Pengembangan Sistem Kendali dan Monitoring Real-Time untuk Optimasi Profil Termal *Post Weld Heat Treatmen*

Hidayat[1], Iman Satria[2], Indra Nisja[3] dan Ade Irwan[4]
[1] Jurusan Teknologi Rekayasa Komputer Jaringan, Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta,
[2] Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Unversitas Bung Hatta,
[3] Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri Unversitas Bung Hatta
Hidayat : hidayat@bunghatta.ac.id

***Abstract* — Temperature profile control is a critical aspect of Post Weld Heat Treatment (PWHT), as the success of the process is determined by heating characteristics, holding temperature stability, and cooling response. This study aims to develop and evaluate a microcontroller-based real-time PWHT temperature control and monitoring system. Experimental evaluation was conducted by testing sensor accuracy, heating characteristics, and the system's ability to follow the temperature profile during the heating, holding, and cooling stages. The sensor testing results showed an average error of 1.6 °C or 2.02%. The heating system was capable of raising the temperature from 30 °C to 120 °C within 21 minutes. In the PWHT profile test, the actual temperature effectively tracked the reference temperature with a mean absolute deviation of approximately 2.50 °C. During the holding stage at 105 °C, the actual temperature remained within the range of 103–105 °C, while the cooling stage demonstrated a decreasing trend that closely aligned with the reference profile. The results indicate that the system is capable of performing real-time thermal profile monitoring and control for PWHT at the laboratory scale.**

***Keyword* — Post Weld Heat Treatment; thermal profile; temperature tracking; temperature control; real-time monitoring.**

Abstrak — P Pengendalian profil temperatur merupakan aspek penting dalam Post Weld Heat Treatment (PWHT) karena keberhasilan proses ditentukan oleh karakteristik pemanasan, kestabilan temperatur penahanan, dan respons pendinginan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi sistem kendali dan monitoring temperatur PWHT secara real-time berbasis mikrokontroler. Evaluasi dilakukan secara eksperimental melalui pengujian akurasi sensor, karakteristik pemanasan, serta kemampuan sistem mengikuti profil temperatur pada tahap heating, holding, dan cooling. Hasil pengujian sensor menunjukkan error rata-rata sebesar 1,6 °C atau 2,02%. Sistem pemanas mampu meningkatkan temperatur dari 30 °C hingga 120 °C dalam waktu 21 menit. Pada pengujian profil PWHT, temperatur aktual mampu mengikuti temperatur referensi dengan deviasi absolut rata-rata sekitar 2,50 °C. Selama holding pada 105 °C, temperatur aktual berada pada kisaran 103–105 °C, sedangkan pada tahap cooling menunjukkan kecenderungan penurunan yang mengikuti profil referensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring dan pengendalian profil termal PWHT secara real-time pada skala laboratorium.

Kata kunci — Post Weld Heat Treatment; profil termal; temperature tracking; kendali temperatur; monitoring real-time.

I. PENDAHULUAN

Kualitas sambungan las tidak berhenti pada keberhasilan pembentukan ikatan antara dua material. Siklus termal yang terjadi selama pengelasan dapat meninggalkan kondisi metalurgi dan tegangan sisa yang berpotensi memengaruhi perilaku sambungan ketika menerima beban dan lingkungan kerja. Besarnya pengaruh tersebut berkaitan dengan karakteristik material, proses pengelasan, geometri sambungan, serta riwayat termal yang dialami daerah las dan heat-affected zone (HAZ). Oleh sebab itu, pengelolaan kondisi sambungan setelah pengelasan menjadi bagian penting dalam upaya memperoleh struktur yang memiliki keandalan memadai [1]–[3].

Salah satu pendekatan yang digunakan untuk mengendalikan kondisi tersebut adalah Post Weld Heat Treatment (PWHT). Perlakuan panas setelah pengelasan memberikan kesempatan terjadinya relaksasi tegangan melalui paparan termal pada kondisi yang ditentukan. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa respons sambungan terhadap PWHT tidak hanya berkaitan dengan temperatur maksimum, tetapi juga dipengaruhi oleh durasi penahanan dan karakteristik siklus pemanasan maupun pendinginan [4]–[7]. Bahkan, perubahan parameter PWHT dapat menghasilkan perbedaan pada distribusi tegangan sisa, mikrostruktur, dan sifat mekanik material hasil pengelasan [8]–[10].

Kondisi tersebut menyebabkan PWHT perlu dipandang sebagai suatu profil termal, bukan hanya proses mencapai temperatur tertentu. Profil tersebut sekurang-kurangnya mencakup temperatur awal, laju pemanasan, temperatur penahanan, waktu penahanan, serta proses menuju temperatur akhir. Penelitian eksperimental dan numerik mengenai PWHT pada berbagai konfigurasi sambungan memperlihatkan bahwa karakteristik pemanasan dan pendinginan mempunyai hubungan dengan mekanisme pelepasan tegangan sisa [11]–[13]. Pada aplikasi dengan ukuran dan ketebalan material yang lebih besar, distribusi temperatur antarlokasi juga menjadi perhatian karena temperatur yang tidak seragam dapat menghasilkan respons termal yang berbeda pada bagian-bagian sambungan [14].

Dari sudut pandang pengendalian proses, kondisi tersebut menuntut tersedianya informasi temperatur yang diperoleh secara kontinu. Pengukuran sesaat hanya memberikan gambaran kondisi pada waktu tertentu dan belum cukup untuk menunjukkan apakah seluruh siklus termal telah berlangsung sesuai rancangan. Rekaman temperatur terhadap waktu memungkinkan setiap tahapan proses ditelusuri kembali dan memberikan dasar kuantitatif untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengikuti profil yang ditetapkan. Pendekatan semacam ini menjadi semakin relevan ketika PWHT diarahkan pada proses yang

terdokumentasi dan dapat dievaluasi secara objektif [3], [15].

