

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

1.1 Waktu Dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang bulan Februari 2025 – Januari 2026, dimulai dari tahap studi literatur, perancangan sistem, akuisisi data, pelatihan model *machine learning*, integrasi *rule-based system* dan *reinforcement learning*, hingga pengujian prototipe. Tempat penelitian berlokasi di laboratorium teknik elektro Universitas Surabaya. Objek penelitian berupa simulasi lingkungan dengan potensi kebakaran di laboratorium. Pengambilan data dilakukan pada lingkungan simulasi dengan memperhatikan aspek keselamatan laboratorium dan protokol penelitian yang berlaku.

1.2 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode simulasi eksperimental dan rekayasa (*engineering research*) dengan pendekatan pengembangan prototipe yang mengintegrasikan sistem berbasis aturan (*rule-based system*) dan pembelajaran penguatan (*reinforcement learning*). Pendekatan ini digunakan untuk merancang, membangun, dan menguji prototipe sistem deteksi dini api berbasis sensor yang berfungsi sebagai pemicu aktivasi sistem pemadaman kebakaran otomatis pada lingkungan terkontrol, dengan fokus pada keakuratan dan keandalan identifikasi kondisi api dan non-api.

Dalam arsitektur sistem, *rule-based system* berperan sebagai dasar pengambilan keputusan awal yang bersifat deterministik dan mudah diinterpretasikan. Namun sistem tidak hanya bergantung pada aturan statis, melainkan ditingkatkan melalui penerapan *reinforcement learning* yang berfungsi untuk menyesuaikan bobot kepercayaan aturan secara adaptif berdasarkan umpan balik keputusan selama tahap pelatihan. Dengan mekanisme ini, sistem tidak terikat pada aturan yang bersifat tetap, tetapi mampu memperkuat aturan yang terbukti konsisten dan melemahkan aturan yang sering menghasilkan kesalahan, sehingga menghasilkan keputusan yang lebih andal dibandingkan *rule-based system* murni. Hasil deteksi api yang telah dioptimalkan secara adaptif ini kemudian digunakan sebagai sinyal kontrol untuk mengaktifkan *fire suppression system*.

1.2.1 Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh landasan teori yang berkaitan dengan *fire suppression system*, karakteristik *infrared api*, *IR flame sensor*, Raspberry pi pico, serta *rule-based system*, dan *machine learning* dengan pendekatan *reinforcement learning* untuk identifikasi api. Sumber literatur meliputi buku teks, jurnal ilmiah, prosiding, dan penelitian terdahulu yang relevan.

Hasil studi literatur digunakan sebagai dasar dalam menentukan arsitektur prototipe, pemilihan komponen, penentuan skenario pengujian, algoritma *reinforcement learning* yang sesuai untuk sistem deteksi api, dan aktivasi *fire suppression system*.

