

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang pernah dilakukan sebagai referensi pengerjaan skripsi adalah sebagai berikut:

1. Jurnal berjudul “Rancang Bangun Alat Deteksi Kebocoran Gas LPG serta Penanggulangan Kebakaran Menggunakan Sensor MQ2 dan Sensor Api Berbasis IoT” Tahun 2022 yang disusun oleh Ilma Aulia & Munasir. Membahas tentang pengembangan perangkat guna mendeteksi kebocoran gas LPG dan cara mengatasinya apabila terjadi kebakaran yang terintegrasi dengan aplikasi Blynk (Aulia & Munasir, 2022).
2. Jurnal berjudul “Rancang Bangun Sistem Pendeteksi Kebocoran Gas LPG Berbasis IoT” Tahun 2021 yang disusun oleh Muhammad Ridwan & Antoni Pribadi. Dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32, akan dibahas pembuatan sistem untuk mendeteksi kebocoran gas LPG. NodeMCU terhubung ke internet melalui penggunaan aplikasi komunikasi pada perangkat seluler Android (Ridwan, 2021).
3. Jurnal berjudul “Desain Sistem Pengurangan Kebisingan Sensor Bahan Bakar Menggunakan Filter Kalman” yang disusun oleh Rico Bernando Putra dan Suhartati Agoes yang membahas tentang sistem pengurangan kebisingan sensor bahan bakar menggunakan filter Kalman untuk mengatasi masalah ketidakstabilan data akibat guncangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi kebisingan sehingga hasil filter lebih mendekati hasil sebenarnya (Putra & Agoes, 2021).
4. Jurnal berjudul “Sistem Tertanam untuk Deteksi Kebocoran LPG Menggunakan Mikrokontroler Arduino dan Algoritma Filter Kalman” yang ditulis oleh Rakha hafizh Praman, yang terdiri dari kipas angin, filter Kalman, sensor MQ-2, serta sistem pendeteksi kebocoran LPG berbasis Arduino. Keberadaan gas LPG bisa dideteksi dengan sensor MQ-2, sedangkan filter Kalman digunakan untuk mengurangi noise

sehingga hasil pengukuran lebih akurat dan stabil. Sistem ini mampu mendeteksi kebocoran gas secara cepat, memberikan peringatan dini, serta mengaktifkan tindakan pencegahan secara otomatis (Pramana & Author, 2025).

2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Liquefied Petroleum Gas (LPG)*

1. Pengertian LPG

LPG adalah gas hasil sampingan pengolahan minyak bumi serta gas alam yang berkomponen utama propana (C_3H_8) serta butana (C_4H_{10}). LPG disimpan dalam bentuk cair melalui proses tekanan, kemudian diuapkan saat dilepas ke udara (Kementrian ESDM, 2011). LPG dikategorikan sebagai clean fuel karena pembakarannya relatif bersih, namun berisiko tinggi terhadap kebocoran.

Analisis bahwa LPG diperoleh sebagai produk sampingan dari proses pemurnian gas alam maupun penyulingan minyak bumi, dan termasuk bahan bakar fosil yang memiliki nilai kalor tinggi, mudah terbakar, serta menghasilkan pembakaran yang relatif bersih dibandingkan bahan bakar padat (Ardila-Suarez et al., 2025).

LPG secara fisik tidak memiliki warna dan tidak memiliki aroma; oleh karena itu, dalam penggunaan komersial biasanya ditambahkan zat pemberi bau (odorant), seperti etil merkaptan, agar kebocorannya dapat dideteksi oleh indera manusia (Muhtar et al., 2021).

2. Komposisi Kimia LPG

LPG merupakan campuran berbagai hidrokarbon rantai pendek (C_3 – C_4) yang berasal dari pemurnian gas alam dan penyulingan minyak bumi. Komposisi LPG dapat bervariasi tergantung standar negara, musim, dan keperluan aplikasi, namun umumnya tersusun oleh komponen berikut:

Komponen Utama LPG

a. Propana (C_3H_8)

Penelitian menunjukkan bahwa propana adalah komponen utama dalam LPG, dengan kisaran 20–60% tergantung negara dan standar distribusi. Propana merupakan alkana jenuh yang memiliki tekanan uap tinggi sehingga meningkatkan volatilitas LPG (Speight, 2015).

b. Butana (C_4H_{10})

Butana—yang mencakup n-butana dan iso-butana—juga merupakan komponen utama LPG. Titik mendidih butana

lebih tinggi dibandingkan propana yaitu $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sehingga menghasilkan tekanan uap yang lebih rendah. Campuran propana–butana menentukan performa pembakaran LPG (Hidayat, 2017).

Komposisi LPG umumnya didominasi oleh kedua komponen ini, yang jumlah totalnya biasanya melebihi 90% dari keseluruhan campuran.

