

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh Harianto *et al.* (2018) terkait penerapan sistem proteksi kebakaran menggunakan *fire suppression system* tipe *Loss Of Pressure* (LOP) pada unit Komatsu WA600-3 pada area operasi pertambangan. *Fire suppression system* tipe *Loss Of Pressure* (LOP) menggunakan tabung silinder bertekan 1350 kPa yang berisi campuran 6% AFFF (*Aqueous Film Forming Foam*) dan 94% air dengan volume larutan mencapai 80% dari kapasitas tabung. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa cara kerja *fire suppression system* ketika detection tube putus akibat terpapar suhu kerja alat yang tinggi (*overheat*) antara 160 – 180 derajat celsius. Ketika *detection tubing* putus terjadi penurunan tekanan pada jalur aktifasi (Kurang dari 1350 kPa) yang memicu piston bergrak keatas karena tekanan dari *feed cylinder* lebih tinggi, sehingga mengakibatkan *foam* keluar melalui jalur *discharge line* dan disemprotkan *nozzle*.

Penelitian terkait sistem pendekripsi kebakaran juga pernah dilakukan oleh Saputra *et al.* (2021) dengan memanfatkan Arduino Uno sebagai mikrokontroler yang memproses data dari *IR Flame sensor* untuk mendekripsi api dan sensor MQ2 untuk mendekripsi adanya asap. Sistem ini dirancang untuk mempercepat penanggulangan kebakaran dengan mengaktifkan *buzzer* sebagai alarm dan NodeMCU mengirimkan notifikasi berisi koordinat lokasi kebakaran ke telegram dan tersimpan ke dalam *website*. Pengujian alat memberikan hasil bahwa sistem mampu bekerja sesuai rancangan dengan batas jarak api dapat terdeteksi *IR Flame sensor* sekitar 120 cm dan pengiriman notifikasi ke telegram. Meskipun sistem bekerja sesuai rancangan, penelitian ini memiliki keterbatasan terkait akurasi sensor MQ2 masih kurang stabil dalam mendekripsi asap.

Selain itu penelitian yang berjudul “Penggunaan *IR Flame sensor* Sebagai Pendekripsi Api Berbasis Mikrokontroller Pada Simulator *fire suppression system*” oleh Darussalam dan Azwardi (2019), membahas prototipe dan implementasi sistem pendekripsi api berbasis mikrokontroler arduino yang diterapkan dalam simulator *fire suppression system*. Sensor *IR Flame* mendekripsi spektrum cahaya inframerah pada api yang kemudian diproses oleh mikrokontroler arduino. *Buzzer*, LCD motor servo, dan lampu indikator digunakan sebagai alat peringatan serta pemicu tindakan

pemadaman api. Penelitian ini mencakup pengujian efektifitas sistem dalam mendeteksi api pada berbagai jarak dan kondisi pencahayaan. Hasil pengujian memberikan kesimpulan bahwa sistem dapat bekerja optimal dalam mendeteksi api hingga jarak 90 cm, sementara perubahan intensitas cahaya cukup mempengaruhi performa dan tingkat keberhasilan sensor, yaitu keberhasilan dalam cahaya cukup sebesar 80% dan 100% ketika keadaan cahaya redup.

Penelitian yang berjudul “Rancang Bangun Simulator *Fire Supression System* Berbasis *Micro Controller*” yang dilakukan oleh Virgiawan *et al.* (2019) berkaitan pula tentang perancangan simulator *fire suppression system* berbasis mikrokontroler dengan harapan memberikan edukasi kepada mahasiswa mengenai keselamatan kerja pada alat berat. Sistem ini menggunakan sensor inframerah untuk mendeteksi api dan arduino sebagai pusat kontrolnya. Pengujian sistem dilakukan dengan mensimulasikan kebakaran, jika api terdeteksi oleh sensor maka sistem secara otomatis menampilkan peringatan pada LCD, mengaktifkan *buzzer*, serta menggerakan servo motor untuk menarik tuas APAR (Alat Pemadam Api Ringan) agar menyemprotkan bahan pemadam. Penelitian ini dilakukan untuk memastikan bahwa simulator dapat bekerja secara aktual dalam menanggulangi kebakaran.

Fauziah *et al.* (2022) mengembangkan prototipe sistem pemadam kebakaran berbasis Raspberry Pi yang dilengkapi fitur notifikasi otomatis melalui WhatsApp sebagai bentuk penerapan teknologi Industri 4.0 dalam mitigasi bencana kebakaran. Sistem ini menggunakan sensor UV-Tron, *flame sensor*, dan sensor suhu TPA81 untuk mendeteksi keberadaan serta posisi nyala api. Ketika sensor UV-Tron mendeteksi api, Raspberry Pi memproses sinyal dan mengaktifkan motor servo untuk mengarahkan sistem pemadam ke titik api, lalu menyemprotkan air melalui pompa yang dikontrol oleh relay. Selain itu, sistem ini secara otomatis mengirimkan pesan peringatan dan pemberitahuan pemadaman kepada pengguna melalui WhatsApp. Berdasarkan hasil pengujian, UV-Tron mampu mendeteksi api hingga jarak 200 cm, sementara flame sensor dan TPA81 masing-masing memiliki jangkauan maksimal 40.5 cm dan 40 cm. Penelitian ini menunjukkan efektivitas integrasi deteksi multi-sensor dengan sistem notifikasi berbasis komunikasi digital sebagai solusi cepat dan efisien dalam sistem pemadam api otomatis.