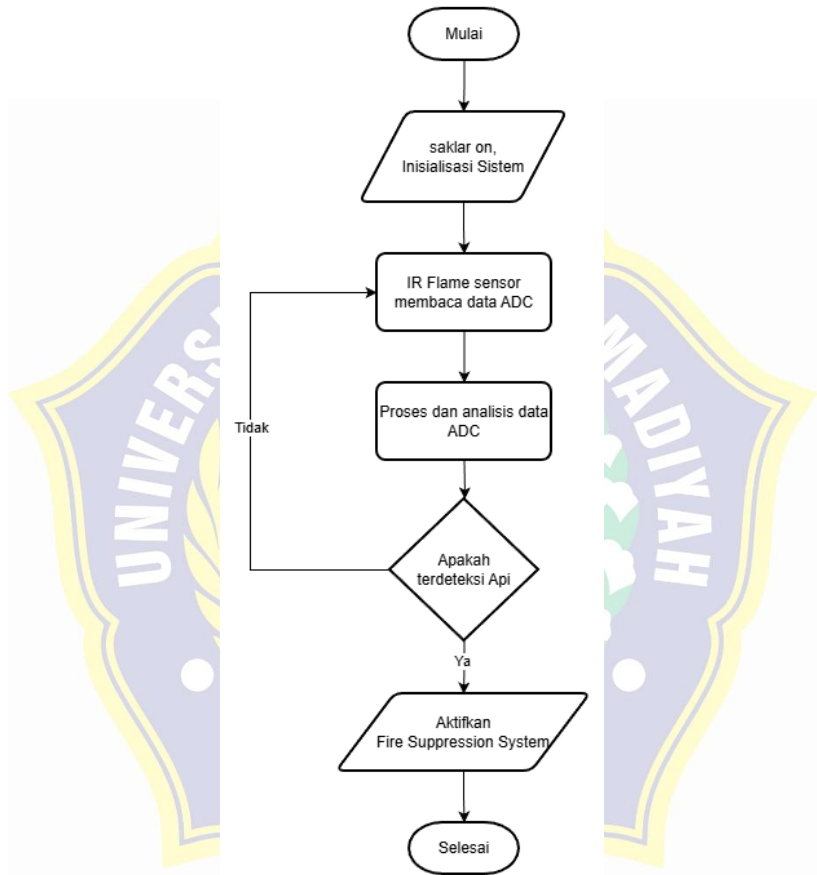
1.2.2 Studi empirik

Studi empirik dilakukan melalui pengujian langsung untuk memperoleh data nyata sekaligus mengevaluasi kinerja sistem. Pengujian mencakup dua aspek utama, yaitu akuisisi data sensor oleh raspberry pi pico menggunakan *rule-base system* dan *reinforcement learning* dan pengujian respons *fire suppression system*.

Akuisisi data dilakukan pada berbagai skenario kondisi “api dan non-api”, *IR Flame sensor* dan raspberry pi pico digunakan untuk merekam nilai ADC, yang disimpan sebagai data set berlabel untuk pelatihan dan evaluasi *rule-base system* dan *reinforcement learning*. Studi empirik juga mencakup pengujian fungsi *fire suppression system*, meliputi aktivasi relay dan solenoid valve. Dengan demikian, studi empirik berfungsi sebagai sumber data pembelajaran *rule-base system* dan *reinforcement learning* sekaligus validasi fungsional sistem pemadaman pada kondisi operasional nyata.

1.3 Konsep Penelitian

1.3.1 *Flowchart* kerja sistem



Gambar 3. 1 *Flowchart* kerja sistem

a. Mulai

Flowchart diawali dengan kondisi “Mulai”, yang menandakan sistem diaktifkan ketika raspberry pi pico mendapatkan catu daya dan program dijalankan. Pada tahap ini seluruh seluruh sistem siap beroperasi sesuai fungsinya.

b. Inisialisasi sistem

Inisialisasi sistem, yaitu konfigurasi awal seluruh komponen agar sistem siap beroperasi. Tahap ini mencakup pengaturan pin input analog, aktivasi dan konfigurasi ADC internal Raspberry Pi Pico, *IR flame sensor*, serta penetapan parameter sistem seperti interval pembacaan data dan kondisi awal logika deteksi. Inisialisasi ini bertujuan untuk memastikan proses akuisisi data berjalan stabil dan konsisten sejak awal sistem beroperasi.

c. Akuisisi data ADC oleh *IR flame sensor*

Setelah sistem terinisialisasi, *IR Flame sensor* mulai mendeteksi radiasi inframerah dari lingkungan sekitar. Sinyal analog yang dihasilkan sensor dibaca secara periodik oleh Raspberry Pi Pico dan dikonversi menjadi data ADC. Proses akuisisi data ini dilakukan secara kontinu sebagai bagian dari pemantauan real-time terhadap kondisi lingkungan, sehingga setiap perubahan karakteristik radiasi inframerah dapat segera direkam oleh sistem.

d. Proses dan analisis data ADC untuk deteksi api

Data ADC hasil pembacaan sensor selanjutnya diproses dan dianalisis untuk menentukan kondisi lingkungan. Pada tahap ini, evaluasi nilai ADC dilakukan berdasarkan metode deteksi yang telah ditetapkan, melalui *rule-base system* dan *reinforcement learning*. Hasil analisis digunakan untuk menjawab keputusan “*Apakah terdeteksi api*”. Jika hasilnya tidak terdeteksi api, sistem kembali ke tahap akuisisi data dan terus melakukan pemantauan secara berulang (looping). Mekanisme ini memastikan sistem selalu berada dalam kondisi siaga.

