Politeknik Caltex Riau

LAPORAN PROYEK AKHIR

SISTEM MONITORING EMISI KARBON BERBASIS *INTERNET OF THING* (IoT) MENGGUNAKAN SENSOR GAS MQ-135

Said Farras Naufal
NIM. 1920301055

Pembimbing
M. Suhairi, S.Pd., M.T.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRONIKA TELEKOMUNIKASI
POLITEKNIK CALTEX RIAU
PEKANBARU
2024

Politeknik Caltex Riau

LAPORAN PROYEK AKHIR

SISTEM MONITORING EMISI KARBON BERBASIS INTERNET OF THING (IoT) MENGGUNAKAN SENSOR GAS MQ-135

Said Farras Naufal
NIM. 1920301055

Pembimbing
M. Suhairi, S.Pd., M.T.

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRONIKA TELEKOMUNIKASI
POLITEKNIK CALTEX RIAU
PEKANBARU
2024

LEMBAR PENGESAHAN

SAID FARRAS NAUFAL
NIM. 1920301055

Proyek Akhir ini diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T.) di Politeknik Caltex Riau

Pekanbaru, Februari 2025
Disetujui oleh:

Pembimbing	Penguji
M. Suhairi, S.Pd., M.T. NIP. 209206	1. Wira Indani, S.T., M.T. NIP. 208705
	2. Cyntia Widiasari, S.ST., M.T. NIP. 078519

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Elektronika Telekomunikasi

Cyntia Widiasari, S. ST., M.T.
NIP. 078519

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karuniaNya penulis dapat menyelesaikan proyek akhir ini yang berjudul " **Sistem Monitoring Emisi Karbon Berbasis *Internet Of Thing* (IoT) Menggunakan Sensor Gas MQ-135**". Proyek Akhir ini merupakan salah satu rangkaian pelaksanaan tugas akhir yang harus ditempuh pada program studi Teknik Elektronika dan Telekomunikasi di Politeknik Caltex Riau.

Dalam menyelesaikan proyek akhir ini, penulis dibantu, dibimbing, dan dimotivasi oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga yang sangat luar biasa membantu baik dalam bentuk doa, dukungan, dan semangat bagi penulis.
2. Ibu Cyntia Widiasari S. ST., M. T, selaku ketua program studi Teknik Elektronika Telekomunikasi.
3. Bapak M. Suhairi S. Pd., M. T, yang senantiasa menyediakan waktunya dan membimbing penulis dalam menyelesaikan proyek akhir ini.
4. Pihak-pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu yang turut membantu dan memotivasi penulis.

Penulis menyadari bahwa proyek akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, saran yang bersifat membangun akan berguna untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga proyek akhir ini bermanfaat bagi semua pihak yang membaca. Atas perhatiannya, penulis ucapkan terima kasih.

Pekanbaru, September 2024

Said Farras Naufal

ABSTRAK

Emisi karbon di wilayah perkotaan Indonesia terus meningkat, menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Peningkatan emisi karbon ini disebabkan oleh berbagai faktor, seperti penggunaan kendaraan bermotor, industri, dan pembangkit listrik. Proyek Akhir ini bertujuan merancang dan membangun sistem monitoring emisi karbon berbasis *Internet of Thing* (IoT) dengan sensor gas MQ-135 yang efektif dan akurat untuk mengukur emisi CO2 di wilayah perkotaan di Indonesia. Metode yang digunakan eksperimental dengan rancangan *post-test only control group design*. Sistem monitoring emisi karbon akan dirancang dan dibangun menggunakan sensor gas MQ-135, mikrokontroler Arduino, dan platform IoT. Data emisi CO2 yang diperoleh dari sistem monitoring akan dibandingkan dengan data emisi CO2 yang diperoleh dari metode pengukuran konvensional. Kesesuaian sistem monitoring emisi karbon dengan standar dan regulasi yang berlaku di Indonesia terkait pemantauan kualitas udara juga akan dianalisis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem monitoring emisi karbon yang efektif dan akurat untuk mendukung upaya pengendalian emisi dan peningkatan kualitas udara di Indonesia. Berdasarkan hasil pengujian, sistem yang dikembangkan menunjukkan akurasi rata-rata yang cukup baik dengan kesalahan pengukuran harian yang berkisar antara 4,04% hingga 23,48%. Hari Selasa dan Kamis mencatat akurasi tertinggi dengan error dibawah 10%, sementara hari Senin dan Sabtu menunjukkan error lebih tinggi. presisi sistem dinilai dari konsistensi pengukuran, dimana pola perubahan konsentrasi CO2 menunjukkan konsistensi yang baik, dengan peningkatan pada siang hingga malam hari dan penurunan pada pagi hari. Dari pengujian kualitas udara pada daerah kecamatan tampan perumahan Griya Arya Panam, yang dimana saat dilakukan pengujian pada daerah perumahan udara dalam keadaan aman dengan ppm 88.45 yang ditampilkan pada LCD dan *Blynk*.

Kata Kunci: Emisi Karbon, *Internet of Thing* (IoT), Sensor Gas MQ-135, Kualitas Udara, Akurasi, Presisi.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....ii
ABSTRAK.....iii
DAFTAR ISI..... iv
I. PENDAHULUAN..... 1
1.1 Latar Belakang..... 1
1.2 Tujuan.....2
1.3 Perumusan masalah dan Batasan Masalah..... 3
1.3.1 Perumusan Masalah.....3
1.3.2 Batasan Masalah.....3
1.4 Metodologi Penelitian..... 3
1.4.1 Studi Literatur..... 3
1.4.2 Wawancara..... 4
1.4.3 Pengujian.....4
1.4.4 Menganalisis Data Hasil Pengujian.....4
1.4.5 Penulisan Laporan.....4
1.5 Sistematika Penulisan..... 4
1.5.1 Pendahuluan..... 4
1.5.2 Tinjauan Pustaka..... 5
1.5.3 Perancangan..... 5
1.5.4 Jadwal dan Perkiraan Biaya..... 5
II. TINJAUAN PUSTAKA..... 6
2.1 Penelitian Terkait..... 6
2.1.1 Sumber Emisi Karbon..... 7
2.1.2 Dampak Emisi Karbon.....8
2.2 Internet of Things (IoT) untuk pemantauan Emisi Karbon..... 8
2.2.1 Definisi dan Konsep Dasar IoT.....9
2.2.2 Monitoring Emisi Karbon dengan IoT..... 10
2.2.3 Sensor Gas MQ-135..... 10
2.2.4 Implementasi IoT dalam Monitoring Emisi Karbon..... 12
2.3 Sensor Gas MQ-135 untuk Deteksi CO2e.....13
2.3.1 Prinsip Kerja Sensor MQ-135..... 13
2.3.2 Kalibrasi dan Penggunaan Sensor MQ-135..... 14
2.3.3 Integrasi Sensor MQ-135 dengan Sistem IoT..... 14
2.3.4 Studi Kasus Penggunaan Sensor MQ-135..... 15
2.3.5 Keunggulan dan Keterbatasan Sensor MQ-135..... 15
2.4 Standar dan Regulasi Pemantauan Kualitas Udara..... 16
2.4.1 Standar Internasional.....16

2.4.2 Standar dan Regulasi Nasional....16
2.4.3 Metodologi Pemantauan....17
2.4.4 Pelaporan dan Tindakan Korektif....17
2.4.5 Tantangan dan Peluang....18
2.5 ESP32....18
2.6 LCD I2C....19
2.7 LED (Light Emitting Diode)....20
III. PERANCANGAN....22
3.1 Tahap Pengerjaan Proyek Akhir....22
3.2 Blok Diagram Sistem....23
3.3 Flowchart Sistem Monitoring Emisi Karbon....24
3.4 Perancangan Elektronika....25
3.5 Perancangan Mekanik....26
3.6 Tampilan pada Aplikasi Android....27
3.7 Validasi Penelitian....27
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN....29
4.1 Hasil Pengujian Sistem....29
4.2 Pembahasan Hasil Pengujian....30
4.3 Analisis Data....31
4.3.1 Pola Emisi Karbon di Area Perumahan....31
4.3.2 Dampak Kualitas Udara Terhadap Kesehatan....32
4.3.3 Pengaruh Ventilasi dan Lingkungan....32
4.3.4 Implikasi Terhadap Kebijakan dan Manajemen Lingkungan....33
4.4 Pengujian Keseluruhan....33
4.4.1 Uploading Program....34
4.4.2 Penjelasan Program....36
V. KESIMPULAN DAN SARAN....40
5.1 Kesimpulan....40
5.2 Saran....40
DAFTAR PUSTAKA....42

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era modern, isu perubahan iklim menjadi perhatian global utama. Kenaikan emisi Gas Rumah Kaca (GRK), terutama CO2 telah mencapai tingkat yang mengkhawatirkan, memicu berbagai dampak buruk bagi planet kita. Indonesia, sebagai salah satu negara dengan populasi terbesar di dunia, turut berkontribusi pada emisi GRK global. Berdasarkan data, Indonesia menempati posisi emitor GRK terbesar keempat di dunia. Emisi CO2 terus meningkat, terutama berasal dari sektor kehutanan, energi, dan industri. Hal ini berakibat pada perubahan iklim yang membawa konsekuensi serius, seperti kenaikan permukaan laut, pola cuaca ekstrem, dan hilangnya keanekaragaman hayati (Amaliyah dan Solikhah, 2019).

Dampak perubahan iklim sudah mulai terasa di berbagai wilayah Indonesia, termasuk kekeringan, banjir, dan tanah longsor. Sektor pertanian, infrastruktur, dan kesehatan masyarakat pun terancam. Menyadari urgensi ini, Indonesia berkomitmen untuk mengurangi emisi GRK sebesar 26-41% pada tahun 2030 dibandingkan dengan BAU (Business-as-Usual). Komitmen ini tertuang dalam dokumen Nationally Determined Contribution (NDC) yang diajukan kepada UNFCCC. Namun, upaya nasional tersebut perlu diiringi dengan langkah-langkah konkret di tingkat lokal. Salah satu provinsi yang menjadi fokus perhatian adalah Riau, dengan emisi karbon tertinggi di Indonesia. Pada tahun 2020, emisi karbon di Riau mencapai 12,42 juta ton CO2e, didominasi oleh sektor kehutanan dan lahan gambut (Syihabuddin dan Ruhaeni 2022).

Permasalahan emisi karbon di Riau diperparah dengan maraknya kebakaran hutan dan lahan (karhutla). Karhutla sering terjadi akibat pembukaan lahan untuk perkebunan kelapa sawit dan akasia, memicu emisi CO2 dalam jumlah besar dan kerusakan lingkungan yang signifikan. Di ibukota Riau, Pekanbaru, pencemaran udara menjadi isu yang kian memprihatinkan. Emisi dari kendaraan bermotor, industri, dan pembakaran lahan berkontribusi terhadap kualitas udara yang buruk, berdampak negatif pada kesehatan masyarakat (Kurniawati dkk., 2017).

Dampak emisi karbon di Riau tak hanya terbatas pada kesehatan dan lingkungan, tetapi juga ekonomi. Pencemaran udara dapat menurunkan

produktivitas pekerja, meningkatkan biaya kesehatan, dan menurunkan nilai properti. Dampak ini menghambat pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat. Menghadapi permasalahan emisi karbon yang kompleks ini, diperlukan solusi inovatif dan terukur. Pemantauan emisi karbon secara real-time menjadi kunci untuk memahami pola dan sumber emisi, sehingga memungkinkan pengambilan langkah tepat untuk mengatasinya (Jannah, 2014).

Teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan solusi efektif untuk memantau emisi karbon. Sensor gas MQ-135, yang mampu mendeteksi gas CO2 dengan sensitivitas tinggi, dapat diintegrasikan dalam sistem IoT untuk membangun jaringan pemantauan emisi karbon yang komprehensif. Sistem monitoring emisi karbon berbasis IoT memiliki beberapa keunggulan, antara lain kemampuan mengidentifikasi sumber emisi karbon secara real-time dari berbagai sektor seperti perkebunan, industri, dan kendaraan bermotor. Dengan menggunakan sensor MQ-135, sistem ini dapat memberikan data emisi CO2e yang akurat dan terpercaya serta menjangkau area yang luas dan terpencil melalui jaringan sensor yang terhubung dengan IoT (Arida dkk., 2020). Data yang dikumpulkan dapat dianalisis untuk memahami pola emisi dan mengambil langkah strategis. Penerapan sistem ini di Riau, khususnya di Pekanbaru, diharapkan dapat membantu pemerintah dalam merumuskan kebijakan pengurangan emisi yang efektif, meningkatkan kesadaran masyarakat mengenai dampak emisi karbon, serta mempromosikan industri hijau dengan mendorong penggunaan teknologi ramah lingkungan. Dengan monitoring emisi karbon yang efektif dan partisipasi aktif dari seluruh pemangku kepentingan, emisi karbon di Riau dan Pekanbaru dapat dikurangi, berkontribusi pada upaya global.

1.2 Tujuan

Tujuan dari Proyek akhir ini adalah merancang dan membangun sistem *monitoring* emisi karbon berbasis IoT dengan sensor gas MQ-135 yang efektif dan akurat untuk mengukur emisi CO2 di wilayah perkotaan di Indonesia.

1.3 Perumusan masalah dan Batasan Masalah

1.3.1 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dipaparkan, berikut adalah rumusan masalah penelitian yang dapat diangkat pada proyek akhir ini:

a. Bagaimana efektivitas penerapan sistem *monitoring* emisi karbon berbasis IoT dengan sensor gas MQ-135 dalam mengidentifikasi dan mengukur emisi CO2 di wilayah perkotaan di Indonesia?
b. Bagaimana akurasi dan presisi data emisi CO2 yang diperoleh dari sistem *monitoring* berbasis IoT dengan sensor gas MQ-135 dibanding dengan metode pengukuran konvensional?
c. Bagaimana kesesuaian sistem pemantauan emisi karbon berbasis IoT dengan sensor gas MQ-135 terhadap standar dan regulasi yang berlaku di Indonesia terkait pemantauan kualitas udara?

1.3.2 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada proyek akhir ini sebagai berikut:

a. Proyek akhir ini berfokus pada pemantauan emisi gas CO2 di wilayah perkotaan, dengan menggunakan sensor gas MQ-135 sebagai sensor utama.
b. Data yang didapat akan ditampilkan pada layar LCD (*Liquid Crystal Display*) I2C 16x2.
c. Data yang didapat akan dikirim oleh modul Wi-Fi ESP-WROOM-32 ke *Smartphone*.

1.4 Metodologi Penelitian

Adapun metode penelitian yang akan dipakai dalam pembuatan proyek akhir ini adalah:

1.4.1 Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan kegiatan seperti mempelajari literatur penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan pada permasalahan yang dibahas, dan menganalisis buku, jurnal, dan artikel yang berkaitan dengan pelaksanaan proyek akhir.

1.4.2 Wawancara

Pada tahap ini penulis mengajukan berbagai pertanyaan pada pembimbing dan pihak-pihak yang terkait dimana dapat menjadi masukan pada proyek akhir ini.

1.4.3 Pengujian

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian Sistem *Monitoring* Emisi Karbon Berbasis *Internet of Things* (IoT) Menggunakan Sensor Gas MQ-135.

1.4.4 Menganalisis Data Hasil Pengujian

Menganalisis data hasil pengujian dan menghubungkannya dengan sumber studi literatur.

1.4.5 Penulisan Laporan

Dalam penulisan laporan ini mengacu pada pedoman penulis ilmiah, dalam hal ini penulisan proyek akhir yang bentuk bakunya telah diatur oleh pihak Politeknik Caltex Riau.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan proposal proyek akhir ini secara keseluruhan terdiri dari empat bab, masing-masing terdiri dari beberapa sub-bab. Adapun pokok pembahasan dari masing-masing bab tersebut secara garis besar sebagai berikut:

1.5.1 Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang masalah, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Latar belakang pada proyek akhir ini untuk menguji Sistem *Monitoring* Emisi Karbon Berbasis *Internet of Things* (IoT) Menggunakan Sensor Gas MQ-135 dengan menerapkan metode studi literatur, wawancara, dan pengujian diharapkan dapat diperoleh manfaat dari tujuan yang akan dicapai pada proyek akhir ini.

1.5.2 Tinjauan Pustaka

Bab ini menguraikan beberapa hasil penelitian terkait yang menjadi referensi dan perbandingan penelitian yang dirancang. Selain itu terdapat juga landasan teori penunjang yang terkait dengan proyek akhir ini.

1.5.3 Perancangan

Bab ini menjelaskan tentang alur pengerjaan proyek akhir ini, pengujian Sistem *Monitoring* Emisi karbon Berbasis *Internet of Things* (IoT) Menggunakan Sensor Gas MQ-135.

1.5.4 Jadwal dan Perkiraan Biaya

Bab ini berisi informasi mengenai jadwal pengerjaan proyek akhir dan perkiraan biaya yang dibutuhkan untuk pengerjaan proyek akhir.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Muhammad Firly Akbar, dalam penelitiannya yang berjudul "Pemanfaatan Sensor MQ-135 Sebagai Monitoring Kualitas Udara Pada Aula Gedung Fasilkom", membuat *prototype* rancangan alat yang dapat *Memonitoring* kualitas udara disuatu tempat dengan menggunakan Sensor MQ-135 dengan output LCD dan Blynk yang diproses oleh mikrokontroler ESP8266 WiFi. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan didapat bahwa alat bekerja dengan baik untuk mendeteksi kualitas udara pada aula fasilkom Universitas Sriwijaya dalam keadaan aman dengan ppm (*parts per million*) 22.19, dan juga mengetes menggunakan gas dari korek api yang menunjukkan ppm 707.93 yang tampil pada LCD dan *Blynk* serta terdapat notifikasi pada *smartphone* menunjukkan bahwa udara dalam keadaan berbahaya.

Adam Faroqi dkk., dalam penelitiannya yang berjudul "Perancangan Alat Pendeteksi Kadar Polusi Udara Menggunakan Sensor MQ-7 dengan Teknologi *Wireless* HC-05", merancang alat pendeteksi kadar polusi di udara dengan menggunakan sensor MQ-7, menghasilkan output pada LCD dan 3 LED (Hijau, Kuning, Merah) serta dikirim melalui *Wireless* HC-05 ke PC yang dimana jika ppm <50 maka LED warna hijau akan menyala, jika ppm 50 dan dibawah 100 maka LED kuning akan menyala dan bila nilai yang didapat melebihi 100 ppm maka LED merah yang akan menyala.

Damanik, Samuel R, dalam penelitiannya yang berjudul "Sistem Monitoring Kualitas Udara pada Kamar Rumah Sakit Menggunakan Sensor DHT11, MQ-135, dan Arduino Uno Berbasis Android", membuat sistem monitoring kualitas udara, kualitas suhu dan kelembaban pada kamar rumah sakit.DHT11 dan MQ-135 digunakan untuk melihat kelembaban dan suhu pada kamar rumah sakit dan kualitas udara kamar rumah sakit. hasil uji sistem yaitu sistem menampilkan kualitas udara berdasarkan gas, suhu, dan kelembaban udara yang dikirim dari Arduino ke *smartphone* pengguna dengan menggunakan koneksi internet melalui ESP8266. Pada percobaan data yang dikirim ke *smartphone* Android terkadang gagal atau tidak sesuai dengan data yang didapat pada LCD.

Arida Amalia Rosa dkk, dalam penelitiannya yang berjudul "Sistem Pendeteksi Pencemar Udara Portabel Menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-135", merancang alat pendeteksi dalam pencemaran udara menggunakan sensor MQ-7 dan MQ-135 dengan output LCD yang sebelumnya diproses oleh mikrokontroler Arduino nano. Emisi karbon adalah salah satu isu lingkungan yang paling mendesak di era modern ini, terutama karena kontribusinya terhadap perubahan iklim global. Emisi karbon terutama dihasilkan dari aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil (batubara, minyak, dan gas alam), deforestasi, dan proses industri lainnya. Menurut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), emisi karbon dioksida (CO_2) merupakan kontributor utama efek rumah kaca yang mengakibatkan peningkatan suhu global. Emisi karbon adalah pelepasan gas rumah kaca (GRK) ke atmosfer, terutama karbon dioksida (CO2), yang dihasilkan dari aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan industri. GRK ini menjebak panas di atmosfer, menyebabkan pemanasan global dan perubahan iklim.

2.1.1 Sumber Emisi Karbon

Menurut Syihabuddin dan Ruhaeni (2022), Emisi karbon berasal dari berbagai sumber, yang dapat dikategorikan menjadi sumber alami dan antropogenik. Sumber alami meliputi respirasi makhluk hidup, kebakaran hutan alami, dan aktivitas vulkanik. Sedangkan sumber antropogenik meliputi:

a. Transportasi: Pembakaran bahan bakar di kendaraan bermotor merupakan salah satu sumber utama emisi karbon. Kendaraan bermotor yang menggunakan bensin atau diesel menghasilkan CO_2 sebagai produk sampingan dari proses pembakaran.
b. Industri: Proses industri seperti produksi semen, baja, dan bahan kimia seringkali melibatkan reaksi kimia yang menghasilkan CO_2. Selain itu, penggunaan energi dalam proses industri juga berkontribusi besar terhadap emisi karbon.
c. Pembangkitan Listrik: Pembakaran batubara dan gas alam di pembangkit listrik untuk menghasilkan energi merupakan salah satu sumber terbesar emisi CO_2 di dunia.

d. Pertanian dan Kehutanan: Deforestasi dan perubahan penggunaan lahan untuk pertanian juga melepaskan karbon yang tersimpan dalam biomassa dan tanah ke atmosfer.

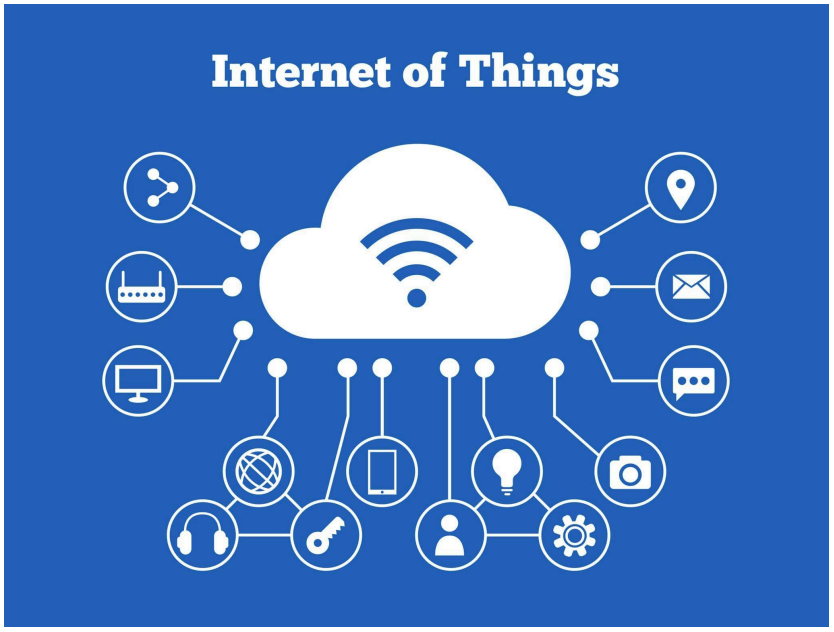
2.1.2 Dampak Emisi Karbon

Menurut Hermawan dkk., (2018), Peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer memiliki berbagai dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Beberapa dampak tersebut adalah:

a. Perubahan Iklim: Peningkatan emisi CO_2 meningkatkan efek rumah kaca yang menyebabkan peningkatan suhu global. Ini berdampak pada perubahan pola cuaca, kenaikan permukaan laut, dan peningkatan frekuensi serta intensitas bencana alam seperti badai dan banjir.
b. Kesehatan Manusia: Peningkatan konsentrasi CO_2 dapat mempengaruhi kualitas udara yang kita hirup, yang berpotensi menyebabkan masalah kesehatan seperti penyakit pernapasan, penyakit jantung, dan lain-lain.
c. Keanekaragaman Hayati: Perubahan iklim yang disebabkan oleh emisi CO_2 dapat mengganggu habitat alami, yang mengancam kelangsungan hidup banyak spesies flora dan fauna.