1.2 *Fire suppression system*

1.2.1 Definisi *fire suppression system*

Fire suppression system merupakan rangkaian teknologi proteksi kebakaran yang dikembangkan untuk menghambat, menurunkan intensitas, atau memadamkan api melalui mekanisme yang mengganggu proses pembakaran pada sumbernya. Vaari *et al.* (2012) menggambarkan *fire suppression system* berbasis air sebagai suatu mekanisme yang melibatkan interaksi kompleks antara dinamika semprotan air, proses pelepasan dari instalasi skala besar, mekanisme pendinginan fase gas, serta kemampuan sistem dalam memadamkan api dan menekan beban kebakaran dari material padat. Penjelasan tersebut menyoroti bahwa efektivitas sistem tidak hanya bergantung pada karakteristik fisik air sebagai media pemadam, tetapi juga pada bagaimana perilaku semprotan air dipahami dan dimodelkan secara akurat.

1.2.2 Jenis *fire suppression system*

Grant *et al.* (2000) mengelompokkan jenis kebakaran menjadi kelas A (bahan padat), B (cairan mudah terbakar), C (gas mudah terbakar), D (logam reaktif), dan F (minyak goreng). Dalam konteks klasifikasi tersebut, sistem berbasis air merupakan pilihan yang paling efektif untuk kebakaran kelas A karena kemampuannya menyerap panas dan menurunkan temperatur sumber api secara cepat.

Fire suppression system dapat diklasifikasikan berdasarkan agen yang digunakan, antara lain:

- a. Sistem Berbasis Air, memanfaatkan kemampuan air dalam menyerap panas dan menurunkan temperatur sumber api. Sistem ini paling umum digunakan karena ketersedian medianya yang tinggi.
- b. Sistem berbasis gas, bekerja dengan menurunkan konsentrasi oksigen atau menghambat reaksi pembakaran, sehingga api tidak dapat dipertahankan.
- c. Sistem berbasis busa (*foam*), digunakan untuk kebakaran cairan mudah terbakar dengan cara menutup permukaan bahan bakar dengan lapisan busa sehingga menghambat pelepasan uap.
- d. Sistem kimia kering (*dry chemical*), menggunakan partikel halus seperti natrium bikarbonat atau monoammonium phosphate yang mengganggu reaksi pembakaran.

1.3 Machine Learning

1.3.1 Pengertian *machine learning*

Machine learning merupakan pendekatan pembelajaran berbasis data yang memungkinkan sistem melakukan klasifikasi secara otomatis melalui proses pelatihan dan evaluasi model (Géron, 2019). *Machine learning* juga dipahami sebagai salah satu disiplin ilmu dalam kecerdasan buatan atau *Artificial Intelegent (AI)* yang memungkinkan sistem komputasi meningkatkan analisisnya berbasis data, tanpa mengandalkan instruksi pemerograman yang eksplisit (Rahmadini *et al.*, 2023).

Raup *et al.* (2022) menekankan bahwa *machine learning* mengubah komputer menjadi sistem analitis yang mampu memproses data multidimensi, membangun model prediksi yang akurat, memberikan rekomendasi yang sesuai dengan konteks, serta mengambil keputusan operasional secara otomatis tanpa intervensi manusia yang intens. Pendekatan ini bekerja dengan mengolah data historis dan mengevaluasi berbagai pola yang muncul untuk kemudian menghasilkan model yang bersifat adaptif terhadap perubahan konteks.

Arrieta *et al.* (2020) menambahkan bahwa *machine learning* beroperasi dengan memanfaatkan algoritma yang mampu meningkatkan kinerjanya melalui pengalaman, di mana sistem belajar secara berkelanjutan dari data baru yang diberikan. Proses ini menyerupai mekanisme pembelajaran kognitif pada manusia, tetapi memiliki tingkat konsistensi, skalabilitas, serta ketepatan yang lebih stabil. Selain itu, kerangka konseptual *machine learning* memungkinkan integrasi dengan berbagai pendekatan lain, seperti statistik, optimisasi, dan komputasi tingkat lanjut.

Dalam konteks sistem berbasis sesor, *machine learning* digunakan untuk mengenali pola data dan menghasilkan keputusan berdasarkan pola tersebut, bukan berdasarkan nilai ambang (*threshold*) yang ditentukan secara manual.

