

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Pemutus Tenaga (PMT)

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan salah satu peralatan utama pada gardu induk yang berfungsi untuk menghubungkan dan memutuskan rangkaian tenaga listrik pada kondisi normal maupun saat terjadi gangguan. PMT dirancang agar mampu memutus arus beban dan arus hubung singkat dengan aman tanpa menimbulkan kerusakan pada sistem tenaga listrik. Dalam proses pemutusan arus, PMT menggunakan media pemadam busur api yang disesuaikan dengan jenis konstruksinya, seperti udara, vakum, minyak, maupun gas sulfur heksafluorida (SF_6).



Gambar 2. 1 Pemutus Tenaga (PMT)

Pada Gardu Induk (GI) Payakumbuh, PMT yang digunakan sebagai objek

penelitian memanfaatkan gas SF₆ sebagai media isolasi dan pemadam busur api. Penggunaan gas SF₆ dipilih karena memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi, kemampuan pemadaman busur api yang sangat baik, stabil secara kimia, serta mampu meningkatkan keandalan operasi peralatan tegangan tinggi. Oleh karena itu, kondisi gas SF₆ harus selalu terjaga agar PMT dapat beroperasi secara optimal.

Apabila terjadi kebocoran gas SF₆ pada PMT di GI Payakumbuh, tekanan dan konsentrasi gas di dalam ruang isolasi dapat menurun sehingga kemampuan isolasi listrik dan pemadaman busur api menjadi berkurang. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan gangguan operasi, mempercepat kerusakan peralatan, serta memengaruhi kontinuitas penyaluran tenaga listrik. Oleh sebab itu, pemantauan kondisi gas SF₆ pada PMT menjadi salah satu aspek penting dalam kegiatan operasi dan pemeliharaan gardu induk.

2.1.2 Gas sulfur heksafluorida (SF₆)

Gas sulfur heksafluorida (SF₆) merupakan senyawa gas anorganik yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak mudah terbakar, serta memiliki stabilitas kimia yang sangat tinggi. Dalam industri ketenagalistrikan, gas ini digunakan secara luas sebagai media isolasi dan pemadam busur api pada peralatan tegangan tinggi seperti *Gas Insulated Switchgear* (GIS) dan Pemutus Tenaga (PMT). Keunggulan utama SF₆ terletak pada sifat elektronegatifnya, yaitu kemampuan molekul gas untuk menangkap elektron bebas secara cepat, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang mencapai 2,5 hingga 3 kali lebih baik dibandingkan udara pada tekanan yang sama. Selain itu, kemampuan pendinginan dan pemadaman busur api yang sangat cepat memungkinkan dimensi peralatan listrik menjadi jauh lebih ringkas dan efisien dibandingkan isolasi udara konvensional.

Gas SF₆ Tidak berwarna, tidak berbau, tidak mudah terbakar, dan stabil secara kimiawi. Ini berarti bahwa pada suhu kamar tidak bereaksi dengan zat lain. Stabilitas berasal dari pengaturan simetris dari enam partikel fluor di sekitar molekul sulfur pusat. Dan stabilitas inilah yang membuat gas berguna dalam peralatan listrik. SF₆ adalah isolator listrik yang sangat baik dan secara efektif dapat memadamkan busur, yang membuat apparatus tegangan tinggi dan sedang diisi dengan SF₆ yang sangat populer. SF₆ dapat ditemukan di jutaan peralatan listrik di seluruh dunia, peralatan listrik yang mengandung SF₆ adalah pemutus busur di electrical switch (Al Akbary et al., 2020).

2.1.3 ESP32

ESP32 adalah sebuah sistem pada chip (*System on a Chip* atau SoC) yang dirancang oleh Espressif Systems sebagai solusi mikrokontroler berbiaya rendah namun memiliki performa tinggi untuk berbagai aplikasi modern. Berbeda dengan mikrokontroler tradisional, ESP32 sudah mengintegrasikan modul Wi-Fi dan *Bluetooth* (termasuk Bluetooth Low Energy) secara internal, menjadikannya pilihan utama dalam pengembangan perangkat berbasis *Internet of Things* (IoT). Chip ini biasanya ditenagai oleh prosesor *dual-core* Xtensa® 32-bit yang memberikan kecepatan pemrosesan mumpuni untuk menangani tugas-tugas kompleks secara bersamaan, mulai dari mengolah data sensor hingga mengelola koneksi nirkabel ke server *cloud*.