2.2 *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan Emisi Karbon

Internet of Things (IoT) adalah sebuah konsep dimana objek fisik dilengkapi dengan teknologi untuk berkomunikasi dan bertukar data dengan perangkat lain melalui internet. Teknologi IoT memungkinkan pengumpulan data secara real-time dari berbagai sensor yang ditempatkan di lokasi yang berbeda-beda, dan data ini dapat dianalisis untuk mengambil keputusan yang tepat. Dalam konteks pemantauan emisi karbon, IoT menyediakan solusi yang efisien dan efektif untuk mengukur, memantau, dan mengelola emisi secara terus-menerus (Anwar dkk., 2022).



Gambar 2.1 Konsep Dasar IoT

2.2.1 Definisi dan Konsep Dasar IoT

Menurut Efendi dan Yoyon (2018), IoT adalah jaringan perangkat yang saling terhubung yang dapat mengumpulkan dan berbagi data. Definisi ini mencakup berbagai perangkat, mulai dari sensor sederhana hingga komputer kompleks. Keunggulan utama dari IoT adalah kemampuannya untuk memberikan data real-time yang dapat diakses dan dianalisis dari jarak jauh.

Komponen dasar dari sistem IoT meliputi:

a. Sensor: Alat yang mengumpulkan data dari lingkungan. Dalam kasus pemantauan emisi karbon, sensor gas seperti MQ-135 dapat digunakan untuk mendeteksi konsentrasi CO_2 dan gas-gas lainnya.
b. Perangkat Komunikasi: Perangkat ini mengirimkan data yang dikumpulkan oleh sensor ke sistem pusat untuk analisis. Komunikasi ini dapat dilakukan melalui berbagai protokol seperti Wi-Fi, Zigbee, atau LPWAN (Low Power Wide Area Network).
c. Platform IoT: Platform ini mengelola data yang dikumpulkan, menganalisisnya, dan menyajikannya dalam bentuk yang mudah dimengerti. Platform ini juga dapat digunakan untuk mengontrol perangkat IoT secara jarak jauh.

d. Aplikasi: Aplikasi ini memberikan antarmuka bagi pengguna untuk mengakses dan menganalisis data yang dikumpulkan oleh sistem IoT.

2.2.2 *Monitoring* Emisi Karbon dengan IoT

Penggunaan IoT untuk me-*monitoring* emisi karbon melibatkan pemasangan sensor di lokasi strategis untuk mengukur konsentrasi gas-gas rumah kaca. Sensor-sensor ini dapat mengirimkan data secara real-time ke platform IoT, dimana data tersebut dianalisis untuk memahami pola emisi dan mengidentifikasi sumber-sumber utama emisi (Adli dan Arifin, 2019).

Menurut Adli dan Arifin, (2019) beberapa keunggulan pemantauan emisi karbon dengan IoT meliputi:

a. Pemantauan Real-Time: Sensor IoT dapat menyediakan data real-time mengenai konsentrasi CO_2 dan gas lainnya. Data ini dapat digunakan untuk segera mendeteksi lonjakan emisi dan mengambil tindakan korektif.
b. Akurasi dan Ketepatan: Sensor IoT yang canggih mampu memberikan data yang sangat akurat mengenai konsentrasi gas-gas berbahaya. Ini memungkinkan pemantauan yang lebih tepat dibandingkan metode konvensional.
c. Analisis Data yang Mendalam: Platform IoT dapat menganalisis data yang dikumpulkan untuk mengidentifikasi pola dan tren emisi, serta untuk mengevaluasi efektivitas tindakan pengurangan emisi.
d. Penghematan Biaya: Penggunaan teknologi IoT dapat mengurangi biaya operasional karena memungkinkan pemantauan jarak jauh dan otomatisasi, sehingga mengurangi kebutuhan untuk inspeksi manual.

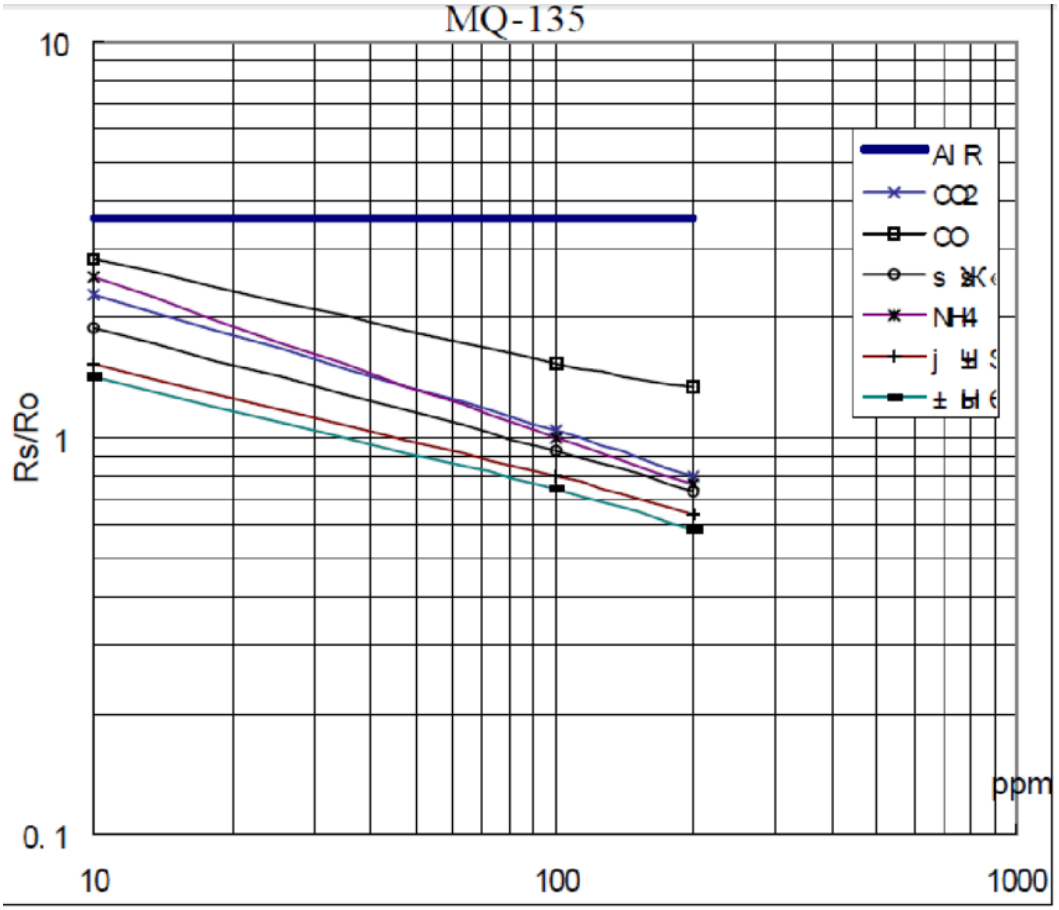
2.2.3 Sensor Gas MQ-135

Sensor gas MQ-135 adalah salah satu sensor yang umum digunakan dalam aplikasi pemantauan kualitas udara dan emisi karbon. Sensor ini dirancang untuk mendeteksi berbagai gas berbahaya termasuk amonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_x), alkohol, benzena, asap, dan CO_2 (Elly, 2021).

Gambar 2.2 Sensor MQ-135

Menurut Elly (2021), Fitur utama dari sensor gas MQ-135 meliputi:

a. Sensitivitas Tinggi: MQ-135 memiliki sensitivitas tinggi terhadap berbagai gas berbahaya, sehingga cocok untuk pemantauan kualitas udara.
b. Rentang Deteksi Luas: Sensor ini dapat mendeteksi konsentrasi gas mulai dari 10 ppm hingga 1000 ppm, membuatnya efektif untuk berbagai aplikasi.
c. Biaya Terjangkau: Sensor ini relatif murah, menjadikannya pilihan yang ekonomis untuk sistem pemantauan emisi berbasis IoT.
d. Mudah Digunakan: MQ-135 dapat diintegrasikan dengan mudah ke dalam berbagai platform IoT menggunakan mikrokontroler seperti Arduino atau Raspberry Pi.
e. Sensor MQ-135 memiliki 4 Pin yaitu: Pin 1 = VCC (+5Volt), Pin 2 = Ground, Pin 3 = Digital Out, dan Pin 4 = Analog Out.



Gambar 2.3 Graph konversi sensor MQ-135

Sensor gas MQ-135 mendeteksi berbagai gas seperti CO2, CO, NH3, Etanol, dan Benzena dengan memberikan data dalam bentuk rasio resistansi sensor (Rs) terhadap resistansi referensi (Ro). Grafik konversi pada gambar 2.3 diatas memetakan hubungan antara rasio Rs/Ro dan konsentrasi gas dalam satuan PPM (*Parts Per Million*).

2.2.4 Implementasi IoT dalam *Monitoring* Emisi Karbon

Menurut (Natsir dkk., 2019), Implementasi IoT dalam pemantauan emisi karbon melibatkan beberapa langkah, mulai dari perancangan sistem hingga analisis data:

a. Desain Sistem: Merancang sistem pemantauan dengan menentukan lokasi penempatan sensor, jenis sensor yang digunakan, dan metode komunikasi data.

b. Instalasi dan Kalibrasi: Memasang sensor dan perangkat komunikasi di lokasi yang telah ditentukan, serta melakukan kalibrasi untuk memastikan akurasi pengukuran.
c. Pengumpulan Data: Mengumpulkan data secara real-time dari sensor dan mengirimkannya ke platform IoT untuk dianalisis.
d. Analisis Data: Menganalisis data yang dikumpulkan untuk mengidentifikasi pola emisi, sumber emisi utama, dan mengevaluasi efektifitas tindakan mitigasi.
e. Pelaporan dan Tindakan: Menyajikan hasil analisis dalam bentuk laporan yang dapat digunakan untuk mengambil tindakan korektif atau perbaikan kebijakan.

Dengan perkembangan teknologi IoT, pemantauan emisi karbon dapat dilakukan dengan lebih efektif dan efisien, memberikan data yang diperlukan untuk mengurangi dampak negatif dari perubahan iklim.

2.3 Sensor Gas MQ-135 untuk Deteksi CO2e

Sensor gas MQ-135 adalah salah satu sensor yang banyak digunakan untuk mendeteksi kualitas udara, termasuk berbagai gas berbahaya seperti amonia (NH_3), nitrogen oksida (NO_x), alkohol, benzena, asap, dan karbon dioksida ekuivalen (CO_2e). Sensor ini terkenal karena sensitivitasnya yang tinggi dan biaya yang relatif rendah, membuatnya ideal untuk aplikasi pemantauan emisi karbon berbasis Internet of Things (IoT) (Salamah dkk., 2021).

2.3.1 Prinsip Kerja Sensor MQ-135

Menurut Adam dkk., (2016), Sensor gas MQ-135 bekerja berdasarkan perubahan konduktivitas listrik dalam material sensitif gas yang ada di dalam sensor. Material ini biasanya adalah oksida logam semikonduktor (MOS) yang konduktivitasnya berubah ketika gas target ada di sekitarnya. Ketika sensor terpapar gas seperti CO_2, molekul gas tersebut berinteraksi dengan permukaan material sensitif, menyebabkan perubahan konduktivitas yang dapat diukur sebagai perubahan tegangan atau arus listrik.

