

BAB II

DASAR TEORI

Bab Dasar Teori membahas landasan teori serta komponen-komponen yang digunakan dalam perancangan sistem monitoring dan pemadam kebakaran otomatis.

2.1. Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka ini memuat beberapa referensi penelitian yang relevan terkait perancangan sistem pemadam kebakaran otomatis sebagai dasar penyusunan tugas akhir. Ringkasan hasil tinjauan pustaka ditunjukkan pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

No	Judul Jurnal	Pembahasan	Persamaan dan Perbedaan
1.	Sistem Pemadam Kebakaran Otomatis Berkonsep <i>Smarthouse</i> Berbasis Arduino	Penelitian pada jurnal Sistem Pemadam Kebakaran Otomatis Berkonsep <i>Smarthouse</i> Berbasis Arduino menggunakan sensor gas CO sebagai indikator kebakaran dan menerapkan sistem otomatis untuk mengaktifkan pompa air serta <i>exhaust fan</i> saat ambang bahaya terdeteksi.	Penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian penulis, yaitu sama-sama memanfaatkan gas CO sebagai parameter utama dalam sistem proteksi kebakaran. Perbedaannya terletak pada platform dan level implementasi sistem. Jurnal tersebut masih menggunakan Arduino dan sensor MQ-2 yang bersifat prototipe <i>smarhome</i> , sedangkan penelitian penulis menggunakan PLC dari Siemens S7-1200 serta sensor gas CO Dräger Polytron 7000 dari Dräger yang merupakan perangkat <i>industrial grade</i> .
2.	Sistem Deteksi Kebakaran Berbasis <i>Internet of Things</i> (IoT) dengan Perangkat Arduino	Penelitian ini mengembangkan sistem deteksi kebakaran berbasis <i>IoT</i> menggunakan sensor gas CO, Arduino, dan NodeMCU untuk monitoring jarak jauh.	Kedua penelitian sama-sama menggunakan sensor CO sebagai indikator kebakaran. Perbedaannya, penelitian ini ditujukan untuk lingkungan non-industri dengan Arduino dan MQ-7, sedangkan penelitian yang dilakukan menggunakan sensor CO

No	Judul Jurnal	Pembahasan	Persamaan dan Perbedaan
			<i>analyzer</i> industri dan PLC Siemens S7-1200.
3.	<i>A Comprehensive Review of Advanced Sensor Technologies for Fire Detection with a Focus on Gasistor-Based Sensors</i>	Penelitian ini merupakan kajian teknologi sensor kebakaran, dengan fokus pada sensor <i>gasistor</i> dan CO sebagai indikator awal kebakaran, serta potensi integrasi dengan AI.	Kedua penelitian sama-sama memanfaatkan CO sebagai indikasi awal kebakaran membara. Perbedaannya, penelitian ini bersifat <i>review</i> konseptual dan berbasis AI, sedangkan penelitian yang dilakukan berfokus pada implementasi sistem industri berbasis PLC tanpa AI.
4.	<i>Modeling of Multifunctional Gas-Analytical Mine Control Systems and Automatic Fire Extinguishing Systems</i>	Sistem ini mengintegrasikan monitoring gas dan pemadaman kebakaran otomatis menggunakan sensor CO dan PLC Siemens S7-1200.	Kedua penelitian sama-sama menerapkan sistem terintegrasi monitoring dan pemadaman kebakaran berbasis CO dengan PLC S7-1200. Perbedaannya terletak pada jenis sensor CO, yaitu STDG-01 pada penelitian ini dan CO <i>analyzer</i> industri pada penelitian yang dilakukan.
5.	Detektor Dini Kebakaran Multisensor Terintegrasi <i>Android</i> Menggunakan Komunikasi <i>Bluetooth</i>	Penelitian ini menggunakan sensor CO MQ-7 dengan Arduino Uno, dan hasil monitoring ditampilkan ke HP melalui <i>Bluetooth</i> .	Kedua penelitian sama-sama menggunakan sensor CO sebagai indikator deteksi kebakaran. Perbedaannya, penelitian ini berbasis Arduino dan <i>Bluetooth</i> , sedangkan penelitian yang dilakukan menggunakan sensor CO <i>analyzer</i> industri dan PLC Siemens S7-1200 untuk aplikasi industri.