3. Komponen Minor dalam LPG

Selain propana dan butana, LPG juga bisa memiliki sedikit hidrokarbon ringan lainnya, tergantung pada asal dan cara penyaringannya:

- a. Etana (C_2H_6)
Etana muncul sebagai jejak hasil pemisahan gas alam, umumnya $<1\%$ (Rahman, 2019.)
- b. Pentana (C_5H_{12}) dan fraksi C_5+
Pentana dan hidrokarbon dengan lima atom karbon atau lebih muncul dalam jumlah sangat kecil (umumnya $<2\%$) dan diklasifikasikan sebagai impurities atau fraksi “ C_5+ ” (Dirjen Migas, 2009).
- c. Hidrokarbon tak jenuh (olefin)
Dalam LPG hasil kilang minyak, dapat ditemukan jejak propilena (C_3H_6), butilena (C_4H_8), atau isomer lain hidrokarbon tak jenuh akibat proses cracking. Jumlahnya biasanya kecil ($<1\%$) (Ginting, 2016).

4. Spesifikasi LPG Menurut Standar Indonesia

Sesuai dengan Standar dan Mutu LPG yang mengacu pada ketentuan Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, komposisi LPG untuk pasar domestik umumnya memenuhi ketentuan: (Kementrian ESDM, 2011)

- a. Propana (C_3) + Butana (C_4) : $\geq 97\%$ volume
- b. Fraksi C_5+ : $\leq 2\%$ volume

Spesifikasi ini memastikan bahwa LPG memiliki karakteristik pembakaran yang stabil dan aman digunakan di tingkat rumah tangga maupun industri.

5. Variasi Komposisi (Propana : Butana)

Komposisi LPG dapat bervariasi berdasarkan:

- a. Iklim atau musim $\rightarrow$ Lebih banyak propana digunakan pada wilayah dingin agar mudah menguap (World LPG Association, 2020).

- b. Sumber produksi → LPG dari gas alam cenderung lebih “murni” (propana-butana dominan), sedangkan LPG dari kilang minyak mengandung lebih banyak olefin.
 - c. Jenis LPG → ada LPG “campuran”, LPG “propana murni”, dan LPG “butana murni”.
6. Penambahan Odorant
- LPG murni tidak berbau, sehingga untuk keamanan ditambahkan senyawa berbau tajam, biasanya etil merkaptan (C_2H_5SH) agar kebocoran dapat terdeteksi dengan cepat (Khan, 2014).

2.2.2 Bahaya Kebocoran Gas LPG

Kebocoran gas LPG diidentifikasi ketika konsentrasinya berada dalam kisaran 200 hingga 5000 ppm. Dalam investigasi ini, konsentrasi gas LPG ditetapkan pada 300 ppm. Hal ini memastikan bahwasanya sistem akan mengidentifikasi kebocoran bila jumlah gas LPG mencapai ataupun melebihi ambang batas ini. Sistem akan mengaktifkan kipas angin secara otomatis jika tingkatnya melebihi 300 ppm dan terus berjalan hingga kebocoran tidak lagi terdeteksi atau konsentrasinya turun di bawah batas toleransi 300 ppm (Kamelia et al., 2017). Kebocoran LPG dapat mengakibatkan berbagai potensi bahaya serius, antara lain:

1. Bahaya Kebakaran dan Ledakan
Ketika konsentrasi LPG di udara mencapai rentang LEL–UEL, gas tersebut dapat terbakar hanya dengan percikan kecil dari sakelar listrik atau api statis. Kondisi ini disebut explosive atmosphere dan dapat menimbulkan ledakan jika tidak segera ditangani (Nugroho, 2019).
2. Bahaya Kesehatan
LPG dapat menyebabkan:
 - a. Sesak napas akibat displacement oksigen
 - b. Pusing dan kehilangan kesadaran pada konsentrasi tinggi
 - c. Potensi frostbite pada paparan cairan LPG langsung
3. Bahaya Lingkungan dan Properti
Akumulasi gas di ruangan tertutup dapat merusak struktur bangunan, peralatan, dan menyebabkan kebakaran besar. Maka dari itu dibutuhkan sistem yang responsif dalam mendeteksi kebocoran.

2.2.3 *Internet of Things (IoT)*

1. Pengertian *Internet of Things (IoT)*

Istilah *Internet of Things (IoT)* mengacu pada jaringan hipotetis benda-benda fisik yang saling terhubung yang bisa bertukar data satu sama lain serta dengan komputer di masa depan (Ary Prasasty Marpaung et al., 2024). Dengan bantuan *Internet of Things (IoT)*, perangkat yang selalu terhubung bisa memanfaatkan bandwidth internet yang tersedia dengan lebih baik. Berbagai gadget dapat terhubung satu sama lain guna memudahkan tugas sehari-hari berkat teknologi ini, yang berfungsi secara terus-menerus. Orang-orang akan merasa lebih mudah untuk melaksanakan berbagai pekerjaan berkat konektivitas ini, yang memungkinkan tenaga kerja yang lebih efisien serta praktis (Ayu Syahfitri, 2025).

