

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Dalam penyusunan tugas akhir ini dilakukan studi literatur terhadap berbagai penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Kajian pustaka ini bertujuan untuk memperoleh referensi serta pemahaman mengenai konsep, metode, dan teknologi yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Beberapa penelitian yang berhubungan dengan Rancang Bangun Sistem Monitoring Suhu Air Menggunakan Metode PID Berbasis PLC antara lain sebagai berikut.

1. Sistem Monitoring Suhu Air

Penelitian mengenai sistem pemantauan suhu air telah banyak dilakukan dalam berbagai bidang, seperti industri, laboratorium, maupun sistem pemanas air. Sistem monitoring suhu memiliki fungsi untuk mengamati perubahan temperatur secara terus-menerus sehingga kondisi sistem dapat diketahui secara langsung atau *real-time*. Menurut Katsuhiko Ogata dalam buku *Modern Control Engineering*, proses pengukuran dan pemantauan parameter dalam suatu sistem merupakan bagian penting dari sistem kontrol karena data yang diperoleh dari sensor akan digunakan sebagai dasar dalam proses pengendalian [6]. Dengan adanya sistem monitoring suhu air, perubahan temperatur dapat diketahui lebih cepat sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan dengan lebih efektif.

2. Kontrol Otomatis Menggunakan PLC

Programmable Logic Controller (PLC) merupakan perangkat pengendali digital yang banyak digunakan dalam sistem otomasi industri. PLC dirancang untuk mengontrol berbagai proses secara otomatis melalui program logika yang tersimpan dalam memori perangkat. Menurut Frank D. Petruzella dalam buku *Programmable Logic Controllers*, PLC bekerja dengan menerima sinyal masukan dari berbagai sensor, kemudian memproses data tersebut berdasarkan program yang telah dirancang, dan selanjutnya menghasilkan sinyal keluaran untuk mengendalikan perangkat lain seperti motor, pompa, atau pemanas [7]. Penggunaan PLC pada

sistem monitoring suhu air memungkinkan proses pengendalian berlangsung secara otomatis, lebih stabil, serta dapat beroperasi secara terus-menerus tanpa memerlukan pengawasan manual secara langsung.

3. Metode Kontrol PID pada Pengendalian Suhu

Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan salah satu teknik pengendalian yang paling umum digunakan dalam sistem kontrol proses, termasuk dalam pengendalian temperatur. Kontrol PID bekerja dengan cara meminimalkan selisih antara nilai yang diinginkan (*set point*) dengan nilai aktual yang terukur oleh sensor. Menurut Richard C. Dorf dan Robert H. Bishop dalam buku *Modern Control Systems*, kontrol PID merupakan gabungan dari tiga komponen pengendali yaitu kontrol proporsional, integral, dan derivatif yang bekerja secara bersamaan untuk menghasilkan respons sistem yang lebih cepat, stabil, dan mampu mengurangi kesalahan pada kondisi *steady-state* [8]. Dalam sistem pengendalian suhu air, metode ini digunakan untuk mengatur kerja pemanas sehingga suhu dapat mencapai nilai yang diinginkan dan tetap stabil selama proses berlangsung.

4. Penerapan PID pada Sistem Pengendalian Suhu Air

Penggunaan metode PID pada sistem pengendalian suhu air telah banyak diterapkan karena mampu memberikan performa sistem yang lebih baik dibandingkan dengan metode kontrol konvensional. Pada sistem ini, sensor suhu berfungsi untuk mengukur temperatur air secara kontinu, kemudian data tersebut diproses oleh sistem pengendali untuk menentukan tindakan yang akan diberikan kepada pemanas air. Menurut Karl Johan Åström dan Tore Hägglund dalam buku *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, penerapan kontrol PID pada sistem temperatur dapat meningkatkan kestabilan sistem, mempercepat respons sistem, serta mengurangi terjadinya *overshoot* dan kesalahan pada proses pengendalian [9]. Oleh karena itu, metode PID banyak digunakan dalam berbagai sistem pengendalian suhu, termasuk pada sistem pemanas air dan proses industri.

2.2 Proportional Integral Derivative (PID)

Metode *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan salah satu metode pengendalian yang paling sering digunakan dalam sistem kontrol industri. Metode ini berfungsi untuk mengatur suatu sistem agar nilai keluaran (*output*) dapat mendekati atau mengikuti nilai yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu *set point*, dengan cara meminimalkan selisih atau kesalahan (*error*) antara nilai *set point* dan nilai aktual yang dibaca oleh sensor. Pengendali PID banyak digunakan karena mampu memberikan respons sistem yang relatif cepat, menjaga kestabilan sistem, serta mengurangi kesalahan yang terjadi selama proses pengendalian berlangsung [10].

Menurut Katsuhiko Ogata dalam buku *Modern Control Engineering*, pengendali PID merupakan gabungan dari tiga jenis aksi kontrol, yaitu kontrol proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D). Ketiga komponen tersebut bekerja secara bersamaan untuk meningkatkan performa sistem kontrol sehingga sistem dapat mencapai nilai *set point* dengan lebih cepat, stabil, dan memiliki tingkat kesalahan yang lebih kecil [11].

Dalam sistem kontrol PID, ketiga komponen pengendali yaitu proporsional, integral, dan derivatif bekerja secara bersamaan untuk menghasilkan performa sistem yang optimal. Kontrol proporsional berperan dalam mempercepat respons sistem terhadap perubahan, kontrol integral berfungsi untuk menghilangkan kesalahan pada kondisi *steady-state*, sedangkan kontrol derivatif membantu meningkatkan kestabilan sistem serta mengurangi kemungkinan terjadinya *overshoot*. Kombinasi dari ketiga komponen tersebut menghasilkan sistem pengendalian yang lebih stabil, responsif, dan akurat dalam mencapai nilai *set point* yang telah ditentukan [12].