Komponen utama sensor MQ-135 meliputi:

a. Elemen Pemanas: Elemen ini memanaskan material sensitif untuk meningkatkan reaktivitasnya terhadap gas target.
b. Material Sensitif: Biasanya berupa oksida logam seperti SnO_2 yang responsif terhadap gas target.
c. Elektroda: Menghubungkan material sensitif ke rangkaian eksternal untuk mengukur perubahan konduktivitas.
d. Kondisioning Sinyal: Rangkaian yang mengubah perubahan konduktivitas menjadi sinyal listrik yang dapat diukur.

2.3.2 Kalibrasi dan Penggunaan Sensor MQ-135

Kalibrasi sensor gas MQ-135 adalah langkah penting untuk memastikan akurasi dalam mendeteksi konsentrasi gas. Proses kalibrasi melibatkan:

a. Pengaturan Nol: Sensor ditempatkan di lingkungan bebas gas target untuk mendapatkan bacaan dasar atau nol.
b. Kalibrasi Rentang: Sensor dipaparkan pada konsentrasi gas target yang diketahui untuk menetapkan titik kalibrasi pada rentang pengukuran.

Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan sumber gas standar atau di lingkungan yang terkontrol. Setelah kalibrasi, sensor siap digunakan untuk mendeteksi perubahan konsentrasi gas di lingkungan nyata (Adam dkk., 2016).

2.3.3 Integrasi Sensor MQ-135 dengan Sistem IoT

Menurut Salamah dkk., (2021).Integrasi sensor MQ-135 dengan sistem IoT melibatkan beberapa komponen dan langkah, seperti:

a. Mikrokontroler: Sensor MQ-135 dihubungkan ke mikrokontroler seperti Arduino atau Raspberry Pi yang mengelola pembacaan data sensor dan mengirimkannya ke platform IoT.
b. Modul Komunikasi: Menggunakan modul seperti Wi-Fi, Zigbee, atau LPWAN untuk mengirim data dari mikrokontroler ke server atau cloud.
c. Platform IoT: Platform seperti ThingSpeak, AWS IoT, atau Azure IoT Hub yang mengumpulkan, menyimpan, dan menganalisis data dari sensor.
d. Aplikasi Analitik: Menggunakan aplikasi analitik untuk memvisualisasikan data, mendeteksi tren, dan membuat laporan.

2.3.4 Studi Kasus Penggunaan Sensor MQ-135

Penggunaan sensor MQ-135 dalam aplikasi pemantauan emisi karbon telah didemonstrasikan dalam berbagai studi dan proyek. Beberapa contoh penerapannya meliputi:

a. Pemantauan Kualitas Udara di Perkotaan: Sensor MQ-135 digunakan untuk mengukur konsentrasi CO_2e di area perkotaan, membantu pemerintah kota untuk memantau dan mengelola kualitas udara.
b. Pemantauan Emisi Industri: Sensor ini dipasang di fasilitas industri untuk mendeteksi dan mengukur emisi gas berbahaya, memastikan kepatuhan terhadap peraturan lingkungan.
c. Sistem Pemantauan Rumah Tangga: MQ-135 digunakan dalam perangkat rumah pintar untuk memantau kualitas udara dalam ruangan, memberikan peringatan jika terdeteksi peningkatan gas berbahaya (Arida dkk., 2020).

2.3.5 Keunggulan dan Keterbatasan Sensor MQ-135

Menurut (Adam dkk., 2016), terdapat keunggulan dan keterbatasan sensor MQ-135:

Keunggulan:

a. Sensitivitas Tinggi: Dapat mendeteksi berbagai gas berbahaya pada konsentrasi rendah.
b. Biaya Rendah: Relatif murah dibandingkan dengan sensor gas lainnya.
c. Mudah Digunakan: Dapat diintegrasikan dengan mudah ke berbagai platform dan mikrokontroler.

Keterbatasan:

a. Selektivitas Gas: Meskipun sensitif terhadap banyak gas, sulit untuk membedakan antara gas yang berbeda tanpa kalibrasi khusus.
b. Pengaruh Lingkungan: Faktor lingkungan seperti kelembaban dan suhu dapat mempengaruhi akurasi sensor.
c. Kalibrasi Berkala: Membutuhkan kalibrasi rutin untuk memastikan akurasi pengukuran.

2.4 Standar dan Regulasi Pemantauan Kualitas Udara

Pemantauan kualitas udara merupakan aspek penting dalam upaya mengurangi dampak negatif emisi gas rumah kaca dan polutan lainnya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Untuk memastikan pemantauan yang efektif dan konsisten, berbagai standar dan regulasi telah dikembangkan oleh organisasi internasional, pemerintah, dan badan lingkungan. Standar dan regulasi ini menetapkan pedoman mengenai metode pemantauan, jenis polutan yang harus dipantau, ambang batas konsentrasi, serta pelaporan dan tindakan korektif (Pradifan dkk., 2021)

2.4.1 Standar Internasional

- ***World Health Organization* (WHO)**

  WHO menetapkan pedoman kualitas udara global yang mencakup ambang batas untuk berbagai polutan utama seperti PM2.5, PM10, nitrogen dioksida (NO_2), sulfur dioksida (SO_2), dan ozon (O_3). Pedoman ini bertujuan untuk melindungi kesehatan manusia dengan mengurangi risiko penyakit terkait polusi udara. Misalnya, ambang batas harian untuk PM2.5 adalah 25 µg/m³, sedangkan untuk PM10 adalah 50 µg/m³.

- **United States Environmental Protection Agency (EPA)**

  EPA menetapkan National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) untuk melindungi kesehatan masyarakat dan lingkungan. NAAQS mencakup standar untuk enam polutan utama: karbon monoksida (CO), timbal (Pb), nitrogen dioksida (NO_2), ozon (O_3), partikel (PM2.5 dan PM10), dan sulfur dioksida (SO_2). Sebagai contoh, standar tahunan untuk PM2.5 adalah 12 µg/m³, dan standar 1 jam untuk NO_2 adalah 100 ppb.

2.4.2 Standar dan Regulasi Nasional

- **Indonesia**

  Indonesia memiliki standar kualitas udara yang diatur dalam Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Peraturan ini menetapkan ambang batas untuk berbagai polutan

seperti PM10, SO_2, NO_2, CO, ozon, dan timbal. Misalnya, ambang batas harian untuk PM10 adalah 150 µg/m³, dan untuk SO_2 adalah 365 µg/m³.

- **Uni Eropa**

  Uni Eropa mengadopsi berbagai direktif yang mengatur kualitas udara, termasuk Directive 2008/50/EC on ambient air quality and cleaner air for Europe. Direktif ini menetapkan batas maksimum untuk polutan seperti PM10, PM2.5, NO_2, SO_2, O_3, benzena, dan karbon monoksida. Sebagai contoh, ambang batas tahunan untuk NO_2 adalah 40 µg/m³, dan untuk PM2.5 adalah 25 µg/m³.

2.4.3 Metodologi Pemantauan

Pemantauan kualitas udara melibatkan penggunaan berbagai metode dan teknologi untuk mengukur konsentrasi polutan di atmosfer. Beberapa metode yang umum digunakan meliputi:

a. Pengambilan Sampel Aktif: Menggunakan perangkat yang menarik udara melalui filter atau media penyerap untuk analisis laboratorium.
b. Sensor Berbasis IoT: Menggunakan sensor elektronik yang dapat memberikan data real-time mengenai konsentrasi polutan di udara.
c. Sistem Pemantauan Otomatis: Stasiun pemantauan otomatis yang dilengkapi dengan berbagai alat pengukur untuk polutan tertentu, menyediakan data yang terus-menerus dan real-time.

2.4.4 Pelaporan dan Tindakan Korektif

Regulasi kualitas udara juga mencakup pedoman mengenai pelaporan data dan tindakan korektif yang harus diambil jika ambang batas terlampaui:

a. Pelaporan: Data kualitas udara harus dilaporkan secara berkala kepada badan lingkungan yang berwenang. Laporan ini biasanya mencakup informasi tentang konsentrasi polutan, tren jangka panjang, dan perbandingan dengan ambang batas yang ditetapkan.
b. Tindakan Korektif: Jika ambang batas terlampaui, langkah-langkah korektif harus diambil untuk mengurangi konsentrasi polutan. Ini bisa meliputi pembatasan aktivitas industri, pengendalian emisi kendaraan, peningkatan ruang hijau, atau penerapan teknologi pengendalian polusi.

2.4.5 Tantangan dan Peluang

Tantangan:

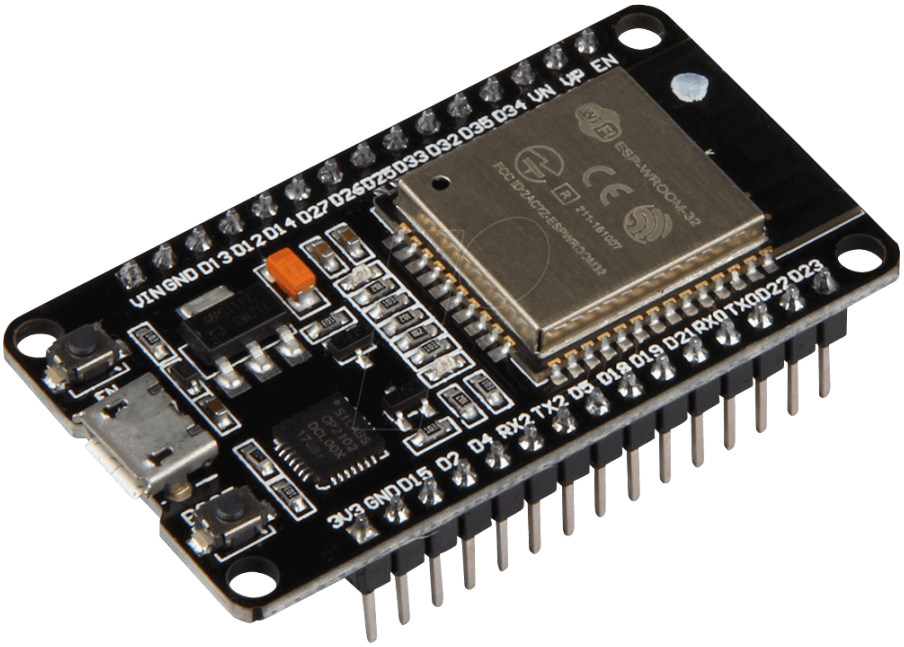
- Variabilitas Data: Data kualitas udara dapat sangat bervariasi tergantung pada lokasi, waktu, dan kondisi cuaca.
- Biaya dan Infrastruktur: Implementasi sistem pemantauan yang canggih memerlukan investasi yang signifikan dalam hal biaya dan infrastruktur.

Peluang:

- Teknologi IoT: Penggunaan sensor IoT yang lebih murah dan mudah diintegrasikan dapat meningkatkan cakupan pemantauan dan memberikan data yang lebih granular.
- Kesadaran Publik: Meningkatnya kesadaran publik mengenai pentingnya kualitas udara dapat mendorong tindakan kolektif untuk mengurangi polusi udara.

2.5 ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang dikenalkan oleh Espressif System merupakan penerus dari mikrokontroler ESP8266. Pada mikrokontroler ini sudah tersedia modul WiFi dalam chip sehingga mendukung untuk pembuatan sistem aplikasi *Internet of Things* (IoT) Terlihat pada **gambar** merupakan pinout dari ESP32. Pin tersebut dapat dijadikan input atau output untuk menyalakan LCD, lampu LED bahkan untuk menggerakan motor DC.