Bangunan yang dilengkapi dengan *Internet of Things (IoT)* bisa mempunyai perangkat elektronik, seperti pencahayaan ruangan, yang dikendalikan dari jarak jauh melalui jaringan komputer. Kebutuhan untuk mempelajari, mengimplementasikan, serta memanfaatkan kemajuan teknis yang begitu cepat dalam kehidupan sehari-hari sudah tidak terbantahkan lagi. Selain perangkat pintar, komponen lain seperti (i) AI, (ii) sensor, dan (iii) koneksi diperlukan untuk membangun ekosistem IoT. Semua *Internet of Things* bertumpu pada tiga pilar ini.



Gambar 2.1 *Arsitektur Internet of Things*

2. Cara Kerja *Internet of Things*

Sederhananya, *Internet of Things (IoT)* ialah arsitektur yang mengandalkan tiga komponen utama: objek fisik yang disematkan dengan modul IoT, perangkat yang terhubung ke internet (misalnya, router serta modem nirkabel), serta pusat data *cloud*, yang menjadi tempat penyimpanan aplikasi serta basis data.

2.2.4 *Blynk*

Blynk merupakan sebuah platform *Internet of Things (IoT)* yang dibuat agar membantu dalam membuat dan mengelola aplikasi yang bisa digunakan untuk mengontrol perangkat IoT melalui ponsel. *Blynk* menawarkan tampilan grafis yang mudah dipahami dan alat yang canggih untuk menghubungkan serta mengendalikan perangkat dari jarak jauh. *Blynk* memberi kesempatan bagi pengguna untuk mengembangkan aplikasi mobile guna mengontrol serta memantau perangkat IoT melalui ponsel mereka. Platform ini menghadirkan antarmuka yang ramah pengguna dan beragam widget yang bisa dipilih untuk berinteraksi dengan perangkat.



Gambar 2.2 Logo *Blynk*

2.2.5 Kalman Filter

1. Pengertian

Salah satu algoritme tersebut ialah Kalman Filter, yang mengambil data historis serta menggunakannya dalam membuat prediksi tentang masa depan. Tidak seperti jenis filter yang lebih tradisional, pendekatan ini tidak memakai band pass filter, high pass filter, ataupun low pass filter (BPF). Pada dasarnya, metode ini berfungsi sebagai estimator yang digunakan untuk memperkirakan keadaan (state) atau komponen tertentu dari suatu sinyal. Proses estimasi tersebut menghasilkan keluaran yang setara dengan pengurangan gangguan (noise) pada sinyal, sehingga metode ini dikenal sebagai Kalman Filter.

Kalman Filter ialah salah satu metode pemrosesan sinyal berbasis estimasi yang sering digunakan untuk meningkatkan sensitivitas dan kestabilan pembacaan sensor MQ-2, terutama karena output sensor ini sangat bising (fluktuatif) akibat suhu, kelembaban, dan karakteristik pemanas internal.

Filter Kalman dasar, Extended, Unscented, serta Ensemble Kalman Filter ialah variasi dari desain Kalman Filter. Berbagai versi Kalman Filter diciptakan guna mengatasi situasi yang lebih rumit, Kalman Filter konvensional ialah yang paling dasar. Dikarenakan fakta bahwasanya persamaannya cukup

mengurangi noise, Kalman Filter konvensional dipergunakan dalam investigasi ini. Dua komponen utama dari Kalman Filter ialah fase prediksi serta pembaruan ataupun update.

Persamaan Kalman Filter standar diperlihatkan pada (1) – (5).

Prediksi :

$$\hat{x}_{t|t-1} = F_t \hat{x}_{t-1|t-1} + B_t u_t \quad (1)$$

$$P_{t|t-1} = F_t P_{t-1|t-1} F_t^T + Q_t \quad (2)$$

Update :

$$\hat{x}_{t|t} = \hat{x}_{t|t-1} + K_t (y_t - H_t \hat{x}_{t|t-1}) \quad (3)$$

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1} \quad (4)$$

$$P_{t|t} = (I - K_t H_t) P_{t|t-1} \quad (5)$$

Variabel beserta matriks berikut ini dipergunakan: x merepresentasikan estimasi state, F matriks transisi state, u variabel kontrol, B matriks kontrol, P matriks varians state, Q matriks varians proses, ialah variabel pengukuran, H matriks pengukuran, K gain Kalman, R matriks pengukuran, $t|t$ periode waktu saat ini, $t-1 | t-1$ periode waktu sebelumnya, serta $t-1$ langkah peralihan ataupun *intermediate steps*.