1.3.2 Metode *machine learning*

Permana *et al.* (2023) menjelaskan tiga klasifikasi *machine learning* yang sering digunakan meliputi *supervised learning*, *unsupervised learning*, dan *reinforcement learning*. Ketiganya memberikan kontribusi berbeda dalam membangun sistem kecerdasan yang adaptif, akurat, dan mampu menangani masalah kompleks dengan tingkat variasi data.

a. *Supervised learning* (Pembelajaran terbimbing)

Metode ini menggunakan data berlabel yang berisi pasangan input dan output target. Model dilatih untuk mempelajari hubungan keduanya agar dapat memetakan input ke output. Digunakan terutama untuk dua tugas:

- 1) Klasifikasi: Menetapkan label/kategori pada data baru (contoh: pengenalan citra, deteksi spam).
- 2) Regresi: Memprediksi nilai numerik kontinu (contoh: prediksi harga, peramalan cuaca).

b. *Unsupervised learning* (Pembelajaran tak terbimbing)

Metode ini bekerja dengan data tanpa label. Tujuannya adalah menemukan pola atau struktur tersembunyi secara otomatis. Teknik utamanya meliputi:

- 1) Clustering: Pengelompokan data berdasarkan kemiripan.
- 2) Dimensionality Reduction: Menyederhanakan data dengan mengurangi fitur namun mempertahankan informasinya.
- 3) Association Rule Learning: Mengidentifikasi hubungan antar item dalam data. Berguna untuk eksplorasi data.

c. *Reinforcement learning*

Reinforcement learning merupakan pendekatan *machine learning* yang menekankan proses pembelajaran melalui interaksi antara agen dan lingkungan. Agen mempelajari strategi terbaik dengan menerima umpan balik berupa penghargaan atau hukuman sebagai konsekuensi dari tindakan yang diambil, sehingga strategi pengambilan keputusan dapat diperbaiki secara bertahap.

Berdasarkan François-Lavet *et al.*, (2018), ada lima komponen utama yang mutlak diperlukan dalam RL, yaitu:

- 1) *Agent*: Entitas pembuat keputusan yang belajar (misal: program komputer, controller robot).
- 2) *Environment*: Lingkungan eksternal tempat agen beroperasi dan berinteraksi. Environment menerima *action* dari agen dan memberikan *state* baru serta *reward*.

- 3) *State* (s): Representasi situasi lingkungan pada waktu tertentu. State yang memenuhi properti Markov (di mana state masa depan hanya bergantung pada state saat ini dan *action*, bukan sejarah sebelumnya) adalah ideal untuk RL.
- 4) *Action* (a): Kumpulan keputusan yang dapat diambil agen pada suatu *state*. Dapat bersifat *diskrit* (contoh: belok kiri/kanan) atau *kontinu* (contoh: sudut setir).
- 5) *Reward* (R): Sinyal skalar yang diberikan lingkungan kepada agen setelah melakukan suatu *action* pada suatu *state*. Ini adalah panduan utama (supervisory signal) bagi agen. Desain fungsi *reward* yang tepat adalah kritis dan sering kali menjadi tantangan tersendiri (Reward Engineering).

Sutton dan Barto (2018), menjelaskan besarnya penguatan (*reward*) dan hukuman (*punishment*) dalam *reinforcement learning* diatur oleh parameter *learning rate* (α), yang menentukan seberapa besar bobot keputusan diperbarui pada setiap siklus pembelajaran. Keputusan yang menghasilkan *reward* positif diperkuat dengan penambahan bobot, sedangkan keputusan yang menghasilkan *reward* negatif dikenai penalti melalui pengurangan bobot, sehingga penyesuaian dilakukan secara bertahap berdasarkan pengalaman.

Secara matematis, mekanisme *reward-punishment* tersebut dapat dirumuskan sebagai

$$w_{t+1} = w_t + \alpha \cdot r \quad (2.1)$$

dengan $r \in \{+1, -1\}$ menyatakan sinyal *reward*. Untuk menjaga stabilitas pembelajaran, pembaruan bobot dibatasi oleh nilai minimum dan maksimum sehingga dirumuskan sebagai

$$w_{t+1} = \begin{cases} \min(w_{\max}, w_t + \alpha), & \text{jika } r = +1, \\ \max(w_{\min}, w_t - \alpha), & \text{jika } r = -1. \end{cases} \quad (2.2)$$

Dengan pembatasan ini, proses pembelajaran tetap stabil dan sesuai untuk implementasi pada sistem berbasis aturan dengan keterbatasan sumber daya komputasi

1.3.3 Tahapan kerja *machine learning*

a. Pengumpulan data

pengumpulan data yang relevan dengan permasalahan yang akan diselesaikan. Data dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti basis data, sensor, maupun sumber daring. Kualitas dan relevansi data pada tahap ini sangat menentukan keberhasilan model yang akan dibangun.

b. Persiapan data

Data yang telah dikumpulkan selanjutnya diproses agar siap digunakan dalam tahap pembelajaran. Proses ini meliputi pembersihan data dari nilai yang hilang atau tidak konsisten, penghapusan data duplikat, serta transformasi data mentah menjadi fitur yang lebih representatif dan mudah dianalisis.