Pada penerapannya dalam sistem pengendalian suhu air, metode PID digunakan untuk mengatur kerja elemen pemanas berdasarkan nilai suhu yang dibaca oleh sensor. Ketika suhu air berada di bawah nilai *set point*, sistem akan meningkatkan daya pemanas untuk menaikkan suhu. Sebaliknya, ketika suhu air telah mendekati *set point*, sistem akan menyesuaikan atau mengurangi daya

pemanas agar suhu tetap berada pada kondisi yang stabil sesuai dengan nilai yang diinginkan [13].

Secara matematis, kontrol PID dinyatakan dalam persamaan:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Dimana $u(t)$ merupakan sinyal kendali yang diberikan ke aktuator, K_p , K_i , dan K_d masing-masing adalah konstanta proportional, integral, dan derivative, serta $e(t)$ adalah error sistem.

Error pada sistem didefinisikan sebagai selisih antara nilai setpoint dan nilai aktual, yang dinyatakan dengan persamaan:

$$e(t) = T_{setpoint} - T(t) \quad (2.2)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan error ke dalam persamaan kontrol PID, maka diperoleh bentuk persamaan yang lebih spesifik terhadap sistem yang dikendalikan, yaitu:

$$u(t) = K_p (T_{setpoint} - T(t)) + K_i \int (T_{setpoint} - T(t)) dt + K_d \frac{d(T_{setpoint} - T(t))}{dt} \quad (2.3)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa sinyal kendali dipengaruhi oleh tiga komponen utama, yaitu proportional, integral, dan derivative. Komponen proportional berfungsi untuk memberikan respon yang sebanding dengan besar error yang terjadi, sehingga dapat mempercepat respon sistem menuju setpoint. Komponen integral berfungsi untuk mengakumulasi error terhadap waktu, sehingga mampu menghilangkan error steady-state. Sedangkan komponen derivative berfungsi untuk memprediksi perubahan error, sehingga dapat mengurangi overshoot dan meningkatkan kestabilan sistem.

Dalam penerapannya pada sistem pengendalian suhu air, nilai error diperoleh dari selisih antara suhu yang diinginkan (setpoint) dengan suhu aktual yang terukur oleh sensor. Sinyal kendali yang dihasilkan oleh kontrol PID

kemudian digunakan untuk mengatur daya pemanas, sehingga suhu air dapat mencapai dan mempertahankan nilai yang diinginkan secara stabil.

Dengan demikian, penggunaan kontrol PID pada sistem ini diharapkan mampu meningkatkan performa sistem dalam hal kecepatan respon, kestabilan, serta akurasi dalam mencapai suhu setpoint.

2.3 Metode Penentuan Parameter PID

Dalam penerapan pengendali PID, diperlukan proses penentuan nilai parameter penguatan yang terdiri dari konstanta proporsional (K_p), konstanta integral (K_i), dan konstanta derivatif (K_d). Penentuan nilai dari ketiga parameter tersebut sangat penting karena akan mempengaruhi performa sistem kontrol, seperti kecepatan respons sistem, tingkat kestabilan, serta besarnya kesalahan yang terjadi antara nilai keluaran (*output*) dan nilai yang diinginkan (*set point*). Proses penentuan parameter tersebut dikenal dengan istilah *tuning* PID [14].

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk melakukan proses *tuning* PID, di antaranya metode *Trial and Error*, metode Ziegler–Nichols, serta metode Cohen–Coon. Setiap metode memiliki karakteristik dan tingkat kompleksitas yang berbeda dalam menentukan parameter kontrol. Dalam penelitian ini digunakan metode *Trial and Error* karena metode tersebut relatif lebih sederhana serta mudah diterapkan pada sistem pengendalian suhu air [15].

2.3.1 Metode Trial and Error

Metode *Trial and Error* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menentukan nilai parameter PID dengan cara melakukan percobaan terhadap berbagai nilai parameter K_p , K_i , dan K_d secara bertahap sampai diperoleh respons sistem yang paling optimal. Proses ini dilakukan dengan mengamati perubahan respons sistem terhadap penyesuaian parameter kontrol hingga sistem mampu mencapai kondisi yang stabil serta dapat mendekati nilai *set point* dengan lebih cepat [16].

Menurut Katsuhiko Ogata dalam buku *Modern Control Engineering*, proses *tuning* PID menggunakan metode *Trial and Error* dilakukan dengan menyesuaikan

nilai parameter kontrol secara bertahap sambil mengamati respons sistem hingga diperoleh karakteristik sistem yang diinginkan [17].

Secara umum, langkah-langkah dalam metode *Trial and Error* dapat dilakukan dengan menentukan nilai awal parameter kontrol PID terlebih dahulu. Selanjutnya nilai konstanta proporsional (K_p) diatur hingga sistem menunjukkan respons yang cukup cepat. Setelah itu ditambahkan konstanta integral (K_i) untuk mengurangi kesalahan pada kondisi *steady-state*. Kemudian konstanta derivatif (K_d) ditambahkan untuk meningkatkan kestabilan sistem serta mengurangi terjadinya *overshoot*. Proses pengamatan terhadap respons sistem terus dilakukan hingga diperoleh kondisi sistem yang stabil dan mampu mencapai nilai *set point* yang telah ditentukan [18].

Dalam proses *tuning* menggunakan metode *Trial and Error*, beberapa parameter performa sistem biasanya diperhatikan, seperti waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), serta besarnya *overshoot* yang terjadi pada sistem. Dengan melakukan penyesuaian parameter secara bertahap, sistem kontrol dapat menghasilkan respons yang lebih stabil dan mampu mempertahankan suhu air sesuai dengan nilai *set point* yang diinginkan [19].

Pada penelitian ini, metode *Trial and Error* digunakan untuk menentukan nilai parameter PID pada sistem monitoring dan pengendalian suhu air. Parameter yang diperoleh dari proses *tuning* tersebut kemudian digunakan untuk mengatur kerja pemanas air sehingga suhu air dapat mencapai nilai yang diharapkan dan tetap stabil selama proses pengujian berlangsung.