Model sistem Kalman Filter yang belum mempunyai tujuan tertentu dapat direpresentasikan oleh persamaan (1) sampai (5). Jadi, sasaran desain dan tingkat kompleksitas sistem yang diperlukan masih dapat menentukan bagaimana model Kalman Filter disempurnakan ataupun diperbarui. Oleh karenanya, pemanfaatan metode Kalman Filter yang ideal dapat tercapai. Sejumlah penyesuaian pada parameter-parameter ini diperlukan guna menerapkan algoritma Kalman Filter, yang menghilangkan *noise* dari pembacaan sensor. Penyesuaian tersebut ialah sebagai berikut.

a) Memprediksi *state* (keadaan)

Dikarenakan tidak ada transisi keadaan yang terjadi saat ini, bisa memodifikasi (1) dengan mengatur $F_t = 1$. Dikarenakan sistem yang diterapkan tidak mengandung input u_t , maka komponen input B_t dari sistem diturunkan. Pada (6), persamaan yang sudah direvisi bisa dilihat.

$$x_{t|t-1} = x_{t-1|t-1} \quad (6)$$

- b) Memprediksi *error*

Dikarenakan , maka (2) menjadi (7).

$$P_{t-1} = P_{t-1|t-1} + Q_t \quad (7)$$

- c) Memperbarui (*update*) nilai *state*

Dimulai dengan (3), dapat dilihat bahwa hanya ada satu pembacaan dari sensor yang perlu difilter. Jadi, persamaan tersebut bisa ditulis ulang menjadi (8).

$$x_{t|t} = x_{t|t-1} + K_t(y_t - x_{t|t-1}) \quad (8)$$

- d) Menghitung *Kalman gain*

Dikarenakan , maka (4) dapat ditulis sebagai (9).

$$K_t = P_{t|t-1}(P_{t|t-1} + R)^{-1} \quad (9)$$

- e) Memperbarui (*update*) nilai *error*

Karena , maka (5) dapat diubah menjadi (10).

$$P_{t|t} = (1 - K_t)P_{t|t-1} \quad (10)$$

2. Manfaat Kalman Filter untuk Sensor MQ-2

- a. Mengurangi Noise

Kalman mengestimasi nilai “sesungguhnya” dari gas, sehingga noise tinggi pada output MQ-2 disaring secara matematis.

- b. Meningkatkan Sensitivitas terhadap Perubahan Kecil
Karena noise disaring, perubahan kecil konsentrasi gas (misalnya kenaikan 10–20 ppm) menjadi lebih mudah terlihat.

- c. Mencegah False Alarm

Pembacaan yang salah akibat fluktuasi sinyal dapat diminimalkan.

- d. Menghasilkan Data Lebih Stabil dan Akurat

Pembacaan tidak lagi melonjak-lonjak karena Kalman memprediksi nilai berikutnya berdasarkan statistik.

3. Kalman Filter untuk mengurangi Noise

Setelah koreksi, persamaan untuk Kalman Filter, yang dipergunakan guna meminimalkan *noise* pada data sensor, dapat dinyatakan sebagai (11) - (15).

Prediksi :

$$x_{t|t-1} = x_{t-1|t-1} \quad (11)$$

$$P_{t-1} = P_{t-1|t-1} + Q_t \quad (12)$$

Update :

$$x_{t|t} = x_{t|t-1} + K_t(y_t - x_{t|t-1}) \quad (13)$$

$$K_t = P_{t|t-1}(P_{t|t-1} + R)^{-1} \quad (14)$$

$$P_{t|t} = (1 - K_t)P_{t|t-1} \quad (15)$$

4. Algoritma

Gambar 2 memperlihatkan flowchart dari metode Kalman Filter yang didasarkan pada persamaan (11) hingga (15). Matlab, Arduino, serta bahasa pemrograman serta platform lainnya kompatibel dengan pendekatan ini. Banyak variabel dan konstanta yang perlu diinisialisasi ketika program dijalankan. Saat ini, sangat krusial untuk secara akurat mengidentifikasi nilai konstanta varians proses Q dan konstanta varians pengukuran R. Variabel keadaan yang diperkirakan x_t serta variabel varians keadaan P_t dapat diinisialisasi masing-masing pada nol serta satu. Tahap berikutnya ialah memasukkan data sensor mentah ke dalam Kalman Filter. Langkah ketiga melibatkan komputasi komponen prediksi, yang mencakup variabel varians keadaan yang diprediksi $P_{t_predict}$ serta variabel estimasi keadaan $x_{t_predict}$.