2.2. Sistem Deteksi dan Pemadam Kebakaran Berbasis CO

Standar EN 54-26 menyatakan bahwa deteksi kebakaran berbasis karbon monoksida (CO) mampu mengenali fase awal kebakaran (*smouldering*) pada material berbasis karbon dengan waktu respons lebih cepat dibandingkan metode konvensional [12]. Oleh karena itu, sensor CO digunakan sebagai elemen utama

deteksi dini pada *dryer system* dan diintegrasikan dengan logika *interlock* untuk mengaktifkan sistem pemadam kebakaran secara otomatis.

2.3. Sensor Gas CO Dräger Polytron 7000

Standar International Organization for Standardization 7240 [13] bagian 6 menetapkan penggunaan sel elektrokimia pada detektor kebakaran CO [11]. Sensor CO Dräger Polytron 7000, merupakan sensor elektrokimia industri yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi gas karbon monoksida sebagai indikator awal kebakaran. Sensor ini dipilih karena memiliki stabilitas tinggi pada lingkungan industri serta kompatibel dengan sistem kontrol berbasis PLC [14]. Sensor gas CO yang digunakan ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1. Sensor Gas CO Draeger 7000 [45].

Sensor CO analyzer Dräger Polytron 7000 dipilih karena memiliki stabilitas pengukuran yang baik serta kompatibel dengan sistem kontrol industri berbasis PLC. Spesifikasi teknis sensor tersebut disajikan pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Spesifikasi Sensor Gas CO Dräger Polytron 7000

Parameter	Nilai
Prinsip Kerja	Elektrokimia
Tegangan kerja	16,5–30 V DC
Output	4 to 20 Ma

2.4. Programmable Logic Controller (PLC)

Programmable Logic Controller (PLC) merupakan perangkat kontrol industri yang digunakan sebagai pengendali utama sistem. PLC bekerja dengan siklus pemindaian yang meliputi pembacaan *input*, eksekusi logika program, dan pembaruan *output* secara kontinu untuk merespons perubahan kondisi sistem secara

real-time [14]. Adapun spesifikasi teknis dari PLC Siemens S7-1200 yang digunakan disajikan pada **Tabel 2.3**.

Parameter	Nilai
Digital <i>Input</i> (DI)	14 Channel 24 V DC
Digital <i>Output</i> (DO)	10 Channel 24 V DC
Analog <i>Input</i> (AI)	2 Channel 24 V DC
<i>Work Memory</i>	150 kB
<i>Load Memory</i>	4 MB

Pada penelitian ini digunakan PLC Siemens S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC (6ES7214-1AG40-0XB0) dengan suplai 24 V DC yang ditunjukkan pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2. PLC Siemens S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC [15]

2.5. Perangkat Lunak dan Pemrograman PLC

Pemrograman PLC dilakukan menggunakan TIA Portal V20 dengan bahasa *Ladder Diagram* (LAD), dan *Structured Control Language* (SCL). Struktur program terdiri atas Organizational Block (OB), *Function* (FC), Function Block (FB), dan Data Block (DB). *Ladder Diagram* digunakan karena kemudahannya dalam merepresentasikan logika *interlock* dan sistem keselamatan [14].

2.6. Sistem Komunikasi PLC

Infrastruktur jaringan PLC pada sistem otomasi industri umumnya menggunakan teknologi *Ethernet bridging* (*switching*). Ethernet merupakan teknologi jaringan *packet-switched* yang telah menjadi standar *de facto* dalam sistem komunikasi industri. Data ditransmisikan dalam bentuk *frame* yang diidentifikasi menggunakan alamat *Media Access Control* (MAC) 48-bit [16].