2.3.2 Analisis Karakteristik Sistem

Dalam analisis sistem kontrol, khususnya pada sistem yang menggunakan metode Proportional Integral Derivative (PID), diperlukan beberapa parameter untuk mengevaluasi kinerja respon sistem terhadap perubahan masukan (input). Parameter-parameter ini digunakan untuk mengetahui seberapa cepat dan seberapa baik sistem dalam mencapai serta mempertahankan nilai *set point* yang diinginkan. Beberapa karakteristik respon sistem yang umum digunakan antara lain *rise time*, *overshoot*, *settling time*, dan *steady-state error*.

1. Rise Time (Waktu Naik)

Rise time adalah waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk mencapai nilai set point pertama kali, yang umumnya diukur dari 10% hingga 90% dari nilai set point. Parameter ini menunjukkan kecepatan awal respon sistem dalam mencapai kondisi yang diinginkan.

Secara umum, rise time dapat dinyatakan sebagai:

$$t_r = \text{waktu dari 10\% hingga 90\% menuju setpoint} \quad (2.4)$$

Semakin kecil nilai rise time, maka sistem akan semakin cepat dalam merespon perubahan menuju nilai set point.

2. Overshoot (Persentase Lewatan Maksimum)

Overshoot adalah besarnya nilai maksimum respon sistem yang melebihi nilai set point. Parameter ini biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase terhadap nilai set point.

Persentase overshoot dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$M_p = \frac{y_{\max} - y_{ss}}{y_{ss}} \times 100\% \quad (2.5)$$

Dimana:

y_{\max} = Nilai maksimum respon system

y_{ss} = nilai steady-state (nilai set point)

Overshoot yang besar menunjukkan bahwa sistem mengalami kelebihan respon yang signifikan sebelum mencapai kondisi stabil.

3. Settling Time (Waktu Tunak)

Settling time adalah waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk mencapai kondisi stabil dan berada dalam batas toleransi tertentu terhadap nilai set point, biasanya dalam rentang $\pm 5\%$ dari nilai set point.

Secara umum, settling time dinyatakan sebagai:

t_s waktu ketika output berada dalam batas $\pm 5\%$ dari setpoint

Semakin kecil nilai settling time, maka sistem akan semakin cepat mencapai kondisi stabil.

4. Steady-State Error (Kesalahan Keadaan Tunak)

Steady-state error adalah selisih antara nilai keluaran sistem dengan nilai set point ketika sistem telah mencapai kondisi stabil.

Steady-state error dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$e_{ss} = \text{setpoint} - \text{output akhir} \quad (2.6)$$

Nilai steady-state error yang kecil menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai nilai set point dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Dengan adanya parameter-parameter tersebut, kinerja sistem kontrol PID pada pengendalian suhu air dapat dianalisis secara lebih terukur. Parameter rise time menunjukkan kecepatan respon sistem, overshoot menunjukkan tingkat kelebihan respon, settling time menunjukkan kecepatan sistem mencapai kestabilan, dan steady-state error menunjukkan tingkat akurasi sistem terhadap nilai set point. Analisis terhadap parameter-parameter ini sangat penting untuk mengevaluasi performa sistem serta menentukan apakah sistem kontrol yang dirancang telah bekerja secara optimal.

2.3.3 Karakteristik Orde Sistem

Dalam sistem kontrol, orde sistem merupakan parameter yang menunjukkan kompleksitas respon dinamik suatu sistem. Orde sistem ditentukan berdasarkan jumlah elemen penyimpan energi atau orde tertinggi dari persamaan diferensial yang merepresentasikan sistem tersebut. Semakin tinggi orde sistem, maka respon yang dihasilkan akan semakin kompleks, seperti munculnya osilasi, overshoot, serta waktu stabil yang lebih lama.

Pada penelitian ini, sistem yang digunakan adalah sistem pemanasan air dengan media tangki. Berdasarkan karakteristik fisiknya, sistem ini memiliki satu elemen penyimpan energi utama, yaitu energi panas yang tersimpan dalam air. Oleh

karena itu, sistem pengendalian suhu air dapat didekati sebagai sistem orde satu (first order system).

- Sistem orde satu memiliki beberapa karakteristik utama, yaitu:
- Respon sistem meningkat secara bertahap menuju keadaan tunak (steady state)
- Tidak mengalami osilasi secara alami
- Memiliki satu konstanta waktu (time constant)
- Respon cenderung lambat namun stabil

1. Persamaan Sistem Orde Satu

Sistem orde satu secara umum dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi alih sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.7)$$

Dimana:

$G(s)$ = fungsi alih sistem

K = gain sistem

τ (tau) = konstanta waktu sistem

s = variabel Laplace

Selain itu, dalam domain waktu, respon sistem orde satu terhadap input step dapat dinyatakan sebagai:

$$T(t) = T_{akhir} + (T_{awal} - T_{akhir})e^{-t/\tau} \quad (2.8)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan suhu tidak terjadi secara instan, melainkan meningkat secara bertahap mengikuti kurva eksponensial hingga mendekati nilai set point.

2. Keterkaitan dengan Sistem Pemanas Air

Pada sistem yang dirancang dalam penelitian ini, proses pemanasan air dilakukan menggunakan elemen pemanas yang dikendalikan oleh PLC. Ketika

pemanas diaktifkan, suhu air tidak langsung mencapai nilai yang diinginkan, tetapi meningkat secara perlahan seiring waktu.

Pada sistem orde satu, konstanta waktu (τ) merupakan parameter penting yang menunjukkan kecepatan respon sistem. Secara teoritis, konstanta waktu didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai 63% dari perubahan total menuju kondisi steady-state.

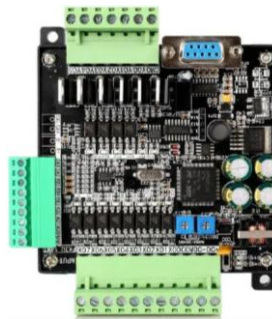
Nilai keluaran sistem pada saat mencapai 63% tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$T(t) = T_{awal} + 0.63 \times (T_{akhir} - T_{awal}) \quad (2.9)$$

Dengan demikian, konstanta waktu (τ) dapat ditentukan dari grafik respon sistem, yaitu pada saat nilai keluaran mencapai 63% dari perubahan total.