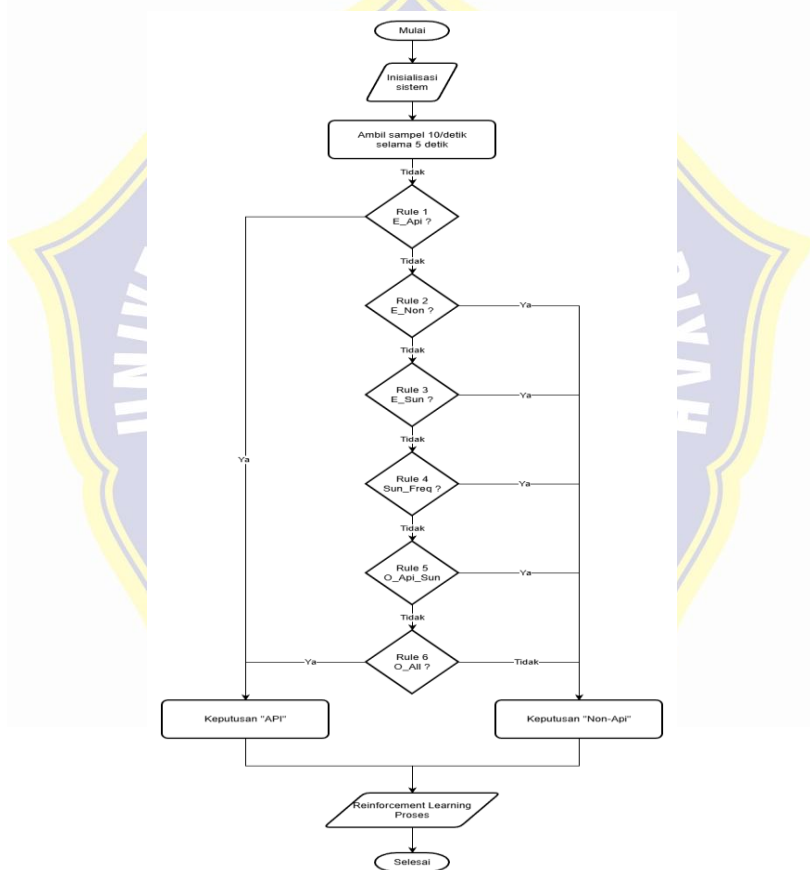
e. Aktivasi *fire suppression system*

Apabila hasil analisis menyatakan bahwa api terdeteksi, sistem akan mengirimkan sinyal kontrol untuk mengaktifkan *fire suppression system* sebagai respon terhadap kondisi darurat. Setelah sistem pemadaman diaktifkan, alur program mencapai tahap *Selesai*, yang menandakan berakhirnya satu siklus operasi sistem aktivasi *fire suppression system* dan Penghentian Proses.

f. Selesai

Proses berakhir setelah *fire suppression aktif*. Dalam implementasi nyata, sistem biasanya kembali ke mode pemantauan, namun pada flowchart ini ditampilkan sebagai kondisi “selesai” untuk memperjelas alur logika.

