai nilai yang diinginkan. Karakteristik respon transien yang umum digunakan ialah *elay time*, *rise time*, *peak time*, *maximum overshoot*, *settling time*, dan *steady-state* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.19**[18].



Gambar 2. 19 Karakteristik Respon Transien pada sistem *closed loop*

Delay time(t_d) adalah waktu yang dibutuhkan keluaran sistem untuk pertama kali mencapai 50% dari nilai akhir (*steady-state*) setelah diberikan masukan berupa sinyal langkah. Parameter ini menunjukkan seberapa cepat sistem mulai memberikan respons terhadap perubahan masukan. Semakin kecil nilai *delay time*, maka semakin cepat sistem merespons perubahan setpoint. Pada sistem *furnace*, nilai *delay time* dipengaruhi oleh karakteristik elemen pemanas, kapasitas termal ruang *furnace*, serta proses perpindahan panas menuju sensor.

Rise time (t_r) adalah waktu yang dibutuhkan keluaran sistem untuk meningkat dari 10% hingga 90% dari nilai akhirnya. Untuk sistem yang bersifat *overdamped* direkomendasikan penggunaan rentang 10%–90%, sedangkan untuk sistem *underdamped* biasanya digunakan rentang 0%–100%.

Parameter ini menunjukkan kecepatan sistem dalam mencapai nilai setpoint. Nilai *rise time* yang kecil menunjukkan sistem mampu menaikkan temperatur dengan cepat, sedangkan nilai yang terlalu besar menunjukkan respon sistem lambat.

Peak time(t_p) merupakan waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai puncak respon pertama setelah diberikan masukan. Pada sistem yang mengalami *overshoot*, nilai *peak time* menunjukkan kapan temperatur maksimum pertama kali tercapai sebelum sistem kembali menuju keadaan tunak atau *steady*. Sebaliknya, apabila sistem tidak mengalami *overshoot*, maka *peak time* tidak dapat didefinisikan karena tidak terdapat puncak respon di atas nilai setpoint.

Maximum overshoot (M_p) adalah besarnya nilai maksimum keluaran sistem yang melebihi nilai keadaan tunak (*steady-state*). Besarnya *overshoot* biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase terhadap nilai akhir sistem. Nilai *maximum overshoot* menggambarkan tingkat kestabilan relatif sistem. Semakin kecil nilai *overshoot*, maka sistem semakin stabil dan semakin kecil kemungkinan temperatur melebihi nilai setpoint.

Settling time(t_s) merupakan waktu yang dibutuhkan keluaran sistem hingga masuk dan tetap berada pada daerah toleransi tertentu terhadap nilai akhirnya. Menurut Ogata, batas toleransi yang umum digunakan adalah $\pm 2\%$ atau $\pm 5\%$ dari nilai keadaan tunak.

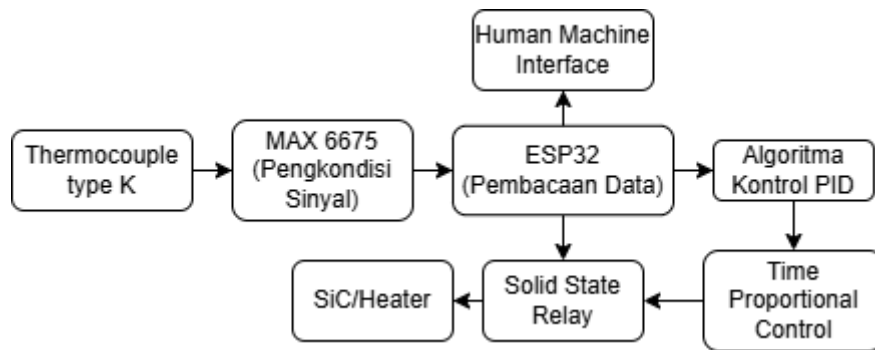
Pada tugas akhir ini digunakan kriteria $\pm 5\%$, sehingga *settling time* menunjukkan waktu yang diperlukan temperatur *furnace* hingga berada dalam rentang $\pm 5\%$ dari setpoint dan tidak keluar lagi dari rentang tersebut. Semakin kecil nilai *settling time*, semakin cepat sistem mencapai kondisi stabil setelah mengalami perubahan temperatur.

Steady-state merupakan kondisi ketika respon sistem telah mencapai keadaan stabil sehingga perubahan keluaran terhadap waktu sangat kecil atau mendekati konstan. Pada kondisi ini temperatur *furnace* berada di sekitar nilai setpoint dengan fluktuasi yang masih berada dalam batas toleransi yang ditentukan. Keadaan tunak menjadi indikator bahwa sistem kendali telah berhasil mengimbangi perubahan yang terjadi pada sistem sehingga temperatur dapat dipertahankan sesuai nilai yang diinginkan.

Karakteristik respon transien saling berkaitan dalam menggambarkan performa sistem kendali. *Delay time* (t_d) menunjukkan waktu awal sistem mulai merespons, sedangkan *rise time* (t_r) menunjukkan kecepatan sistem mencapai setpoint. Selama proses tersebut, sistem dapat mengalami *maximum overshoot* (M_p) yang mencapai nilai puncaknya pada *peak time* (t_p). Setelah respon transien berakhir, sistem akan mencapai kondisi *steady-state*, yaitu ketika keluaran berada di sekitar nilai setpoint. Waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai dan mempertahankan kondisi tersebut dinyatakan sebagai *settling time* (t_s). Parameter tersebut digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi performa respon sistem terhadap perubahan masukan (setpoint), meskipun objek yang dikendalikan berupa *furnace* lebih mendekati model orde satu[18].