2.4 PLC FX-3U (Programmable Logic Controller)

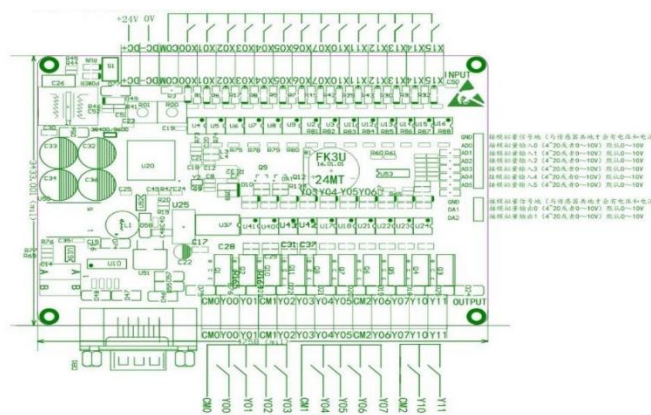
Programmable Logic Controller (PLC) merupakan suatu bentuk khusus dari sistem kontrol berbasis mikroprosesor yang dirancang untuk mengendalikan mesin maupun proses secara otomatis. PLC menggunakan memori yang dapat diprogram untuk menyimpan berbagai instruksi, sehingga mampu menjalankan fungsi-fungsi tertentu seperti logika, pewaktuan (timing), pencacahan (counting), maupun operasi aritmetika. Dengan kemampuan tersebut, PLC banyak digunakan dalam bidang otomasi industri karena fleksibilitas dan keandalannya dalam mengendalikan efisiensi proses produksi.



Gambar 2.1 Modul PLC

Programmable Logic Controller (PLC) pertama kali diperkenalkan oleh perusahaan General Motors (USA) pada tahun 1968. Pada awal pengembangannya,

PLC berfungsi sebagai pengganti rangkaian relay yang saat itu dianggap tidak fleksibel dan memerlukan biaya tinggi dalam penerapan sistem otomatisasi industri, khususnya pada proses sekuensial. Pada tahap awal, penggunaan PLC masih terbatas pada fungsi kontrol relay saja. Namun, seiring dengan perkembangan teknologi, PLC telah berkembang menjadi sebuah sistem kendali yang dapat diprogram secara fleksibel sesuai dengan kebutuhan pengguna.



Gambar 2.2 Schematic PLC

Secara umum, sebuah sistem PLC terdiri atas lima komponen dasar, yaitu:

1. **Central Processing Unit (CPU)**, berfungsi sebagai unit pengolah pusat yang mengendalikan seluruh operasi PLC.
2. **Memori**, digunakan untuk menyimpan instruksi dan data yang diperlukan dalam proses kendali.
3. **Power Supply**, menyediakan sumber daya listrik bagi seluruh bagian PLC.
4. **Input/Output Interface**, berfungsi sebagai penghubung antara PLC dengan perangkat masukan (sensor, tombol, saklar) maupun keluaran (aktuator, motor, lampu).
5. **Perangkat Pemrograman**, digunakan untuk menulis, mengedit, serta mengunduh program ke dalam PLC.

Dengan kelima komponen tersebut, PLC mampu melaksanakan berbagai fungsi kontrol secara lebih efisien, fleksibel, dan andal dibandingkan sistem relay konvensional.

Tabel 2.1 Spesifikasi PLC

Parameter	Spesifikasi
Seri	Mitsubishi PLC FX3U Series
Kapasitas Program	Hingga 64.000 langkah (64K step)
Kecepatan Eksekusi Instruksi	$\pm 0,065 \mu\text{s}$ per instruksi dasar
Tipe I/O Built-in	Tersedia 16, 32, 48, 64, 80, hingga 128 I/O (tergantung model)
Jenis Input	24 V DC, sink/source (tergantung model)
Jenis Output	Relay atau Transistor (Sink/Source)
High-Speed Counter	Hingga 100 kHz (built-in)
High-Speed I/O (Opsional)	Hingga 200 kHz menggunakan modul/adapter khusus
Ekspansi Modul	Digital I/O, Analog I/O, Komunikasi, Positioning/Motion, Counter, dsb
Komunikasi yang Didukung	RS-232, RS-422, RS-485, USB, Ethernet (menggunakan modul tambahan)
Fungsi Tambahan	PID Control, Pulse Output, High-speed processing, Positioning control
Memori Data Internal	Register data, timer/counter, auxiliary relays (kapasitas bervariasi per model)
Tegangan Catu Daya	100–240 V AC atau 24 V DC (tergantung tipe)

Temperatur Operasional	0–55 °C
Fitur Keamanan	Password protection, self-diagnostic
Aplikasi Umum	Otomasi industri, kontrol mesin, conveyor, packaging, robotik sederhana

2.5 GX Developer

Dalam proses pemrograman, PLC memerlukan perangkat lunak (*software*) khusus yang digunakan untuk membuat serta mengelola program kendali. Pada PLC Mitsubishi, perangkat lunak yang digunakan adalah GX Developer. GX Developer merupakan *software* resmi yang hanya dapat digunakan untuk membuat program pada PLC Mitsubishi, sehingga tidak kompatibel dengan PLC dari merek lain.

Beberapa seri PLC Mitsubishi yang dapat diprogram menggunakan GX Developer antara lain seri FX3U, FX1N, FX2N, dan H Series. Dengan menggunakan perangkat lunak ini, pengguna dapat menuliskan instruksi, melakukan pengujian, serta mengunduh program ke dalam PLC sehingga sistem otomatisasi dapat berjalan sesuai dengan rancangan yang diinginkan.