Adapun spesifikasi ESP32 adalah sebagai berikut: Tersedia dalam dua varian, yaitu dengan 30 GPIO dan 36 GPIO. Keduanya memiliki fungsi yang sama, tetapi versi dengan 30 GPIO lebih disukai karena memiliki dua pin GND, yang memudahkan pengaturan rangkaian. Semua pin diberi label di bagian atas board sehingga mudah dikenali. Board ini dilengkapi dengan antarmuka USB to UART yang memudahkan pemrograman menggunakan software pengembangan seperti Arduino IDE. Sumber daya untuk board ini dapat disuplai melalui konektor microUSB (Azhar & Nurpulaela, 2024).



Gambar 2. 2 ESP32

2.1.4 LoRa Ra-02

Modul LoRa Ra-02 merupakan solusi komunikasi nirkabel berbasis chip Semtech SX1278 yang dikembangkan oleh Ai-Thinker untuk kebutuhan transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya minimal. Bekerja pada frekuensi 433 MHz, modul ini memanfaatkan teknologi spread spectrum yang memungkinkannya mengirimkan informasi hingga jarak 10 kilometer di area terbuka, sekaligus

memiliki ketahanan yang luar biasa terhadap interferensi sinyal radio lainnya. Karakteristik utamanya yang hemat energi menjadikan Ra-02 pilihan favorit untuk perangkat IoT berbasis baterai, seperti sensor pemantau lahan pertanian atau sistem pelacakan aset di area terpencil.

Dari sisi teknis, Ra-02 beroperasi pada tegangan 3.3V dan berkomunikasi dengan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32 melalui antarmuka SPI. Modul ini dilengkapi dengan konektor IPEX untuk pemasangan antenna eksternal, yang sangat krusial dalam menentukan kestabilan dan jarak jangkauan sinyal. Meski memiliki keunggulan dalam jarak tempuh, modul ini dirancang untuk pengiriman data berukuran kecil (low bandwidth), sehingga lebih cocok digunakan untuk mengirimkan parameter sensor seperti suhu atau kelembapan daripada data multimedia yang berat.



Gambar 2. 3 LoRa Ra-02.

2.1.5 AC to DC converters

AC to DC converters 12V 3A adalah perangkat yang berfungsi untuk mengubah sumber listrik arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) dengan tegangan keluaran sebesar 12V dan kemampuan arus maksimum sebesar 3 ampere. Dengan spesifikasi tersebut, *AC to DC converters* ini mampu menghasilkan daya hingga 36W, yang diperoleh dari hasil perkalian antara tegangan dan arus ($P = V \times I$). Cara kerjanya dimulai dari masuknya tegangan AC 220V dari sumber listrik, kemudian diturunkan melalui rangkaian seperti transformator atau switching converter, disearahkan menggunakan penyearah (rectifier), dan distabilkan sehingga menghasilkan tegangan DC 12V yang konstan.

Perangkat ini banyak digunakan pada berbagai aplikasi seperti lampu LED, CCTV, router, motor DC kecil, serta sistem mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32. Penting untuk diperhatikan bahwa nilai 3 ampere merupakan batas maksimum arus yang dapat disuplai, sehingga beban yang digunakan tidak boleh melebihi kapasitas tersebut agar *AC to DC converters* tetap bekerja dengan aman

dan tidak mengalami kerusakan.



Gambar 2. 4 AC to DC converters 12V 3A.

2.1.6 Step Down

Step-down adalah suatu rangkaian atau modul elektronika yang berfungsi untuk menurunkan tegangan listrik dari nilai yang lebih tinggi menjadi nilai yang lebih rendah sesuai dengan kebutuhan beban. Komponen ini sering digunakan dalam sistem elektronika untuk memastikan bahwa tegangan yang diberikan ke perangkat sesuai dengan spesifikasi kerja agar tidak terjadi kerusakan.