1.3.2 Flowchart rule-based system

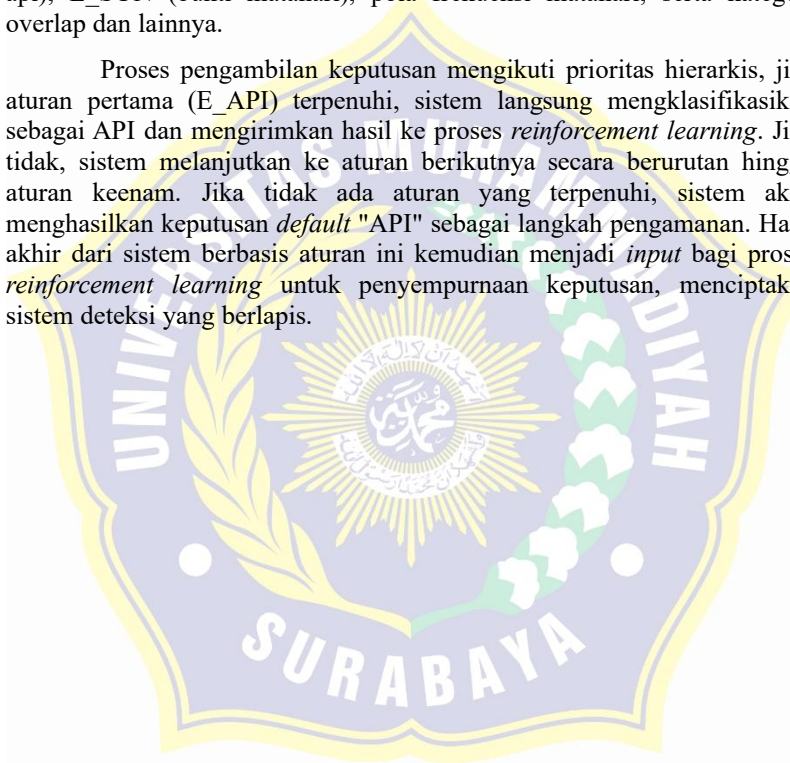


Gambar 3. 2 Flowchart rule-based System

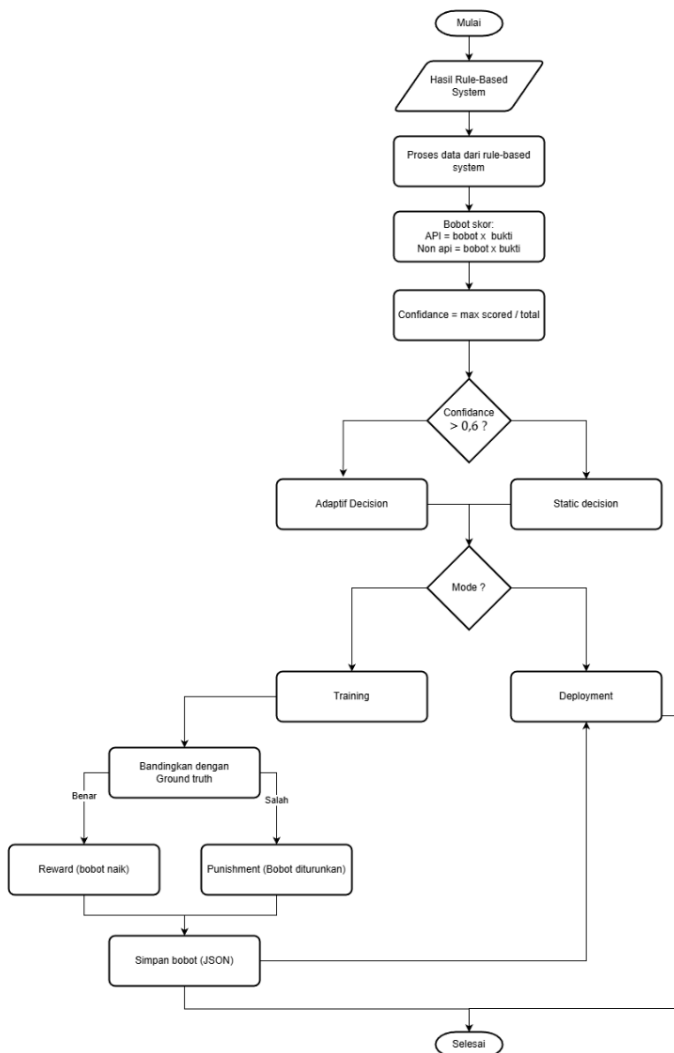
Flowchart rule-based System menggambarkan alur kerja sistem berbasis aturan (rule-based system) untuk mendeteksi api menggunakan *IR*