c. Pemilihan model

Pada tahap ini dilakukan pemilihan algoritma *machine learning* yang sesuai dengan karakteristik data dan tujuan permasalahan. Setiap algoritma memiliki kelebihan dan keterbatasan, sehingga pemilihan model harus mempertimbangkan kompleksitas data serta jenis keluaran yang diharapkan.

d. Pelatihan model

Pelatihan model merupakan proses pembelajaran di mana algoritma menyesuaikan parameter internalnya menggunakan data pelatihan untuk meminimalkan kesalahan prediksi. Melalui proses ini, model mempelajari pola hubungan antara data masukan dan keluaran yang diinginkan.

e. Evaluasi model

Evaluasi dilakukan untuk menilai kinerja model menggunakan data pengujian yang tidak digunakan pada saat pelatihan. Tahap ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan model dalam melakukan prediksi terhadap data baru. Beberapa metrik evaluasi yang umum digunakan antara lain akurasi, presisi, *recall*, *F1-score*, dan ROC-AUC.

f. Optimasi model

Tahap ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja model melalui penyetelan parameter atau *hyperparameter*. Teknik optimasi seperti *cross-validation*, *grid search*, dan *random search* digunakan untuk memperoleh kombinasi parameter yang menghasilkan performa terbaik.

g. Prediksi atau inferensi

Setelah model dilatih dan dievaluasi, model tersebut dapat digunakan untuk melakukan prediksi atau inferensi pada data baru. Tahap ini merupakan penerapan langsung hasil pembelajaran model dalam menyelesaikan permasalahan yang dihadapi

h. *Deployment*

Tahap akhir adalah *deployment*, yaitu proses penerapan model ke dalam lingkungan operasional atau sistem produksi. Pada tahap ini, model diintegrasikan ke dalam aplikasi atau sistem yang akan memanfaatkan hasil prediksi sebagai dasar pendukung pengambilan keputusan.

1.3.4 Evaluasi *machine learning*

Evaluasi dilakukan menggunakan beberapa metrik yang umum digunakan pada klasifikasi biner, yaitu *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-Score*, *ROC-AUC*.

a. *Accuracy*

Accuracy (akurasi) menunjukkan proporsi yang benar terhadap keseluruhan data pengujian. Metrik ini memberikan gambaran mengenai performa model, namun kurang representatif apabila dataset memiliki distribusi kelas yang tidak seimbang.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2.3)$$

Keterangan:

TP (*True Positive*) = jumlah data kelas positif yang di prediksi sebagai positif

TN (*True Negative*) = jumlah data kelas negatif yang di prediksi sebagai negatif

FP (*False Positive*) = jumlah data kelas negatif yang keliru di prediksi sebagai kelas positif

FN (*False Negative*) = jumlah data kelas positif yang keliru di prediksi sebagai kelas negatif.

b. *Precision*

Precision mengukur tingkat ketepatan prediksi pada kelas positif, yaitu proporsi prediksi positif yang benar terhadap seluruh prediksi positif yang dihasilkan oleh model.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2.4)$$

Keterangan:

TP (*True Positive*) = jumlah data kelas positif yang di prediksi sebagai positif

FP (*False Positive*) = jumlah data kelas negatif yang keliru di prediksi sebagai kelas positif

c. *Recall*

Recall menunjukkan kemampuan model dalam mengidentifikasi seluruh data yang benar-benar termasuk dalam kelas positif, sehingga meminimalisir kegagalan identifikasi.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.5)$$

Keterangan:

TP (*True Positive*) = data kelas positif yang berhasil di identifikasi

FN (*False Negative*) = data kelas positif yang tidak berhasil di identifikasi

d. *F1-Score*

F1-Score merupakan rata – rata harmonis antara precision dan recall, digunakan untuk memberikan ukuran kinerja tunggal dengan mempertimbangkan keseimbangan antara ketepatan dan kelengkapan klasifikasi.

$$F1 - Score = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (2.6)$$

Keterangan:

Precision = ketepatan prediksi kelas positif

Recall = kemampuan model mengidentifikasi kelas positif

e. ROC-AUC

Receiver Operating Characteristic (ROC) mengevaluasi model pada berbagai nilai threshod dengan merepresentasikan hubungan antara *true positive rate* (TPR) dan *false positive rate* (FPR), sehingga menunjukkan kemampuan model dalam membedakan dua kelas. Nilai *area under curve* (AUC) berada pada rentang 0 sampai 1 dan memberikan ukuran kuantitatif terhadap kemampuan diskriminasi secara menyeluruh, dimana nilai yang semakin mendekati 1 menunjukkan kinerja klasifikasi yang semakin baik dan stabil.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.7)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (2.8)$$

Keterangan:

TPR (*True Positive Rate*) = tingkat keberhasilan model dalam mengidentifikasi kelas positif

FPR (*False Positive Rate*) = tingkat kesalahan model dalam mengklasifikasikan kelas negatif sebagai kelas positif.

f. Class Balance Ratio (raso keseimbangan kelas)