Secara umum, step-down dikenal juga sebagai DC-DC converter tipe *buck converter*, yaitu konverter yang mengubah tegangan DC ke DC dengan nilai yang lebih kecil. Prinsip kerjanya adalah dengan mengatur lebar pulsa (PWM) melalui komponen seperti transistor, induktor, dan kapasitor sehingga tegangan output dapat distabilkan. Dalam aplikasi Internet of Things (IoT), modul step-down digunakan untuk menyesuaikan sumber tegangan, misalnya dari power supply 12V diturunkan menjadi 5V atau 3.3V untuk mikrokontroler seperti ESP32 dan sensor.



Gambar 2. 5 Stepdown

2.1.7 Sensor Gas G7L SF₆ berbasis NDIR

Sensor yang digunakan pada penelitian ini adalah sensor gas G7L SF₆ berbasis *Non-Dispersive Infrared* (NDIR). Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip

penyerapan cahaya inframerah oleh molekul gas sulfur heksafluorida (SF_6). Setiap molekul gas memiliki karakteristik penyerapan cahaya inframerah pada panjang gelombang tertentu. Ketika gas SF_6 memasuki ruang deteksi sensor, sebagian energi cahaya inframerah akan diserap sehingga intensitas cahaya yang diterima oleh detektor berkurang. Perubahan intensitas tersebut diproses oleh rangkaian internal sensor untuk menghasilkan nilai konsentrasi gas dalam satuan *parts per million* (ppm).



Gambar 2. 6 Sensor Gas G7L SF_6 berbasis NDIR

Berdasarkan karakteristik teknisnya, sensor G7L SF_6 memiliki beberapa parameter yang menjadi pertimbangan dalam perancangan sistem pada penelitian ini. Parameter tersebut meliputi rentang pengukuran, resolusi, akurasi, waktu respons, kondisi lingkungan operasi, kebutuhan catu daya, serta jenis keluaran yang tersedia. Karakteristik teknis sensor tersebut disajikan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Karakteristik teknis Sensor Gas G7L SF_6 berbasis NDIR

Parameter	Spesifikasi
Nama Sensor	G7L-SF6
Jenis Sensor	Sensor gas Sulfur Hexafluoride (SF_6) berbasis NDIR
Prinsip Kerja	Non-Dispersive Infrared (NDIR)
Gas yang Dideteksi	Sulfur Hexafluoride (SF_6)
Rentang Pengukuran	0–1000 ppm (tersedia varian 2000 ppm dan 3000 ppm)
Resolusi	5 ppm
Response time T90	≤ 30 detik
Repeatability	$\leq \pm 1,5\%$ FS
Suhu operasi	-20 – 60 °C
Kelembapan	0–95% RH
Preheat	1 menit
Supply	3,3–6 VDC
Digital	1200 bps
Analog	0,4–2 V
Rentang Pengukuran	1 ppm
Tegangan suplai	3,3–6 VDC
Tx	TTL 0–2,5 V

Rx	Input 1,8–5 V
Data bit	8
Stop bit	1

Selain karakteristik teknis, sensor G7L SF₆ memiliki protokol komunikasi yang mengatur proses pertukaran data antara sensor dan mikrokontroler. Protokol tersebut menentukan perintah yang dapat diberikan kepada sensor, format data yang dikirimkan, serta informasi hasil pengukuran yang diterima oleh sistem. Karakteristik komunikasi sensor G7L ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2 Karakteristik Protokol Komunikasi dan Pembacaan Data Sensor G7L SF₆

Parameter	Keterangan
Antarmuka komunikasi	ASCII Serial
Kecepatan komunikasi	1200 bps
Kode R0	Membaca nomor seri dan versi sensor
Kode R4	Membaca rentang pengukuran dan satuan
Kode R6	Membaca nilai konsentrasi SF ₆
Kode F0	Menonaktifkan pengiriman data aktif
Kode F1	Mengaktifkan pengiriman data aktif
Format data	Suhu, Konsentrasi Checksum
Satuan suhu	°C
Satuan konsentrasi	PPM