2.7. Sistem Transmisi Analog 4–20 mA

Sistem transmisi analog 4–20 mA merupakan standar sinyal analog yang digunakan pada sistem instrumentasi industri untuk mengirimkan data sensor menuju PLC. Pada penelitian ini, sensor gas CO Dräger Polytron 7000 menggunakan *output* analog 4–20 mA yang diproses oleh PLC melalui *Analog to Digital Converter* (ADC) sebelum dilakukan *scaling* menjadi *engineering value* dalam satuan ppm.

Sistem 4–20 mA menerapkan konsep *live zero*, yaitu nilai 4 mA menunjukkan kondisi minimum normal, sedangkan arus di bawah batas tertentu dapat mengindikasikan gangguan seperti *wire break* atau kegagalan sensor. Selain itu, sinyal 4–20 mA memiliki ketahanan yang baik terhadap gangguan listrik (*noise immunity*) sehingga lebih stabil digunakan pada lingkungan industri [19].

PLC mengubah sinyal analog menjadi *raw value* melalui proses *Analog to Digital Converter* (ADC). Selanjutnya, *raw value* tersebut diproses menggunakan metode *scaling* untuk menghasilkan *engineering value* sesuai dengan rentang pengukuran sistem. Siemens menjelaskan bahwa proses *scaling* dilakukan dengan menghubungkan nilai analog input terhadap batas minimum dan maksimum *engineering unit* secara linear [20]. Persamaan proses *scaling* pada PLC Siemens ditunjukkan pada persamaan 2.1. sebagai berikut:

$$\text{Engineering Value} = \text{Low Range} + \frac{(\text{Analog Input Value})(\text{High Range} - \text{Low Range})}{(\text{Maximum Analog Range} - \text{Minimum Analog Range})} \quad (2.1)$$

Keterangan:

Engineering Value : Nilai hasil konversi dalam satuan *engineering* (ppm)

Analog Input Value : Nilai analog masukan (*raw value*) dari PLC

High Range : Batas atas rentang pengukuran *engineering* unit

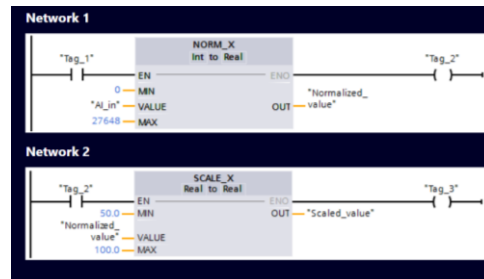
Low Range : Batas batas rentang pengukuran *engineering*

Maximum Analog Range : Nilai maksimum *raw* analog PLC

Minimum Analog Range : Nilai minimum *raw* analog PLC

PLC Siemens melakukan proses pengolahan sinyal analog melalui fungsi *normalization* dan *scaling*. Fungsi *NORM_X* digunakan untuk mengubah *raw value* analog menjadi nilai normalisasi antara 0–1, sedangkan fungsi *SCALE_X*

digunakan untuk mengubah nilai normalisasi menjadi *engineering value* sesuai rentang parameter sistem [20]. Proses *scaling* pada PLC Siemens ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3. Program *Scaling* [20]

2.8. Human Machine Interface (HMI)

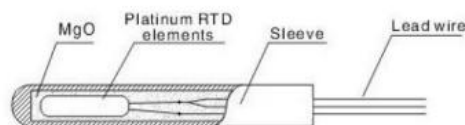
Human Machine Interface (HMI) berfungsi sebagai antarmuka antara operator dan sistem. Sistem ini menggunakan SIMATIC HMI TP900 *Comfort* yang ditunjukkan pada **Gambar 2.4**. untuk menampilkan data sensor, status sistem, dan peringatan kebakaran. Perancangan HMI mengacu pada prinsip *usability* sesuai ISO 9241-11 [21].