Flame sensor. Sistem dimulai dengan inialisasi perangkat keras dan perangkat lunak, kemudian mengambil data ADC dari sensor dengan kecepatan 10 sampel per detik selama 5 detik, menghasilkan total 50 data untuk dianalisis. Data tersebut kemudian dievaluasi melalui enam aturan berurutan yang telah ditetapkan, di mana setiap aturan memeriksa keberadaan kategori data ADC, yaitu E_API (bukti api), E_NON (bukti non-api), E_SUN (bukti matahari), pola frekuensi matahari, serta kategori overlap dan lainnya.

Proses pengambilan keputusan mengikuti prioritas hierarkis, jika aturan pertama (E_API) terpenuhi, sistem langsung mengklasifikasikan sebagai API dan mengirimkan hasil ke proses *reinforcement learning*. Jika tidak, sistem melanjutkan ke aturan berikutnya secara berurutan hingga aturan keenam. Jika tidak ada aturan yang terpenuhi, sistem akan menghasilkan keputusan *default* "API" sebagai langkah pengamanan. Hasil akhir dari sistem berbasis aturan ini kemudian menjadi *input* bagi proses *reinforcement learning* untuk penyempurnaan keputusan, menciptakan sistem deteksi yang berlapis.



1.3.3 Flowchart reinforcement learning



Gambar 3. 3 Flowchart reinforcement learning

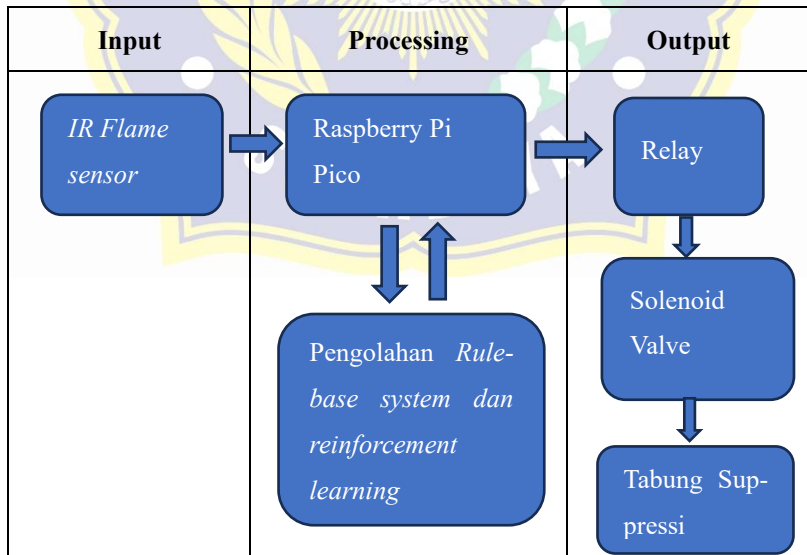
Flowchart berikut menggambarkan mekanisme reinforcement learning yang bekerja sebagai lapisan pengambilan keputusan tambahan

setelah *rule-based system* menghasilkan keputusan awal. Proses dimulai dengan mengambil hasil dari *rule-based system* sebagai input, kemudian menghitung skor berbobot untuk dua kemungkinan keluaran, Api dan Non-Api. Sistem kemudian menghitung tingkat keyakinan (*confidence*) dengan membandingkan skor tertinggi terhadap total skor, jika *confidence* melebihi 60%, sistem akan menggunakan keputusan adaptif, namun jika tidak mencapai ambang batas tersebut, sistem akan tetap menggunakan keputusan statis dari *rule-based system*.