Gambar 2.4 ESP32

Pada modul ESP32 terdapat WiFi 802.11 b/g/n, bluetooth v4.2 BR/EDR dan BLE yang dimana radio terbagi dengan WiFi. pada ESP32 terdapat memori sebesar 520KB SRAM untuk menyimpan program. ESP32 memiliki 38 pin terbagi menjadi 18 pin kanal ADC, 3 pin SPI, 3 pin UART, 2 pin I2C, 16 pin output PWM, 2 pin kanal DAC, 2 pin I2S dan 10 pin GPIO. (Nizam dkk., 2022).

2.6 LCD I2C

LCD I2C (*Liquid Crystal Display Inter-Integrated Circuit*) adalah layar tampilan yang digunakan untuk menampilkan informasi dari mikrokontroler. Keuntungan utama dari penggunaan LCD I2C adalah kebutuhan pin yang lebih sedikit dibandingkan dengan LCD standar, karena menggunakan komunikasi I2C (dua pin: SDA dan SCL).

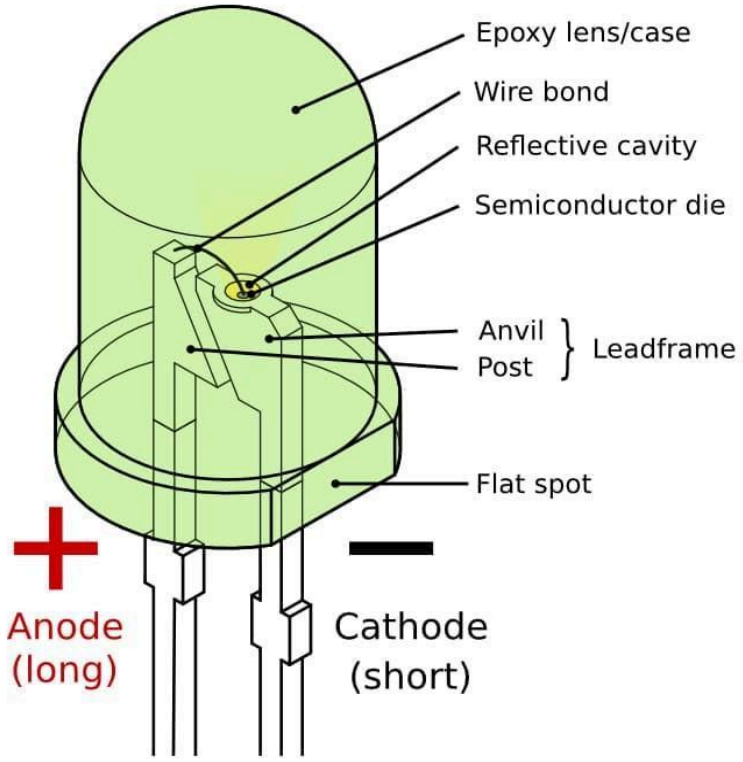
Gambar 2.5 LCD I2C 16x2

LCD I2C 16x2 memiliki kemampuan untuk menampilkan data hasil pengukuran dari sensor MQ-135. Informasi yang ditampilkan meliputi konsentrasi CO2 yang diukur oleh sensor. Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan untuk mengintegrasikan LCD I2C dengan sistem:

a. **Koneksi Perangkat Keras:** Menghubungkan pin SDA dan SCL LCD ke mikrokontroler. Selain itu, menghubungkan pin VCC dan GND untuk menyediakan daya.
b. **Inisialisasi Perangkat Lunak:** Menggunakan pustaka (*Library*) LiquidCrystal_I2C untuk menginisialisasi dan mengontrol LCD. Pustaka ini memudahkan komunikasi antara mikrokontroler dan LCD I2C.
c. **Menampilkan Data:** Menulis kode untuk menampilkan data hasil pengukuran dari sensor MQ-135 pada LCD I2C.

2.7 LED (*Light Emitting Diode*)

LED (*Light Emitting Diode*) adalah komponen elektronika yang memiliki bentuk yang kecil dengan dua kaki, yaitu anoda (+) dan katoda (-). LED dapat memancarkan cahaya ketika mendapatkan arus bias maju dan terdiri dari chip semikonduktor yang tidak menimbulkan panas. Bentuk LED yang kecil membuatnya mudah digunakan pada berbagai perangkat elektronika.



Gambar 2.6 LED

LED akan memancarkan cahaya bila diberikan tegangan listrik. Arus yang mengalir melalui LED harus cukup rendah, yakni maksimal 20 mA. Jika arus

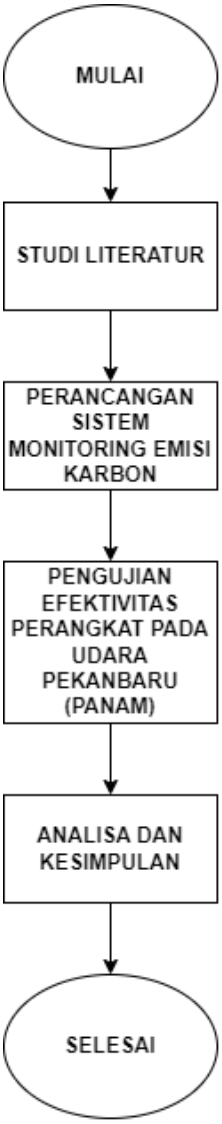
melebihi dari 20 mA, LED akan rusak. Oleh karena itu, pada rangkaian LED, biasanya dipasang sebuah resistor pada kutub positif / anoda (+) sebagai pembatas arus (Natsir dkk., 2019).

III. PERANCANGAN

Perancangan sistem *monitoring* emisi karbon berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan sensor gas MQ-135 melibatkan beberapa tahap kritis yang mencakup pemilihan perangkat keras dan perangkat lunak, desain arsitektur sistem, pengembangan perangkat lunak, serta pengujian dan kalibrasi. Berikut adalah penjelasan rinci mengenai setiap tahap dalam perancangan sistem ini

3.1 Tahap Pengerjaan Proyek Akhir

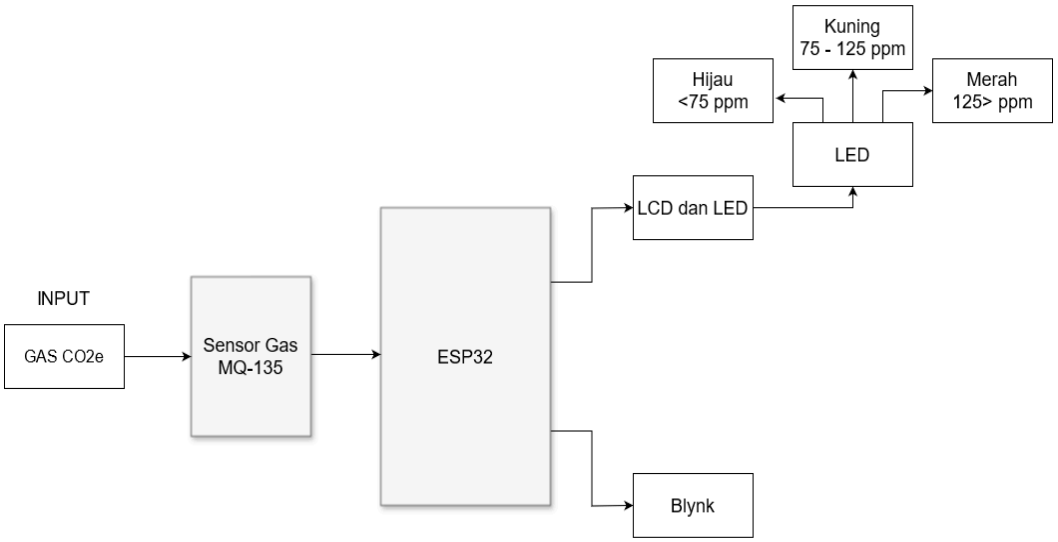
Tahap Pengerjaan proyek akhir ini berupa flowchart alur kerja, alur kerjanya dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 3.1 Flowchart tahapan pengerjaan proyek akhir

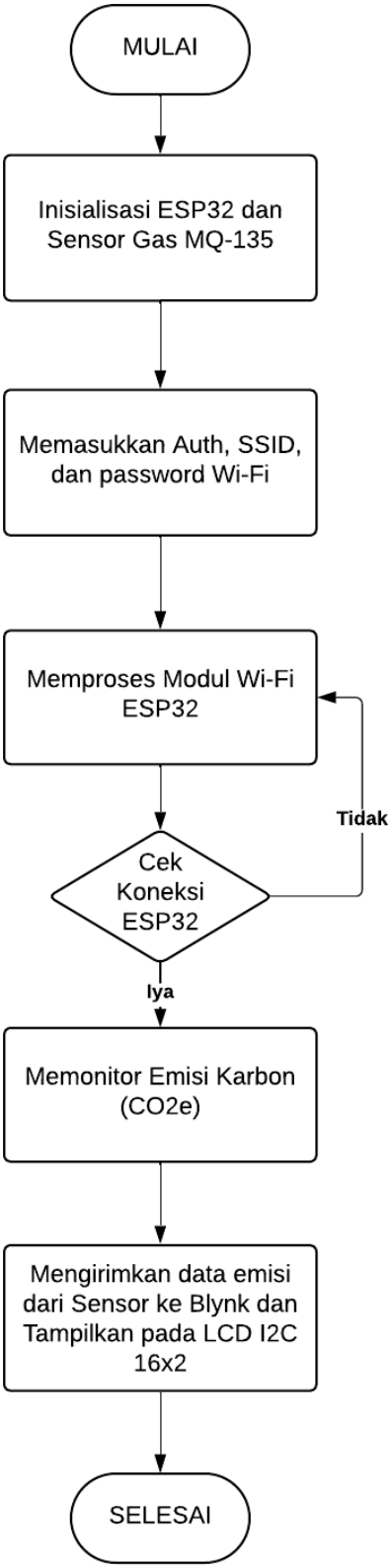
3.2 Blok Diagram Sistem

Rangkaian Elektronika yang diperlukan pada alat ini adalah rangkaian *monitoring* dengan mikrokontroler ESP32, yang menerima perintah dari Sensor Gas MQ-135. Perintah tersebut diproses oleh ESP32 dan data dikirimkan ke Blynk serta ditampilkan pada LCD 16x2.



Gambar 3.2 Blok diagram sistem

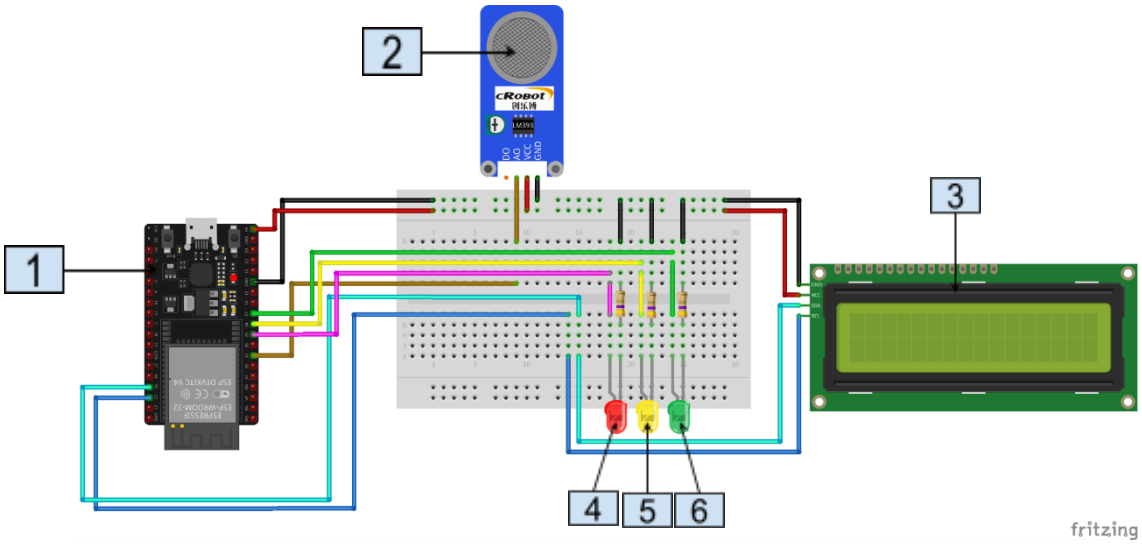
3.3 *Flowchart* Sistem *Monitoring* Emisi Karbon



Gambar 3.3 *Flowchart* Sistem Monitoring Emisi Karbon

Gambar 3.3 merupakan alur kerja sistem monitoring emisi karbon. Pertama melakukan inisialisasi pada ESP32 dan sensor Gas MQ-135. Mikrokontroler di program untuk menghubungkan ESP32 ke Wi-Fi dan ke Blynk. Setelah itu data yang sudah didapatkan pada sensor akan dikumpulkan dan diproses data mentahnya menjadi bentuk konsentrasi CO2e (PPM). Data yang sudah diproses akan dikirim ke Blynk dan juga ke LCD I2C 16x2 yang akan ditampilkan pada dashboard Blynk dan dikirimkan notifikasinya ke smartphone.

