

**MONITORING KUALITAS UDARA DALAM RUANGAN DENGAN
SENSOR CO₂ BERBASIS *NON-DISPERSIVE INFRARED* (NDIR)**

(Skripsi)

Oleh

BAMBANG HERYANTO

1915061037



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

**MONITORING KUALITAS UDARA DALAM RUANGAN DENGAN
SENSOR CO₂ BERBASIS *NON-DISPERSIVE INFRARED* (NDIR)**

**Oleh
BAMBANG HERYANTO**

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

ABSTRAK

MONITORING KUALITAS UDARA DALAM RUANGAN DENGAN SENSOR CO₂ BERBASIS *NON-DISPERSIVE INFRARED* (NDIR)

Oleh

BAMBANG HERYANTO

Kualitas udara dalam ruangan menjadi isu penting yang sering diabaikan, padahal berdampak besar terhadap kesehatan fisik maupun mental. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan alat monitoring kualitas udara dalam ruangan menggunakan sensor CO₂ berbasis *Non-Dispersive Infrared* (NDIR), yaitu SCD41, serta sensor suhu dan kelembaban DHT11. Sistem ini dibangun menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 yang terhubung dengan aplikasi Blynk untuk pemantauan jarak jauh secara *real-time*, serta LCD 16x2 I²C sebagai tampilan lokal. Proses penelitian meliputi desain sistem, perakitan perangkat keras, pemrograman mikrokontroler, kalibrasi dengan alat standar industri (AirVisual Pro), dan pengujian fungsional. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi parameter suhu, kelembaban, dan kadar CO₂ secara akurat dan konsisten, serta menampilkan data tersebut baik secara lokal maupun melalui aplikasi mobile. Dengan alat ini, civitas akademika Universitas Lampung dapat lebih mudah memantau dan meningkatkan kualitas udara dalam ruangan demi mendukung kesehatan lingkungan kampus.

Kata kunci: kualitas udara, sensor SCD41, NDIR, NodeMCU ESP8266, Blynk, DHT11, monitoring udara dalam ruangan.

ABSTRACT

Indoor Air Quality Monitoring Using Non-Dispersive Infrared (NDIR)-Based CO₂ Sensor

By

BAMBANG HERYANTO

Indoor air quality is a crucial issue that is often overlooked, despite its significant impact on both physical and mental health. This study aims to design and develop an indoor air quality monitoring device using a Non-Dispersive Infrared (NDIR)-based CO₂ sensor (SCD41) along with a DHT11 sensor for temperature and humidity measurements. The system is built using a NodeMCU ESP8266 microcontroller, which connects to the Blynk application for real-time remote monitoring, and a 16x2 I²C LCD for local display. The research process includes system design, hardware assembly, microcontroller programming, calibration using an industry-standard device (AirVisual Pro), and functional testing. The results show that the system can accurately and consistently measure temperature, humidity, and CO₂ levels, and display the data both locally and through a mobile application. This tool enables the academic community at the University of Lampung to easily monitor and improve indoor air quality, supporting a healthier campus environment.

Keywords: air quality, SCD41 sensor, NDIR, NodeMCU ESP8266, Blynk, DHT11, indoor air monitoring.

Judul Skripsi : MONITORING KUALITAS UDARA DALAM
RUANGAN DENGAN SENSOR CO₂
BERBASIS *NON-DISPERSIVE INFRARED*
(NDIR)

Nama Mahasiswa : Bambang Heryanto
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915061037
Program Studi : S1 Teknik Informatika
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik

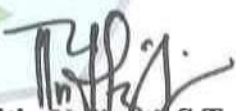
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


Ir. M. Komarudin, S.T., M.T.
NIP. 196812071997031006


Ir. Titin Yulianti, S.T., M.Eng.
NIP. 198807092019032015

2. Mengetahui

Ketua Jurusan
Teknik Elektro


Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 197103141999032001

Ketua Program Studi
Teknik Informatika


Yessi Mulyani, S.T., M.T.
NIP. 197312262000122001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Ir. M. Komarudin, S.T., M.T.**



Sekretaris : **Ir. Titin Yulianti, S.T., M.Eng.**



Penguji : **Ir. Gigih Forda Nama, S.T. M.T.I.P.M.**



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)

NIP. 197509282001121002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 8 Agustus 2025

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini, menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi saya yang berjudul “Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Dengan Sensor CO₂ Berbasis *Non-Dispersive Infrared* (NDIR)” merupakan hasil karya saya sendiri. Semua hasil yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa skripsi saya ini merupakan salinan atau dibuat oleh orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan hukum atau akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 25 Agustus 2025

Pembuat Pernyataan



Bambang Heryanto

1915061037

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Karangrejo pada tanggal 3 juni 2001, sebagai anak pertama dari pasangan Bapak Herman HS dan Ibu Ernawati. Penulis memulai pendidikan di SDN 1 Karangrejo pada tahun 2007, kemudian melanjutkan ke SMP Datarajan dan lulus pada tahun 2016, dan pendidikan menengah atas di SMK N 1 Gadingrejo yang diselesaikan pada tahun 2019. Selain jenjang pendidikan formal, penulis juga menempuh pendidikan non formal di Pondok Pesantren Sirajul Kutub dari tahun 2005-2016. Berangkat dari niat merubah nasib keluarga dan dengan bermodalkan doa kedua orangtua dan guru di pondok pesantren untuk mempertahankan faham ASWAJA, Penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Universitas Lampung, Program Studi S1 Teknik Informatika, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, melalui jalur Program Mahasiswa Perluasan Akses Pendidikan(PMPAP). Selama menjalani masa perkuliahan, penulis aktif berpartisipasi dalam berbagai kegiatan, antara lain:

1. Berperan aktif mendirikan FORMA PMPAP tahun 2020 dibawah bimbingan WR3 Prof.Yulianto,dan Kepala BP2M Unila Bpk.Hartono, menjadi Ketua umum ke 2 di FORMA PMPAP tahun 2020.
2. Menjadi Asisten Laboratorium Teknik Digital dalam praktikum Embedded System.
3. Berperan aktif dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO).
4. Penerima hibah dana PMW dan juga Startup dari Unila dan Kementrian.
5. Berperan aktif menjadi pemateri kaderisasi, pemateri ASWAJA, NU, Analisis, Strategi Pertahanan Kader di internal kampus maupun eksternal kampus, di Tingkat Regional Sumatera Malaysia, Nasional hingga International.
6. Menerima beberapa penghargaan dari Cisco, PCNU, PC PMII Bandar Lampung, Walikota Bandar Lampung, Menteri BUMN RI , MENKOMINFO RI, MENHAN RI,KEMENAG, IPSI, FORKI, BAWASLU, KPU, dan beberapa penghargaan lain dari Pemprov maupun Pemkab.

MOTTO

“Innamal a”malu binniyat”

“Ma tawaqqafa mathlabun anta tholibu birabbika wala tayassara mathlabun anta tholibu binafsika “

“Ibn.Athoilah~hiasilah dirimu dengan kemaksiatan dan janganlah kau hiasi dirimu dengan ketaatan, akan kubakar surga dan kupadamkan neraka agar keduanya tidak menjadi alasan manusia untuk menyembah allah”

“Jika Allah yang menjadi Tujuan, mengapa harus dikalahkan oleh rintangan yang kecil dihadapan allah”

“Allah akan menguji hambanya dengan mendatangkan seseorang seolah hakekatnya cinta, namun hanya akan membuat kau bermaksiat kepadanya”

“Telah kusaksikan orang orang berwudhu dengan darah mereka sendiri sedangkan air wudhuku hanya sebatas tinta”

“Kullu muskirin khamrun, wa kullu muskirin haramun”

“Seberat apapun dan sebesar apapun kegiatan jika orangtuamu memanggil atau memerintahkanmu maka tinggalkan semua itu, karena yang memanggil sejatinya adalah surga dan kesuksesanmu dimasa depan”

“Ridhollahi fi ridho walidain, wa sukhtullahi fi sukhti walidain”

“cukup satu kata lakukan”

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillahiwakafabillahisyahida, wa asyhadu alla ilahailallahuwahdahula syarikalah, waasyhaduanna muhammadan abduhu warosuluhu la nabiyya ba'dah.

Penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini.

Kupersembahkan karya ini kepada:

Kedua Orang Tua “Yang telah memberikan segalanya dan mensupport saya, baik secara mental, finansial maupun lainnya. Terkhusus buat ayah dan mamak, tiada kata yang bisa mewakili apa yang sudah kalian berikan, doakan anakmu ini sukses dan bisa membahagiakan kalian.”

“Seluruh dosen dan civitas akademik Prodi Teknik Informatika, Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, yang telah memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis. Seluruh rekan-rekan seperjuangan, senior, dosen senior baik di internal kampus maupun eksternal kampus, ”

“Alm.Mbah Yot Wo Samirah, Alm. Mbah Kakung Yono, Alm. Mbah Tifanudin, Alm.Mbah Yot Kaulan Alm.Tamong Hamdan – Tuyuk Umar”

SANWACANA

Alhamdulillah „*alamin*, puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena atas rahmat dan ridha-Nya, penulis akhirnya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul: " Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Dengan Sensor CO₂ Berbasis *Non-Dispersive Infrared* (NDIR Berawal dari ketidaktahuan dalam proses tersebut, penulis menghadapi berbagai tantangan dan hari-hari yang tidak mudah, namun dorongan dari orang tua, dosen pembimbing dan sahabat-sahabat menjadi kekuatan tersendiri dalam menjalankan proses penulisan skripsi. Berbekal niat untuk mengangkat derajat kedua orangtua dan hadist “*Man salaka ṭarīqan yaltamisu fīhi „ilman, saḥḥalallāhu lahu bihi ṭarīqan ilāl-jannah*” membuat keyakinan untuk menyelesaikan skripsi ini menjadi kuat dan membara walaupun dengan banyak drama didalam perjalanan-nya. Sehingga terselesaikannya skripsi ini menjadi pencapaian yang sangat berarti. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Dekan Fakultas Teknik Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
2. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
3. Ibu Yessi Mulyani, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Tr^o Informatika terimakasih atas bimbingan, bantuan, arahan, dan kesabaran selama proses penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Ir. M. Komarudin S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 1, Terimakasih banyak pak bapak sudah sabar menghadapi penulis yang suka menghilang ini. Terimakasih bapak sudah selalu mengingatkan saya, sudah membantu penulis dalam hal apapun itu.
5. Ibu Ir. Titin Yulianti, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing 2, terimakasih atas waktu, ilmu dan pemikiran yang ibu berikan kepada penulis. Mohon maaf sekali karena penulis banyak menyusahkan ibu, semoga Allah mengangkat

derajat ibu dan dilancarkan segala hajat oleh Allah. Terimakasih karna sudah menjadi orang baik. Semoga ibu sehat dan bahagia selalu.

6. Bapak Ir.Gigih Forda Nama, S.T. M.T.I.I.P.M. terimakasih pak, atas kebaikan, ketegasan dan ilmu dari bapak.
7. Kedua orang tua, ayah dan mamak tersayang Herman HS dan Ernawati. Terimakasih atas segalanya. Dan seluruh keluarga besar saya terimakasih.
8. Al-Ustadz Cecep Djunaidi M.Pd.I selaku Pengasuh Pondok Pesantren Sirajul Kutub yang selalu mendoakan dan memberi nasehat untuk saya melangkah sampai di titik ini.
9. Bapak .M. Iwan Satriawan, S.H., M.H. , Bapak Suroto, S.Pd., M.Pd. Bapak Hartono, S.Sos., M.A. Bapak Deny Budiyanto, S.Kom., M.T, Bapak Rio Ariesta Pradipta, S.Kom., M.T.I., Miss Nailly, Miss Novita Nurdiana , Prof.Dr. Farida Ariyani, M., Prof.Dr. Karomani, M.Si , Mas Oktavian Alma, Dr. Muallimin, M.PdI Abang Fitriadi, S.Pd., M.Pd Ayah, mamah , bapak , ibu,ibun, angkat saya. Rekan rekan ponpes. Prof. Dr. Drs. H. Musthofa Wagianto, S.H., M.H. Seluruh AslabTeknik Digital dan Teknik Komputer dan admin TI.
10. Nandito Al Ghifari , Dhea Rahmadewi, Bagus Aditia, Dedek Handoko, Rendi Arya, Naufal Irfanda, dan seluruh temen temen terbaik saya yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu. Seluruh rekan KMNU, PMII MWCNU dan PBNU. Para Muassis Nahdlatul. Seluruh teman-teman PSTI 2019, , semoga sukses semua.

Semoga karya ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif bagi pembaca, dan kedepan dapat membantu dalam berkhidmat.

Bandar Lampung, 11 Oktober 2025

Penulis



Bambang Heryanto

DAFTAR ISI

	halaman
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Udara	7
2.2 Kualitas Udara.....	8
2.2.1 Air Quality Index (AQI).....	8
2.2.2 Suhu.....	11
2.2.3 Karbon Dioksida (CO ₂).....	11
2.3 Node MCU	14
2.4 Sensor Non-Dispersive CO ₂	16
2.5 Sensor Suhu dan Kelembaban	17
2.6 Liquid Crystall Display (LCD).....	18
2.8 Kalibrasi	20
2.9 Blynk IoT	21
2.10 Penelitian Terdahulu.....	22
III. METODE PENELITIAN	26

	xiv
3.1 Waktu dan Tempat	26
3.2 Alat dan Bahan	27
3.3 Tahapan Penelitian	28
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1 Hasil Desain	32
4.2 Hasil Pembuatan <i>Prototype</i>	35
4.3 Pengambilan Data Awal	42
4.4 Kalibrasi Data	51
4.5 Pengambilan Data Setelah Kalibrasi	54
4.6 Analisis Hasil	56
4.7 Development	60
V. KESIMPULAN DAN SARAN	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	67

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Udara bersih adalah Hak Asasi bagi Manusia. Namun, polusi udara selalu menjadi ancaman besar untuk masyarakat dunia. Polusi udara merupakan ancaman kesehatan dan lingkungan terbesar yang menjadi penyebab penyakit tidak menular (PTM) seperti serangan jantung atau stroke. Menurut *World Health Organization* (WHO), terdapat 7 juta kematian dini setiap tahun akibat dari gabungan polusi udara baik udara luar maupun rumah tangga sehingga jutaan manusia jatuh sakit karena menghirup udara yang tercemar [1].

WHO secara rutin mengintegrasikan bukti ilmiah mengenai dampak polusi udara terhadap kesehatan serta memantau kemajuan kualitas udara di berbagai negara. Rekomendasi yang termasuk dalam pedoman kualitas udara WHO didasarkan pada tinjauan literatur yang sistematis dan metode evaluasi yang ketat serta konsultasi ekstensif dengan para ahli dan pengguna akhir pedoman tersebut dari seluruh wilayah dunia.

Kualitas udara di Indonesia sudah lama menjadi perhatian, terlebih saat Covid-19 dimana segala pekerjaan harus dilakukan dari rumah. Tidak bisa dipungkiri bahwa saat Covid-19 kualitas udara di kota besar Indonesia semakin membaik. Namun, setelah kegiatan kembali normal kualitas udara kembali memburuk. Akibat dari adanya polusi dari kegiatan industri dan kendaraan transportasi membuat langit mengusam kembali. Di provinsi Lampung khususnya akibat adanya polusi tersebut membuat kasus Infeksi Saluran Pernafasan Akut (ISPA) melonjak. Hingga tercatat 1824 warga Lampung yang terkena ISPA pada Juli 2023 [2].

Sebagai salah satu tempat pembentukan karakter dan kualitas sumber daya manusia, Universitas Lampung memiliki peran yang strategis. Upaya peningkatan kualitas udara di lingkungan kampus juga sangat diperlukan, khususnya kampus sebagai salah satu tempat yang sering digunakan mahasiswa dan dosen untuk belajar harus memiliki kualitas yang baik sehingga menghasilkan dampak positif terhadap kesehatan dan mengurangi resiko penyakit pernafasan pada mahasiswa yang beraktifitas di lingkungan kampus.