Data hasil pengukuran yang dikirimkan sensor disajikan dalam format karakter ASCII. Pada mode pengiriman data aktif, data terdiri atas nilai suhu, konsentrasi SF₆, dan checksum. Sebagai contoh, **data 17.8,0.0 78** menunjukkan suhu sebesar 17,8 °C, konsentrasi SF₆ sebesar 0,0 ppm, dan nilai 78 sebagai *checksum*. Dengan demikian, mikrokontroler melakukan proses parsing terhadap data yang diterima untuk memisahkan nilai suhu, konsentrasi SF₆, dan checksum sebelum data digunakan pada proses selanjutnya.

2.1.8 LCD I2C

LCD (*Liquid Crystal Display*) 16x2 I2C merupakan perangkat tampilan yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk karakter sebanyak 16 kolom dan 2 baris. LCD bekerja dengan memanfaatkan kristal cair untuk membentuk karakter berdasarkan sinyal yang diberikan oleh mikrokontroler. Pada umumnya, LCD 16x2 menggunakan pengendali berbasis HD44780 untuk mengatur proses penyimpanan dan penampilan karakter pada layar. Penggunaan modul antarmuka I2C (*Inter-Integrated Circuit*) pada LCD memungkinkan komunikasi dengan mikrokontroler melalui dua jalur utama, yaitu SDA (*Serial Data Line*) sebagai jalur pengiriman data dan SCL (*Serial Clock Line*) sebagai jalur sinyal

clock. Modul antarmuka I2C yang terpasang pada bagian belakang LCD umumnya menggunakan IC PCF8574 sebagai *I/O expander* untuk menghubungkan komunikasi serial I2C dengan antarmuka LCD.



Gambar 2. 7 LCD 12C 16x2

LCD 16x2 I2C memiliki empat terminal utama, yaitu VCC, GND, SDA, dan SCL. VCC digunakan sebagai sumber tegangan, GND sebagai jalur referensi ground, sedangkan SDA dan SCL digunakan untuk proses komunikasi antara LCD dan mikrokontroler. Penggunaan antarmuka I2C membuat kebutuhan pin mikrokontroler menjadi lebih sedikit serta menyederhanakan proses pengkabelan dibandingkan LCD dengan antarmuka paralel.

Pada proyek akhir ini, LCD 16x2 I2C digunakan sebagai media penampil lokal pada modul *receiver*. LCD menampilkan data hasil pembacaan sensor yang telah diterima oleh *receiver* dari modul *transmitter*. Informasi yang ditampilkan berupa nilai konsentrasi gas SF₆ sehingga kondisi hasil pembacaan dapat diketahui secara langsung pada perangkat *receiver* tanpa bergantung pada media monitoring Bot Telegram. Dengan demikian, LCD berfungsi sebagai media visualisasi lokal yang melengkapi proses pemantauan data pada sistem pendeteksi kebocoran gas SF₆.

2.1.9 Bot Telegram

Bot Telegram pada alat pendeteksi gas SF₆ berfungsi sebagai media komunikasi antara pengguna dengan sistem berbasis ESP32 yang terhubung ke sensor NDIR. Melalui bot ini, pengguna dapat mengirim perintah (command) dari aplikasi Telegram untuk mengontrol alat serta menerima data hasil pengukuran secara real-time tanpa harus berada langsung di lokasi alat.

Secara umum, sistem bekerja dengan cara ESP32 terhubung ke internet (WiFi), kemudian berkomunikasi dengan Bot Telegram menggunakan API dari Telegram. Ketika pengguna mengirimkan perintah seperti `/start`, `/cek_gas`, atau

/status, bot akan meneruskan perintah tersebut ke ESP32. Selanjutnya, ESP32 akan membaca data konsentrasi gas SF₆ dari sensor NDIR, mengolahnya, lalu mengirimkan hasilnya kembali ke pengguna dalam bentuk pesan Telegram. Data yang dikirim biasanya berupa nilai konsentrasi dalam satuan ppm (parts per million), misalnya “Kadar SF₆: 350 ppm”. Selain itu, bot Telegram juga dapat digunakan untuk sistem monitoring otomatis. ESP32 dapat diprogram untuk mengirim notifikasi secara berkala atau ketika terjadi kondisi tertentu, seperti saat kadar gas melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Contohnya, jika konsentrasi SF₆ > 1000 ppm, maka bot akan mengirim pesan peringatan. Hal ini sangat penting untuk meningkatkan keselamatan dan respon cepat terhadap potensi kebocoran.