Perkembangan teknologi mikrokontroler dan sensor temperatur membuka peluang penerapan sistem pengendalian termal dengan perangkat yang relatif sederhana. Penggabungan sensor, pengendali pemanas, antarmuka pengguna, dan komunikasi data memungkinkan kondisi proses diketahui selama perlakuan berlangsung. Meskipun demikian, keberadaan perangkat elektronik tersebut belum dengan sendirinya menunjukkan kualitas pengendalian PWHT. Aspek yang lebih penting adalah kemampuan sistem menghasilkan respons temperatur yang konsisten terhadap tahapan proses yang ditentukan serta menyediakan informasi yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja siklus termal.

Penelitian terdahulu yang menjadi dasar pengembangan penelitian ini telah menghasilkan prototipe sistem monitoring dan pengendalian temperatur PWHT menggunakan Arduino dan komunikasi GSM [16]. Hasil tersebut membuktikan kelayakan integrasi sensor temperatur, pengendali pemanas, tampilan lokal, dan komunikasi jarak jauh pada perangkat PWHT skala laboratorium. Namun, pendekatan sebelumnya masih lebih menitikberatkan pada fungsi dasar monitoring dan pengendalian temperatur. Pengkajian yang menempatkan profil termal sebagai parameter utama untuk mengevaluasi kinerja sistem masih perlu diperkuat, terutama dengan melihat ketercapaian temperatur, kestabilan selama penahanan, serta karakteristik perubahan temperatur setelah tahap penahanan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini diarahkan pada pengembangan sistem kendali dan monitoring real-time yang menempatkan profil termal sebagai basis evaluasi proses PWHT. Sistem mengintegrasikan pengukuran temperatur menggunakan termokopel tipe-K dan MAX6675, pengendalian pemanas menggunakan SSR, Arduino Uno sebagai unit pengolah dan pengendali, LCD sebagai media informasi lokal, serta komunikasi GSM untuk penyampaian status proses. Evaluasi dilakukan menggunakan data pengujian yang telah diperoleh dari prototipe dengan mengamati karakteristik pengukuran temperatur serta respons sistem pada tahap pemanasan, penahanan, dan pendinginan.

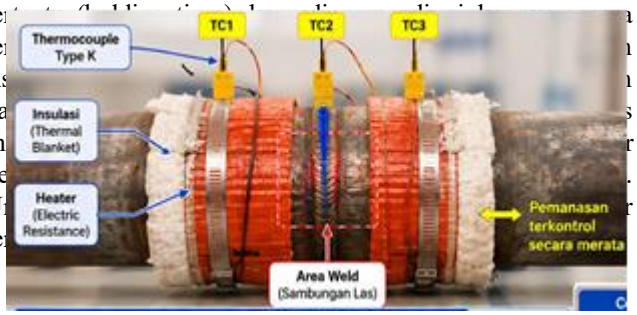
Kontribusi penelitian ini terletak pada pendekatan evaluasi PWHT berbasis profil temperatur yang dipantau secara real-time, sehingga kinerja sistem tidak hanya dinilai dari kemampuan mencapai temperatur target, tetapi juga dari perilaku temperatur sepanjang siklus perlakuan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan sistem PWHT skala laboratorium yang lebih terukur, terdokumentasi, dan mudah dievaluasi, sekaligus memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai respons termal selama proses perlakuan panas setelah pengelasan.

II. PEMODELAN SISTEM PWHT

A. *Konsep Dasar PWHT*

Proses pengelasan menghasilkan siklus pemanasan dan pendinginan yang sangat lokal sehingga distribusi temperatur pada material menjadi tidak seragam. Kondisi tersebut dapat menyebabkan terbentuknya tegangan sisa dan perubahan mikrostruktur di sekitar daerah las. Tegangan sisa dapat memengaruhi perilaku mekanik dan umur layanan sambungan, sehingga pengendaliannya menjadi salah satu aspek penting dalam rekayasa pengelasan [1]–[3].

Post Weld Heat Treatment (PWHT) merupakan salah satu metode perlakuan termal yang digunakan setelah pengelasan untuk membantu mereduksi tegangan sisa dan mengendalikan perubahan metalurgi pada sambungan. Efektivitas PWHT dipengaruhi oleh temperatur perlakuan, waktu penahanan, serta karakteristik pemanasan dan pendinginan. Perubahan parameter tersebut dapat menghasilkan respons yang berbeda terhadap tegangan sisa dan sifat mekanik sambungan [4]–[7]. Proses PWHT dilakukan dengan memanaskan material hingga temperatur tertentu, mempertahankan temperatur tersebut dalam waktu te



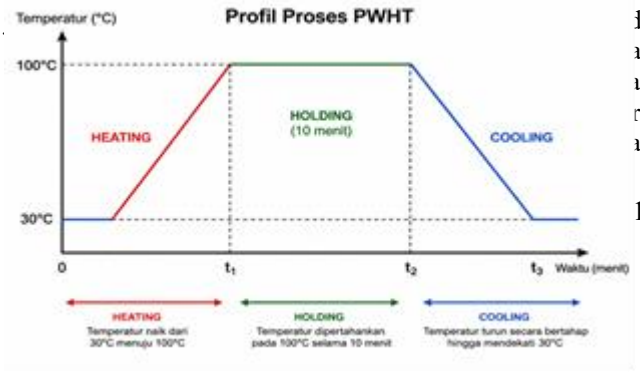
Gambar 1. Sistem PWHT [8]

Penelitian eksperimental pada sambungan baja API 5L X70 menunjukkan bahwa PWHT memberikan perubahan terhadap distribusi tegangan sisa dan karakteristik mikrostruktur sambungan. Pengujian tersebut menggunakan pengendalian temperatur dan beberapa titik termokopel untuk memantau distribusi temperatur selama proses perlakuan panas [8]. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengendalian temperatur merupakan bagian yang tidak dapat dipisahkan dari evaluasi proses PWHT.