Upaya menjaga kualitas udara di kampus merupakan tanggung jawab dari semua civitas akademika di lingkungan Universitas Lampung. Dengan demikian diperlukan suatu langkah pengawasan terkait kualitas udara di lingkungan Universitas Lampung baik di Fakultas ataupun Jurusan terkhusus dalam ruangan, karena kualitas udara dalam ruangan biasanya kurang mendapat perhatian. Selain tempat yang biasanya tertutup dan juga tanpa ventilasi, ruangan juga terdapat banyak orang yang keluar masuk ruangan dengan membawa debu partikel dari luar yang banyak mengandung polutan dari berbagai macam struktur.

Efek buruk udara yang tercemar sangat banyak dan berbahaya. Dalam penelitian yang dipimpin oleh Profesor Kam Bhui di departemen Psikiatri Universitas Oxford untuk mengamati dampak dari polusi udara dalam maupun luar ruangan, mereka menemukan bahwa paparan polusi udara dapat menyebabkan depresi, kecemasan, psikosis “gangguan mental yang menyebabkan seseorang kehilangan kontak dengan kenyataan / halusinasi”, bahkan gangguan neurokognitif seperti demensia “penurunan daya ingat” dan kemampuan otak lain [3].

Profesor Kham menambahkan “ secara khusus, partikel udara yang mencemari termasuk didalamnya ada Bioaerosol (partikel udara dari makhluk hidup baik yang masih hidup ataupun yang sudah mati, seperti bakteri, jamur, virus dan serbuk sari) dan mengubah paparan kualitas udara yang buruk di dalam dan luar ruangan dapat mengurangi tingkat kesehatan yang buruk secara umum”.

Lingkungan udara didalam ruangan dapat mengandung berbagai macam polutan (zat yang mencemari lingkungan dan berdampak negatif bagi manusia) yang beragam, misalnya partikel nitrogen dioksida NO_2 (polutan utama) dari proses pembakaran sepeda motor, pembangkit listrik, industri dan karbon monoksida CO (gas beracun yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa) seperti pembakaran kayu, dan arang, yang berasal dari dalam maupun luar ruangan. Namun, lingkungan dalam ruangan juga dapat menjadi sumber paparan kimia spesifik yang lebih signifikan (misalnya senyawa organik yang menguap dan non organik yang gampang menguap) [4].

Sebuah studi di Amerika Serikat dan Denmark juga menilai polusi udara berdasarkan indeks kualitas udara dari 87 polutan udara potensial di Amerika Serikat dan Denmark. Partikular Matter (PM) campuran partikel padat dan cair di udara dan *Partikular Matter*^{2,5} (diameter kurang dari 2.5 mikrometer), Emisi *Diesel*, nitrogen dioksida, dan zat Organik. Secara signifikan dikaitkan dengan resiko gangguan kejiwaan [5].

Menyikapi beberapa dampak dari kualitas udara dalam ruangan yang luar biasa mengerikan, maka upaya menjaga kualitas udara harus dilaksanakan sebaik mungkin dan sesegera mungkin. Karenanya diperlukan cara yang baik untuk mengukur paparan polusi dan perubahan iklim yang ekstrem akhir-akhir ini di Lampung. Karena udara yang buruk dapat menyebabkan penyakit serius baik secara fisik maupun mental, terutama ditempat seperti perkotaan yang perlu ditangani.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini akan merancang sensor udara sebagai langkah dalam mengawasi kualitas udara di lingkungan kampus Universitas Lampung. Alat yang dibuat akan mampu menampilkan data CO_2 (Karbon Dioksida) dan kualitas udara dalam ruangan. Penelitian ini hanya terfokus pada pembuatan alat. Dengan adanya alat ini maka upaya pengawasan kualitas udara jadi lebih mudah sehingga upaya penstabilan dan perbaikan kualitas

udara di lingkungan Universitas Lampung dengan tujuan menjaga kesehatan para warga kampus akan tercapai.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana cara membuat alat monitoring kualitas udara untuk mengetahui kualitas udara menggunakan sensor SCD41 NDIR SENSOR ?
2. Apa hambatan dalam pembuatan atau penggunaan alat monitoring kualitas udara menggunakan sensor SCD41 NDIR SENSOR ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Membuat alat monitoring kualitas udara dengan menggunakan NodeMCU berbasis ESP8266, Sensor suhu dan kelembaban, sensor CO₂, dan Blynk.
2. Menguji alat yang dibuat dan melakukan proses kalibrasi.
3. Melakukan analisis hasil pengukuran.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi Universitas Lampung terkait dengan pengambilan kebijakan terkait kualitas udara di lingkungan Universitas Lampung.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan alat yang dibuat dengan satu alat kalibrator standar industri yaitu Air Visual Pro.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan skripsi / tugas akhir terdiri dari 5 bab sebagai berikut :

1) PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian dari pembuatan alat monitoring kualitas udara dalam ruangan dengan menggunakan sensor SCD41 NDIR SENSOR. Selain itu bab ini juga membahas manfaat dan batasan masalah dari pembuatan alat monitoring kualitas udara dengan menggunakan sensor SCD41 NDIR SENSOR di Laboratorium Teknik Digital Fakultas Teknik Universitas Lampung.

2) TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan membahas teori yang menjadi dasar dalam pembuatan alat monitoring kualitas udara menggunakan sensor SCD41 NDIR SENSOR. Seperti Udara, Kualitas Udara, ESP8266, SCD41 NDIR SENSOR, sensor Lingkungan BME280, LCD16X2 I²C, Solder, Ikatan Kimia, CO₂, Sumber CO₂, Dampak CO₂, Kalibrasi, Metode Pengembangan dan Penelitian Terdahulu yang mendukung pembuatan alat monitoring kualitas udara dengan sensor SCD41 NDIR SENSOR di Laboratorium Teknik Digital Fakultas Teknik Universitas Lampung.

3) METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi waktu dan tempat penelitian, Diagram Alir, alat dan bahan untuk pembuatan alat monitoring kualitas udara dengan sensor SCD41 NDIR SENSOR dan juga tahapan penelitian yang meliputi perencanaan, instalasi , uji coba alat, pengumpulan data, presentasi dan penyebaran hasil.

4) HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi pembahasan dari pelaksanaan tahapan pembuatan alat Monitoring Kualitas Udara Dengan Menggunakan Sensor SCD41 NDIR SENSOR di Laboratorium Teknik Digital Fakultas Teknik Universitas Lampung, instalasi , uji coba alat, dan pengumpulan data.

5) KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi kesimpulan dan saran dari pembuatan alat Monitoring Kualitas Udara dengan Menggunakan Sensor SCD41 NDIR SENSOR di Laboratorium Teknik Digital Universitas Lampung.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Udara

Udara merupakan campuran antara oksigen, karbon dioksida, argon, nitrogen dan uap air yang terdapat pada lapisan yang menyelimuti bumi. Meskipun begitu campuran tersebut tidak selalu konstan ketika masuk kedalam tubuh manusia [6]. Bagi manusia dan makhluk hidup udara merupakan salah satu komponen penting karena berguna untuk kelangsungan hidup. Udara dapat dikatakan bersih apabila tidak terdapat energi, zat atau komponen lain yang tidak seharusnya ada dalam komponen udara. Khususnya manusia tidak dapat bertahan hidup tanpa adanya udara yang sehat.

Salah satu akibat yang diakibatkan adalah gangguan kesehatan karena kualitas udara didalam ruangan yang tidak memenuhi standar kesehatan. Kualitas udara tersebut harus kualitas fisik, kimia, dan biologi [7]. udara dikelompokkan dalam 2 jenis yaitu udara luar ruangan (*outdoor air*) dan udara dalam ruangan (*indoor air*). kualitas udara dalam ruangan merupakan udara yang terdapat ruangan dalam suatu bangunan yang dihuni atau ditempati sekurang-kurangnya 1 jam oleh orang dengan berbagai status kesehatan yang berbeda [8].

Di negara berkembang biasanya sebanyak 400 hingga 500 juta orang seingkali berhadapan dengan masalah polusi udara dalam ruangan. Ruangan yang dimaksud disini adalah sebuah kantor, sekolah, fasilitas transportasi, pusat perbelanjaan, rumah sakit atau rumah hunian.