Gambar 2.3 GX Developer

2.6 Arduino Nano

Arduino Nano merupakan papan mikrokontroler berukuran kecil yang berbasis pada chip ATmega328P. Mikrokontroler ini dirancang untuk aplikasi elektronika yang membutuhkan ruang terbatas, namun tetap memiliki fungsionalitas yang lengkap. Secara umum, Arduino Nano memiliki fitur serupa dengan Arduino Uno, tetapi hadir dalam bentuk yang lebih ringkas sehingga sangat sesuai untuk digunakan pada proyek miniatur maupun sistem tertanam (*embedded system*).



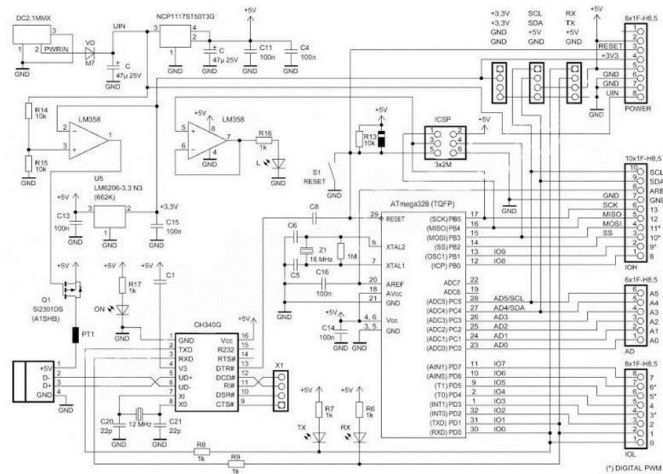
Gambar 2.4 Arduino Nano

Arduino Nano dilengkapi dengan 14 pin input/output digital (enam di antaranya dapat difungsikan sebagai output PWM), 8 pin input analog, serta mendukung berbagai protokol komunikasi seperti serial, I2C, dan SPI. Papan ini beroperasi pada tegangan 5 V dan dapat diprogram melalui koneksi USB Mini-B menggunakan perangkat lunak Arduino IDE. Dari sisi memori, Arduino Nano memiliki kapasitas 32 KB flash memory, 2 KB SRAM, serta 1 KB EEPROM, dengan kecepatan clock sebesar 16 MHz yang memungkinkan mikrokontroler ini menjalankan proses kendali secara *real-time*.

Tabel 2.2 Spesifikasi Arduino Nano

Spesifikasi	Keterangan
Mikrokontroler	Atmel ATmega 168 atau ATmega328
Tegangan Operasi	5V
Input Voltage (disarankan)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Pin Digital I/O	14 (6 pin digunakan sebagai output PWM)
Pins Input Analog	8
Arus DC per pin I/O	40 mA
Flash Memory	16KB (ATmega168) atau 32KB (ATmega328) 2KB digunakan oleh Bootlader
SRAM	1 KB (ATmega168) atau 2 KB (ATmega328)
EEROM	512 byte (ATmega168) atau 1KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz
Ukuran	1.85 cm x 4.3 cm

Keunggulan utama Arduino Nano terletak pada ukurannya yang kecil, konsumsi daya yang relatif rendah, serta kemudahan integrasi dengan berbagai sensor dan aktuator. Oleh karena itu, Arduino Nano banyak dimanfaatkan dalam aplikasi seperti sistem monitoring, pengendalian suhu, otomatisasi rumah, maupun pengembangan sistem berbasis Internet of Things (IoT), karena sifatnya yang fleksibel, ekonomis, dan mudah diprogram.



Gambar 2.5 Schematic Arduino Nano

2.7 Solenoid valve 2W-025-08

Solenoid valve merupakan katup otomatis yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik untuk mengendalikan aliran fluida seperti air, udara, minyak, maupun gas. Komponen utama solenoid valve terdiri dari kumparan (coil), plunger, pegas, dan badan katup. Saat coil dialiri tegangan listrik, medan magnet yang dihasilkan akan menarik plunger sehingga katup terbuka dan fluida dapat mengalir. Sebaliknya, ketika tegangan dihentikan, pegas akan mengembalikan plunger ke posisi semula sehingga aliran fluida tertutup.

Pada penelitian ini digunakan solenoid valve tipe 2W-025-08 dengan sistem Normally Closed (NC), yaitu katup yang dalam kondisi normal tertutup dan akan terbuka ketika mendapat suplai tegangan listrik. Solenoid valve ini menggunakan metode kerja direct acting sehingga dapat beroperasi tanpa memerlukan tekanan minimum pada saluran fluida. Material badan katup terbuat dari kuningan (brass) yang memiliki ketahanan korosi yang baik, sedangkan material seal menggunakan NBR yang cocok untuk berbagai jenis fluida umum.

Spesifikasi utama solenoid valve 2W-025-08 meliputi tegangan kerja AC 220 V, ukuran port 1/4 inci, diameter orifice 2,5 mm, tekanan kerja 0–0,7 MPa, serta rentang suhu operasi -10°C hingga 80°C . Solenoid valve ini banyak digunakan

pada sistem otomasi karena memiliki respon kerja yang cepat, mudah dikendalikan menggunakan mikrokontroler, dan memiliki konstruksi yang sederhana.

Tabel 2.3 Spesifikasi Solenoid

Parameter	Spesifikasi
Model	2W-025-08
Tipe	2/2 Way Normally Closed (NC)
Tegangan Kerja	AC 220 V
Ukuran Port	1/4 inci
Diameter Orifice	2,5 mm
Metode Kerja	Direct Acting
Tekanan Kerja	0–0,7 MPa
Suhu Operasi	-10°C hingga 80°C
Material Body	Brass (Kuningan)
Material Seal	NBR
Media Kerja	Air, udara, minyak, dan gas

2.8 Relay Omron MK3PN 24V

Relay Omron MK3PN 24V merupakan salah satu jenis *power relay* berukuran kecil yang banyak digunakan pada aplikasi industri dan sistem kontrol. Relay ini bekerja dengan tegangan kumparan sebesar 24 VDC, arus kumparan sebesar 66 mA, serta memiliki resistansi kumparan sekitar 430 Ω . Konsumsi daya pada relay ini berkisar antara 1,6 hingga 2,0 W.