3.4 Perancangan Elektronika



Gambar 3.4 Perancangan Elektronika

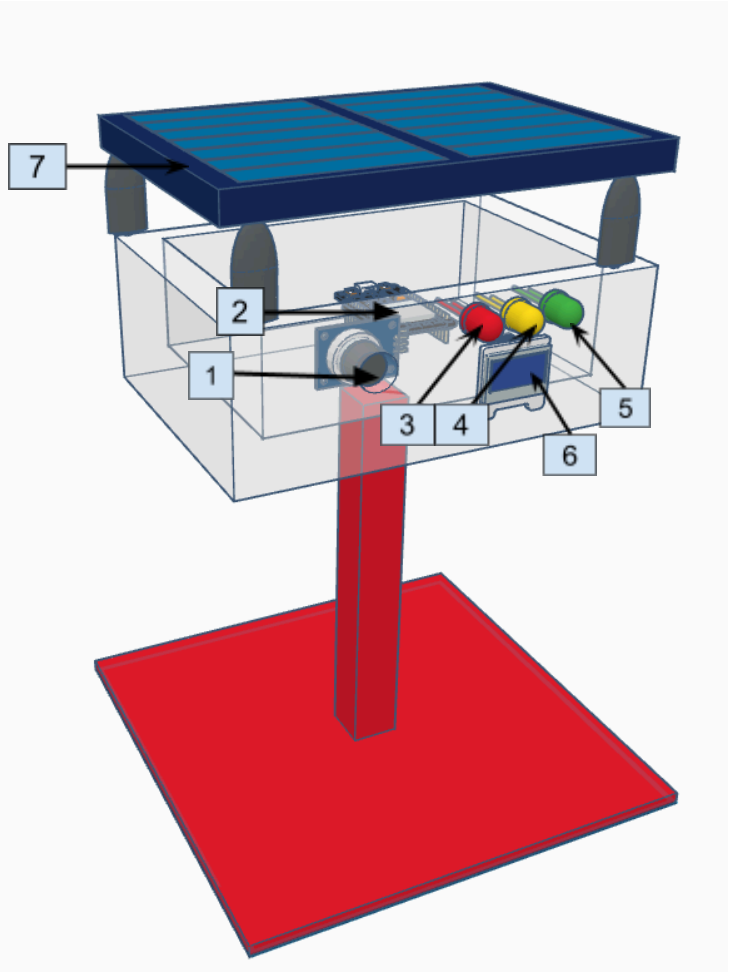
Keterangan pada perancangan Elektronika:

1. ESP32
   - Pin GND = Terhubung ke semua Pin GND pada Sensor, LED, dan LCD dari ESP32
   - Pin 5V = Terhubung ke semua Pin Vin pada Sensor, LED, dan LCD dari ESP32
   - Pin GPIO 32 = Terhubung ke Pin A0 pada Sensor MQ-135 dari ESP32
   - Pin GPIO 25 = Terhubung ke Anoda pada LED merah dari ESP32
   - Pin GPIO 26 = Terhubung ke Anoda pada LED Kuning dari ESP32
   - Pin GPIO 27 = Terhubung ke Anoda pada LED Hijau dari ESP32
   - Pin GPIO 22 = Terhubung ke Pin SCL pada LCD dari ESP32
   - Pin TX = Terhubung ke Pin SDA pada LCD dari ESP32
2. Sensor gas MQ-135

3. LCD I2C 16x2
4. LED Merah
5. LED Kuning
6. LED Hijau

3.5 Perancangan Mekanik

Perancangan mekanik merupakan pengaturan tata letak komponen yang akan digunakan dalam perancangan alat.



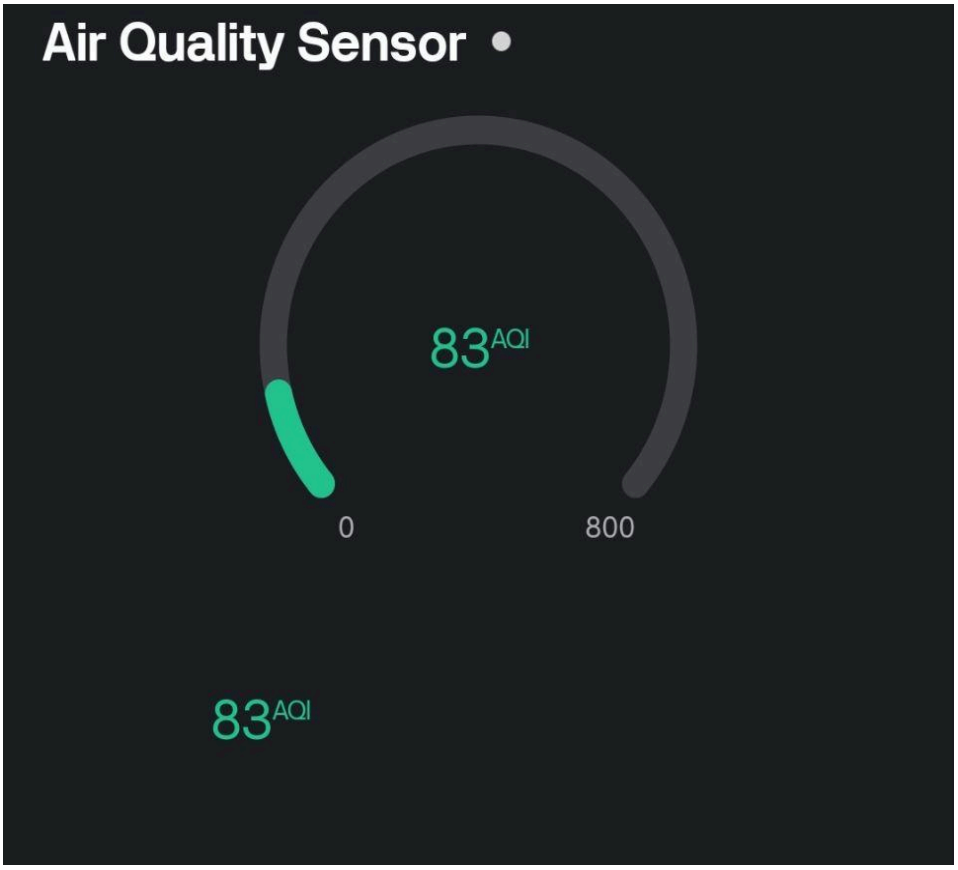
Gambar 3.5 Perancangan Mekanik dan tampilan Android

Keterangan pada gambar 3.5 :

1. Sensor MQ-135
2. ESP32
3. LED Merah
4. LED Kuning

5. LED Hijau
6. LCD 16x2 I2C
7. Panel Surya

3.6 Tampilan pada Aplikasi Android



Gambar 3.6 *User Interface* pada Aplikasi Blynk

Pada Gambar 3.6 menunjukkan antarmuka (*User Interface*) pada aplikasi Blynk IoT yang dapat menampilkan hasil dari monitoring emisi karbon menggunakan sensor MQ-135 yang terhubung pada mikrokontroler ESP32. Data yang ditampilkan adalah nilai konsentrasi CO2e dalam bentuk meteran (*gauge*) secara *real time* dan menampilkan dalam bentuk grafik batang (*bar chart*) yang menunjukan data konsentrasi CO2e yang diukur selama rentang waktu tertentu.

3.7 Validasi Penelitian

Validasi penelitian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem monitoring emisi karbon berbasis *Internet of Things* (IoT) yang menggunakan

sensor gas MQ-135 berfungsi dengan benar dan akurat. Validasi yang dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran dari penelitian dan metode konvensional (IQ*Air*) yang sudah teruji.

Berikut merupakan metodologi validasi yang akan digunakan dalam penelitian proyek akhir ini:

a. **Pengujian Laboratorium:** Pengujian dilakukan di laboratorium untuk memastikan bahwa sensor MQ-135 dapat mendeteksi konsentrasi CO2e dengan akurat. Hasil pengukuran sensor akan dibandingkan dengan alat ukur konvensional.
b. **Studi Perbandingan:** Data yang diperoleh dari sistem monitoring akan dibandingkan dengan data yang dikumpulkan dari metode konvensional pada waktu dan lokasi yang sama.

Setelah melakukan validasi, hasil dari sistem yang dikembangkan akan dapat memenuhi standar akurasi dan keandalan yang diperlukan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian sistem monitoring emisi karbon yang dilakukan di area perumahan. Pengujian bertujuan untuk mengetahui variasi konsentrasi emisi karbon selama satu minggu, dengan pengukuran yang dilakukan setiap jam mulai dari pukul 08:00 hingga 20:00. Data dari sensor gas MQ-135 akan dianalisis untuk memahami pola emisi karbon di area perumahan Griya Arya Panam.

4.1 Hasil Pengujian Sistem

Pengujian sistem monitoring emisi karbon ini dilakukan di Perumahan Griya Arya Panam selama satu minggu, dengan pencatatan data tiap jam mulai dari pukul 08:00 hingga 20:00. Sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi kadar gas berbahaya seperti karbon dioksida (CO2) yang berpotensi mencemari udara.

Pengujian dilakukan setiap hari selama satu minggu untuk mendapatkan gambaran tentang konsentrasi karbon dioksida (CO2) di lingkungan perumahan. Hasil pengujian ditampilkan pada tabel dan grafik di bawah ini.