B. *Siklus Termal PWHT*

Secara umum, PWHT dapat dipandang sebagai suatu siklus temperatur terhadap waktu yang terdiri atas tahap heating, soaking/holding, dan cooling. Parameter termal pada setiap tahap mempunyai peran berbeda dalam menentukan respons

material terhadap perlakuan panas [4],[5]. Pada tahap heating, material dinaikkan temperaturnya dengan laju tertentu hingga mencapai temperatur perlakuan. Setelah temperatur target tercapai, material memasuki tahap holding, yaitu mempertahankan temperatur dalam periode tertentu. Tahap terakhir adalah cooling, ketika temperatur diturunkan sesuai kondisi proses yang ditentukan. ISO 17663:2023 menempatkan temperatur dan waktu penahanan sebagai parameter penting dalam pelaksanaan perlakuan panas yang berkaitan dengan pengelasan. Standar tersebut



la
an
un
rti
an

1)

rya tulis versi akhir lah yang akan dimasukkan ke SEMINAR NASIONAL ELEKTRO. Contoh format ini beris

Gambar 2. Siklus Kerja PWHT

C. *Model Ternmal PWHT*

Secara fisik, sistem PWHT dapat dipandang sebagai sistem energi. Pemanas memasok energi termal kepada benda kerja dan ruang pemanas, sementara sebagian energi dilepaskan ke lingkungan. Pendekatan neraca energi dapat digunakan untuk menggambarkan hubungan antara daya pemanas dan perubahan temperatur [10], [11]. Model sistem termal dapat dinyatakan dengan persamaan (2).

$$C_{th}\frac{dT}{dt} = \eta Ph - \frac{\mathrm{T} - \mathrm{Ta}}{R_{th}} \quad (2)$$

dengan C_{th} = kapasitas termal sistem (J/°C); T = temperatur sistem (°C); T_a = temperatur lingkungan (°C); P_h = daya pemanas (W); η = efisiensi perpindahan energi; R_{th} = resistansi termal terhadap lingkungan (°C/W). Persamaan (2) dapat dijelaskan bahwa kenaikan temperatur merupakan hasil keseimbangan antara energi yang diberikan oleh pemanas dan energi yang hilang ke lingkungan. Apabila daya pemanas dikendalikan melalui SSR, besarnya daya efektif dapat dinyatakan dengan persamaan (3).

$$P_h = u\ x\ P_{max} \quad (3)$$

dengan \(u\) merupakan sinyal kendali dengan rentang (4)

$$0 \leqslant u \leqslant 1 \quad (4)$$

Dan P_{max} merupakan daya maksimum elemen pemanas

D. *Model Dinamik Temperatus*

Persamaan neraca energi, dinamika temperatur dapat dituliskan seperti persamaan (5)

$$\frac{dT}{dt} = \eta\frac{P_{max}}{C_{th}}u - \frac{\mathrm{T} - \mathrm{Ta}}{R_{th}C_{th}} \quad (5)$$

Dengan mendefinisikan konstanta waktu termal: (6)

$$\tau = R_{th}.C_{th} \quad (6)$$

dan penguatan termal (7)

$$K = \eta P_{max}.R_{th} \quad (7)$$

maka sistem termal secara sederhana dapat direpresentasikan sebagai sistem orde pertama (8).

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (8)$$

Model orde pertama banyak digunakan sebagai pendekatan awal untuk sistem termal karena respons temperatur umumnya berlangsung lebih lambat dibandingkan respons sistem elektronik [10], [11]. Pada sistem PWHT nyata terdapat kemungkinan keterlambatan antara perubahan daya pemanas dan perubahan temperatur yang terbaca sensor. Keterlambatan tersebut dapat berasal dari perpindahan panas, posisi sensor, karakteristik elemen pemanas, maupun waktu respons sensor. Model dapat diperluas menjadi persamaan (9).

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{\tau s + 1} \quad (9)$$

dengan L adalah dead time sistem.

Dalam penelitian ini model tersebut digunakan sebagai landasan teoritis untuk menjelaskan perilaku termal sistem, bukan sebagai model untuk menghasilkan data simulasi. Evaluasi utama tetap didasarkan pada hasil pengujian prototipe yang telah diperoleh.

Pengendalian temperatur dilakukan dengan membandingkan temperatur yang diinginkan dengan temperatur aktual. Selisih kedua temperatur tersebut dinyatakan persamaan (10).

$$e(t) = T_{ref}(t) - T(t) \quad (10)$$

Secara teoritis, pengendali PID dapat dinyatakan (11).

$$U(t) = K_p.e(t) + K_i\int e(t)dt + K_d\frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Penggunaan kendali berbasis umpan balik memungkinkan daya pemanas disesuaikan berdasarkan kondisi temperatur aktual. Pendekatan ramp–soak juga memungkinkan referensi temperatur berubah mengikuti tahapan proses, bukan hanya mempertahankan satu nilai setpoint [12]. Pada PWHT, konsep tersebut penting karena proses tidak berhenti ketika temperatur target tercapai. Sistem harus mampu membedakan tahap pemanasan dan tahap penahanan, sementara proses pendinginan perlu dipantau untuk memastikan perubahan temperatur tetap dapat diketahui dan didokumentasikan.