Tabel 2.4 Spesifikasi Relay

Parameter	Spesifikasi
Tipe Relay	General Purpose Relay, 3PDT (3 Form C)
Tegangan Koil	24 V DC
Arus Koil	\pm 55–60 mA

Resistansi Koil	$\pm 430 \Omega$
Daya Koil	$\pm 1.4 - 2 \text{ W}$
Konfigurasi Kontak	3PDT (3 pole, masing-masing NO dan NC)
Material Kontak	Silver Alloy (Ag)
Rating Kontak	NO: 10 A @ 250 VAC / 30 VDC NC: 5 A @ 250 VAC / 30 VDC
Maksimum Tegangan Switching	250 VAC / 250 VDC
Resistansi Kontak	$\leq 100 \text{ m}\Omega$
Waktu Operasi (On)	$\leq 30 \text{ ms}$
Waktu Lepas (Off)	$\leq 20 \text{ ms}$
Frekuensi Operasi	Mekanik: ± 18.000 operasi/jam Elektrik: ± 1.800 operasi/jam
Tipe Terminal / Soket	Plug-in, 11-pin (octal)
Indikator	Opsional: indikator mekanik / LED (tergantung varian)
Suhu Operasional	-10°C hingga $+40^{\circ}\text{C}$ (umum)
Jenis Aplikasi	Kontrol industri, panel otomatis, PLC, motor starter, mesin produksi

Dengan spesifikasi tersebut, Relay Omron MK3PN 24V mampu digunakan pada berbagai sistem kendali untuk menghubungkan maupun memutuskan rangkaian listrik sesuai dengan sinyal kendali yang diterima. Komponen ini banyak diaplikasikan pada rangkaian otomasi, proteksi, serta pengendalian beban berdaya rendah hingga menengah karena memiliki keandalan yang tinggi dan umur pakai yang relatif panjang.



Gambar 2.6 Relay Omron MK3PN 24V

Relay Omron MK3PN 24V memiliki konfigurasi kontak 3PDT (Triple Pole Double Throw) dengan material kontak berbahan perak (Ag). Relay ini mampu menangani tegangan maksimum hingga 250 V AC maupun 250 V DC, dengan arus maksimum sebesar 3 A untuk kedua jenis tegangan tersebut.

Dari sisi kinerja, relay ini memiliki waktu operasi ≤ 30 ms dan waktu reset ≤ 20 ms pada tegangan operasi terukur. Frekuensi operasinya dapat mencapai 18.000 kali/jam secara mekanis dan sekitar 1.800 kali/jam pada beban terukur. Selain itu, relay ini memiliki ketahanan isolasi ≥ 100 M Ω pada pengujian dengan DC 500 V, sehingga menjamin keamanan dan keandalannya dalam aplikasi industri.

Relay Omron MK3PN 24V juga dilengkapi dengan beberapa fitur tambahan, antara lain indikator operasi LED, struktur tertutup untuk melindungi komponen internal, serta terminal plug-in yang kompatibel dengan berbagai jenis soket, seperti PF113A dan PL11. Dengan spesifikasi tersebut, relay ini sangat sesuai digunakan pada aplikasi kontrol industri, sistem otomasi, pengendalian daya, serta peralatan elektronik. Selain itu, komponen ini telah memenuhi standar RoHS, yang membatasi penggunaan bahan berbahaya dalam proses manufaktur.

2.9 Pompa Air Mini DC 12V

Pompa air merupakan suatu alat yang berfungsi untuk memindahkan atau mengalirkan cairan dari satu tempat ke tempat lain melalui media pipa. Proses pemindahan ini dilakukan dengan memberikan energi pada cairan sehingga dapat bergerak secara terus-menerus sesuai dengan kebutuhan sistem.

Tabel 2.5 Spesifikasi Pompa Air

Spesifikasi	Keterangan
Tipe	MLR-PP25W
Sumber tenaga	Aki / power supply / DC 12V
Volts	12V
Amps	2.1 A
Daya	25 Watt
Aliran air	4 liter per menit
Tekanan	80 Psi / 5,5 bar
Note	BBRG, thermal protected
Suhu Operasional	-55°C hingga +83°C
Umur Pemakaian	±200.000 jam

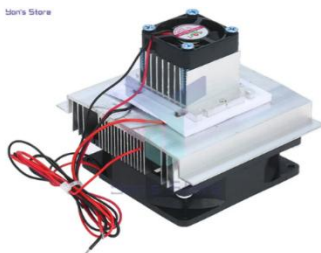
Pompa air yang digunakan pada penelitian ini adalah pompa air mini 12 VDC. Pompa jenis ini bekerja dengan menggunakan tegangan minimum sebesar 12 volt dengan kebutuhan arus sekitar 5 ampere. Pompa air mini 12 VDC umumnya digunakan pada aplikasi skala kecil, seperti sistem sirkulasi air, pendingin, maupun proyek otomasi berbasis mikrokontroler, karena bentuknya yang ringkas dan konsumsi dayanya yang relatif rendah. Bentuk fisik dari pompa air mini 12 VDC dapat dilihat

**Gambar 2.7** Pompa Air Mini DC 12V

2.10 Peltier

Pada sistem pendinginan yang digunakan, dilakukan analisis untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas yang terjadi pada air. Massa air

ditentukan berdasarkan hubungan antara volume dan massa jenis, dimana massa air dinyatakan sebagai $m = \rho \cdot V$, dengan ρ sebagai massa jenis fluida dan V sebagai volume. Selanjutnya, perubahan suhu air dinyatakan menggunakan persamaan $\Delta T = T_{awal} - T_{akhir}$, yang menunjukkan selisih antara suhu awal dan suhu akhir selama proses pendinginan berlangsung.