Gambar 2.4. SIMATIC HMI TP900 [22]

2.9. Temperature Detector (RTD)

Resistance Temperature Detector (RTD) digunakan untuk memantau temperatur lingkungan sistem. RTD bekerja berdasarkan perubahan nilai tahanan listrik akibat perubahan suhu. Data temperatur digunakan sebagai parameter pendukung dalam analisis kondisi operasi sistem [23]. *Resistance Temperature Detector* (RTD) yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5. *Resistance Temperature Detector* (RTD) [23]

2.10. Aktuator dan Komponen Pendukung Sistem

Aktuator merupakan perangkat yang mengubah sinyal kontrol menjadi aksi fisik pada sistem pemadam kebakaran [24]. Sistem pemadam otomatis ini menggunakan komponen aktuator berikut:

2.10.1. Solenoid Valve

Solenoid valve merupakan aktuator elektromagnetik yang berfungsi mengatur aliran fluida pada sistem pemadam kebakaran. Pada sistem ini digunakan *solenoid valve* ASCO tipe *direct-operated* yang bekerja tanpa memerlukan perbedaan tekanan fluida, dengan tegangan kerja 24-48 V DC dan dikendalikan oleh PLC [25]. *Solenoid valve* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 2.6.**



Gambar 2.6. *Solenoid Valve* Asco [26]

2.10.2. Pompa Diafragma

Pompa diafragma merupakan pompa perpindahan positif yang bekerja melalui gerakan bolak-balik diafragma untuk mengalirkan fluida [27]. Pada sistem ini digunakan pompa diafragma DC tipe R385 dengan tegangan kerja 24 V DC dan laju aliran sekitar 1,2 L/menit untuk menyalurkan air ke sprayer saat sistem pemadam diaktifkan.

2.10.3. Pompa Peristaltik

Pompa *peristaltik* merupakan jenis pompa perpindahan positif yang memanfaatkan kompresi dan relaksasi progresif pada tabung fleksibel untuk menggerakkan cairan. Pada sistem ini digunakan pompa Verderflex dengan tegangan kerja DC hingga 30 V dan kapasitas laju aliran maksimum sebesar 240 mL/menit [28][29].

2.10.4. Buzzer

Buzzer merupakan perangkat indikator audio yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik untuk menghasilkan bunyi peringatan. Sistem ini menggunakan buzzer DC tipe SFM-27 dengan rentang tegangan

kerja 3-24 V DC yang diaktifkan oleh sinyal logika dari PLC saat kondisi kebakaran terdeteksi [30].

2.10.5. Sprayer

Sprayer merupakan salah satu komponen utama pada sistem ini. Secara konstruksi, sistem ini memiliki kemiripan dengan sistem *sprinkler* tradisional, namun terdapat perbedaan pada penggunaan *nozel* kabut air yang dirancang secara khusus. *Nozel* kabut otomatis dipasang pada pipa yang terhubung dengan katup seksi. Sistem pompa berfungsi mengalirkan air dari tangki suplai [31]. Pada sistem ini digunakan *fitting* pneumatik tipe Y berdiameter 6 mm serta *mist nozzle head* dengan fitur *anti-drip slip lock* berdiameter 0,8 mm.

2.11. Komponen Elektrikal Sistem

Sistem pemadam kebakaran otomatis didukung oleh komponen elektrikal dan kontrol untuk menjamin keandalan operasi, keselamatan, serta integrasi antarperangkat. *Power supply* industri PULS PIANO PIC480.241C menerima masukan AC 200-240 V dan bekerja mengonversinya menjadi keluaran 24 V DC yang stabil sebagai sumber catu daya utama PLC dan perangkat kontrol [32][16]. Relay PLC-RSC-120UC/21 menerima sinyal *input* 24 V DC dari PLC dan bekerja dengan menghubungkan atau memutus rangkaian beban sebagai *output* ON/OFF, sekaligus memisahkan rangkaian kontrol dengan rangkaian daya [33]. Proteksi sistem dilakukan menggunakan MCB ABB tipe S202-C16 (*2-pole*, 16 A, karakteristik trip C) yang menerima arus beban sebagai *input* dan bekerja memutus rangkaian sebagai *output* proteksi saat terjadi arus lebih atau hubung singkat [34]. *Push button* Siemens tipe 3SU1150-0AB40-3BA0 bekerja dengan menerima *input* tekanan mekanis dan menghasilkan perubahan status kontak *Normally Open* (NO) sebagai sinyal *input* digital ke PLC [35], sedangkan *emergency push button* tipe 3SU1000-1GB20-0AA0 bekerja memutus suplai sistem secara langsung sebagai *output* keselamatan dalam kondisi darurat [36].