E. *Pengukuran Temperatur*

Pengukuran temperatur merupakan bagian fundamental dari sistem PWHT karena keputusan pengendalian bergantung pada temperatur yang dibaca sensor. Termokopel tipe-K banyak digunakan untuk pengukuran temperatur pada aplikasi perlakuan panas karena mempunyai rentang pengukuran yang luas dan konstruksi yang relatif sederhana [8], [13]. Pada prototipe yang dikembangkan, termokopel tipe-K dihubungkan dengan MAX6675 sebagai rangkaian konversi untuk memperoleh data temperatur digital yang kemudian diproses oleh Arduino Uno. Secara sederhana, temperatur yang terbaca dapat dinyatakan persamaan (12),

$$T_m(t) = T(t) + e_s(t) \quad (12)$$

dengan T_m adalah temperatur hasil pengukuran dan e_s adalah adalah kesalahan pengukuran. Kinerja pengukuran dapat dievaluasi menggunakanpersamaan (13).

$$E_i = |T(m,i) - T(ref,i)| \quad (13)$$

Sedangkan *mean error* dapat dinyatakan dengan perasmaan (14).

$$ME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{T_{m,i} - T_{Ref,i}}{T_{Ref,i}}\right| \quad (14)$$

Persamaan tersebut digunakan untuk mengevaluasi hasil pengukuran temperatur pada penelitian ini.

F. *Evaluasi Profil Termal*

Evaluasi sistem PWHT tidak hanya didasarkan pada temperatur maksimum yang dicapai. Beberapa parameter yang dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik profil termal adalah laju pemanasan, kestabilan temperatur penahanan, dan laju pendinginan [4], [6], [14]. Laju pemanasan dihitung dengan:persamaan (15).

$$R_h = \frac{T_h - T_0}{t_h - t_0} \quad (15)$$

edangkan laju pendinginan rata-rata dihitung dengan persamaan (16).

$$r_c = \frac{T_{awal} - T_{akhir}}{\triangle t} \quad (16)$$

Untuk tahap penahanan, variasi temperatur dapat dinyatakan persamaan (17).

$$\Delta T_h = T_{max} - T_{min} \quad (17)$$

Semakin kecil variasi temperatur selama periode penahanan, semakin stabil kondisi termal sistem pada tahap tersebut.

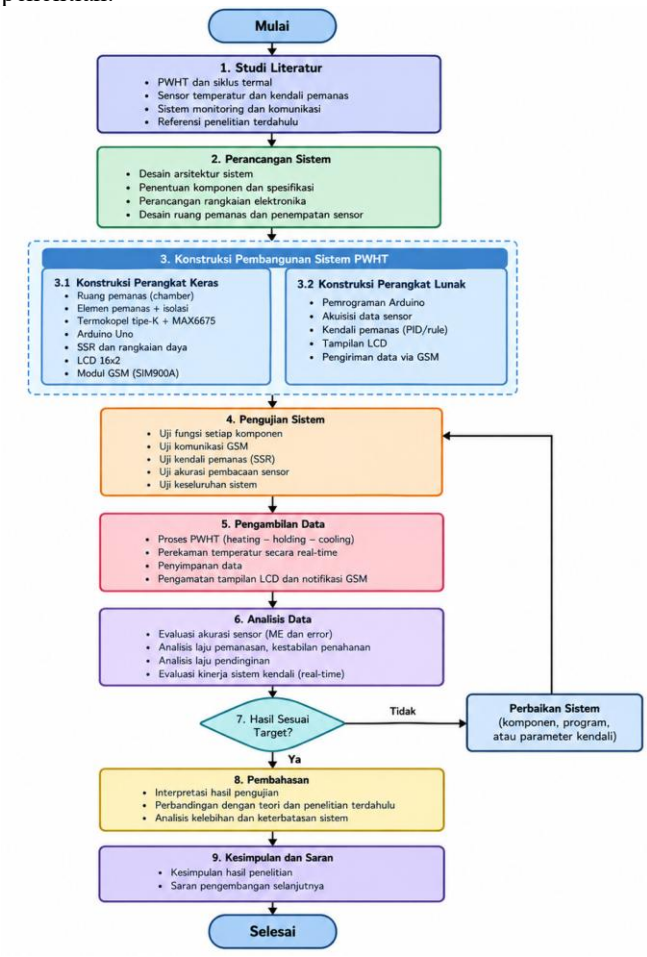
III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem kendali serta monitoring temperatur Post Weld Heat Treatment (PWHT) secara real-time. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur mengenai karakteristik siklus termal PWHT, teknik pengukuran temperatur, kendali elemen pemanas, serta sistem monitoring dan komunikasi data.

Tahap selanjutnya meliputi perancangan arsitektur sistem, integrasi perangkat keras, dan pengembangan perangkat lunak. Sistem dibangun menggunakan Arduino Uno sebagai unit kendali, termokopel tipe-K dan MAX6675 sebagai sensor temperatur, Silicon Control Rectifier (SCR) sebagai pengendali pemanas, LCD 20×4 sebagai antarmuka lokal, serta SIM900A untuk komunikasi informasi proses.

Evaluasi eksperimental dilakukan berdasarkan respons sistem terhadap profil temperatur yang meliputi tahap pemanasan, penahanan, dan pendinginan. Data temperatur direkam secara kontinu untuk memperoleh karakteristik termal sistem. Kinerja pengukuran dievaluasi melalui mean error, sedangkan performa pengendalian dianalisis berdasarkan kemampuan mencapai temperatur target, kestabilan selama periode penahanan, dan respons temperatur pada tahap pendinginan. Kemampuan monitoring real-time dievaluasi berdasarkan kontinuitas penyajian informasi pada LCD dan pengiriman status melalui GSM.

Seluruh hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif dan diinterpretasikan untuk menilai efektivitas sistem dalam merealisasikan profil termal PWHT pada skala laboratorium. Pada gambar 3 ditunjukkan diagram alir penelitian.