Setelah keputusan dihasilkan, sistem akan mengecek mode operasi yang sedang berjalan. Jika dalam mode training, keputusan tersebut akan dibandingkan dengan *ground truth*. Apabila keputusan benar, sistem akan memberikan *reward* dengan menaikkan bobot *rule data* ADC pada *rule-based system*. Namun apabila salah, sistem memberikan *punishment* dengan menurunkan bobot *rule data* ADC pada *rule-based system*. Perubahan bobot ini kemudian disimpan ke dalam file JSON untuk mempertahankan pembelajaran sistem. Jika dalam mode *deployment*, proses langsung berakhir tanpa penyesuaian bobot. Dengan mekanisme ini, sistem mampu belajar dan meningkatkan akurasi secara bertahap berdasarkan pengalaman nyata.

1.3.4 Blok diagram sistem

Tabel 3. 1 Blok diagram sistem



a. Input

Input sistem berupa *IR Flame sensor* yang berfungsi mendeteksi radiasi inframerah dari nyala api.

b. Proses

- 1) Prapemrosesan data, raspberry pi pico menerima sinyal dari *IR Flame sensor* kemudian dikonversi menjadi data ADC.
- 2) Penerapan *rule-based system* dilakukan sebagai mekanisme deteksi awal, yang selanjutnya dioptimalkan menggunakan pendekatan *reinforcement learning* sehingga memungkinkan sistem melakukan klasifikasi api dan non-api secara adaptif berdasarkan data sensor yang diterima.

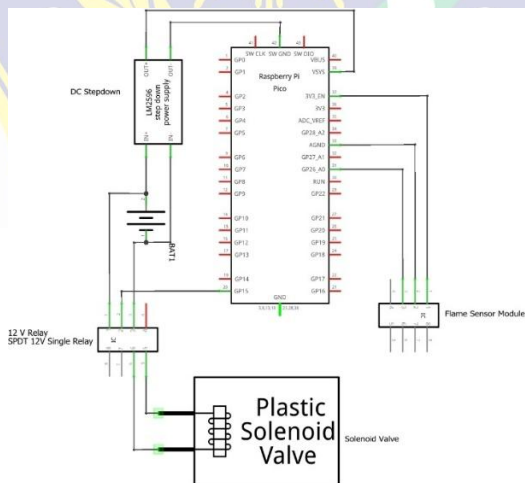
c. Output

Output sistem berupa aktivasi relay yang mengendalikan solenoid valve untuk membuka aliran media pemadam dari tabung supresi ketika api terdeteksi.

1.3.5 Perancangan sistem

a. Perancangan *Hardware*

1) Skematik alat



Gambar 3. 4 Skematik alat

2) Lokasi penempatan pin

Tabel 3. 2 Konfigurasi Pin

No	Komponen	Pin Komponen	Pin Pico	Keterangan
1	<i>IR Flame sensor</i>	AO	GP26	Membaca sinyal analog radiasi inframerah
2	<i>IR Flame sensor</i>	VCC	3V3	Catu daya sensor
3	<i>IR Flame sensor</i>	GND	GND	Ground sistem
4	Relay	IN	GP15	Kontrol relay dari Pico
5	Relay	VCC	5 V (dari Baterai)	Catu daya relay
6	Relay	GND	GND	Ground bersama
7	Solenoid	(+)	NC Relay	Daya dikendalikan relay
8	Solenoid	(-)	Ground	Jalur balik arus
9	DC-DC Stepdown	Input +	Baterai 12V	Tegangan masuk

10	DC-DC Stepdown	Output +	VSYS/ 5 V Pico	Tegangan keluar 5 V
11	DC-DC Stepdown	GND	GND baterai	Ground bersama

b. Perangkat lunak (*software*)

Tabel 3. 3 *Software* pendukung

No	Perangkat Lunak	Fungsi
1	MicroPhyton	Kontrol sistem, akuisisi data, inferensi ML
2	Thonnya IDE	Pengembangan dan debugging program pico
3	Phyton	Pelatihan dan evaluasi <i>rule-based system</i> dan <i>reinforcement learning</i>
4	Microsoft Excel	Validasi dan pemeriksaan dataset