2.12. Resistor

Resistor merupakan komponen pasif yang menimbulkan hambatan terhadap arus listrik dan dapat ditemukan hampir pada seluruh rangkaian listrik maupun

jaringan elektronika. Fungsi utama resistor meliputi pembatas arus listrik, pembagi tegangan, pembangkitan panas, pencocokan dan pembebanan rangkaian, pengendalian penguatan, serta penentuan konstanta waktu. Simbol resistor berdasarkan standar IEC digambarkan dalam bentuk persegi panjang dengan terminal pada kedua ujungnya. Sementara itu, standar ANSI yang umum digunakan di Amerika Serikat merepresentasikan resistor dalam bentuk garis zigzag dengan terminal pada kedua ujungnya yang ditunjukkan pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2.7. Simbol Resistor Standar ANSI [37]

Pengukuran resistansi dinyatakan dalam satuan ohm (Ω). Satu ohm merepresentasikan resistansi suatu perangkat ketika terjadi penurunan tegangan sebesar satu volt akibat aliran arus sebesar satu ampere. Hubungan tersebut dinyatakan dalam Hukum Ohm. Hukum Ohm, yang dinamai berdasarkan penemunya yaitu fisikawan asal Jerman Georg Ohm, menyatakan bahwa arus listrik yang mengalir melalui suatu konduktor berbanding lurus dengan beda potensial pada kedua terminalnya. Persamaan Hukum Ohm ditunjukkan pada persamaan 2.2.

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

Keterangan:

I : Arus listrik (A)

V : Tegangan (V)

R : Hambatan (Ω)

Dalam pemilihan resistor, selain mempertimbangkan tegangan dan arus kerja pada perangkat, perlu diperhatikan juga *power rating* resistor untuk menentukan energi maksimum yang dapat dilepaskan resistor secara aman sehingga dapat mencegah terjadinya *overheating* dan kerusakan komponen. Daya listrik berhubungan dengan tegangan dan arus sebagaimana dinyatakan pada Hukum Joule yang ditunjukkan pada persamaan 2.3.

$$P = V \times I \quad (2.3)$$

Jika dikombinasikan dengan Hukum Ohm, diperoleh persamaan 2.4. dan persamaan 2.5. yang digunakan untuk menentukan pemilihan watt resistor sebagai berikut:

$$P = R \cdot I^2 \quad (2.4)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2.5)$$

Semakin besar kemampuan resistor dalam melepaskan panas, maka kenaikan suhu internal resistor akan semakin rendah. Namun, temperatur lingkungan dapat memengaruhi kemampuan disipasi daya resistor. Oleh karena itu, daya nominal resistor menjadi parameter penting dalam pemilihan resistor dibandingkan daya maksimum sesaat. Umumnya, resistor dirancang untuk bekerja pada daya penuh hingga temperatur 70 °C. Di atas temperatur tersebut, resistor akan mengalami *derating*, sehingga kemampuan daya yang dapat digunakan menjadi lebih rendah [37].

2.13. Klasifikasi Alat Pemadam Kebakaran

NFPA 10 (National Fire Protection Association) mengklasifikasikan kebakaran berdasarkan jenis bahan yang terbakar serta media pemadam yang sesuai. Klasifikasi tersebut dibagi menjadi lima kelas, yaitu sebagai berikut:

1. Kebakaran Kelas A: Kebakaran pada bahan padat biasa yang mudah terbakar, seperti kayu, kain, kertas, karet, dan berbagai jenis plastik. Media pemadam yang digunakan antara lain air, alat pemadam api AFFF (*aqueous film-forming foam*), FFFP (*film-forming fluoroprotein*), serta *bromoklorodifluorometana (Halon 1211)*.
2. Kebakaran Kelas B: Kebakaran pada cairan dan gas yang mudah terbakar. Media pemadam yang digunakan antara lain AFFF, FFFP, karbon dioksida (CO₂), serta *bromoklorodifluorometana (Halon 1211)*.
3. Kebakaran Kelas C: Kebakaran yang melibatkan peralatan listrik bertegangan. Media pemadam yang digunakan antara lain karbon dioksida (CO₂) dan *bromoklorodifluorometana (Halon 1211)*.
4. Kebakaran Kelas D: Kebakaran yang terjadi pada material logam mudah terbakar.