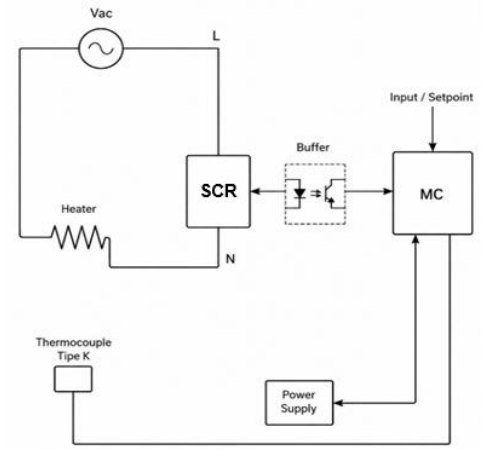


Gambar 3. Metodologi Penelitian

Konsep sistem pengendalian PWHT ditunjukkan pada gambar 4. Pada dasarnya system PWHT merupakan pengedalian temperature dengan trakcing disesuaikan

dengan Gambar 2. Gambar 4 menunjukkan sistem kendali temperatur berbasis mikrokontroler dengan metode Proportional–Integral–Derivative (PID). Sistem terdiri atas sumber tegangan AC, power supply, Arduino Uno, thermocouple Type K, modul MAX6675, silicon control rectifier (SCR), dan heater. Sumber AC digunakan untuk menyuplai daya heater melalui SCR, sedangkan Arduino dan rangkaian sensor memperoleh catu daya dari power supply.

Temperatur yang diinginkan ditetapkan sebagai setpoint (SP) sesuai Gambar 2, sedangkan temperatur aktual yang terukur merupakan process variable (PV). Sensor thermocouple Type K mendeteksi temperatur objek dan mengirimkan sinyal ke modul MAX6675 untuk dikonversi menjadi data digital yang selanjutnya dibaca oleh Arduino Uno. Nilai PV dibandingkan dengan SP untuk menghasilkan error sebagai masukan algoritma PID. Sinyal kendali PID dihitung berdasarkan persamaan (11). Konstanta Ki, Kp dan Kd ditentukan melalui proses tuning untuk memperoleh respons temperatur yang cepat, stabil, dan memiliki overshoot minimum. Keluaran algoritma PID selanjutnya digunakan Arduino untuk mengatur SCR melalui teknik pengendalian daya yang sesuai. Dengan demikian, energi yang diberikan heater dapat disesuaikan terhadap perubahan temperatur aktual. Selama proses PWHT, sistem menjalankan tiga tahapan utama, yaitu heating hingga mencapai temperatur target, holding untuk mempertahankan temperatur pada nilai yang ditentukan selama waktu tertentu, dan cooling dengan mengendalikan penurunan temperatur sesuai laju pendinginan yang dipersyaratkan. Mekanisme feedback secara kontinu memungkinkan sistem mempertahankan temperatur mendekati SP selama seluruh siklus PWHT.

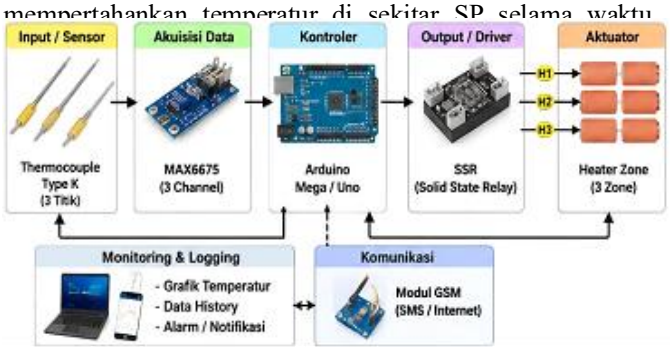


Gambar 4. Konsep Pengedalian Suhu PWHT

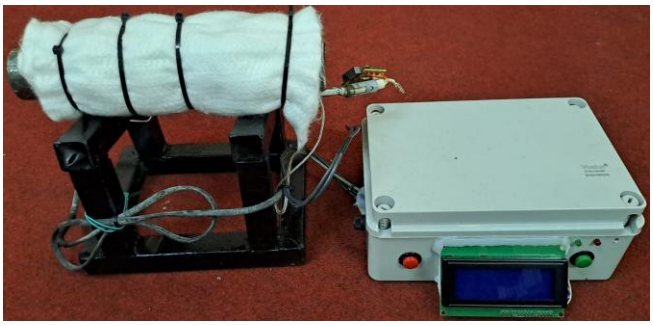
Penggunaan kendali berbasis umpan balik memungkinkan daya pemanas disesuaikan berdasarkan kondisi temperatur aktual. Pendekatan ramp–soak juga memungkinkan referensi temperatur berubah mengikuti tahapan proses, bukan hanya mempertahankan satu nilai setpoint [12]. Pada PWHT, konsep tersebut penting karena proses tidak berhenti ketika temperatur target tercapai. Sistem harus mampu membedakan tahap pemanasan dan tahap penahanan, sementara proses pendinginan perlu dipantau untuk memastikan perubahan temperatur tetap dapat diketahui dan didokumentasikan.

Pada gambar 5 ditunjukan pengontrolan PWHT berbasis GSM. Modul GSM digunakan sebagai media komunikasi jarak jauh untuk menyampaikan status dan perkembangan proses Post Weld Heat Treatment (PWHT). Arduino Uno berfungsi sebagai pusat pengendalian yang mengintegrasikan pembacaan temperatur, algoritma PID, pengendalian heater, indikator lokal, serta komunikasi GSM. Informasi kondisi proses dikirimkan melalui jaringan seluler dalam bentuk pesan singkat (SMS).