Menghitung bagian pembaruan, yang mencakup gain Kalman K_t , variabel varians keadaan yang diperbarui P_t , serta variabel estimasi keadaan yang diperbarui x_t , ialah langkah keempat. Keluaran algoritme, variabel estimasi keadaan yang diperbarui x_t , ialah data yang sudah difilter yang ditampilkan di bagian pembaruan. Dikarenakan proses iterasi berjalan secara konstan hingga sistem dihentikan, data sebelumnya untuk iterasi berikutnya juga mencakup beberapa variabel tambahan, seperti estimasi keadaan terakhir serta varians keadaan terakhir.

5. *Source Code* Kalman Filter pada Arduino

```
float SensorData, KalmanFilterData;
float Xt, Xt_update, Xt_prev;
float Pt, Pt_update, Pt_prev;
float Kt, R, Q;
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    R=100; Q=1; Pt_prev=1;
}
void loop() {
    SensorData = analogRead(A0);
    Xt_update = Xt_prev;
    Pt_update = Pt_prev + Q;
    Kt = Pt_update / (Pt_update + R);
    Xt = Xt_update + ( Kt * (SensorData -
    Xt_update));
    Pt = (1 - Kt) * Pt_update;
    Xt_prev = Xt;
    Pt_prev = Pt;
    KalmanFilterData=Xt;
    Serial.print(SensorData,3);
    Serial.print(",");
    Serial.print(KalmanFilterData,3);
    Serial.println();
    delayMicroseconds(100);
}
```

2.2.6 Sensor MQ-2

1. Pengertian Sensor MQ-2

Di antara banyak gas yang mudah terbakar yang terdeteksi oleh detektor gas MQ-2 ialah hidrogen, butana, propana, gas alam, serta gas minyak cair (LPG). Sensor ini beroperasi berdasarkan prinsip perubahan nilai resistansi listrik ketika terpapar oleh gas sasaran.

Lapisan penginderaan yang peka terhadap gas dan elemen pemanas arus listrik ialah fitur dari sensor MQ-2. Nilai resistansi sensor berubah sebagai akibat dari interaksi molekuler antara gas target serta lapisan sensitif. Sinyal yang bisa diukur kemudian dihasilkan dari pergeseran resistensi ini (S. Dewi, 2020).

Dengan output tegangan analognya, sensor MQ-2 bisa mengukur tingkat gas yang mudah terbakar di udara serta asap. Pengguna dapat secara langsung mengubah tingkat sensitivitas sensor MQ-2 menggunakan pengaturan trimpot. Baik di lingkungan komersial maupun perumahan, sensor ini sering dimanfaatkan untuk mengidentifikasi kebocoran gas. Berbagai macam gas, termasuk liquid petroleum gas (LPG), propana, butana, alkohol, hidrogen, serta asap, dapat dideteksi. Dengan

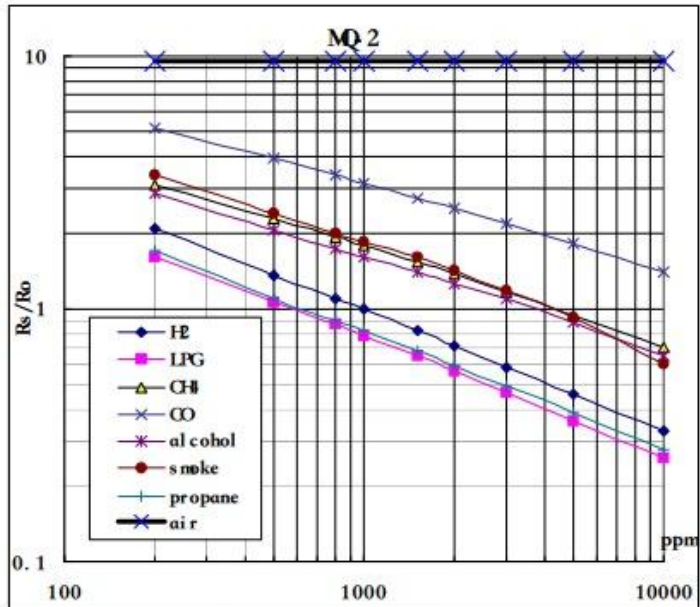
kemampuannya mendeteksi kebocoran gas dan asap, sensor ini sangat cocok untuk diterapkan pada sistem darurat yang bertujuan untuk mencegah kebakaran (Inggi & Pangala, 2021)



Gambar 2.3 Sensor MQ-2

Sensor MQ-2 memiliki empat pin, yaitu:

1. VIN: Terhubung dengan 5V pada Arduino Uno.
 2. GND: Terhubung dengan GND Arduino Uno.
 3. DO: Pin output digital yang dihubungkan ke pin digital mikrokontroler.
 4. AO: Pin analog mikrokontroler dihubungkan ke pin output analog.
2. Karakteristik Sensor MQ-2
- Perangkat sensor ini dirancang mampu mengidentifikasi beragam jenis gas seperti LPG, i-butana, propana, metana, alkohol, hidrogen, serta asap, serta dilengkapi sistem dual signal output berupa keluaran analog dan level TTL digital. Tegangan analog keluarannya berada pada rentang 0–5 VDC, dengan performa pembacaan yang stabil, konsisten, serta memiliki tingkat responsivitas dan sensitivitas yang tinggi. Sensor ini juga menyediakan output analog–digital terintegrasi, fitur trigger level configuration, serta dilengkapi potensiometer pengatur untuk kalibrasi sensitivitas, dengan dimensi modul yang ringkas berukuran 32×20 mm sehingga praktis digunakan dalam berbagai sistem elektronika terapan.