5. Kebakaran Kelas K: Kebakaran yang terjadi pada peralatan masak yang melibatkan minyak atau lemak mudah terbakar [38].

2.14. Standar dan Parameter Validasi Sistem

Validasi kinerja sistem mengacu pada:

- NFPA 13 untuk batas maksimum *water transit time* sebesar 60 detik [39].
- Konsentrasi CO sebesar 30 ppm digunakan sebagai ambang batas indikasi awal kebakaran (*Set Point*) secara umum [40].

2.15. Pengaruh Kondisi Lingkungan Terhadap Kinerja Sensor

Pengujian tugas akhir ini dilaksanakan di *workshop Automation* dalam ruangan tertutup dengan kondisi lingkungan yang relatif terkendali. Kondisi tersebut dipilih karena kinerja sensor gas elektrokimia dipengaruhi oleh faktor lingkungan, terutama temperatur dan kelembapan. Sensor yang digunakan adalah sensor CO elektrokimia Dräger Polytron 7000, yang sensitif terhadap variasi suhu dan kelembapan sehingga dapat memengaruhi stabilitas pembacaan. Oleh karena itu, pengujian dilakukan pada kondisi lingkungan yang stabil untuk memperoleh hasil pengukuran yang representatif terhadap kinerja sistem [41].

2.16. Analisis Statistik Pengukuran

Analisis statistik digunakan untuk mengetahui karakteristik data hasil pengukuran sistem dengan merujuk pada [42]. Pada penelitian ini, analisis statistik yang digunakan meliputi rata-rata (*mean*), standar deviasi (*standard deviation*), dan regresi linear untuk mengetahui kestabilan data pengukuran serta hubungan antarparameter hasil pengujian sistem.

2.17.1. Rata-rata (*Mean*)

Rata-rata digunakan untuk mengetahui nilai representatif dari seluruh data hasil pengukuran yang diperoleh selama proses pengujian sistem, dinyatakan dalam persamaan 2.6. sebagai berikut:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (2.6)$$

Keterangan:

\bar{x} = Nilai rata-rata

x_i = Data pengukuran ke-i

n = Jumlah data pengukuran

2.17.2. Standar Deviasi

Standar deviasi digunakan untuk mengetahui tingkat penyebaran data hasil pengukuran terhadap nilai rata-ratanya. Semakin kecil nilai standar deviasi, maka hasil pengukuran dinilai semakin stabil, persamaan standar deviasi dinyatakan pada persamaan 2.7. sebagai berikut:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.7)$$

Keterangan:

s = Standar deviasi

\bar{x} = Nilai rata-rata

x_i = Data pengukuran ke- i

n = Jumlah data pengukuran

2.17.3. Regresi Linear

Regresi linear digunakan untuk mengetahui hubungan linear antara parameter hasil pengujian sistem, seperti hubungan antara tegangan keluaran sensor terhadap konsentrasi gas CO yang terukur, dinyatakan pada persamaan 2.8. sebagai berikut:

$$y = ax + b \quad (2.8)$$

Keterangan:

y = Variabel terikat

x = Variabel bebas

a = Gradien garis

b = Konstanta

2.17.4. Koefisien Determinasi (R^2)

Koefisien determinasi digunakan untuk mengetahui tingkat linearitas hubungan antar variabel hasil pengukuran. Semakin mendekati nilai 1, maka hubungan antar variabel dinilai semakin linear yang dinyatakan pada persamaan 2.9. berikut:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (2.9)$$

Keterangan:

R^2 = Koefisien determinasi

y_i = Data aktual

\hat{y}_i = Data prediksi

\bar{y} = Rata-rata data aktual