Gambar 2.8 Peltier

Energi panas yang dilepaskan oleh air selama proses pendinginan dihitung menggunakan persamaan kalor

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.10)$$

dimana Q merupakan energi panas, m adalah massa air, c adalah kalor jenis air, dan ΔT adalah perubahan suhu. Persamaan ini menunjukkan bahwa energi panas yang dilepaskan sebanding dengan massa air dan perubahan suhu yang terjadi.

Karena sistem pendinginan tidak menggunakan pompa, maka aliran fluida yang terjadi relatif kecil dan proses perpindahan panas lebih didominasi oleh konveksi alami. Oleh karena itu, daya pendinginan sistem dapat ditentukan berdasarkan hubungan antara energi dan waktu menggunakan persamaan

$$P = \frac{Q}{t} \quad (2.11)$$

dimana P adalah daya dan t adalah waktu yang dibutuhkan selama proses pendinginan.

Selain itu, berdasarkan karakteristik respon suhu terhadap waktu, sistem pendinginan dapat dimodelkan sebagai Sistem Orde Satu, dimana respon sistem mengikuti pola eksponensial menuju kondisi stabil. Konstanta waktu (τ) pada sistem ini ditentukan saat suhu mencapai 63% dari perubahan total, yang

dinyatakan dengan persamaan $T_{63\%} = T_{awal} - 0,63(T_{awal} - T_{akhir})$. Model matematis sistem pendinginan tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau}(T(t) - T_{set}) \quad (2.12)$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa laju perubahan suhu berbanding lurus dengan selisih antara suhu aktual dan suhu lingkungan atau setpoint, serta dipengaruhi oleh konstanta waktu sistem. Dengan demikian, analisis menggunakan persamaan-persamaan tersebut dapat digunakan untuk memahami perilaku sistem pendinginan secara menyeluruh tanpa bergantung pada nilai numerik tertentu.

Tabel 2.6 Spesifikasi Peltier

Spesifikasi	Keterangan
Model	TEC1-12706
Tegangan Kerja Maksimal	12 Volt DC
Tegangan Optimal	12 V DC
Arus Maksimal	6 A
Arus Optimal	4~5 A
Perbedaan Suhu Maksimal (ΔT)	66°C (tanpa beban panas)
Daya Maksimal	±60 W
Dimensi Fisik	40 mm x 40 mm x 3.6 mm
Panjang Kabel	±300 mm (tergantung produk)
Berat	±25 gram
Bahan	Keramik + Semikonduktor
Suhu Operasional	-55°C hingga +83°C
Umur Pemakaian	±200.000 jam

2.11 DS18B20

Sensor DS18B20 merupakan salah satu jenis sensor suhu analog yang banyak digunakan dalam sistem elektronika dan otomasi. Sensor ini memiliki tingkat akurasi yang cukup baik serta kemudahan dalam implementasinya. Prinsip

kerja DS18B20 adalah mengubah besaran suhu menjadi tegangan listrik yang bersifat proporsional terhadap perubahan suhu.

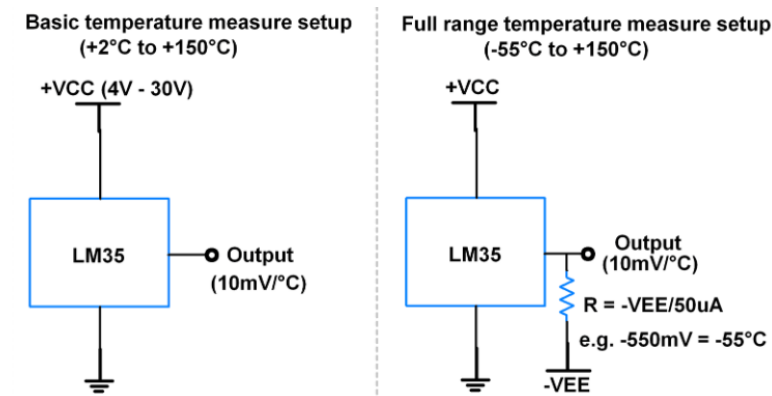
Sensor DS18B20 menghasilkan tegangan keluaran linier sebesar $10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, sehingga misalnya pada suhu 30°C , keluaran yang dihasilkan adalah sekitar 300 mV . Rentang pengukuran suhu yang dimiliki sensor ini adalah antara -55°C hingga $+150^{\circ}\text{C}$, dengan tingkat ketelitian sekitar $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada suhu 25°C . Karakteristik tersebut menjadikan DS18B20 sebagai sensor yang andal dalam berbagai aplikasi, khususnya pada sistem monitoring suhu, kontrol otomatis, serta penelitian yang memerlukan akurasi pengukuran temperatur.



Gambar 2.9 Sensor DS18B20

Keunggulan sensor DS18B20 dibandingkan dengan sensor suhu lainnya terletak pada kemudahannya, karena tidak memerlukan kalibrasi eksternal. Selain itu, DS18B20 memiliki konsumsi arus yang relatif rendah serta bentuk kemasan yang kecil, sehingga memudahkan integrasinya pada berbagai perangkat elektronika. Sensor ini juga telah melalui proses factory calibrated, sehingga dapat langsung digunakan pada sistem akuisisi data maupun sistem kendali suhu tanpa perlu dilakukan pengaturan tambahan.

Keluaran DS18B20 berupa sinyal analog dengan karakteristik linier, sehingga dapat dengan mudah diakuisisi oleh perangkat pengendali seperti mikrokontroler, Arduino, maupun PLC yang dilengkapi dengan modul input analog. Dengan keunggulan tersebut, DS18B20 banyak digunakan pada berbagai aplikasi, antara lain sistem pemantauan suhu ruangan, pengendalian pendingin dan pemanas, serta aplikasi industri maupun akademik yang memerlukan pengukuran suhu secara real-time.