Alur kerja sistem dimulai ketika sumber tegangan mengaktifkan rangkaian kontrol dan tombol START ditekan. Arduino kemudian membaca temperatur aktual dari thermocouple Type K melalui modul MAX6675 dan menampilkannya pada LCD. Pada tahap heating, temperatur aktual (process variable, PV) dibandingkan dengan setpoint (SP). Selisih antara SP dan PV diproses menggunakan algoritma PID dengan parameter (Kp), (Ki), dan (Kd), kemudian keluaran kendali digunakan untuk mengatur daya heater melalui SCR. Ketika temperatur mencapai SP, sistem beralih ke tahap holding. Pada tahap ini, kendali PID mempertahankan temperatur di sekitar SP selama waktu



Gambar 5. Blok Sistem Kontrol PWHT Berbasis GSM



Gambar 6. Prototipe PWHT

Modul GSM mengirimkan notifikasi ketika proses dimulai, temperatur mencapai SP, tahap holding dimulai, proses cooling berlangsung, dan PWHT selesai. Dengan demikian, sistem mampu melaksanakan pengendalian temperatur sekaligus menyediakan monitoring dan notifikasi jarak jauh secara real-time.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menilai kinerja system yang sudah dirancang, dilakukan pengunjian guna mengevaluasi kemampuan sistem kendali temperatur berbasis PID dalam mengikuti tracking temperatur yang telah ditentukan pada siklus Post Weld Heat Treatment (PWHT). Analisis difokuskan pada kesesuaian temperatur aktual (process variable, PV) terhadap setpoint (SP) selama tahap heating, holding, dan cooling. Kinerja sistem dievaluasi berdasarkan nilai error temperatur antara SP dan PV serta kemampuan sistem mempertahankan temperatur sesuai profil termal yang ditetapkan. Hasil pengujian digunakan untuk mengetahui tingkat akurasi dan konsistensi sistem dalam mengikuti temperature tracking selama proses PWHT.

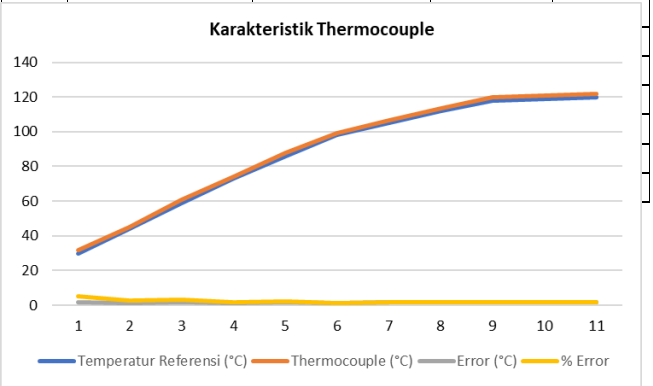
A. Pengujian Sensor Thermocouple

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan thermocouple Type K dalam mengukur perubahan temperatur selama proses pemanasan. Hasil pembacaan thermocouple dibandingkan dengan temperatur yang diukur menggunakan termometer digital sebagai instrumen pembanding. Thermocouple Type K dihubungkan ke modul MAX6675, kemudian data temperatur diproses oleh Arduino Uno dan ditampilkan secara real-time pada LCD 20×4 melalui antarmuka I2C. Hasil pengujian ditunjukan pada Tabel 1 dan Gambar 7.

Hasil pengujian sensor menunjukkan bahwa temperatur yang dibaca oleh thermocouple Type-K melalui modul MAX6675 memiliki kecenderungan sedikit lebih tinggi dibandingkan temperatur referensi. Pada rentang temperatur 30–120 °C, selisih pengukuran berada pada kisaran 1,1–1,9 °C. Nilai error rata-rata yang diperoleh adalah 1,6 °C atau 2,02%.

Tabel 1. Hasil Pengujiann Sensor

No	Temperatur Referensi (°C)	Thermocouple (°C)	Error (°C)	% Error
1	30	31.5	1.5	5.00
2	44	45.1	1.1	2.50
3	59	60.9	1.9	3.22
4	73	74.1	1.1	1.51



Gambar 7. Karakteristik Thermocouple

Pada temperatur referensi 120 °C, temperatur yang terbaca sebesar 121,8 °C sehingga diperoleh deviasi sebesar 1,8 °C atau 1,5%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sensor mampu mengikuti perubahan temperatur dengan deviasi yang relatif kecil. Selain itu, kecenderungan error yang semakin kecil pada temperatur yang lebih tinggi menunjukkan bahwa pembacaan sensor relatif konsisten pada daerah temperatur operasi PWHT yang digunakan.

Hasil ini memberikan dasar bahwa kombinasi thermocouple Type-K dan MAX6675 dapat digunakan sebagai elemen pengukuran temperatur pada prototipe. Meskipun terdapat offset pembacaan, besarnya deviasi masih relatif kecil sehingga perubahan temperatur selama proses dapat direpresentasikan secara memadai oleh sistem monitoring.

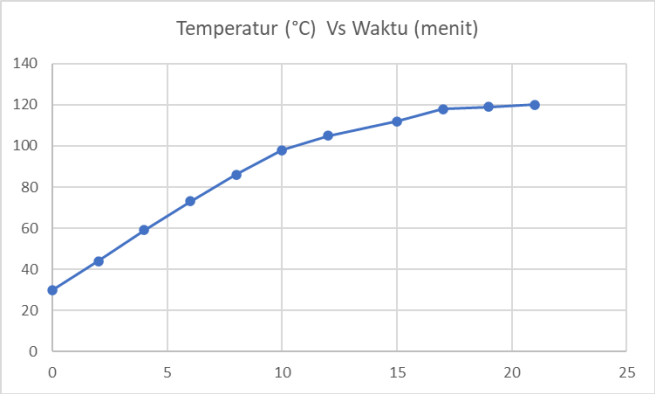
B. Pengujian Pemanas

Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik kenaikan temperatur pada blok aluminium yang dipanaskan menggunakan solder 220 VAC. Pemanas ditempatkan pada bagian bawah atau sisi blok aluminium sehingga panas yang dihasilkan oleh heater ditransfer secara konduksi ke dalam blok aluminium. Selama proses pemanasan, distribusi dan perubahan temperatur pada blok dipantau menggunakan thermocouple Type K. Sensor ditempatkan pada bagian blok aluminium yang dianggap representatif terhadap temperatur media yang dipanaskan, sehingga perubahan temperatur yang terukur dapat digunakan untuk menggambarkan respons termal blok aluminium selama proses heating. Tabel 2 menunjukan hasil pengujian heater. Dalam bentuk grafik, ditunjukan pada gambar 8.