Alasan mengapa kualitas udara dalam ruangan menjadi salah satu perhatian khusus karena dapat menimbulkan gangguan kesehatan pada manusia. Salah satu cara mempertahankan kualitas udara dalam ruangan adalah dengan memberikan

ventilasi dan juga manajemen polutan. Masalah yang sering muncul dari berbagai penelitian kualitas udara dalam ruangan berdasarkan frekuensi adalah ventilasi tidak kuat, kontaminasi kimia, dan kontaminasi mikrobiologi [9].

2.2 Kualitas Udara

2.2.1 Air Quality Index (AQI)

AQI adalah indeks pengukuran kualitas udara dalam suatu wilayah, berdasarkan faktor polusi udara terutama seperti Partikular Matter 2,5 (PM_{2,5}) , Partikular Matter (PM₁₀), Ozon (O₃), Carbon Monoksida (CO) , Sulfur Dioksida (SO₂) , dan Nitrogen Dioksida (NO₂). Faktor tersebut dinilai dalam bentuk indeks yang digabungkan untuk mendapatkan nilai AQI yang secara keseluruhan akan mencerminkan kualitas udara. Proses penghitungan AQI mengkonfersi nilai polutan ke nilai AQI dengan tujuan memberikan informasi tentang kualitas udara kepada masyarakat ksususnya penderita masalah pernafasan, lansia dan anak anak.

Rumus untuk menghitung AQI yaitu

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

Keterangan:

I_p = indeks untuk polutan p

C_p = konsentrasi polutan p

BP_{Hi} = titik ambang batas konsentrasi yang lebih besar atau sama dengan C_p

BP_{Lo} = titik ambang batas konsentrasi yang lebih kecil atau sama dengan C_p

I_{Hi} = nilai AQI yang berhubungan dengan BP_{Hi}

I_{Lo} = nilai AQI yang sesuai dengan BP_{Lo}

Perhitungan Konversi AQI dilakukan dengan menggunakan tabel konversi dibawah ini [10].

Tabel 1. Konversi Nilai Konsentrasi Parameter AQI [10].

O ₃ (ppm) 8-jam	O ₃ (ppm) 1-jam ¹	PM _{2.5} (µg/m ³) 24-jam	PM ₁₀ (µg/m ³) 24-jam	CO (ppm) 8-jam	SO ₂ (ppb) 1-jam	NO ₂ (ppb) 1-jam	AQI	Kategori
0.000 - 0.054	-	0.0 – 12.0	0 - 54	0.0 - 4.4	0 - 35	0 - 53	0 - 50	Baik
0.055 - 0.070	-	12.1 – 35.4	55 - 154	4.5 - 9.4	36 - 75	54 - 100	51 - 100	Sedang
0.071 - 0.085	0.125 - 0.164	35.5 – 55.4	155 - 254	9.5 - 12.4	76 - 185	101 - 360	101 - 150	Tidak sehat untuk kelompok sensitif
0.086 - 0.105	0.165 - 0.204	(55.5 - 150.4) ³	255 - 354	12.5 - 15.4	(186 - 304) ⁴	361 - 649	151 - 200	Tidak sehat
0.106 - 0.200	0.205 - 0.404	(150.5 - 250.4) ³	355 - 424	15.5 - 30.4	(305 - 604) ⁴	650 - 1249	201 - 300	Sangat tidak sehat
(²)	0.405 - 0.504	(250.5 - 350.4) ³	425 - 504	30.5 - 40.4	(605 - 804) ⁴	1250 - 1649	301 - 400	Berbahaya
(²)	0.505 - 0.604	(350.5 - 500.4) ³	505 - 604	40.5 - 50.4	(805 - 1004) ⁴	1650 - 2049	401 - 500	Berbahaya

Pada tabel 1 menunjukkan nilai akhir AQI yang terbagi dalam beberapa kategori mulai dari baik, sedang, tidak sehat untuk kelompok sensitif, tidak sehat, sangat tidak sehat, berbahaya dan berbahaya.

Rentang nilai AQI, dapat dilihat di bawah ini:

Tabel 2. Nama dan warna untuk 6 kategori AQI [10].

AQI	Deskripsi Level	Warna
0 – 50	Baik	Hijau
51 – 100	Sedang	Kuning
101 – 150	Tidak sehat untuk kelompok sensitif	Oranye
151 – 200	Tidak sehat	Merah
201 – 300	Sangat tidak sehat	Ungu
301 – 500	Berbahaya	Merah marun

Catatan : untuk nilai diatas 500 dianggap “diluar AQI” masuk kedalam rekomendasi Berbahaya.

Kode warna untuk AQI dapat dilihat di bawah ini:

Tabel 3. Kode Warna Kategori AQI Dalam RGB dan CMYK [10].

Warna	R	G	B	C	M	Y	K
Hijau	0	228	0	40	0	100	0
Kuning	255	255	0	0	0	100	0
Oranye	255	126	0	0	52	100	0
Merah	255	0	0	0	100	100	0
Ungu	143	63	151	51	89	0	0
Merah Marun	126	0	35	30	100	100	30

RGB digunakan untuk warna layar, sementara CMYK digunakan untuk warna percetakan.

Kelompok sensitif terhadap polutan dapat dilihat di bawah ini:

Tabel 4. Kelompok Sensitif Terhadap Spesifik Polutan [10].

Ketika Nilai Polutan AQI di Atas 100	Kelompok Sensitif
Ozon	Orang dengan penyakit paru-paru, anak-anak, orang dewasa yang lebih tua, orang yang aktif di luar ruangan (termasuk pekerja di luar ruangan), orang dengan varian genetik tertentu, dan orang-orang dengan diet terbatas pada nutrisi tertentu adalah kelompok yang paling berisiko.
PM2.5	Orang dengan penyakit jantung atau paru-paru, orang dewasa yang lebih tua, anak-anak, dan orang-orang status sosial ekonomi yang lebih rendah adalah kelompok yang paling berisiko.
PM10	Orang dengan penyakit jantung atau paru-paru, orang dewasa yang lebih tua, anak-anak, dan orang-orang status sosial ekonomi yang lebih rendah adalah kelompok yang paling berisiko.
CO	Orang dengan penyakit jantung adalah kelompok yang paling berisiko.
NO2	Penderita asma, anak-anak, dan orang dewasa yang lebih tua adalah kelompok yang paling berisiko.
SO2	Penderita asma, anak-anak, dan orang dewasa yang lebih tua adalah kelompok yang paling berisiko.

2.2.2 Suhu

Suhu udara yang baik dalam ruangan adalah berkisar dari 21°C dan 23°C atau 70°F dan 73°F . Dimana kedua suhu ini terasa hangat namun tidak terasa dingin dan terasa dingin namun tidak panas. Standar Nasional Indonesia (SNI) mengatur suhu ruang kerja berkisar antara 24°C hingga 27°C . Dengan kelembaban relatif 55% (lima puluh lima persen) sampai dengan 65% (enam puluh lima persen) [11]. Untuk mendapatkan standar suhu, kelembaban, dan tekanan udara yang sesuai dengan suatu ruangan, maka harus mengikuti standar yang sudah ditetapkan oleh pemerintah yaitu Standar Nasional Indonesia (SNI)-6389 tahun 2011. Yang telah mengatur tentang konservasi energi pada sistem tata udara bangunan dan gedung sebagai berikut.

Tabel 5. Standar Temperature dan Kelembaban[12].

No	Kriteria	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Kelembaban (%)
1	Ruang Kerja	24-27	60
2	Lobi, Koridor	27-30	60
3	Ruang Perawatan	24-27	60

Pada saat sekarang ini sudah banyak gedung yang menggunakan berbagai cara untuk menjaga suhu ruangan agar nyaman untuk penghuni ataupun tamu. Kenyamanan tersebut disebut dengan *utilitas* (kelengkapan fasilitas bangunan). Diantaranya adalah dengan penyebaran konsumsi listrik dan sistem pengendalian udara (AC)[12].