Gambar 2.4 Kurva Sensitivitas Sensor MQ-2
Sumber: Datasheet, 2014

3. Spesifikasi Sensor MQ-2

Tabel 2.1 Spesifikasi Sensor MQ-2

Operating voltage	5V
Load resistance	20 K Ω
Heater resistance	33 $\Omega \pm 5\%$
Heating consumption	<800mw
Sensing Resistance	10 K Ω - 60 K Ω
Concentration Scope	200 - 10000 ppm
Preheat Time	Over 24 hour

4. Rumus Kalibrasi Sensor MQ-2

Para ahli dan pengembang menggunakan persamaan regresi logaritmik untuk mengkonversi rasio hambatan sensor (R_s/R_o) menjadi konsentrasi gas (PPM). Rumus yang paling umum digunakan untuk memodelkan kurva sensitivitas (*Sensitizing Curve*) adalah:

$$\log (R_s/R_o) = m.\log (PPM).b$$

Atau, untuk mendapatkan konsentrasi gas (PPM) secara langsung:

$$PPM = a.(R_s/R_o)^b$$

Di mana:

- R_s (Resistance of Sensor): Nilai hambatan sensor pada saat mendeteksi gas di lingkungan tertentu.
- R_o (Resistance in clean Air): Nilai hambatan sensor saat berada di udara bersih (baseline) yang diukur setelah proses pemanasan (*pre-heating*).
- R_s/R_o : Rasio hambatan sensor, yang menjadi nilai input utama.
- PPM (Part Per Million): Konsentrasi gas yang sedang diukur.
- a dan b : Konstanta (atau koefisien regresi) yang sangat spesifik dan didapatkan dari grafik pada *datasheet* MQ-2 untuk setiap jenis gas (misalnya, LPG, Metana, CO, Asap, dll.)

Langkah-Langkah Turunan (Untuk Menghitung R_s/R_o)
Sebelum menggunakan rumus kalibrasi di atas, Anda harus mendapatkan nilai R_s/R_o . Untuk sistem mikrokontroler seperti Arduino, langkah-langkahnya adalah:

- Hitung Tegangan Keluaran (V_{out})

$$V_{out} = \frac{\text{nilai analog}}{1024} \times V_{ref}$$

- Hitung Hambatan Sensor (R_s)

Sensor MQ-2 terhubung sebagai pembagi tegangan, maka R_s dihitung menggunakan hukum Ohm dan pembagi tegangan:

$$R_s = R_L \cdot \left(\frac{V_c}{V_{out}} - 1 \right)$$

Di mana:

R_L : Hambatan Beban (*Load Resistance*), biasanya 10 k Ω atau ditentukan oleh sirkuit modul.

Vc: Tegangan Sirkuit (*Circuit Voltage*), biasanya 5V.

Hitung Rasio (Rs/Ro)

Ro didapat saat kalibrasi awal di udara bersih. Setelah Rs dihitung, Anda dapat menemukan rasio:

$$\text{Ratio} = R_s/R_o$$

Rasio inilah yang kemudian dimasukkan ke dalam persamaan logaritmik di poin 1 untuk mendapatkan nilai PPM.

2.2.7 Mikrokontroler ESP32

1. Pengertian Mikrokontroler ESP32

Sejumlah periferal, termasuk WiFi 802.11 b/g/n serta *Bluetooth* versi 4.2, disertakan ke dalam mikrokontroler ESP32, yang merupakan SoC (*System on Chip*) terintegrasi. Fitur-fitur seperti CPU, penyimpanan, serta akses GPIO (*General Purpose Input Output*) membuat ESP32 menjadi perangkat yang cukup komprehensif. Berkat kemampuan Wi-Fi bawaannya, ESP32 bisa menggantikan Arduino dalam sebuah rangkaian (Wagyan et al., 2019).

ESP32 ialah sebuah *chip* yang dilengkapi dengan konektivitas *Wi-Fi 2,4 GHz* serta *Bluetooth*, serta dirancang menggunakan teknologi fabrikasi 40 nm. *Chip* ini dioptimalkan untuk efisiensi daya dan kinerja radio yang tinggi, sehingga memiliki tingkat ketahanan, fleksibilitas, dan keandalan yang baik dalam berbagai aplikasi serta kondisi penggunaan daya (Espressif Inc., 2016).