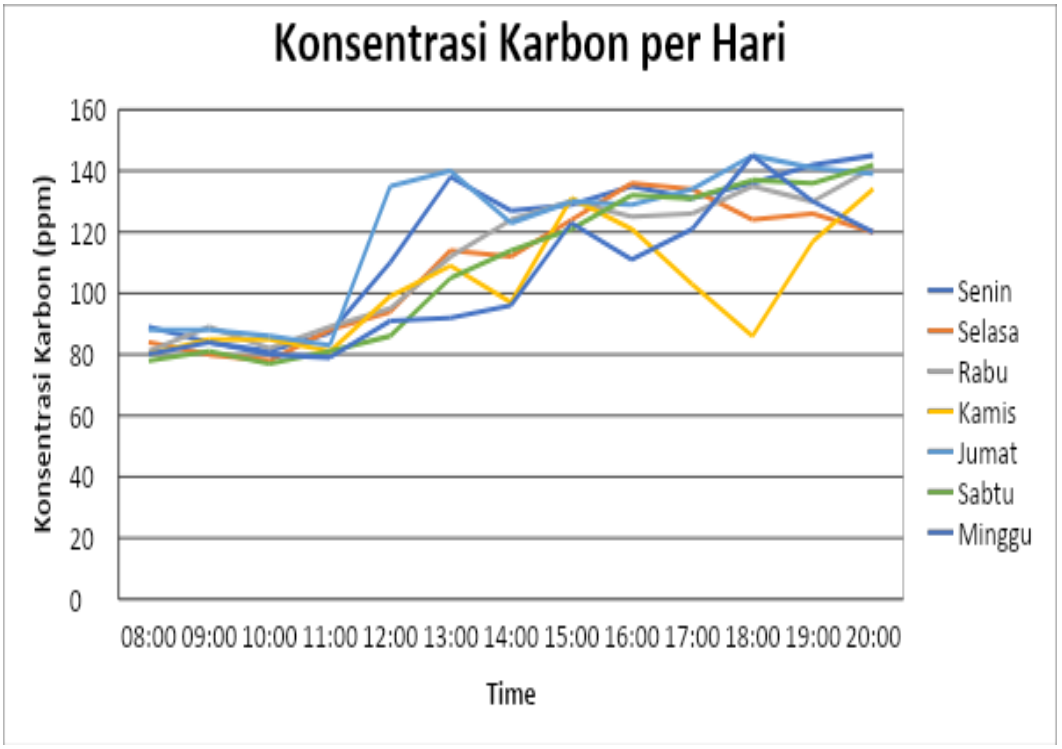
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Sensor di Perumahan Griya Arya Panam Pekanbaru

HARI/ JAM	SENIN		SELASA		RABU		KAMIS		JUM'AT		SABTU		MINGGU	
08:00	89	84	84	79	81	75	80	72	88	80	78	64	80	75
09:00	84	79	80	78	89	80	85	78	88	78	81	79	84	76
10:00	81	76	78	75	82	78	85	79	86	76	77	71	80	76
11:00	87	79	88	72	89	75	81	76	83	77	81	74	79	78
12:00	110	89	94	92	95	82	99	91	135	102	86	92	91	76
13:00	138	95	114	85	112	84	109	101	140	86	105	79	92	89
14:00	127	96	112	88	124	89	97	86	123	95	114	84	96	95
15:00	129	90	124	77	130	88	131	95	130	81	121	95	123	92
16:00	135	90	136	76	125	96	121	90	129	82	132	88	111	85
17:00	131	96	134	90	126	96	103	85	134	89	131	91	121	83
18:00	136	102	124	90	135	102	86	98	145	100	137	89	145	86
19:00	142	96	126	85	130	87	117	84	141	96	136	94	130	92
20:00	145	87	120	73	141	88	134	87	139	93	142	95	120	98
Rata-rata Error (%)	23.48%		4.04%		13.49%		8.10%		9.97%		16.05%		10.21%	

Catatan: Angka yang ditampilkan adalah nilai ppm (part per million) dari gas yang terdeteksi. Kuning merupakan data dari alat projek, hijau merupakan data dari alat konvensional.

4.2 Pembahasan Hasil Pengujian

Dari hasil pengujian yang dilakukan selama seminggu, dapat dilihat adanya fluktuasi kadar emisi karbon di Perumahan Griya Arya Panam. Nilai ppm tertinggi tercatat pada hari Senin pukul 20:00 dengan angka 145 ppm, yang menunjukkan adanya peningkatan emisi karbon pada waktu tersebut sebaliknya, nilai terendah terpantau pada hari kamis pukul 08:00 dengan angka 73 ppm.



Gambar 4.1 Konsentrasi Karbon Harian di perumahan

Hasil pengujian menunjukkan variasi yang cukup signifikan dalam konsentrasi emisi karbon di area perumahan sepanjang minggu. Grafik di atas memberikan visualisasi dari data yang dikumpulkan, memperlihatkan bagaimana konsentrasi CO2 berubah-ubah setiap harinya pada berbagai waktu.

Pada grafik tersebut, terlihat bahwa konsentrasi CO2 cenderung meningkat pada siang hingga malam hari, terutama pada hari kerja seperti Senin dan Jumat.

Peningkatan ini dapat disebabkan oleh aktivitas rumah tangga yang lebih intens pada waktu-waktu tersebut, seperti memasak, penggunaan kendaraan bermotor, dan aktivitas lainnya yang menghasilkan emisi karbon.

Nilai ppm tertinggi tercatat pada Senin pukul 20:00 dengan angka 145 ppm, yang mungkin disebabkan oleh aktivitas yang meningkat pada akhir hari kerja. Sebaliknya, nilai terendah terpantau pada Kamis pukul 08:00 dengan angka 73 ppm, menunjukkan kondisi udara yang relatif bersih di pagi hari sebelum aktivitas harian dimulai.

4.3 Analisis Data

Data yang diperoleh dari sistem monitoring emisi karbon berbasis IoT di area perumahan dianalisis dengan dukungan literatur dan jurnal untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pola emisi karbon yang terdeteksi. Data menunjukkan adanya fluktuasi konsentrasi karbon dioksida (CO2) di berbagai waktu dan hari, yang mencerminkan aktivitas manusia dan kondisi lingkungan yang beragam.

4.3.1 Pola Emisi Karbon di Area Perumahan

Data yang diperoleh menunjukkan bahwa konsentrasi CO2 cenderung lebih tinggi pada siang hingga malam hari, terutama pada hari kerja seperti Senin dan Jumat. Peningkatan ini sejalan dengan temuan dalam penelitian yang dilakukan oleh Williams et al. (2018), yang menunjukkan bahwa aktivitas manusia seperti memasak, penggunaan kendaraan bermotor, dan penggunaan peralatan elektronik secara signifikan meningkatkan konsentrasi CO2 di area perumahan .

Penelitian lain oleh Cheng et al. (2020) juga mendukung temuan ini, di mana konsentrasi CO2 dalam rumah tangga cenderung meningkat pada waktu-waktu tertentu, terutama pada sore hingga malam hari, karena adanya peningkatan aktivitas rumah tangga dan berkurangnya ventilasi. Dalam konteks ini, hasil yang diperoleh di area perumahan menunjukkan pola yang konsisten dengan literatur yang ada, di mana peningkatan aktivitas manusia berkorelasi dengan peningkatan emisi karbon.

4.3.2 Dampak Kualitas Udara Terhadap Kesehatan

Konsentrasi CO2 yang tinggi dalam jangka panjang dapat berdampak negatif terhadap kesehatan manusia. Menurut World Health Organization (WHO), paparan CO2 pada tingkat yang lebih tinggi dari 1000 ppm dapat menyebabkan gejala seperti sakit kepala, pusing, dan dalam kasus ekstrim, asfiksia. Meskipun dalam pengujian ini, konsentrasi CO2 belum mencapai tingkat yang membahayakan, nilai tertinggi yang tercatat sebesar 145 ppm pada Senin malam menunjukkan bahwa kualitas udara dapat mengalami penurunan pada waktu tertentu.

Penelitian oleh Satish et al. (2012) juga menemukan bahwa paparan CO2 pada tingkat moderat (600-1000 ppm) dapat mengurangi kemampuan kognitif manusia, terutama dalam hal pengambilan keputusan dan pemecahan masalah. Meskipun konsentrasi CO2 dalam penelitian ini masih berada di bawah ambang batas ini, penting untuk diingat bahwa peningkatan aktivitas manusia yang tidak terkendali dapat mendorong konsentrasi CO2 mendekati atau bahkan melebihi batas aman.

4.3.3 Pengaruh Ventilasi dan Lingkungan

Ventilasi yang buruk di dalam rumah atau area perumahan dapat memperburuk konsentrasi CO2, terutama jika sumber emisi karbon berada di dalam rumah itu sendiri, seperti saat memasak dengan bahan bakar fosil atau penggunaan peralatan pemanas. Penelitian oleh Seppänen et al. (1999) menegaskan pentingnya ventilasi yang memadai untuk menjaga kualitas udara dalam ruangan, yang dapat mengurangi risiko kesehatan terkait dengan tingginya kadar CO2(Data dari sensor).

Dalam konteks area perumahan yang diuji, variasi konsentrasi CO2 yang lebih rendah pada pagi hari (seperti terlihat pada Kamis pukul 08:00) menunjukkan bahwa ventilasi alami mungkin lebih baik pada pagi hari, ketika pintu dan jendela kemungkinan besar lebih sering dibuka untuk mengalirkan udara segar. Namun, peningkatan konsentrasi CO2 pada malam hari menunjukkan perlunya sistem ventilasi buatan atau alami yang lebih baik untuk menjaga kualitas udara.

4.3.4 Implikasi Terhadap Kebijakan dan Manajemen Lingkungan

Hasil analisis ini menunjukkan bahwa untuk menjaga kualitas udara yang baik di area perumahan, diperlukan intervensi yang mencakup peningkatan ventilasi, penggunaan energi yang lebih efisien, dan pengurangan sumber emisi karbon dalam rumah tangga. Studi oleh Fisk (2000) menunjukkan bahwa peningkatan kualitas udara dalam ruangan melalui ventilasi yang lebih baik dan pengurangan sumber emisi dapat meningkatkan kesehatan penghuni dan produktivitas.

Kebijakan lingkungan di tingkat lokal dan nasional harus mempertimbangkan pentingnya memonitor dan mengelola emisi karbon di area perumahan. Teknologi IoT yang digunakan dalam penelitian ini dapat menjadi alat penting untuk memantau kualitas udara secara real-time, memberikan data yang diperlukan untuk pengambilan keputusan yang lebih baik dalam manajemen lingkungan dan kesehatan masyarakat.

Analisis yang mendalam dan didukung oleh literatur ini menunjukkan bahwa meskipun konsentrasi CO2 di area perumahan yang diuji masih dalam batas aman, ada potensi risiko yang perlu diawasi, terutama terkait dengan ventilasi dan aktivitas manusia. Monitoring kualitas udara secara berkelanjutan dan penerapan kebijakan lingkungan yang tepat sangat penting untuk menjaga kesehatan dan kesejahteraan penghuni.

Secara keseluruhan, meskipun CO2 adalah gas yang alami dan diperlukan dalam proses fisiologis tubuh, paparan yang berlebihan dan berkelanjutan harus dihindari untuk mencegah dampak kesehatan yang merugikan. Pencegahan melibatkan ventilasi yang baik, pemantauan kualitas udara, dan pengurangan sumber emisi CO2 di lingkungan tempat tinggal atau kerja.

4.4 Pengujian Keseluruhan

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan setelah pengujian pada setiap bagian dari “SISTEM MONITORING EMISI KARBON BERBASIS INTERNET OF THING (IoT) MENGGUNAKAN SENSOR GAS MQ-135”. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja keseluruhan sistem yang dapat memonitoring

kualitas udara di area kecamatan Tampan, Pekanbaru di perumahan Griya Arya Panam.

Pengukuran tingkat kualitas udara di area perumahan dari jam 08:00 sampai dengan 20:00. Pengujian keseluruhan Sistem Monitoring Emisi Karbon Berbasis *Internet of Things* (IoT) melalui grafik yang ditampilkan oleh Blynk IoT dapat dilihat di gambar berikut ini.

Gambar 4.2 Hasil Monitoring

Kualitas Udara melalui Blynk IoT

Berdasarkan pada Tabel 4.1 data hasil pengukuran tingkat pencemaran udara di area Perumahan Griya Arya Panam dengan diambil periode pengukuran setiap 1 (satu) jam, didapatkan bahwa pencemaran gas polutan CO2e pada periode pengukuran rata-rata tertinggi pada pukul 12:00 sampai dengan 14:00 dan 16:00 sampai dengan 18:00, yakni 132 ppm dan periode pengukuran rata-rata terendah pada pukul 08:00, yakni 77 ppm.