1.3.6 Pengadaan alat dan bahan

a. Perangkat utama sitem

Tabel 3. 4 Alat dan bahan

No	Alat/Bahan	Jumlah
1	Raspberry Pi Pico	1
2	<i>IR Flame sensor</i>	1

3	<i>Solenoid Valve</i>	1
4	Relay	1
5	<i>DC-DC Stepdown</i>	1
6	Baterai	1
7	Tabung Suppresi	1

b. Perangkat pendukung

Tabel 3. 5 Bahan pendukung

NO	Alat / Bahan	Jumlah	Fungsi
1	Kabel Jumper	Secukupnya	Penghubung antar komponen
2	Kabel USB A – Type C	1	Pemrograman dan catu daya pico
3	<i>Breadboard</i>	1	Media perakitan
4	Laptop	1	Pemrograman, pelatihan, dan analisis data
5	Multi Meter	1	Pengukuran tegangan dan pengecekan koneksi
6	Apar	1	Alat pemadam
7	Lilin / korek api	secukupnya	Media deteksi

1.3.7 Prosedur perakitan alat

a. Persiapan awal

Tahap persiapan dilakukan dengan menyiapkan seluruh komponen utama, meliputi Raspberry Pi Pico, *IR Flame sensor*, relay, *solenoid valve*, *DC-DC stepdown*, baterai, serta peralatan keselamatan kerja. Seluruh komponen diperiksa untuk memastikan tidak terdapat kerusakan fisik, dan sumber daya dipastikan dalam kondisi tidak terhubung selama proses perakitan.

b. Perakitan catu daya

Catu daya dirangkai dengan menghubungkan baterai 12 V ke input *DC-DC stepdown*. Tegangan keluaran diatur hingga 5V dan diverifikasi menggunakan multimeter, kemudian dihubungkan ke pin catu daya Raspberry Pi Pico dengan penyatuan jalur ground sistem.

c. Perakitan *IR Flame sensor*

IR Flame sensor dihubungkan ke Raspberry Pi Pico dengan mengkoneksikan pin VCC ke 3V3, pin GND ke *ground*, serta pin *analog output* (AO) ke pin GP26/ADC0 sebagai jalur pembacaan data sensor.

d. Perakitan relay dan *solenoid valve*

Relay dihubungkan ke Raspberry Pi Pico melalui pin GPIO kontrol (GP15), dengan suplai daya dari *DC-DC stepdown* dan *ground* bersama. Terminal keluaran relay dikoneksikan ke *solenoid valve* untuk mengendalikan aliran media pemadam secara elektrik.

e. Integrasi tabung supresi

Solenoid valve dihubungkan ke tabung supresi melalui pipa atau selang sesuai arah aliran media pemadam. Seluruh sambungan mekanik dipastikan rapat dan *nozzle* diarahkan ke area target pengujian.

f. Pemeriksaan dan uji awal

Tahap akhir dilakukan dengan pemeriksaan ulang seluruh koneksi untuk mencegah kesalahan pemasangan. Sistem kemudian dinyalakan dan dilakukan uji aktivasi relay menggunakan program

sederhana untuk memastikan Raspberry Pi Pico, relay, dan *solenoid valve* berfungsi dengan baik.

1.3.8 Tahapan Kerja Sistem

a. Tahap pengambilan *raw data* ADC

Pengambilan *raw data* dilakukan pada berbagai skenario terkontrol untuk membentuk representasi kondisi non-api dan api nyata, sebagai dasar pembentukan aturan dan proses pembelajaran sistem.