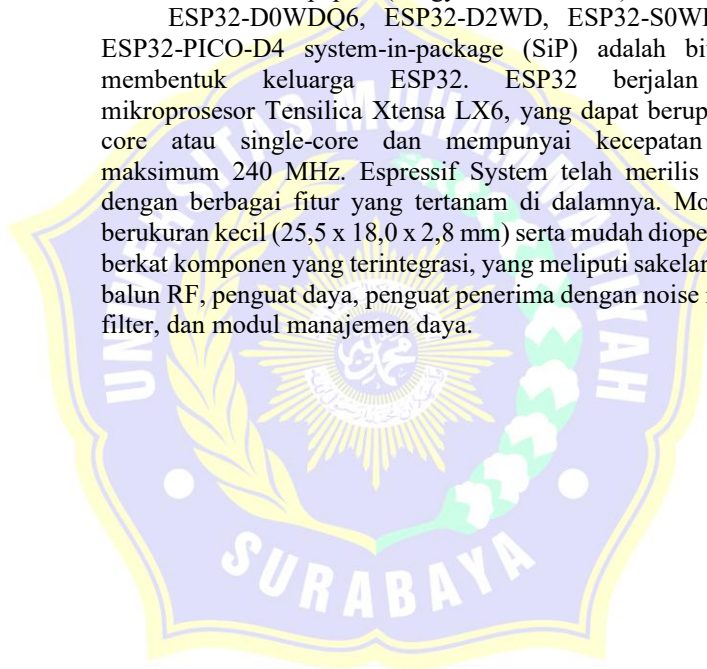


Gambar 2.5 Modul ESP32

2. Spesifikasi ESP32

Satu versi *board* ini berisi 30 GPIO, serta versi lainnya mempunyai 36 GPIO. Versi 30 GPIO dipilih dikarenakan dua pin GND-nya, namun semua versi mempunyai tujuan yang sama. Pin-pin tersebut diberi label dengan jelas pada bagian atas board untuk memudahkan identifikasi. Fitur tambahan yang membuat board ini ideal untuk dipakai dengan perangkat lunak pengembangan aplikasi seperti Arduino IDE ialah konektivitas *USB* ke *UART*. Sebuah port micro *USB* memungkinkan daya untuk diberikan ke papan. (Wagya et al., 2019).

ESP32-D0WDQ6, ESP32-D2WD, ESP32-S0WD, dan ESP32-PICO-D4 *system-in-package* (SiP) adalah bit yang membentuk keluarga ESP32. ESP32 berjalan pada mikroprosesor Tensilica Xtensa LX6, yang dapat berupa dual-core atau single-core dan mempunyai kecepatan clock maksimum 240 MHz. Espressif System telah merilis ESP32 dengan berbagai fitur yang tertanam di dalamnya. Modul ini berukuran kecil (25,5 x 18,0 x 2,8 mm) serta mudah dioperasikan berkat komponen yang terintegrasi, yang meliputi sakelar antena, balun RF, penguat daya, penguat penerima dengan noise rendah, filter, dan modul manajemen daya.



Tabel 2.2 Spesifikasi Modul ESP32

Categories	Items	Specifications
Certification	RF certification	FCC/CE-RED/IC/TELEC/KCC/SRRC/NCC
	Bluetooth certification	BQB
	Green certification	RoHS, REACH
Test	Reliability	HTOL/HTSL/uHAST/TCT/ESD
Wi-Fi	Protocols	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps)
		A-MPDU and A-MSDU aggregation and 0.4 μ s guard interval support
	Frequency range	2.4 GHz ~ 2.5 GHz
Bluetooth	Protocols	Bluetooth v4.2 BR/EDR and BLE specification
	Radio	NZIF receiver with -97 dBm sensitivity
		Class-1, class-2 and class-3 transmitter
		AFH
	Audio	CVSD and SBC
Hardware	Module interfaces	SD card, UART, SPI, SDIO, I ² C, LED PWM, Motor PWM, I ² S, IR, pulse counter, GPIO, capacitive touch sensor, ADC, DAC
	On-chip sensor	Hall sensor
	Integrated crystal	40 MHz crystal
	Operating voltage/Power supply	2.7 ~ 3.6V
	Minimum current delivered by power supply	500 mA
	Recommended operating temperature range	-40°C ~ 65°C
	Package size	(18.00 $\pm$ 0.10) mm x (31.40 $\pm$ 0.10) mm x (3.30 $\pm$ 0.10) mm

3. Keunggulan Mikrokontroler ESP32

Bila dibandingkan dengan mikrokontroler lainnya, ESP32 mempunyai banyak manfaat yang membuatnya ideal untuk aplikasi Internet of Things (IoT). Ini termasuk kapasitas memori yang lebih tinggi, port analog tambahan, Bluetooth 4.0 hemat energi, serta koneksi WiFi (Imran, 2020).