4.4.1 Uploading Program

```
#defineBLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL6zW34-uZ0"
#defineBLYNK_TEMPLATE_NAME "Gas Sensor"
#defineBLYNK_AUTH_TOKEN "7TUS6FTkzUPmGfVj8O7jSO750PbQWxxQ"

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <MQ135.h>

// WiFi credentials
char ssid[] = "Captain";
char pass[] = "gaschamber";

// Blynk Auth Token
char auth[] = BLYNK_AUTH_TOKEN;

// LCD configuration
#define I2C_ADDR 0x27
#define LCD_COLUMNS 16
#define LCD_ROWS 2
LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR, LCD_COLUMNS, LCD_ROWS);

// MQ135 configuration
#define MQ135_PIN 34
MQ135 mq135(MQ135_PIN);

void setup() {
 // Initialize Serial for debugging
 Serial.begin(115200);

 // Initialize LCD
 Wire.begin();
 lcd.init();
 lcd.backlight();
 lcd.setCursor(0, 0);
 lcd.print("Initializing...");

 // Initialize Blynk
 Blynk.begin(auth, ssid, pass);
}
```

```
void loop() {
 // Read PPM from MQ135
 float ppm = mq135.getPPM();

 // Display on LCD
 lcd.clear();
 lcd.setCursor(0, 0);
 lcd.print("Air Quality:");
 lcd.setCursor(0, 1);
 lcd.print("PPM: ");
 lcd.print(ppm);

 // Send to Blynk
 Blynk.virtualWrite(V1, ppm);

 // Run Blynk
 Blynk.run();

 // Delay before next reading
 delay(2000);
}
```

4.4.2 Penjelasan Program

```
#defineBLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL6zW34-uZ0"
#defineBLYNK_TEMPLATE_NAME "Gas Sensor"
#defineBLYNK_AUTH_TOKEN "7TUS6FTkzUPmGfVj8O7jSO750PbQWxxQ"
```

Baris ini mendefinisikan ID template Blynk, nama template, dan token autentikasi. Dengan nilai-nilai yang sesuai dari platform Blynk.

Nilai ini diperlukan untuk menghubungkan ESP32 ke cloud Blynk dan menampilkan data pada Blynk.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <MQ135.h>
```

- “Wire.h” Digunakan untuk komunikasi I2C, ini diperlukan untuk mengontrol LCD 16x2.
- “LiquidCrystal_I2C.h” Digunakan untuk mengontrol layar LCD yang terhubung melalui I2C.
- “WiFi.h” Digunakan untuk menghubungkan ESP32 ke jaringan Wi-Fi.
- “BlynkSimpleESP32” Digunakan untuk mengintegrasikan ESP32 dengan platform Blynk.
- “MQ135.h” Digunakan untuk mengontrol sensor gas MQ-135 untuk mengukur kualitas udara.

```
#define I2C_ADDR 0x27
#define LCD_COLUMNS 16
#define LCD_ROWS 2
LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR, LCD_COLUMNS, LCD_ROWS);
```

Baris ini digunakan untuk mengatur I2C untuk LCD yang diatur ke ‘0x27’. LCD diinisialisasi untuk memiliki 16 kolom dan 2 baris.

```
#define MQ135_PIN 34
MQ135 mq135(MQ135_PIN);
```

Baris ini membaca sensor gas MQ-135 dan menghubungkan sensor ke pin 34 pada ESP32. ‘MQ135’ dibuat untuk membaca data/nilai dari sensor gas MQ-135.

```
void setup() {
 // Initialize Serial for debugging
 Serial.begin(115200);

 // Initialize LCD
 Wire.begin();
 lcd.init();
 lcd.backlight();
 lcd.setCursor(0, 0);
 lcd.print("Initializing...");

 // Initialize Blynk
 Blynk.begin(auth, ssid, pass);
}
```

fungsi ‘setup()’ dijalankan sekali saat ESP32 dinyalakan dan serial diinisialisasi untuk debugging.

Komunikasi I2C diaktifkan untuk LCD, yang kemudian diinisialisasi dan menampilkan pesan *startup*.

ESP32 terhubung ke Wi-Fi dan Blynk menggunakan kredensial yang disediakan.

```
void loop() {
 // Read PPM from MQ135
 float ppm = mq135.getPPM();

 // Display on LCD
 lcd.clear();
 lcd.setCursor(0, 0);
 lcd.print("Air Quality:");
 lcd.setCursor(0, 1);
 lcd.print("PPM: ");
 lcd.print(ppm);

 // Send to Blynk
 Blynk.virtualWrite(V1, ppm);

 // Run Blynk
 Blynk.run();

 // Delay before next reading
 delay(2000);
}
```

Fungsi ‘loop()’ dijalankan terus-menerus untuk menampilkan kualitas udara (dalam satuan PPM) yang dibaca dari sensor gas MQ-135 dan ditampilkan pada layar LCD.

Data yang dikirim ke Blynk menggunakan ‘Blynk.virtualWrite(V1, ppm);’.(Virtual pin ‘V1’ digunakan di sini dapat diubah sesuai dengan pengaturan dari dashboard Blynk).

‘Blynk.run();’ menjaga koneksi Blynk untuk tetap aktif agar data yang dikirim dengan konsisten dengan delay 2 detik ditambahkan sebelum pembacaan berikutnya.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Sistem ini menunjukkan kinerja yang konsisten dalam mendeteksi perubahan konsentrasi CO2 di berbagai waktu, dengan data yang dapat diakses secara real-time melalui platform Blynk.
2. Peningkatan konsentrasi CO2 yang terdeteksi pada siang hingga malam hari menunjukkan bahwa aktivitas manusia seperti penggunaan kendaraan bermotor dan perangkat elektronik berkontribusi terhadap emisi karbon yang lebih tinggi.
3. Data yang diperoleh dari sistem ini juga menunjukkan bahwa konsentrasi CO2 masih dalam batas aman, namun perlu adanya langkah-langkah untuk mempertahankan kualitas udara yang baik, seperti peningkatan ventilasi dan pengurangan sumber emisi.
4. Sistem ini memiliki potensi besar untuk diimplementasikan secara luas di berbagai lingkungan perumahan dan industri, serta dapat menjadi alat yang efektif dalam mendukung kebijakan pengurangan emisi karbon.
5. Dengan dukungan teknologi IoT, pemantauan kualitas udara dapat dilakukan dengan lebih efisien dan akurat, memberikan informasi yang penting untuk meningkatkan kualitas lingkungan hidup.
6. Akurasi sistem menunjukan rata-rata error harian antara 4,04% hingga 23,48%, dengan akurasi terbaik pada hari selasa dan kamis.
7. Presisi sistem cukup baik dengan pola pengukuran yang konsisten, dimana konsentrasi CO2 meningkat pada siang hari dan menurun di pagi hari.

5.2 Saran

1. Pertimbangkan untuk mengintegrasikan sistem dengan teknologi tambahan seperti sensor suhu dan kelembaban untuk memberikan data yang lebih komprehensif mengenai kualitas udara.
2. Sistem ini dapat diimplementasikan di area publik seperti sekolah, kantor, dan pusat perbelanjaan untuk memantau kualitas udara secara

terus-menerus, yang dapat membantu dalam menjaga kesehatan masyarakat.

3. Dengan meningkatkan jangkauan jaringan IoT, sistem ini dapat diterapkan di area yang lebih luas, termasuk kawasan industri dan perkotaan, untuk mendapatkan gambaran yang lebih holistik mengenai emisi karbon.

DAFTAR PUSTAKA

Adam, F., Eko, P. H., Dery, K. H., Mada, S. WS. (2016). Perancangan Alat Pendeteksi Kadar Polusi Udara Menggunakan Sensor MQ-7 dengan Teknologi *Wireless* HC-05. *Jurnal Istek Teknologi.* 10(2), 33-47.

Adli, F. F., dan Arifin, A. S. (2019). Sistem Monitoring Gas CO Pada Parkiran Basement Mall Di Jakarta Menggunakan Metode Real-Time Berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal Ilmiah Teknologi Dan Rekayasa*, 2(4), 171–180.

Amaliyah, I., dan Solikhah, B. (2019). Pengaruh Kinerja Lingkungan dan Karakteristik *Corporate Governance* Terhadap Pengungkapan Emisi Karbon. *Journal Technology*, 2(2), 129– 141.

Anwar, N., Saputra, R. R., Ichwani, A. (2022). *Internet Of Things Monitoring* Sistem Deteksi Gas Carbon Monoksida (CO) Pada Kabin Mobil. Jurnal Teknik Informatika. 11(1), 45-54.

Arida, A.R., Bryan, A. S., dan, Kevin, S. L (2020)."Sistem Pendeteksi Pencemar Udara Portabel Menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-135, 12(1), 23–28.

D. Setiadi and M. N. A. Muhaemin, (2018). Penerapan Internet of Things (Iot) pada Sistem Monitoring Irigasi (Smart Irigasi). *Jurnal Infotronik*, 3(2), 95-102,

Damanik, Samuel R. (2019). Sistem Monitoring Kualitas Udara pada Rumah Sakit Menggunakan Sensor DHT11, MQ135 dan Arduino Uno Berbasis Android. *Jurnal Teknologi*. 1(1), 80-101.

Efendi dan Yoyon. *Internet of Things* (IoT) Sistem Pengendalian Lampu Menggunakan Raspberry Pi Berbasis Mobile. *Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer*, 4 (1), 78-86.

Elly I. (2021). Rancang Bangun Alat Pengukur Konsentrasi Gas Karbon Monoksida(CO) Menggunakan Sensor Gas MQ-135 Berbasis Mikrokontroller Dengan Komunikasi Serial USART. *Jurnal Teknik Elektro*. 3(1). 12-20

Hermawan, A., Aisyah, I. S., Gunardi, A., dan Putri, W. Y. (2018). Going green: Determinants of carbon emission disclosure in manufacturing companies in Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(1), 55– 61.

Jannah, R. (2014). Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi *Carbon Emission Disclosure* pada perusahaan di Indonesia. *Journal of Accounting*.

Kurniawati, Irma Dita, Ulfa Nurullita, dan Mifbakhuddin. (2017). Indikator Pencemaran Udara Berdasarkan Jumlah Kendaraan dan Kondisi Iklim

(Studi di Wilayah Terminal Mangkang dan Terminal Penggaron. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 12(2), 19–24.

Muhammad F. A. 2021. Pemanfaatan Sensor MQ-135 Sebagai Monitoring Kualitas Udara Pada Aula Gedung Fasilkom. *Journal Technology, 3(1),* 34-50.

Natsir, M., Rendra, D. B., Angga, A. D. Y. (2019). Implementasi IOT untuk Sistem Kendali AC Otomatis pada Ruang Kelas di Universitas Serang Raya. Jurnal Prosisko. 6(1), 69-72.

Nizam, M., Yuana, H., Wulansari, Z. (2022). Mikrokontroler ESP32 Sebagai Alat Monitoring Pintu Berbasis Web. *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*. 6(2), 767-772.

Pradifan, A., Widayat, dan Suprihanto, A. (2021). Pemantauan Kualitas Udara Kota Tegal. *Jurnal Ilmu Lingkungan.* 19(1). 73-82

Salamah, U., Hidayah, Q., Kusuma. (2021). CO2 Detection System in Mixed Gas Using MQ-135 Sensor. *Journal of Physics*. 5(1), 72-77.

Syihabuddin, M., dan Ruhaeni, N. (2022). Emisi Gas Rumah Kaca Berdasarkan *the Kyoto Protocol of* 1997 dan Implementasinya di Indonesia, 4(1), 70–77.

Williams, J. A., et al. (2018). "Residential CO2 Monitoring and Its Implications for Energy Efficiency and Indoor Air Quality." *Building and Environment*, 134, 36-45.

Cheng, H., et al. (2020). "Temporal Variability in Indoor CO2 Concentrations and the Impact of Human Activities." *Indoor Air*, 30(3), 489-500.

World Health Organization. (2000). "Air Quality Guidelines for Europe, 2nd Edition." *WHO Regional Publications, European Series, No. 91*.

Satish, U., et al. (2012). "Is CO2 an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO2 Concentrations on Human Decision-Making Performance." *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1671-1677.

Seppänen, O., et al. (1999). "Association of Ventilation Rates and CO2 Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings." *Indoor Air*, 9(4), 226-252.

Fisk, W. J. (2000). "Health and Productivity Gains from Better Indoor Environments and Their Relationship with Building Energy Efficiency." *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), 537-566.