Temperatur awal sebesar 30 °C meningkat secara bertahap menjadi 44 °C pada menit ke-2, 59 °C pada menit ke-4, 73 °C pada menit ke-6, dan 86 °C pada menit ke-8. Pada menit ke-10 temperatur telah mencapai 98 °C dan selanjutnya meningkat hingga 120 °C pada menit ke-21. Data tersebut menunjukkan karakteristik sistem termal yang bersifat gradual dan memiliki inersia termal. Laju pemanasan rata-rata dari 30 °C menuju 120 °C adalah sekitar 4,29 °C/menit. Respons tersebut menunjukkan bahwa kenaikan temperatur tidak berlangsung secara linier karena laju pemanasan dipengaruhi oleh perpindahan panas dari heater ke blok aluminium serta pelepasan panas ke lingkungan. Karakteristik ini penting dalam pengendalian PWHT karena temperatur aktual tidak langsung berubah mengikuti perubahan daya pemanas. Dengan demikian, keberadaan umpan balik temperatur diperlukan agar pemberian energi pemanas dapat disesuaikan terhadap kondisi temperatur aktual.

Tabel 2. Hasil Pengujian Heater

Waktu (menit)	Temperatur (°C)	Status
0	30	*Heating*
2	44	*Heating*
4	59	*Heating*
6	73	*Heating*



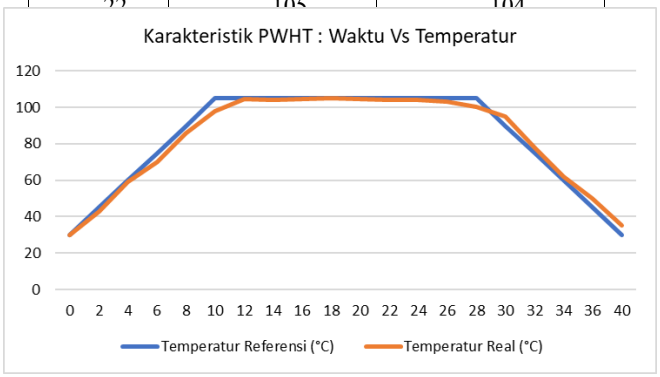
Gambar 8. Karakteristik Temperatur Heater

C. Pengujian PWHT

Pengujian PWHT dimaksudkan untuk mendapatkan karakteristik PWH pada saat *heating, holding dan cooling*. Diberikan setpoint dengan proses heating 12 menit, holding 12 menit dan cooling 12 menit. Sebelum pengujian, gterlebih dahulu dilakukan penyetingan konstanta PID dengan metide Ziegler Nichols. Data hasil pegujian ditunjukkan pada Tabel 3. Sedangkan dalam bentuk grafik, didapatkan karakteristik PWHT sebagainana ditunjukkan pada Gambar 9. Hasil pengujian menunjukkan bahwa temperatur aktual mengikuti pola umum temperatur referensi, meskipun terdapat deviasi pada beberapa titik selama proses. Pada tahap heating, temperatur meningkat dari 30 °C pada menit ke-0 menjadi 43 °C pada menit ke-2, 59 °C pada menit ke-4, 70 °C pada menit ke-6, 86 °C pada menit ke-8, dan 98 °C pada menit ke-10. Temperatur kemudian meningkat hingga mendekati temperatur target 105 °C. Deviasi terbesar pada tahap pemanasan terjadi pada menit ke-10, yaitu sebesar 7 °C, ketika temperatur referensi 105 °C sedangkan temperatur aktual 98 °C. Kondisi tersebut menunjukkan adanya keterlambatan respons termal antara temperatur referensi dan temperatur aktual. Keterlambatan tersebut merupakan karakteristik yang umum pada sistem termal karena energi dari heater terlebih dahulu ditransfer melalui media pemanas sebelum terdeteksi oleh sensor. Selain itu, kapasitas termal blok aluminium dan kehilangan panas ke lingkungan turut memengaruhi respons temperature

Tabel 3. Hasil Pengujian Karakteristik PWHT

Waktu (menit)	Temperatur Referensi (°C)	Temperatur Real (°C)
0	30	30
2	45	43
4	60	59
6	75	70
8	90	86
10	105	98
12	105	104.5
14	105	104
16	105	104.5
18	105	105
20	105	104.5
22	105	104



Gambar 9. Karakteristik PWHT

.Pada tahap holding, temperatur aktual berada pada rentang sekitar 103–105 °C ketika temperatur referensi ditetapkan sebesar 105 °C. Variasi temperatur yang relatif kecil, yaitu sekitar 2 °C, menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan temperatur di sekitar nilai target. Kondisi ini merupakan bagian penting dari keberhasilan PWHT karena tahap holding memerlukan kestabilan temperatur selama periode perlakuan.

Setelah tahap holding, sistem memasuki tahap cooling. Temperatur aktual turun dari 95 °C pada menit ke-30 menjadi 78 °C pada menit ke-32, 62 °C pada menit ke-34, 50 °C pada menit ke-36, dan 35 °C pada menit ke-40. Pola tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti kecenderungan penurunan temperatur sesuai profil referensi, walaupun temperatur aktual masih berada sedikit di atas temperatur referensi pada beberapa titik. Hal ini menunjukkan adanya efek thermal inertia setelah heater dimatikan.