2.2.3 CO₂ (karbon Dioksida)

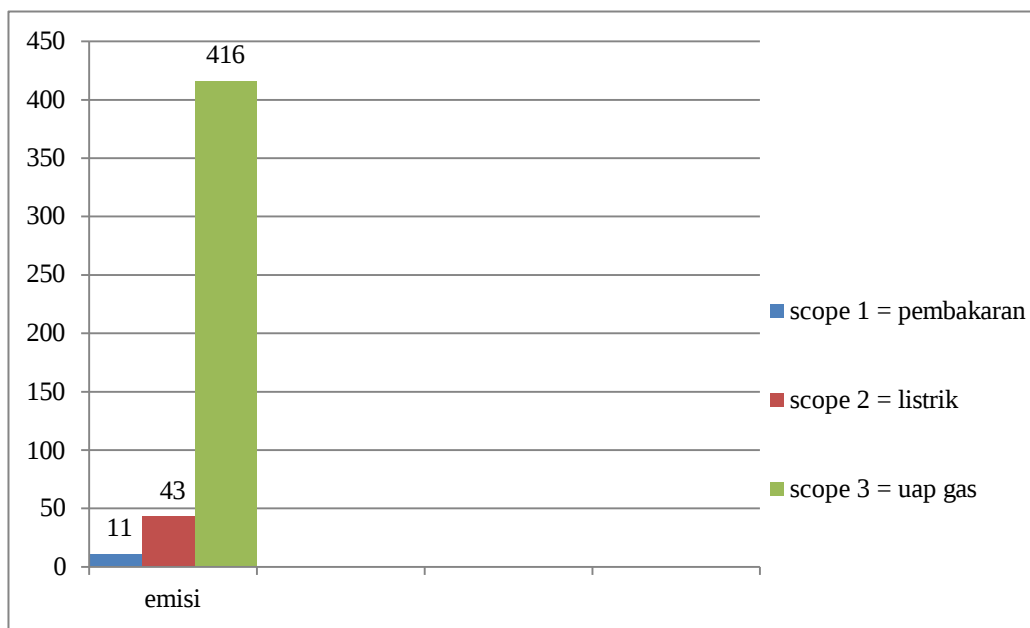
Karbon dioksida (CO₂) merupakan suatu senyawa kimia yang berperan dalam perubahan iklim global. Sifat karbon dioksida pada tanah yang dinamis memiliki indikasi adanya penyerapan karbon yang besar dan pelarutan karbonat di bentangan karst [13].

Akibat adanya pemanasan global berdampak pada negara Indonesia, tercatat pada maret 2016-2022 suhu di Indonesia mengalami kenaikan dan penurunan.

Perubahan suhu di Indonesia terkonsentrasi paling besar pada karbon dioksida yang dihasilkan dari industri dan kendaraan transportasi [14]. Sumber terbesar penyebab tingginya kadar CO₂ pada lingkungan adalah penggunaan bahan bakar fosil yang dihasilkan dari beberapa sektor, diantaranya yaitu sektor transportasi, sektor industri, rumah tangga dan sampah yang menghasilkan emisi CO₂ yang dapat menyebabkan meningkatnya suhu bumi atau pemanasan global.

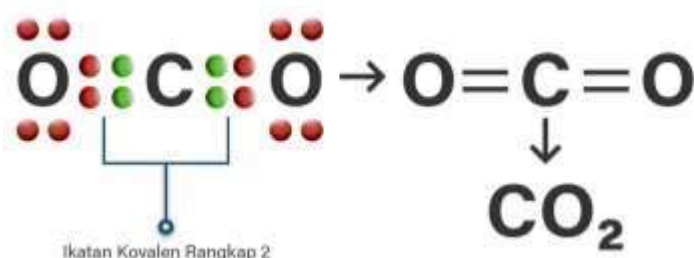
Wilayah perkotaan menjadi salah satu pusat kegiatan yang hasilkan karbon dioksida terbesar, khususnya berasal dari pembakaran pada mesin kendaraan transportasi . peningkatan konsentrasi pada CO₂ akan meningkatkan suhu global melalui efek rumah kaca. Salah satu upaya untuk mengurangi dampak dari CO₂ dan juga efek rumah kaca yaitu dengan memperluas lahan hijau[15].

Gambar berikut menunjukkan emisi CO₂ tahunan untuk lokasi produksi Maasvlakte. Emisi Cakupan 1 mengacu pada emisi yang dilaporkan untuk tahun 2019 Otoritas Emisi Belanda. Emisi Cakupan ke 1 kemungkinan dapat diatribusikan ke sistem pembakaran, konverter katalitik, dan pembakar termal, karena tidak ada ketel uap atau tungku di lokasi. Proporsi pasti pasokan uap dari UCML dan MPP3 dan faktor emisi uap dan listrik tidak diketahui. Karena itu, emisi Cakupan ke 2 diperkirakan berdasarkan efisiensi termal listrik dan uap CHP berbahan bakar gas masing-masing sebesar 36% dan 49%⁷. Karena itu, mengacu pada faktor emisi listrik dan uap masing-masing sebesar 85,4 dan 52,8 kg/GJ [16].



Gambar 1. Perkiraan emisi tahunan [16].

Karbon dioksida merupakan salah satu jenis gas yang tidak memiliki warna dan tidak memiliki bau pada suhu dan tekanan atmosfer. Karbon dioksida relatif tidak mudah terbakar dan tidak beracun. Karbon dioksida juga dapat larut dalam air, lebih berat daripada oksigen sehingga dapat menyebabkan sesak nafas karena perpindahan udara. Karbon dioksida dapat membentuk asam ringan dan asam karbonat. Jika terkena api atau panas dalam kurun waktu yang lama dapat menyebabkan wadah pecah atau meledak dengan hebat. Karbon dioksida digunakan untuk membekukan makanan, mengendalikan reaksi kimia, dan juga sebagai alat pemadam kebakaran [17].



Gambar 2. Struktur CO₂ [18]

Karbon dioksida merupakan senyawa karbon tunggal dengan rumus CO₂ dimana karbonnya terikat pada setiap atom oksigen melalui ikatan rangkap. Dalam

kondisi normal gas karbon dioksida tidak berbau dan tidak berwarna selama respirasi (proses pertukaran udara) oleh semua hewan, jamur, dan mikroorganisme yang secara langsung maupun secara tidak langsung.

Tabel 6. Sifat kimia dan fisika [17].

Nama Properti	Nilai Properti	Referensi
Berat Molekul	44.009 gram/mol	Dihitung oleh PubChem 2.2 (PubChem rilis 2025.04.14)
XLogP3-AA	0.9	Dihitung oleh XLogP3 3.0 (PubChem rilis 2025.04.14)
Jumlah Donor Ikatan Hidrogen	Angka 0	Dihitung oleh Cactvs 3.4.8.18 (PubChem rilis 2025.04.14)
Jumlah Penerima Ikatan Hidrogen	2	Dihitung oleh Cactvs 3.4.8.18 (PubChem rilis 2025.04.14)
Jumlah Obligasi yang Dapat Diputar	Angka 0	Dihitung oleh Cactvs 3.4.8.18 (PubChem rilis 2025.04.14)
Massa Tepat	43.989829239 hari	Dihitung oleh PubChem 2.2 (PubChem rilis 2025.04.14)
Massa Monoisotopik	43.989829239 hari	Dihitung oleh PubChem 2.2 (PubChem rilis 2025.04.14)
Luas Permukaan Kutub Topologi	34.1A ²	Dihitung oleh Cactvs 3.4.8.18 (PubChem rilis 2025.04.14)
Jumlah Atom Berat	3	Dihitung oleh PubChem
Muatan Formal	Angka 0	Dihitung oleh PubChem
Kompleksitas	18.3	Dihitung oleh Cactvs 3.4.8.18 (PubChem rilis 2025.04.14)
Jumlah Atom Isotop	Angka 0	Dihitung oleh PubChem
Hitungan Stereocenter Atom yang Ditentukan	Angka 0	Dihitung oleh PubChem
Jumlah Stereocenter Atom Tak Terdefinisi	Angka 0	
Hitungan Stereocenter Bond yang Ditentukan	Angka 0	Dihitung oleh PubChem
Hitungan Stereocenter Bond Tak Terdefinisi	Angka 0	Dihitung oleh PubChem
Jumlah Unit yang Terikat Secara Kovalen	1	Dihitung oleh PubChem
Senyawa Dikanonikalisasi	Tidak	Dihitung oleh PubChem (rilis 2025.04.14)

2.3 Node MCU

NodeMCU merupakan sebuah board elektronik berbasis chip ESP8266 dengan kemampuan menjalankan fungsi mikrokontroler dan koneksi internet (*WiFi*). Selain itu terdapat pin I/O sehingga dapat dikembangkan menjadi alat monitoring maupun pengontrolan pada proyek IoT. NodeMCU ESP8266 dapat diprogram dengan *compiler*-nya Arduino, menggunakan arduino IDE. Terdapat port USB pada ESP8266 sehingga memudahkan pengguna dalam pemrogramannya.