2.4.7 Akuisisi dan Pemantauan Data

Akuisisi data temperatur merupakan proses pengambilan informasi suhu dari objek yang diukur hingga menjadi data digital yang dapat diolah oleh mikrokontroler. Pada penelitian ini, pengukuran temperatur dilakukan menggunakan sensor thermocouple tipe-K yang dipasang pada ruang pemanas *furnace*.



Gambar 2. 20 Diagram Blok Akuisisi pada Sistem

Pada **Gambar 2.21** sensor termokopel bekerja berdasarkan prinsip efek *Seebeck*, yaitu menghasilkan tegangan yang sebanding dengan perbedaan temperatur antara junction pengukuran dan junction referensi. Dikarenakan tegangan keluaran *thermocouple* sangat kecil, maka diperlukan modul MAX6675 sebagai pengkondisi sinyal sekaligus konverter analog ke digital. Modul MAX6675 melakukan kompensasi sambungan dingin (*cold junction compensation*), mengubah tegangan *thermocouple* menjadi data digital 12-bit, kemudian mengirimkan hasil pembacaan temperatur ke ESP32 melalui komunikasi SPI.

Selanjutnya, ESP32 membaca data temperatur secara periodik sesuai interval yang telah ditentukan. Data temperatur tersebut digunakan sebagai *process variable* (PV) pada algoritma *Proportional Integral Derivative* (PID) untuk menghitung nilai keluaran pengendali atau *manipulated variable* (MV). Nilai keluaran PID kemudian diterapkan pada metode *Time Proportional Control* (TPC) untuk mengatur waktu aktif dan tidak aktif *Solid State Relay* (SSR) yang mengendalikan daya listrik menuju elemen pemanas *Silicon Carbide* (SiC), sehingga temperatur *furnace* dapat dipertahankan sesuai nilai setpoint. Selain berfungsi sebagai pengendali, ESP32 juga mengirimkan data pengukuran secara *real-time* ke *Human Machine Interface* (HMI) Nextion melalui komunikasi serial UART. HMI Nextion menampilkan informasi penting seperti temperatur aktual (PV), nilai setpoint (SP), status pemanas (heater ON/OFF), serta parameter PID yang digunakan selama proses pengendalian. Dengan adanya tampilan ini, pengguna dapat memantau kondisi *furnace* secara langsung dan

melakukan perubahan parameter, seperti nilai setpoint, melalui antarmuka HMI tanpa perlu memprogram ulang mikrokontroler, sehingga proses *monitoring* dan pengoperasian sistem menjadi lebih mudah, interaktif, dan efisien.

2.5 Arduino Integrated Development Environment (IDE)

Arduino IDE merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menulis, mengedit, mengompilasi, dan mengunggah program ke papan mikrokontroler seperti Arduino maupun board berbasis mikrokontroler lainnya, termasuk ESP32. Arduino IDE dirancang dengan antarmuka yang sederhana sehingga memudahkan pengguna dalam mengembangkan sistem berbasis embedded tanpa memerlukan konfigurasi yang kompleks.

Arduino IDE menyediakan lingkungan pemrograman yang terintegrasi dengan bahasa pemrograman berbasis C/C++ yang telah disederhanakan melalui berbagai pustaka (*library*) termasuk algoritma kontrol seperti PID.. Hal ini memungkinkan pengguna untuk mengakses fungsi-fungsi perangkat keras seperti GPIO, komunikasi serial, serta protokol komunikasi lainnya dengan lebih mudah[12].

Arduino IDE digunakan sebagai tempat mengembangkan program sistem kontrol PID, membaca data suhu dari *thermocouple* melalui modul MAX6675, serta mengatur kerja SSR menggunakan metode *Time Proportional Control*. Dengan demikian, Arduino IDE menjadi platform utama dalam implementasi perangkat lunak sistem *furnace*.

2.6 Aluminium Oksida

Aluminium oksida (Al_2O_3), yang dikenal juga sebagai alumina, merupakan material keramik oksida yang banyak digunakan dalam aplikasi suhu tinggi karena memiliki sifat termal, mekanik, dan kimia yang sangat baik. Alumina termasuk dalam kategori *refractory material*, yaitu material yang mampu mempertahankan kekuatan dan stabilitas pada temperatur tinggi[15].

Salah satu sifat utama aluminium oksida adalah ketahanan terhadap temperatur tinggi, dengan titik leleh mencapai sekitar 2050°C . Selain itu, material ini memiliki konduktivitas termal yang cukup baik serta ketahanan terhadap oksidasi dan korosi, sehingga banyak digunakan sebagai lapisan pelindung dan isolator panas pada *furnace* industri [2] [24].



Gambar 2. 21 Alumunium Oksida untuk Reflektor Panas pada Ruang Bakar

Dalam sistem *furnace*, aluminium oksida yang dipadatkan dapat berfungsi sebagai reflektor panas (*heat reflector*) dan sekaligus sebagai isolator termal. Sebagai reflektor, alumina mampu memantulkan radiasi panas kembali ke dalam ruang pemanasan sehingga meningkatkan efisiensi termal sistem. Hal ini penting pada *furnace* berbasis *Silicon Carbide* (SiC) karena proses pemanasan melibatkan mekanisme perpindahan panas secara radiasi yang dominan pada temperatur tinggi [3] [14].