Secara keseluruhan, dari seluruh titik pengujian diperoleh deviasi absolut rata-rata sekitar 2,50 °C terhadap profil temperatur referensi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu merealisasikan pola temperature tracking yang mendekati profil PWHT yang dirancang. Perbedaan temperatur yang masih muncul terutama berkaitan dengan karakteristik dinamika termal, keterlambatan perpindahan panas, dan posisi sensor terhadap sumber panas. Dengan demikian, kinerja prototipe lebih tepat dinilai dari kemampuan mengikuti keseluruhan profil termal dibandingkan hanya berdasarkan pencapaian temperatur maksimum. Sistem telah menunjukkan kemampuan untuk melakukan monitoring temperatur secara kontinu sekaligus mengendalikan tahapan heating, holding, dan cooling. Integrasi Arduino Uno, thermocouple Type-K, MAX6675, pengendali heater, LCD, dan komunikasi GSM memberikan kemampuan monitoring lokal dan penyampaian status proses selama siklus PWHT berlangsung.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan prototipe sistem kendali dan monitoring temperatur PWHT secara real-time berbasis Arduino Uno dengan thermocouple Type-K, MAX6675, pengendali heater, LCD 20×4, dan komunikasi GSM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengukur dan memantau temperatur secara kontinu serta mengikuti tahapan heating, holding, dan cooling. Pengujian sensor menghasilkan error rata-rata sebesar 1,6 °C atau 2,02%, sedangkan heater mampu meningkatkan temperatur dari 30 °C hingga 120 °C dalam waktu 21 menit. Pada pengujian profil PWHT, temperatur aktual mampu mengikuti pola temperatur referensi dengan deviasi absolut rata-rata sekitar 2,50 °C. Selama holding pada temperatur referensi 105 °C, temperatur aktual berada pada kisaran 103–105 °C, menunjukkan kestabilan temperatur yang relatif baik. Pada tahap cooling, temperatur aktual mengikuti kecenderungan penurunan temperatur referensi meskipun masih terdapat deviasi akibat karakteristik termal sistem. Secara keseluruhan, prototipe mampu merealisasikan monitoring dan pengendalian profil termal PWHT secara real-time pada skala laboratorium.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Ketua Jurusan Teknik Elektro Unversitas Bung Hatta, yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini di laboratorium Dasar Sistem Kendali. Demikian juga kepada segenap pimpinan Universitas Yayasan Pendidikan Bung Hatta.

DAFTAR ACUAN

[1] D. Schroepfer et al., "Influence of welding stresses on relief cracking during heat treatment of a creep-resistant 13CrMoV steel Part III: assessment of residual stresses from small-scale to real component welds," Welding in the World, 2021, doi: 10.1007/s40194-021-01101-7.

[2] J. Lee et al., "Effect of Post-Weld Heat Treatment Conditions on Mechanical Properties, Microstructures and Nonductile Fracture Behavior of SA508 Gr.1a Thick Weldments," Metals and Materials International, 2021, doi: 10.1007/s12540-021-01090-8.

[3] B.-C. Goo, "Effect of Post-Weld Heat Treatment on the Fatigue Behavior of Medium-Strength Carbon Steel Weldments," Metals, vol. 11, no. 11, 1700, 2021, doi: 10.3390/met11111700.

[4] P. Ferro, F. Berto, and R. Meneghello, "Setup of a numerical model for Post Welding Heat Treatment simulation of steel joints," Procedia Structural Integrity, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.024.

[5] B. Yu et al., "The residual stress relief of post weld heat treatment in SMA490BW welded joints: Simulation and experiment," International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 200, 104852, 2022, doi: 10.1016/j.ijpvp.2022.104852.

[6] "Fatigue performance of rib-to-deck joints in orthotropic steel deck with PWHT," Journal of Constructional Steel Research, vol. 196, 107420, 2022, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107420.

[7] R. Kumar et al., "Residual stresses study in butt welded joint of Inconel 617 alloy and effect of post weld heat treatment on residual stresses," 2023, doi: 10.1177/14644207221149205.

[8] "Analysis of residual stress relief for Ti62A alloy welded joints by post weld heat treatment considering creep effect," Journal of Materials Research and Technology, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.057.

[9] "Investigation of stress relief crack susceptibility of CrMoV steels coarse grain HAZ via simulation of uniaxial stress conditions during PWHT," Welding in the World, 2023, doi: 10.1007/s40194-023-01539-x.

[10] B. Qiang et al., "Influence of post-weld heat treatment on welding residual stress in U-rib-to-deck joint," Thin-Walled Structures, vol. 196, 111550, 2024, doi: 10.1016/j.tws.2023.111550.

[11] X. Li et al., "Effect of Post-Weld heat treatment on residual stress in deck-rib double-side welded joints and process optimization," Engineering Failure Analysis, vol. 164, 108731, 2024, doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108731.

[12] H. Wu et al., "Residual stress relief strategy in thick steel weldments via local induction heat treatment: Simulation and neutron diffraction experiment," Materials Science and Engineering: A, vol. 902, 146612, 2024, doi: 10.1016/j.msea.2024.146612.

[13] Q. Jin et al., "Experimental and numerical analysis of residual stress relief mechanisms of local postweld heat treatment in pressure vessels," Thin-Walled Structures, 2024, Art. no. 112487, doi: 10.1016/j.tws.2024.112487.

[14] O. Falodun, S. Oke, and M. Bodunrin, "A comprehensive review of residual stresses in carbon steel welding: formation mechanisms, mitigation strategies, and advanced post-weld heat treatment techniques," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 136, pp. 4107–4140, 2025, doi: 10.1007/s00170-025-15088-8.

[15] M. Tümer et al., "Influence of Post-Weld Heat Treatment on the Performance of UHSS Joints," Materials, vol. 18, no. 12, 2792, 2025, doi: 10.3390/ma1812279