2.2 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa penelitian terdahulu yang dijadikan acuan. Acuan pertama berjudul “*Sistem Monitoring Kebocoran Gas SF₆ pada Gas Insulated Substation (GIS) Berbasis Internet of Things (IoT)*” yang ditulis oleh Al Akbary. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan melakukan perancangan sistem monitoring berbasis IoT menggunakan modul komunikasi LoRa. Sistem ini memanfaatkan sensor tekanan untuk mendeteksi adanya indikasi kebocoran gas SF₆ pada peralatan GIS. Data yang diperoleh kemudian dikirimkan secara real-time ke server dan ditampilkan melalui antarmuka web serta notifikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan tekanan gas secara akurat dan memberikan peringatan dini terhadap potensi kebocoran. Pendekatan ini dinilai lebih efektif dibandingkan metode monitoring manual karena dapat meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik (Akbary & Hendrawan, 2023).

Acuan kedua berjudul “*Rancang Bangun Alat Pendeteksi Kebocoran Gas Berbasis Internet of Things (IoT)*” yang ditulis oleh Syahputra dan Simanjuntak. Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun dengan memanfaatkan sensor gas MQ-2 sebagai pendeteksi kebocoran gas serta mikrokontroler NodeMCU sebagai pengolah data. Sistem yang dirancang dilengkapi dengan buzzer sebagai alarm serta notifikasi berbasis internet untuk memberikan peringatan kepada pengguna. Data dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi sehingga dapat dipantau secara jarak jauh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat mampu mendeteksi kebocoran gas dengan respon cepat dan memberikan notifikasi secara real-time, sehingga dapat meningkatkan keamanan lingkungan (Syahputra & Simanjuntak, 2025).

Acuan ketiga berjudul “*Rancang Bangun Sistem Pendeteksi Kebocoran Gas Berbasis IoT Menggunakan NodeMCU dan Aplikasi Blynk*” yang ditulis oleh Nurhapsari dkk. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan mengintegrasikan sensor gas MQ-6 dan mikrokontroler NodeMCU. Sistem ini dirancang untuk mendeteksi kebocoran gas dan mengirimkan data ke aplikasi Blynk melalui koneksi internet. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan alarm sebagai indikator bahaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja dengan baik dalam mendeteksi kebocoran gas serta memberikan notifikasi secara real-time kepada pengguna. Penggunaan aplikasi Blynk mempermudah monitoring karena dapat diakses melalui smartphone (Nurhapsari et al., 2025).

Acuan keempat berjudul “*Smart Monitoring Alat Deteksi Kebocoran Gas Berbasis Internet of Things dengan Metode Fuzzy Logic*” yang ditulis oleh Saied. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan menggabungkan sensor gas MQ-2 dan MQ-6 serta algoritma fuzzy logic untuk menentukan tingkat bahaya kebocoran gas. Data yang diperoleh diproses oleh mikrokontroler dan dikirimkan ke sistem monitoring berbasis IoT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan metode fuzzy logic dapat meningkatkan akurasi dalam menentukan kondisi aman, waspada, dan bahaya. Sistem ini dinilai lebih adaptif dibandingkan sistem konvensional karena mampu mengolah data secara cerdas (Saied, 2024).

Acuan kelima berjudul “*Prototype Alat Pendeteksi dan Pengukur Kebocoran Gas Berbasis IoT dengan Notifikasi Telegram*” yang ditulis oleh Lontaan. Penelitian ini menggunakan metode rancang bangun dengan memanfaatkan sensor gas dan mikrokontroler berbasis IoT. Sistem ini mampu mengirimkan notifikasi secara langsung kepada pengguna melalui aplikasi Telegram ketika terjadi kebocoran gas. Selain itu, sistem juga dapat menampilkan data pengukuran secara real-time. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu meningkatkan efektivitas deteksi kebocoran gas serta memberikan respon cepat dalam kondisi darurat (Lontaan & Marinka, 2025).