1) Skenario pengambilan *raw data* non-api

Skenario non-api dirancang untuk merepresentasikan kondisi lingkungan normal yang berpotensi menimbulkan gangguan pembacaan sensor, meliputi:

- a) Cahaya matahari langsung
- b) Cahaya matahari dengan penghalang kaca
- c) Cahaya matahari mendung
- d) Ruang gelap
- e) Ruang terang dengan pencahayaan lampu
- f) Ruang terang dengan interferensi inframerah dari remote AC

2) Skenario pengambilan *raw data* api

Skenario api digunakan untuk merekam karakteristik sinyal ADC dari api nyata pada berbagai kondisi jarak dan pencahayaan, meliputi:

- a. Ruang terang dengan api pada jarak 10 cm
- b. Ruang terang dengan api pada jarak 25 cm
- c. Ruang terang dengan api pada jarak 50 cm
- d. Ruang gelap dengan api pada jarak 10 cm
- e. Ruang gelap dengan api pada jarak 15 cm
- f. Ruang gelap dengan api pada jarak 45 cm

- b. Tahap pengolahan *raw data* ADC berbasis *rule-based system* (pemrosesan berbasis aturan)

Pada tahap ini, *raw data* ADC dari sensor IR Flame dievaluasi menggunakan *rule-based system* berdasarkan kumpulan *evidence* yang telah ditetapkan, meliputi *evidence* api (E_API), *evidence* non-api (E_NON), yang didalamnya juga terdapat *evidence* cahaya matahari (E_SUN), pola cahaya matahari (SUN_ADC), serta kelompok nilai ambigu lainnya. Evaluasi dilakukan tidak hanya berdasarkan kemunculan satu nilai ADC, tetapi juga pola dan frekuensi kemunculan nilai dalam interval waktu tertentu untuk meningkatkan keandalan deteksi. Keputusan awal sistem ditentukan secara deterministik berdasarkan prioritas *evidence*, di mana keberadaan E_API langsung diklasifikasikan sebagai kondisi api, sedangkan E_NON, E_SUN, atau pola cahaya matahari diklasifikasikan sebagai non-api.

- c. Tahap *reinforcement learning* dan training sistem

Berfungsi sebagai proses *training* untuk meningkatkan keandalan *rule-based system*. Keputusan hasil pemrosesan aturan dibandingkan dengan *ground truth* dari skenario pengambilan *raw data*. Keputusan yang sesuai diberikan *reward*, sedangkan keputusan yang tidak sesuai diberikan *punishment*. Bobot aturan diperbarui secara bertahap dengan parameter *learning rate* serta batas minimum dan maksimum bobot untuk menjaga stabilitas pembelajaran. Proses ini diulang pada seluruh skenario pengambilan data hingga diperoleh bobot aturan yang lebih adaptif dan representatif.

- d. Tahap tahap *deployment* dan skenario pengujian sistem

Pada tahap ini, sistem tidak lagi melakukan pembaruan bobot atau pembelajaran, melainkan menggunakan bobot hasil *training* secara tetap. Tujuan utama tahap *deployment* adalah untuk mengevaluasi kinerja aktual sistem, meliputi akurasi deteksi, stabilitas keputusan, serta efektivitas aktivasi sistem pemadaman pada kondisi pengujian yang merepresentasikan situasi operasional.

Pengujian pada tahap *deployment* dilakukan menggunakan skenario terkontrol yang terdiri dari kondisi api dan non-api sebagai berikut:

- 1) Cahaya matahari langsung

- 2) Cahaya matahari dengan penghalang kaca
 - 3) Cahaya matahari mendung
 - 4) Cahaya matahari dalam ruangan
 - 5) Ruang gelap
 - 6) Ruang terang
 - 7) Ruang gelap dengan api pada jarak 12 cm
 - 8) Ruang gelap dengan api pada jarak 45 cm
 - 9) Ruang terang dengan api pada jarak 20 cm
 - 10) Ruang terang dengan api pada jarak 50 cm
- e. Tahap pengujian dan aktivasi *fire suppression system*

Pada tahap ini sistem menyemprotkan air dari tabung supresi setelah *relay valve* terbuka, sehingga proses pemadaman api terjadi.