NodeMCU ESP8266 adalah turunan dari modul IoT (Internet of Things) dengan tipe ESP-12. Secara fungsi modul hampir sama dengan arduino, namun bedanya yaitu terkhusus pada “*Connected To Internet*” [19].

NodeMCU merupakan sebuah *open source platform* untuk IoT menggunakan bahasa pemrograman LUA dalam pembuatan *Prototype* berbasis teknologi IoT[20]. Selain itu NodeMCU memiliki beberapa pin I/O yang memungkinkan pengembangannya sebagai aplikasi kontrol dan monitoring pada proyek IoT.

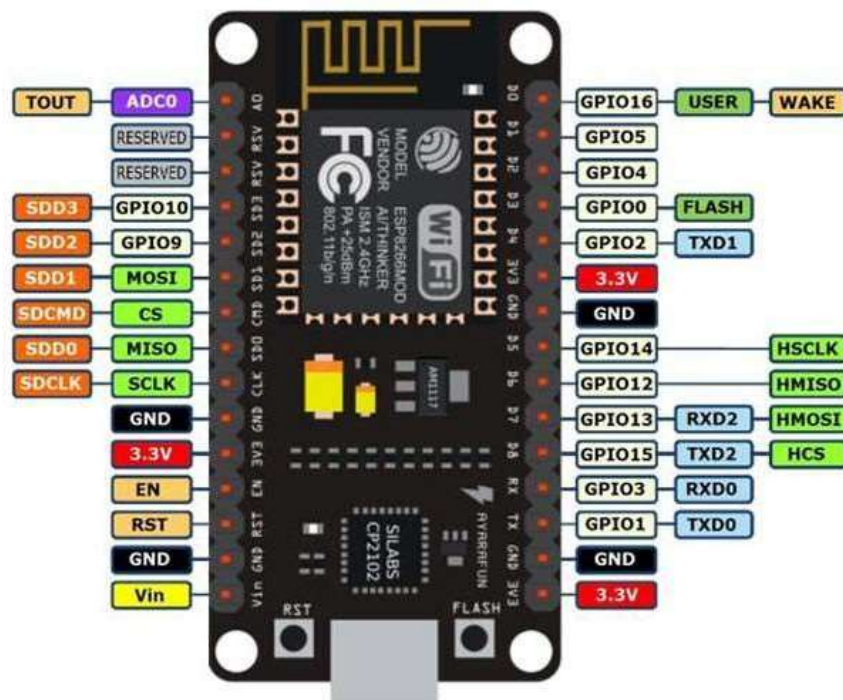
Tabel 7. Spesifikasi ESP8266[21].

Pin	Nama	Deskripsi
Pin Power	Micro-USB	Node-MCU dapat diberi daya melalui port USB
	3.3V	3.3V yang diatur dapat disuplai ke pin ini untuk memberi daya pada papan
	GND	Pin 0 tegangan daya
	Vin	Catu daya eksternal
Pin Kontrol	ID,RST	Pin dan tombol mereset mikrokontroler
Pin Analog	A0	Digunakan untuk mengukur tegangan analog dalam kisaran 0-3.3V
Pin GPIO	GPIO1 ke GPIO16	NodeMCU memiliki 16 pin input-output tujuan umum di papannya
Pin SPI	SD1, CMD, SD0,CLK	NodeMCU memiliki 4 pin yang tersedia untuk komunikasi SPI
Pin UART	TXD0, RXD0, TXD2,RXD2	NodeMCU memiliki dua antarmuka UART, UART0 (RXD0 & TXD0) dan UART1 (RXD1 & TXD1). UART1 digunakan untuk mengunggah firmware/program.
Pin I ² C		NodeMCU memiliki dukungan fungsionalitas I ² C tetapi karena fungsionalitas internal pin

Berikut adalah gambar Node MCU berbasis ESP8266



Gambar 3. NodeMCU ESP8266[21]



Gambar 4. Fitur NodeMCU ESP8266[21].

Untuk data fitur lengkap dapat dilihat pada *datasheet* [21].

2.4 Sensor Non-Dispersive CO₂

Detektor karbon dioksida kebanyakan menggunakan sensor inframerah non-dispersif (NDIR) dengan mengukur cahaya inframerah dalam sampel udara. Cara kerjanya adalah dengan perbandingan terbalik antara molekul karbon dioksida dan jumlah cahaya yang melewati sampel udara.

Saat cahaya *Infra Red* melewati tabung sampel udara, molekul gas CO₂ menyerap satu pita cahaya IR sambil membiarkan panjang gelombang cahaya lainnya melewatinya. Cahaya yang menyentuh ujung tabung akan mengenai filter dari optik yang menyerap setiap panjang gelombang cahaya kecuali panjang gelombang yang diserap oleh CO₂. Molekul CO₂ yang tersisa akan dihitung oleh detektor cahaya inframerah yang mengirimkan tegangan analog ke sirkuit sensor, dengan demikian dapat dikatakan karbon dioksida menghitung jumlah molekul CO₂ di udara [22].

berikut adalah gambar dari detektor gas CO₂



Gambar 5. Detektor Gas CO₂ sensor SCD41[23]

Berikut adalah Spesifikasi SCD41 :

Tabel 8. Spesifikasi SCD41[23]

NO	Spesifikasi SCD41	
1	Tegangan	4,5~5,5V
2	Output	Gravity : analog (analog output 0,4~2V)
3	Prinsip Pengukuran	NDIR (Non Dispersive Infrared)
4	Rentang Pengukuran	400~5000 ppm
5	Ketepatan	±(100ppm + 6% readings)
6	Waktu respon	<90s
7	Kekuatan Rata-rata	<430mW@5V
8	Suhu Operasional	0°C ~ 50 °C
9	Operasi Kelembaban	0~95% RH (No condensation)
10	Jangka hidup	>5 tahun
11	Dimensi PCB	37*69mm
12	Fitur	1. akurasi tinggi 2. umur panjang 3. kompensasi suhu otomatis 4. tahan terhadap gangguan uap air 5. keluaran analog

2.5 Sensor Suhu dan Kelembaban

Sensor pengukuran suhu dan kelembaban yang akan digunakan pada penelitian ini adalah DHT11 *Temperature and Humidity* sensor. Sensor DHT11 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban udara yang ada disekitarnya. Sensor ini memiliki stabilitas yang baik dalam pengukuran dan juga tingkat kalibrasi yang sangat akurat. Walaupun memiliki ukuran yang kecil namun sensor ini dapat mentransmisikan sinyal hingga jarak 20m. Sensor ini dapat mendeteksi suhu dan kelembaban dalam satu ruangan.



Gambar 6. Sensor DHT11[24]

Sensor ini membutuhkan suplai daya 5 volt. Rentang pengukuran suhu oleh sensor ini berkisar antara 0 hingga 50°C dengan tingkat ketelitian $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Sedangkan untuk pengukuran kelembaban, rentangnya adalah 20 hingga 90% RH, dengan toleransi kesalahan $\pm 5\%$ RH. Data yang dihasilkan oleh sensor ini berupa sinyal digital. Suhu dan kelembaban adalah dua parameter yang sering diukur dalam sistem akuisisi data, dan banyak sensor yang dirancang untuk mengukur kedua parameter tersebut. Salah satu faktor penting dalam memilih sensor adalah akurasi, yang dapat digunakan sebagai pertimbangan utama dalam pemilihan perangkat yang tepat[25].