Class Balance Ratio didefinisikan sebagai perbandingan jumlah sampel antar kelas minoritas dan mayoritas.

$$R = \frac{N_{\text{minoritas}}}{N_{\text{mayoritas}}} \quad (2.9)$$

Keterangan:

R = *Ratio*

N_{minoritas} = Jumlah sampel kelas minoritas

N_{mayoritas} = Jumlah sampel kelas mayoritas

1.3.5 Pendekatan *rule-based system* dan *reinforcement learning*

Pendekatan hybrid yang mengintegrasikan sistem berbasis aturan (*rule-based system*) dengan pembelajaran penguatan (*reinforcement learning*) semakin mendapat perhatian dalam penelitian kecerdasan buatan kontemporer, khususnya pada aplikasi yang menuntut keseimbangan antara keamanan, interpretabilitas, dan adaptabilitas. Sistem berbasis aturan memanfaatkan logika eksplisit yang diturunkan dari pengetahuan domain (*domain knowledge*) sehingga mampu menjamin perilaku yang deterministik, dapat diprediksi, dan sesuai dengan batasan keselamatan yang telah ditetapkan. Namun, memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas dan kemampuan beradaptasi terhadap kondisi baru di luar aturan yang telah dirancang.

Reinforcement learning memungkinkan sistem mempelajari kebijakan pengambilan keputusan yang optimal melalui interaksi *trial-and-error* dengan lingkungan, tetapi menghadapi tantangan berupa ketidakefisienan sampel (*sample inefficiency*), risiko eksplorasi tindakan berbahaya, serta rendahnya interpretabilitas kebijakan yang dihasilkan. Dengan mengombinasikan kedua paradigma tersebut, pendekatan hybrid mampu menggabungkan stabilitas dan jaminan keamanan dari aturan eksplisit dengan fleksibilitas serta kemampuan optimisasi dari pembelajaran penguatan, sehingga menghasilkan sistem pengambilan keputusan yang lebih robust, aman, dan adaptif untuk menangani permasalahan kompleks pada lingkungan (Thomas *et al.*, 2019).

1.4 Raspberry Pi Pico

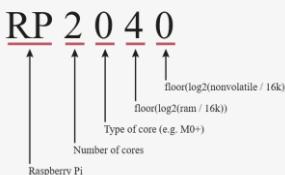
1.4.1 Raspberry pi pico

Raspberry pi pico merupakan papan pengembang berbasis mikrokontroler yang dirancang untuk kebutuhan komputasi. Papan ini memanfaatkan mikrokontroler RP2040 sebagai pusat pemrosesan serta menyediakan berbagai input/output untuk mengendalikan sensor, aktuator, dan perangkat elektronik lain. Raspberry pi pico dirancang sebagai pengendali berdaya rendah yang dapat diprogram menggunakan MicroPhyton atau C/C++.



Gambar 2. 1 Raspberry Pi Pico

RP2040 merupakan inti dari Raspberry pi pico, dimana “RP” adalah kepanjangan Raspberry Pi, “2” merupakan inti mikrokontroler, “0” mendakan jenis prosesor Cortex-M0 yang digunakan, angka “40” merupakan kapasitas SRAM dan penyimpanan non-volatile yang dimiliki.



Gambar 2. 2 Penamaan core Raspberry Pi Pico

Raspberry Pi Pico dirancang sebagai board yang memperluas fungsiionalitas dari RP2040 dan kemudahan programmer untuk mengakses sebagian besar fiturnya termasuk pin – pin GPIO, dilengkapi juga dengan rangkaian regulator daya didalamnya, sehingga dapat dicatut dengan sumber daya dengan tegangan yang bervariasi mulai dari 1.8 V hingga 5.5 V (Raspberry Pi Ltd, 2025).

1.4.2 Komponen raspberry pi pico

a. RP2040 mikrokontroler

Chip ini menggunakan arsitektur *dual-core* ARM Cortex-M0+, sebagai salah satu prosesor 32-bit paling efisien untuk aplikasi *low-power embedded systems*. Prosesor tersebut beroperasi pada frekuensi default 48 MHz, namun dapat ditingkatkan melalui konfigurasi internal hingga 133 MHz, sehingga mampu menyediakan kinerja pemrosesan yang lebih tinggi ketika diperlukan.

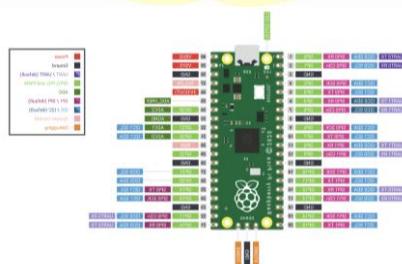
b. Memori

RP2040 dilengkapi 264 kB SRAM yang terbagi ke dalam enam bank memori independen. Desain ini memberikan keunggulan dalam pengelolaan memori paralel karena tiap bank dapat diakses secara bersamaan oleh subsistem internal. Raspberry Pi Pico menggunakan 2 MB memori flash eksternal berbasis antarmuka QSPI sebagai media penyimpanan *firmware* dan program. Karena RP2040 tidak memiliki *flash* internal, pemisahan memori ini memberikan fleksibilitas bagi pengguna untuk mengganti atau memperbesar kapasitas flash sesuai kebutuhan proyek.