2.2.8 Buzzer

1. Pengertian Buzzer

Buzzer merupakan komponen output yang menghasilkan suara sebagai tanda peringatan. Buzzer dipakai guna memberikan alarm lokal jika konsentrasi gas melebihi ambang batas (Malvino, 2017). *Buzzer* adalah salah satu komponen elektronika yang bisa mengganti sinyal listrik menjadi getaran suara. *Buzzer* bisa dimanfaatkan dengan DFRduino atau sistem pengendali lainnya dan dimanfaatkan untuk mengendalikan suara bel atau music MID Sederhana (Artha & Mulyana, 2022).

Menurut (Fani et al., 2020) Gadget elektronik yang dikenal sebagai *buzzer* bisa mengubah getaran listrik menjadi getaran yang bisa didengar. *Buzzer*, yang berfungsi melalui kumparan yang terhubung ke diafragma, secara konseptual sangat mirip dengan pengeras suara. Penggunaan yang paling umum untuk buzzer ialah sebagai sinyal yang bisa didengar guna mengindikasikan akhir dari sebuah prosedur ataupun terjadinya kesalahan pada sebuah perangkat.



Gambar 2.6 *Buzzer*

Pada prinsipnya, mekanisme kerja buzzer memiliki kesamaan dengan loudspeaker. Medan elektromagnetik dibuat dengan menghubungkan kumparan yang dialiri listrik ke diafragma; proses ini disebut dengungan. Apabila polaritas magnet serta aliran arusnya dibalik, maka kumparan akan bergerak ke arah yang berlawanan. Setiap perubahan pada posisi kumparan akan menghasilkan perubahan yang sesuai pada posisi diafragma, yang pada gilirannya akan menyebabkan getaran di udara untuk menghasilkan suara. Guna menandakan berakhirnya suatu prosedur atau terjadinya kesalahan pada perangkat (alarm), buzzer sering dipakai.

2. Spesifikasi *Buzzer*

Berdasarkan ilustrasi pada Gambar 2.4, dapat dipahami bahwa buzzer memiliki beberapa spesifikasi komponen utama, yaitu bagian piezoelectric berbentuk tabung silinder berwarna hitam yang berfungsi sebagai sumber utama penghasil bunyi, kemudian terdapat kaki pin negatif yang berukuran lebih pendek untuk dihubungkan ke arus negatif atau GND, serta kaki pin positif yang lebih panjang sebagai jalur koneksi ke arus positif atau VCC/5V, sehingga keseluruhan komponen ini membentuk sistem kerja buzzer yang sederhana, efisien, dan fungsional

2.2.9 LED

1. Pengertian LED

Mengacu (Gunawan et al., 2020) komponen listrik yang bisa memancarkan cahaya ialah *Light Emitting Diode* (LED).

Dioda pemancar cahaya (LED) adalah perangkat semikonduktor yang, apabila dibiaskan ke depan, akan memancarkan cahaya dalam satu temperatur warna. Dioda, yang sejenis dengan LED, hanya bisa memungkinkan listrik mengalir dalam satu arah. Dengan pengaturan bias maju, LED akan menyala apabila diberi tegangan. Di sisi lain, LED hanya bisa menangani arus hingga sekitar 20 mA, yang secara signifikan lebih rendah daripada kemampuan menghantarkan arus pada sebagian besar dioda. Apabila arus melebihi batas tersebut, LED dapat mengalami kerusakan, sehingga dalam rangkaian LED diperlukan pemasangan resistor sebagai pembatas arus.

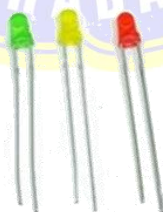
LED berfungsi sebagai output device yang menampilkan status pendeteksian gas, status jaringan *IoT* (*WiFi*), status kerja sensor, serta peringatan bahaya secara cepat dan mudah dipahami oleh pengguna. Dalam sistem pendeteksi gas, LED menjadi media komunikasi visual antara alat dan pengguna agar kondisi bahaya dapat dikenali tanpa harus mendengar alarm suara atau memantau aplikasi *IoT* secara terus-menerus (Gayo, 2020).

2. Fungsi LED

Dalam konteks sistem *IoT* pendeteksi kebocoran gas LPG, LED memiliki beberapa fungsi penting:

Indikator Status Gas

- a. LED memberikan tanda visual apakah kondisi udara aman atau berbahaya:
 - 1) LED merah → bahaya (kebocoran gas signifikan terdeteksi oleh sensor MQ-2)



Gambar 2.7 LED