Tabel 9. Spesifikasi Pengukuran[24]

No	Spesifikasi		
1	Tegangan Input	3v-5VDC	
2	Range suhu	0°C - 50°C	
3	Range kelembaban	20% - 90% RH	
4	Akurasi	Suhu	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
		Kelembaban	$\pm 5\%$ RH

Spesifikasi lengkap dapat dilihat pada *datasheet* [24] .

2.6 Liquid Crystall Display (LCD)

LCD atau *Liquid Crystall Display* adalah tampilan dari bahan cairan kristal yang pengoperasiannya menggunakan sistem *dot matriks*. LCD 16x2 dapat menampilkan sebanyak 32 karakter yang terdiri dari 2 baris dan tiap baris dapat menampilkan 16 karakter [26]. LCD adalah alat untuk menampilkan data hasil

dari sensor, mampu menampilkan teks berkualitas tinggi dengan kontrol kontras pada board, lampu latar dan antarmuka I²C, koneksi tidak rumit dan meropotkan. Dengan adanya taambahan modul I²C maka koneksi akan lebih disederhanakan, menghemat pin input output.



Gambar 7. LCD I²C[27]

Berikut adalah spesifikasi dari LCD I²C

Tabel 10. Spesifikasi LCD I²C[27]

No	Spesifikasi	
1	Vout	Konversikan DC. Hubungkan kapasitor antara terminal ini dan vin saat penguat internal digunakan
2	CAP1N	Untuk rangkaian penguat tegangan (VDD/VSS) kapasitor eksternal sekitar 0.1u~4.7uf
3	CAP1P	
4	VDD	3/5V
5	VSS	GND
6	SDA	(Pada <i>interface</i> I ² C DB7 (SDA) merupakan data masukan. SDA dan SCL harus terhubung pada bus I ² C (Bus I ² C berfungsi untuk menghubungkan resistor antara SDA/SCL dengan daya pada bus I ² C).
7	SCL	(Pada <i>interface</i> I ² C DB6 (SDA) merupakan data masukan. SDA dan SCL harus terhubung pada bus I ² C (Bus I ² C berfungsi untuk menghubungkan resistor antara SDA/SCL dengan daya pada bus I ² C).
8	RST	RESET

Untuk spesifikasi dari LCD 16x2 I²C dapat dilihat pada *datasheet* [27] .

2.8 Kalibrasi

Kalibrasi merupakan salah satu langkah untuk mengukur dan mendeteksi akurasi suatu alat ukur baru dengan alat ukur standaryang telah dibuat. Kalibrasi dilakukan untuk menguji kelayakan dari sebuah alat yang akan digunakan. Suatu alat dikatakan layak apabila hasil kalinrasi pengukuran sesuai dengan Standar Internasional (SI). Manfaat kalibrasi yaitu untuk menjaga agar alat ukur selalu sesuai standar Nasional maupun Iternasional, sehingga sebuah alat tidak terjadi penyelewengan alat ukur [28].

Kalibrasi juga merupakan kegiatan untuk menentukan kebenaran konvensional (kesepakatan) nilai yang menunjukkan alat ukur dan bahan ukur. Cara melakukan kalibrasi yaitu dengan cara membandingkan alat dan bahan yang akan dikalibrasi terhadap standar ukur yang mampu telusur (*traceable*) ke standar Nasional ataupun Internasional [29]. setelah melakukan kalibrasi maka kebenaran alat yang konvensional nilainya menunjukkan nominal yang seharusnya. Hampir semua jenis alat ukur perlu dilakukan kalibrasi baik pengukuran luas, panjang, massa, isi, kecepatan, gaya, tekanan, frekuensi, energi, arus listrik dan lain lain. Apabila alat ukur sudah masuk kategori legal, maka periode untuk kalibrasinya sudah ditentukan, bergantung pada keperluan dan frekuensi dari penggunaanya.

Rumus kalibrasi digunakan untuk mengoreksi data hasil alat.

$$\{Y\} = a + bX \quad (1)$$

Keterangan :

Y = data dari alat kalibrator (standar)

a = intercept (konstanta)

b = slope (kemiringan garis)

X = data dari alat buatan (alat uji)

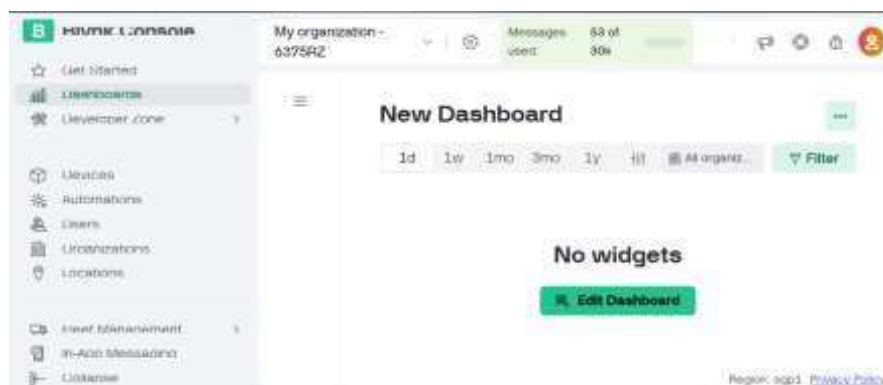
untuk melakukan kalibrasi di excel perlu dibuat:

- 1) Kolom untuk data hasil pengukuran dan data dari alat kalibrator
- 2) Buat grafik dispersi dengan cara
 - a. Blok 2 kolom dari alat dan kalibrator
 - b. Klik insert lalu pilih chart klik yang line

- 3) Tambahkan garis regresi linier
 - a. Klik kanan pada garis di grafik lalu klik add trendline
 - b. Pilih linier
 - c. Ceklis opsi Display Equation Chart, dan Display R-squared value on chart
 - d. Hasilnya akan muncul persamaan garis $Y=a+bX$ dan nilai R^2
 - e. R^2 atau R-Squared adalah ukuran statistik yang menunjukkan seberapa baik model regresi
- 4) Terapkan rumus kalibrasi
- 5) R^2 menunjukkan seberapa kuat hubungan antara alat dan kalibrator. R^2 mendekati 1 maka akurasi tinggi, sementara R^2 rendah maka hubungan lemah dan perlu dikalibrasi ulang.

2.9 Blynk IoT

Blynk adalah sebuah platform Internet of Things (IoT) yang memberikan kemudahan bagi pengguna dalam melakukan pemantauan dan pengendalian perangkat secara jarak jauh, baik melalui perangkat mobile maupun web. Platform ini menyediakan antarmuka pengguna yang ramah dan mudah digunakan, serta mendukung integrasi dengan berbagai perangkat keras, sehingga sangat sesuai untuk digunakan oleh pengembang dalam membangun sistem IoT secara praktis. Selain itu, Blynk mendukung berbagai jenis koneksi komunikasi seperti WiFi, Bluetooth, dan jaringan seluler, sehingga kompatibel dengan berbagai mikrokontroler seperti ESP8266, ESP32, Arduino, serta perangkat berbasis mikroprosesor lainnya [30].



Gambar 10. Dashboard Blynk IoT[30]

2.10 Penelitian Terdahulu

Untuk memperkuat penelitian ini ada beberapa penelitian terdahulu yang akan menjadi contoh untuk penelitian yang akan dilakukan dan mendukung betapa pentingnya penelitian ini dilakukan. Beberapa penelitian yang dilampirkan juga memiliki kesamaan jenis objek, atau teori dan beberapa metode yang dilakukan.

Penggunaan sensor DFROBOT untuk memantau CO₂ dalam ruangan memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sensor yang lain. Sehingga menjadikan sensor ini disukai untuk penilaian kualitas udara yang optimal. Keunggulan utama dari sensor ini terletak pada desain, fungsionalitas, akurasi data, dan kemampuan integrasinya dalam konteks pemantauan yang *real-time*.

Salah satu faktor signifikan yang meningkatkan sensor DFROBOT adalah integrasi teknologinya yang canggih, terkhusus dengan kemampuan IoT (Internet of Things). Dimana sensor ini dapat mengirimkan data secara *real-time*, sehingga memungkinkan respons langsung terhadap fluktuasi kadar CO₂ di lingkungan dalam ruangan[31], [32]. Pertukaran data yang tepat waktu tersebut sangatlah penting, terutama dalam pengaturan di mana kualitas udara dapat dengan cepat memburuk. Seperti fasilitas pendidikan atau dilingkungan perawatan kesehatan. Begitupun sebaliknya, banyak perangkat monitoring yang bergantung dengan pengambilan sampel yang lebih jarang, sehingga menyebabkan keterlambatan respons dan kondisi yang memiliki potensi bahaya[33].