c. *GPIO* dan *Input/Output*

Raspberry Pi Pico menyediakan 26 pin *GPIO* yang dapat digunakan, dan masing-masing mendukung berbagai fungsi multipurpose. Sistem ini memungkinkan *GPIO* dikonfigurasi sebagai input digital, output digital, serta fungsi alternatif seperti *PWM*, *UART*, *SPI*, dan *I2C*. Selain fungsi dasar, Pico juga memiliki:

- 1) 3 kanal *ADC* 12-bit, memungkinkan pembacaan sinyal analog seperti sensor suhu, potensiometer, atau sensor cahaya.
- 2) 16 kanal *PWM*, yang dapat digunakan untuk mengendalikan aktuator seperti motor DC, motor servo, atau *LED* berintensitas variabel.
- 3) *LED on-board* pada *GPIO25*, yang sangat berguna sebagai indikator diagnostik.
- 4) Sensor suhu internal, yang membaca suhu chip melalui kanal *ADC* khusus.



Gambar 2. 3 *GPIO* Raspberry Pi Pico

d. *Interface* Komunikasi

- 1) 2 modul *UART*, digunakan untuk komunikasi serial asinkron, misalnya dengan modul *GPS* atau perangkat monitoring.
- 2) 2 modul *I2C*, yang memungkinkan Pico berkomunikasi dengan sensor dan komponen *multi-drop* seperti *IMU*, *RTC*, atau sensor lingkungan.
- 3) 2 modul *SPI*, yang menyediakan komunikasi sinkron berkecepatan tinggi untuk perangkat seperti layar OLED, modul *flash*, atau sensor industri.

e. Konektor dan sistem Kontrol

Raspberry Pi Pico menggunakan *port microUSB*, yang berfungsi sebagai antarmuka komunikasi sekaligus sumber daya utama. Terdapat pula tombol *BOOTSEL*, yang memungkinkan papan masuk ke mode *USB Mass Storage* saat ditekan saat reset sehingga pengguna dapat mem-flash firmware secara mudah tanpa alat tambahan. Pico menyediakan antarmuka *SWD (Single-Wire Debug)* yang mendukung proses debugging tingkat rendah, seperti inspeksi register, pemantauan memori, dan pengaturan *breakpoints*, sehingga sangat bermanfaat dalam proses pengembangan perangkat lunak *embedded* yang kompleks.

f. Catu Daya

Raspberry Pi Pico dirancang sebagai perangkat *low-power* yang fleksibel dalam sumber daya. Terdapat beberapa jalur suplai, yaitu:

- 1) *VBUS (USB 5V)*, digunakan ketika Pico dihubungkan melalui kabel USB.
- 2) *VSYS (1.8–5.5V)*, yang memungkinkan penggunaan sumber daya eksternal seperti baterai Li-ion, adaptor DC, atau power supply lain.

1.4.3 MicroPhyton pada raspberry pi pico

MicroPhyton Merupakan implementasi bahasa pemrograman Python 3 yang dirancang secara singkat dan efisien untuk dijalankan pada mikrokontroler dan sistem tertanam dengan keterbatasan sumber daya. Bahasa pemrograman MicroPython hanya menyertakan sebagian dari pustaka (*library*) standar Python dan dioptimalkan agar dapat berjalan

langsung pada perangkat keras (*bare metal*), sehingga memungkinkan pengembangan aplikasi kendali dan pengolahan data tanpa memerlukan sistem operasi konvensional. Pendekatan ini membuat MicroPython ideal untuk Raspberry Pi Pico yang memerlukan respons cepat, hemat memori dan kemudahan pengembangan.

MicroPhyton tetap mendukung berbagai fitur penting dari Python, seperti antarmuka interaktif (*interactive prompt*), penanganan kesalahan (*exception handling*), serta struktur program lanjutan. MicroPython dirancang dengan tingkat kompatibilitas terhadap Python, sehingga kode yang dikembangkan pada desktop dapat diadaptasi dan dijalankan pada Raspberry pi pico.

1.5 Analog to Digital Converter (ADC)

1.5.1 Definisi Analog to Digital Converter (ADC)

Analog to Digital Converter (ADC) merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi mengkonversi sinyal analog kontinu menjadi sinyal digital diskrit agar dapat diproses oleh sistem digital seperti mikrokontroler. Menurut Wang (2024), kualitas hasil konversi ADC sangat menentukan keandalan sistem akuisisi data, khususnya pada aplikasi sensor yang bekerja dilingkungan dengan gangguan dan variasi sinyal yang tinggi.

Jumlah kuantisasi ADC ditentukan oleh resolusi bit dan dinyatakan sebagai berikut:

$$L = 2^n \quad (2.10)$$

Dengan n adalah jumlah bit ADC. Semakin tinggi resolusi ADC, semakin kecil perubahan sinyal analog yang dapat direpresentasikan secara digital, namun peningkatan resolusi juga berdampak pada konsumsi daya dan kompleksitas rangkaian (Ellaithy, 2023).