Setelah penelitian yang membahas penerapan IoT dan media notifikasi pada sistem pendeteksi kebocoran gas, beberapa penelitian lain digunakan untuk memperkuat aspek pendeteksian gas SF₆ dan komunikasi nirkabel yang diterapkan pada penelitian ini. Penelitian-penelitian berikut memiliki fokus yang lebih spesifik,

terutama pada karakteristik pendeteksian SF₆, penggunaan sensor, serta penerapan LoRa dalam proses pengiriman data.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Tatemi dkk. melalui penelitian berjudul *“Study on Field Demonstration of High-Sensitivity SF₆ Leakage Detection Method for Gas Insulated Switchgear”*. Penelitian ini berfokus pada pengembangan metode untuk mendeteksi kebocoran SF₆ pada Gas Insulated Switchgear (GIS) dengan memanfaatkan perubahan karakteristik gas di dalam peralatan. Pengujian dilakukan pada kondisi lapangan untuk mengetahui kemampuan metode dalam mendeteksi kebocoran dengan tingkat sensitivitas yang tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang dikembangkan dapat digunakan untuk mendukung pendeteksian kebocoran SF₆ pada peralatan tegangan tinggi. Penelitian ini menjadi acuan dalam memahami penerapan metode pendeteksian kebocoran SF₆ pada peralatan listrik, sedangkan penelitian yang dilakukan menggunakan sensor G7L-SF₆ untuk memperoleh data konsentrasi gas secara langsung (Tatemi et al., 2021).

Sejalan dengan pembahasan mengenai pendeteksian SF₆, penelitian berjudul *“Sub-ppm NDIR SF₆ Gas Sensor Using ICEEMDAN-SG Joint Denoising Algorithm”* membahas pengembangan sensor SF₆ berbasis Non-Dispersive Infrared (NDIR). Penelitian tersebut berfokus pada peningkatan kualitas hasil pembacaan sensor melalui metode pengolahan sinyal denoising untuk mengurangi gangguan pada data pengukuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diterapkan mampu meningkatkan kualitas sinyal sensor dalam mendeteksi konsentrasi SF₆ pada tingkat rendah. Penelitian ini menjadi acuan pada aspek pengukuran konsentrasi SF₆, meskipun teknologi sensor dan metode pengolahan sinyal yang digunakan berbeda dengan penelitian ini (He et al., 2024).

Selain aspek pendeteksian, proses pengiriman data juga menjadi bagian penting dalam sistem monitoring karena data hasil pembacaan sensor perlu diteruskan dari perangkat pengirim menuju perangkat penerima. González dkk. melalui penelitian berjudul *“LoRa Sensor Network Development for Air Quality Monitoring or Detecting Gas Leakage Events”* mengembangkan jaringan sensor berbasis LoRa untuk pemantauan kualitas udara dan pendeteksian kejadian kebocoran gas. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa LoRa dapat digunakan sebagai media komunikasi nirkabel untuk mengirimkan data sensor dari lokasi

pemantauan menuju perangkat penerima. Penelitian ini menjadi acuan dalam penggunaan LoRa sebagai media komunikasi pada penelitian yang dilakukan, khususnya untuk mendukung pengiriman data sensor antarperangkat (González et al., 2020).

Penerapan LoRa pada komunikasi antara perangkat pengirim dan penerima juga ditunjukkan oleh Nugraha, Suja'i, dan Marya melalui penelitian "*Design Gas Leak Detection System in Residential Areas Using LoRa Communication*". Sistem yang dikembangkan menggunakan beberapa perangkat *transmitter* yang dilengkapi sensor gas, kemudian data hasil pembacaan dikirimkan melalui LoRa menuju *receiver*. Data yang diterima selanjutnya digunakan untuk mengetahui kondisi gas pada lokasi pemantauan. Penelitian ini memiliki keterkaitan dengan penelitian yang dilakukan karena menggunakan konsep *transmitter –receiver* dan LoRa sebagai media pengiriman data. Hasil penelitian tersebut menjadi acuan dalam perancangan komunikasi antara modul *transmitter* dan *receiver*, terutama dalam melihat keberhasilan penerimaan data dan jangkauan komunikasi (Nugraha et al., 2024).