Gambar 2.10 Skematik Sensor DS18B20

2.12 Water Heater

Water heater atau pemanas air merupakan perangkat yang digunakan untuk menaikkan suhu air dengan memanfaatkan energi listrik yang diubah menjadi energi panas. Salah satu jenis water heater yang umum digunakan adalah pemanas celup (immersion heater), dimana elemen pemanas dicelupkan langsung ke dalam air sehingga proses perpindahan panas berlangsung secara konduksi dan konveksi secara langsung. Prinsip kerja water heater didasarkan pada pemanasan resistif, yaitu arus listrik yang mengalir melalui elemen pemanas akan menghasilkan panas akibat hambatan listrik, yang kemudian ditransfer ke air hingga mencapai suhu yang diinginkan.



Gambar 2.11 Water Heater

Dalam menganalisis kinerja water heater, diperlukan perhitungan energi panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu air. Energi panas tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan kalor yaitu

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.13)$$

dimana Q adalah energi panas (Joule), m adalah massa air (kg), c adalah kalor jenis air (4186 J/kg°C), dan ΔT adalah perubahan suhu (°C) yang diperoleh

dari selisih suhu akhir dan suhu awal. Persamaan ini menunjukkan bahwa semakin besar massa air dan perubahan suhu yang diinginkan, maka energi yang dibutuhkan juga akan semakin besar.

Selain energi, parameter penting lainnya adalah daya listrik (Watt) yang digunakan oleh water heater. Daya dapat ditentukan berdasarkan hubungan antara energi dan waktu menggunakan persamaan

$$P = \frac{Q}{t} \quad (2.14)$$

dimana P adalah daya (Watt) dan t adalah waktu pemanasan (detik). Persamaan ini menunjukkan bahwa untuk mencapai pemanasan yang lebih cepat (waktu kecil), dibutuhkan daya yang lebih besar. Sebaliknya, jika daya yang digunakan kecil, maka waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu setpoint akan lebih lama.

Di sisi lain, hubungan antara daya listrik, tegangan, dan arus dapat dijelaskan menggunakan Hukum Ohm dan persamaan daya listrik, yaitu

$$P = V \cdot I \quad (2.15)$$

dimana V adalah tegangan (Volt) dan I adalah arus (Ampere). Persamaan ini penting dalam menentukan spesifikasi komponen listrik seperti heater dan sumber daya yang digunakan. Selain itu, hambatan elemen pemanas juga dapat dihitung menggunakan persamaan

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.16)$$

yang menunjukkan bahwa besar kecilnya hambatan akan mempengaruhi jumlah panas yang dihasilkan.

Berdasarkan karakteristik respon suhu terhadap waktu, sistem water heater umumnya dapat dimodelkan sebagai Sistem Orde Satu, dimana perubahan suhu berlangsung secara bertahap mengikuti kurva eksponensial menuju nilai setpoint. Model matematis sistem ini dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} (T_{set} - T(t)) \quad (2.17)$$

Konstanta waktu (τ) pada sistem ini menunjukkan kecepatan respon sistem dalam mencapai suhu yang diinginkan, dimana semakin kecil nilai τ maka respon sistem akan semakin cepat. Dengan demikian, analisis menggunakan persamaan

energi, daya, dan model sistem sangat penting untuk menentukan performa water heater serta efisiensi proses pemanasan yang terjadi.

2.13 Sensor Jarak HC-SR04

Sensor ultrasonik HC-SR04 merupakan sensor jarak yang bekerja dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik untuk mengukur jarak antara sensor dan suatu objek. Sensor ini banyak digunakan pada sistem otomasi, robotika, serta aplikasi pengukuran jarak karena memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dan mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler maupun PLC melalui rangkaian tambahan.

HC-SR04 bekerja dengan prinsip *time of flight*, yaitu menghitung waktu tempuh gelombang ultrasonik dari sensor menuju objek dan kembali lagi ke sensor. Sensor ini memiliki dua transduser, yaitu *transmitter* yang berfungsi memancarkan gelombang ultrasonik dengan frekuensi sekitar 40 kHz, serta *receiver* yang berfungsi menerima gelombang pantul dari objek. Selisih waktu antara pemancaran dan penerimaan sinyal digunakan untuk menentukan jarak objek terhadap sensor.



Gambar 2.12 Ultrasonik

Sensor HC-SR04 memiliki empat pin utama, yaitu VCC, Trig, Echo, dan GND. Pin VCC digunakan sebagai sumber tegangan sebesar 5 V DC, sedangkan pin GND sebagai ground. Pin Trig berfungsi sebagai pemicu untuk memulai pengukuran dengan memberikan pulsa logika tinggi selama minimal 10 mikrodetik. Setelah itu, sensor akan memancarkan gelombang ultrasonik dan pin Echo akan menghasilkan sinyal logika tinggi selama waktu tertentu yang sebanding dengan jarak objek yang terdeteksi.

Perhitungan jarak pada sensor HC-SR04 dilakukan berdasarkan kecepatan rambat gelombang suara di udara, yaitu sekitar 343 m/s pada suhu ruang. Jarak dapat

$$s = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2.18)$$

dihitung dengan membagi waktu pantulan sinyal dengan dua, karena gelombang menempuh perjalanan pergi dan pulang. Sensor ini umumnya memiliki jangkauan pengukuran antara 2 cm hingga 400 cm dengan sudut deteksi sekitar 15 derajat, sehingga cukup efektif untuk mendeteksi objek di area tertentu.

Tabel 2.7 Sensor HC-SR04

Parameter	Spesifikasi
Jenis Sensor	Sensor ultrasonik
Model	HC-SR04
Tegangan Kerja	5 V DC
Arus Kerja	±15 mA
Frekuensi Ultrasonik	40 kHz
Jarak Minimum	2 cm
Jarak Maksimum	400 cm
Sudut Deteksi	±15°
Metode Pengukuran	<i>Time of flight</i>
Pin Input	<i>Trig</i>
Pin Output	<i>Echo</i>
Waktu Pulsa <i>Trigger</i>	≥10 μs
Resolusi Pengukuran	±0,3 cm
Suhu Operasi	0 °C – 40 °C
Media Perambatan	Udara