1.5.2 Karakteristik dan akurasi ADC

Karakteristik utama ADC meliputi resolusi, tegangan referensi (V_{ref}), akurasi, dan kecepatan sampling. Hubungan antara tegangan masukan analog dan nilai digital ADC dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$ADC_{out} = \frac{V_{in}}{V_{ref}} \times (2^n - 1) \quad (2.11)$$

Resolusi tegangan ADC atau *Least Significant Bit* (LSB) dihitung menggunakan:

$$\Delta V = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad (2.12)$$

Nilai ini menunjukkan perubahan tegangan terkecil yang masih dapat dibedakan oleh ADC. Error kuantisasi maksimum secara teoritis berada pada kisaran:

$$E_q = \pm \frac{\Delta V}{2} \quad (2.13)$$

(Zahrai dan Onabajo, 2018), menjelaskan bahwa error kuantisasi, noise termal, dan non-linearitas dapat menurunkan kualitas sinyal digital, yang ditunjukkan melalui penurunan Signal-to-Noise Ratio (SNR) dan Effective Number of Bits (ENOB). Oleh karena itu, pemrosesan lanjutan terhadap data ADC sering diperlukan untuk meningkatkan keandalan sistem deteksi.

1.6 IR Flame Sensor

1.6.1 Pengertian *IR flame sensor*

Sensor Inframerah Api (*IR flame sensor*) merupakan perangkat deteksi kebakaran berbasis optik yang bekerja dengan mengidentifikasi radiasi inframerah yang dipancarkan oleh nyala api. Sensor ini banyak digunakan dalam sistem deteksi kebakaran modern karena kemampuannya mengenali pola radiasi termal yang menjadi karakteristik proses pembakaran. Dalam konteks keselamatan, *IR flame sensor* berfungsi sebagai komponen pendekripsi dini yang mampu mengidentifikasi adanya api sebelum terjadi peningkatan suhu atau munculnya asap dalam jumlah signifikan, sehingga memungkinkan tindakan respons cepat pada situasi darurat (Darussalam dan Azwardi, 2019)



Gambar 2. 4 *IR Flame Sensor*

1.6.2 Prinsip kerja *IR flame sensor*

IR flame sensor terdiri dari elemen peka inframerah berupa fotodioda atau fototransistor, rangkaian penguat sinyal, serta pebanding tegangan (*comparator*). Ketika elemen peka cahaya menerima radiasi inframerah dari nyala api, akan dihasilkan arus listrik berintensitas kecil yang sebanding dengan kuatnya sinyal radiasi yang diterima. Sinyal ini diperkuat sebelum dibandingkan dengan nilai referensi tertentu oleh komparator.

Apabila sinyal yang telah diperkuat melampaui nilai ambang (*threshold*) modul akan mengubah outputnya, misal api terdeteksi atau sebaliknya. *IR flame sensor* juga dilengkapi dengan trimpot yang berfungsi untuk mengatur nilai ambang (*threshold*) deteksi, sehingga sensitivitas sensor dapat disesuaikan dengan kondisi lingkungan pengoperasian, misalnya jarak sensor terhadap sumber api, tingkat debu, serta gangguan cahaya.

1.6.3 Spesifikasi *IR flame sensor*

- a. Modul dilengkapi dengan chip pembanding tegangan LM393 dan probe sensor inframerah, yang berfungsi untuk mendeteksi perubahan sinyal berbasis inframerah.
- b. Mendukung tegangan 5 V dan 3,3 V sehingga kompatibel dengan berbagai sistem mikrokontroler.
- c. Terdapat indikator output signal, ketika sinyal terdeteksi, modul memproses signal dan indikator menyala, sehingga output signal dapat dihubungkan langsung ke pin input/output mikrokontroler.
- d. Tingkat sensitivitas deteksi dapat diatur, sehingga memungkinkan pengaturan ambang (*threshold*) respon sensor sesuai dengan kebutuhan aplikasi

- e. Dilengkapi dengan jalur tambahan rangkaian pembanding tegangan (P3).
- f. Mampu mendeteksi nyala api dengan panjang gelombang inframerah pada rentang 760 – 1100 nm.
- g. Memiliki sudut deteksi 60° dan menunjukkan sensitivitas tinggi pada spektrum radiasi api.
- h. Memiliki rentang suhu operasi di ambien temperatur $-25^\circ\text{C} – 85^\circ\text{C}$.