Penggunaan mikrokontroler ESP32 dalam sistem komunikasi LoRa juga dibahas oleh O'Brien, Salamy, dan Min melalui penelitian "*Design of a Wireless Cyber-Physical System for Gas Leak Detection with LoRa*". Penelitian tersebut mengembangkan sistem pendeteksi kebocoran gas dengan menggabungkan ESP32 dan LoRa untuk mengirimkan data sensor secara nirkabel. Fokus penelitian berada pada perancangan sistem komunikasi yang memungkinkan hasil pembacaan sensor diteruskan dari perangkat pemantauan menuju sistem penerima. Penelitian ini menjadi acuan dalam penggunaan ESP32 dan LoRa sebagai bagian dari sistem komunikasi nirkabel, sedangkan penelitian yang dilakukan mengarah pada pendeteksian kebocoran SF₆ menggunakan sensor G7L-SF₆ (O'Brien et al., 2025).

Untuk memperkuat aspek pendeteksian dini pada objek SF₆, Lindskog, Neandhers, dan Thiringer melakukan penelitian berjudul "*Early SF6 Gas Leakage Detection Through a Novel Comparison Algorithm Based on Pressure Only*". Penelitian tersebut membahas metode pendeteksian awal kebocoran SF₆ pada circuit breaker berdasarkan perubahan tekanan gas. Metode yang dikembangkan memungkinkan kondisi kebocoran dikenali melalui perbandingan data tekanan

sehingga indikasi kebocoran dapat diketahui lebih awal. Penelitian ini menjadi acuan dalam penerapan pemantauan kondisi SF₆ secara berkelanjutan untuk mendukung pendeteksian kebocoran sejak tahap awal. Perbedaannya dengan penelitian ini terletak pada parameter yang digunakan, yaitu penelitian tersebut menggunakan tekanan gas, sedangkan penelitian ini menggunakan sensor G7L-SF₆ untuk mendeteksi konsentrasi gas (Lindskog et al., 2023).

Selain membahas penerapan LoRa pada sistem pendeteksi gas, pengujian karakteristik komunikasi berdasarkan jarak juga menjadi pertimbangan dalam perancangan sistem. Makarim dan Rafsyam melalui penelitian “*Pengiriman Data Polusi Udara Menggunakan Komunikasi Long Range (LoRa)*” menerapkan LoRa untuk mengirimkan data hasil pemantauan gas dari perangkat sensor menuju gateway. Pengujian dilakukan pada beberapa jarak dan kondisi lingkungan untuk mengetahui kemampuan komunikasi dalam mengirimkan data. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan jangkauan komunikasi berdasarkan kondisi jalur transmisi. Penelitian ini menjadi acuan dalam melakukan pengujian komunikasi LoRa berdasarkan jarak pada penelitian yang dilakukan, khususnya untuk mengetahui jarak komunikasi efektif antara *transmitter* dan *receiver* (Makarim & Rafsyam, 2022).

Dengan demikian, penelitian terdahulu yang telah dibahas memberikan dasar dari beberapa aspek yang digunakan dalam penelitian ini. Penelitian mengenai SF₆ memberikan acuan dalam proses pendeteksian kebocoran, sedangkan penelitian mengenai LoRa memberikan gambaran mengenai komunikasi data antara perangkat pengirim dan penerima. Penelitian mengenai ESP32 dan sistem monitoring juga mendukung pemilihan perangkat pengolah data serta metode penyampaian informasi. Berdasarkan acuan tersebut, penelitian ini menggabungkan sensor G7L-SF₆, ESP32, komunikasi LoRa antara *transmitter* dan *receiver*, LCD 16x2 I2C sebagai penampil data pada *receiver*, serta Bot Telegram sebagai media monitoring dan penyampaian informasi kepada pengguna.