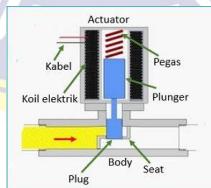
1.7 Solenoid Valve

1.7.1 Pengertian solenoid valve

Solenoid valve adalah jenis katup yang bekerja dengan memanfaatkan tenaga listrik melalui sebuah kumparan elektromagnetik. Kumparan tersebut menghasilkan gaya magnet yang menggerakkan piston ketika dialiri arus, baik arus bolak-balik (AC) maupun arus searah (DC). Komponen ini umumnya memiliki dua saluran utama, yaitu saluran masuk (*inlet*) dan saluran keluar (*outlet*). Port masuk berfungsi sebagai jalur masuknya fluida—baik air maupun cairan lainnya—sedangkan port keluar menjadi saluran tempat fluida tersebut dialirkan ke sistem berikutnya (Triady *et al.*, 2015).

1.7.2 Komponen dan cara kerja solenoid valve

Menurut LAPAN (2023), *solenoid valve* merupakan perangkat elektromagnetik yang berfungsi mengatur aliran fluida secara otomatis dengan memanfaatkan medan magnet yang dihasilkan oleh *solenoid coil* untuk menggerakan *plunger*, sehingga katup dapat membuka dan menutup secara cepat dan presisi.



Gambar 2. 5 Bagian solenoid valve

a. Solenoid coil

Solenoid coil merupakan komponen utama berupa lilitan kawat pada inti besi yang menghasilkan medan magnet ketika

dialiri arus listrik, yang berperan sebagai sumber gaya penggerak sistem.

b. *Plunger*

Plunger adalah batang ferromagnetik yang bergerak secara linier didalam *solenoid coil*. Ketika medan magnet terbentuk, *plunger* tertarik menuju inti dan memicu mekanisme pembukaan katup.

c. Kondisi tidak aktif

Pada kondisi tanpa arus listrik, *solenoid coil* tidak menghasilkan medan magnet sehingga *plunger* berada pada posisi awal dan katup tetap tertutup, yang berfungsi menghentikan aliran fluida.

d. Kondisi aktif

Ketika *solenoid coil* diberi arus listrik, medan magnet terbentuk dan menarik *plunger* ke dalam inti solenoid, sehingga katup terbuka dan fluida dapat mengalir.

e. Kontrol dan penghentian aliran

Pengaturan arus listrik pada *solenoid coil* mempengaruhi kekuatan medan magnet dan pergerakan *plunger*, yang berdampak pada pembukaan katup dan laju aliran fluida. Saat arus listrik dihentikan, medan magnet menghilang dan *plunger* kembali ke posisi semula, menyebabkan katup menutup kembali dan aliran fluida terhenti.

1.8 Relay

1.8.1 Pengertian relay

Menurut (Erminda dan Latifa, 2020) Relay merupakan peralatan listrik yang berfungsi menghubungkan dan memutuskan suatu rangkaian listrik dari yang satu ke yang lainnya yang bekerja secara otomatis dan digerakkan oleh magnet yang dapat dikontrol. Secara prinsip, relay memanfaatkan prinsip elektromagnetik dimana arus listrik kecil yang mengalir pada kumparan (coil) akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini kemudian menarik armature (angker) mekanis untuk menggerakkan kontak saklar, sehingga dapat menghubungkan atau

memutuskan rangkaian listrik yang memiliki daya dan tegangan lebih tinggi (Noviansyah dan Saiyar, 2019).



Gambar 2. 6 Relay

1.8.2 Jenis relay

a. *Normally Open*

Konfigurasi *normally open* (*NO*) ketika kondisi kontak relay yang berada dalam keadaan terbuka ketika kumparan tidak dialiri arus listrik, sehingga rangkaian beban terputus dan tidak terjadi aliran arus. Saat kumparan diberi tegangan, medan elektromagnetik yang terbentuk akan menggerakkan armature sehingga kontak menutup dan menghubungkan rangkaian beban.

b. *Normally Closed*

Konfigurasi *normally closed* (NC) ketika kondisi kontak berada dalam keadaan tertutup saat kumparan tidak dialiri arus. Ketika kumparan relay diberi tegangan. Kontak akan terbuka dan memutus aliran listrik ke beban.

1.9 DC-DC Stepdown LM2596



Gambar 2. 7 I DC-DC Stepdown

LM2596 merupakan *regulator switching step-down* nonsinkronus yang beroperasi pada frekuensi osilasi 150 kHz, dirancang untuk

menurunkan tegangan DC secara efisien dengan kemampuan arus output hingga 3A, rentang input 4,5-40V, dan efisiensi konversi maksimum 92%. Penelitian Mahardi *et al.*, (2024) LM2596T diimplementasikan pada rangkaian *buck converter* dengan kapasitor *input* 100 μF , kapasitor *output* 220 μF , resistor *feedback* tetap 5 $\text{k}\Omega$ dan variabel, dioda Schottky IN5822, serta induktor 33 μH , menghasilkan tegangan *output* stabil sebesar 6,68V (*input* 10V), 6,71V (*input* 15V), dan 6,78V (*input* 20V) dengan fluktuasi minimal 0,1V. Fitur perlindungan internal seperti *thermal shutdown* dan current limit memastikan keandalan operasi pada aplikasi portabel, IoT, serta sensor, didukung desain *feedback* resistor yang presisi untuk regulasi akurat terhadap variasi beban.