Sensor DFROBOT dalam hal akurasi dan keandalan dibuat untuk memberikan pengukuran CO₂ yang akurat, sering kali pada level ± 500 ppm, yang sejalan dengan parameter regulasi untuk kualitas udara dalam ruangan[31]. Tingkat sensitivitas yang tinggi, memungkinkan pemahaman yang lebih baik mengenai lingkungan dalam ruangan yang mungkin mengandung kadar CO₂ yang tinggi, terkhusus di lingkungan yang padat penduduk. Sensor model lain kemungkinan tidak sampai pada tingkat akurasi ini. Atau mungkin sensor lain akan memerlukan kalibrasi yang sering, yang dapat mengorbankan kenyamanan dan efisiensi operasional [33], [34]. Ketahanan sensor DFROBOT juga mencakup kemampuannya untuk mengukur berbagai parameter lingkungan seperti suhu dan

kelembaban yang merupakan bagian yang sangat penting untuk penilaian udara yang bersifat mampu menerima dengan baik secara luas dan lengkap[35].

Selain itu, sensor DFROBOT juga dirancang untuk aksesibilitas yang berorientasi pada pengguna. Penyesuaian dengan berbagai platform (baik perangkat keras maupun perangkat lunak), termasuk Arduino memingkatkan kemudahan integrasi kedalam sistem pemantauan yang lebih besar[36], [37]. Fleksibilitas seperti ini menguntungkan ketika pengguna ingin menyesuaikan solusi pemantauan kualitas udara yang mereka miliki berdasarkan kebutuhan lingkungan yang unik. Suatu pilihan yang tidak semua sensor bisa menyediakan dengan mudah. Proses penyatuan komponen kedalam IoT merupakan pertimbangan yang semakin ditekankan dalam studi terkini yang memantau peralihan ke solusi pemantauan cerdas dalam mengelola kualitas udara dalam ruangan ditengah masalah kesehatan yang sedang berlangsung seperti saat pandemi COVID-19[38].

Terakhir, efektifitas biaya sensor DFROBOT lebih unggul, terutama dalam konteks perluasan jaringan pemantauan kualitas udara dalam ruangan. Literatur terkini menunjukkan bahwa harga sensor DFROBOT yang lebih terjangkau, dilengkapi dengan kemampuan yang canggih memungkinkan penerapan dan peningkatan dalam akses pemantauan di ruang publik dan ruang privat yang lebih luas lagi [33], [39]. Karena kualitas udara semakin diakui sebagai masalah kesehatan masyarakat, ketersediaan solusi pemantauan yang lebih hemat biaya dan efisien menjadi semakin penting, menjadikan sensor DFROBOT sebagai pilihan yang layak dalam ekosistem lingkungan[40]. Singkatnya sensor DFROBOT menawarkan kemampuan pemantauan yang *real-time* dan unggul. Pengukuran CO₂ yang akurat, potensi penyatuan yang berorientasi kepada pengguna dan efektivitas biaya yang secara kolektif menjadikannya sebagai pilihan utama untuk manajemen kualitas udara dalam ruangan dibandingkan dengan sensor lain.

Tabel 11. Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Objek	Alat/metode	Hasil
1	Abalaka, O.,Essien, J.,Chimezie (2024)[1]	Polusi (CO ₂ , gas Amonia, benzena dan asap)	Arduino,sensor MQ135 (Design, Development, implement, validate system)	Kualitas udara berdampak signifikan pada kondisi pernafasan, penyakit kardiovaskular, dan fungsi kognitif.
2	Akbaba, C. and Dişken, G. (2023)[39]	Konsentrasi gas NH ₃ , Nox, uap alkohol, benzena, asap dan CO ₂	Arduino uno, sensor MQ135, DHTT11 Temperature sensor, ESP8622. (Arduino IDE, Pemrograman Phytion)	Kualitas udara dalam ruangan berdasarkan nilai suhu, kelembaban, dan rasio gas.
3	Fernández Ramos,M. ,Moreno Puche[37]	CO ₂	Arduino UNO, Memori Card, Sensor NDIR (Non DispersiveInfra-Red)	Perangkat portable untuk pemantauan CO ₂ yang murah.
4	Gilio, A., Palmisai J.,Pulino, M.,Cerio, dkk (2021)[35]	Karbon Dioksida (CO ₂)	Ruang Kelas, Sensor NDIR	Protokol operasi ventilasi udara dan simulasi visualisai real-time simultan tingkat CO ₂ oleh NDIR
5	He, Zewei. and Ruan, Xuxian. (2022)[41]	PM2,5, Suhu dan Kelembaban	STM32F103RCT6 Modul PM25, LCD16X2 I ² C	Sistem pemantauan udara dalam ruangan cerdas dengan STM32
6	Heengama , S. and Heengama , K. (2023)[33]	PM0.3, PM0,5, PM1, PM2,5, PM5, PM10, dan Suhu.	ESP8266-12F, Papan PCB, PMS5003, MQ-135, BMP280, Power Bank, Power Suply Cable 15v	Perangkat pemantauan berbiaya rendah dapat digunakan dengan desain yang efisien dan dengan menggunakan sensor yang sangat akurat dan valid dengan biaya rendah.
7	Jo,Junho., Jo,Byung wan., JungHonS ungJun., & Han, Woonyon g.(2020[32]	Konsentrasi Aerosol, VOC, CO, CO ₂ Suhu Kelembaban.	Sensor NDIR, STM 32F407IG, Sensor PM2007, Sensor VOC, Sensor CO GSET11-P110, Sensor DHT11, LED	Berhasil mengklasifikasi kondisi udara dalam ruangan dan menampilkan nya melalui web dan aplikasi

	]			
8	Kuncoro, C., Amaris, A., & Permana, A. (2022)[31]	CO ₂ dan Aerosol	PCB, Mikrokontroler, NDIR CO ₂ , Super kapasitor	Hasil pengukuran sensor dan pemantauan menunjukkan sensor dapat digunakan untuk pemantauan dan perekaman data CO ₂ dalam ruangan dalam jangka waktu yang lama.
9	Muhamad Komarudin, Titin Yulianti dkk (2023)[42]	Akurasi sensor karbon dioksida murah (CCS811)	Sensor CCS811, alat kalibrator, kalibrasi menggunakan model regresi linier	Akurasi meningkat dari 92,67% menjadi 95,26% setelah kalibrasi linier
10	Muhamad Komarudin, Titin Yulianti dkk(2024) [43]	Pengaruh pola okupansi terhadap kualitas udara	Sensor MQ135, MQ7, LCD, Buzzer, LED, ESP32	Kadar CO ₂ , meningkat seiring banyaknya penghuni, rekomendasi ventilasi berdasarkan pola okupansi

Dilihat dari penelitian terdahulu, monitoring kualitas udara sangat penting dilakukan. Tidak hanya karena uji coba semata namun dampak dari kualitas udara yang buruk sangat berpengaruh bagi kesehatan masyarakat. Berbagai penyakit dapat dengan gampang ditularkan melalui udara. Oleh karenanya pada penelitian ini akan membuat alat monitoring kualitas udara dengan sensor SCD41 NDIR SENSOR dimana penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Teknik Digital, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan April – Juli 2025. Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan di laboratorium Teknik Digital, Laboratorium Komputer, Ruang Seminar dan Ruang H5, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Tabel 8 menunjukkan jadwal penelitian.

Tabel 12. Jadwal penelitian

No	Kegiatan	2025									
		Mei		Juni				Juli			
		3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur										
2	Perencanaan & Persiapan alat										
3	Design (<i>wiring diagram dan simulasi</i>)										
4	Development (<i>Prototype</i>)										
5	Testing dan Kalibrasi										
6	Analisis dan Penyusunan Hasil Penelitian										

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Adapun alat dalam penelitian ini adalah

Tabel 13. Alat penelitian

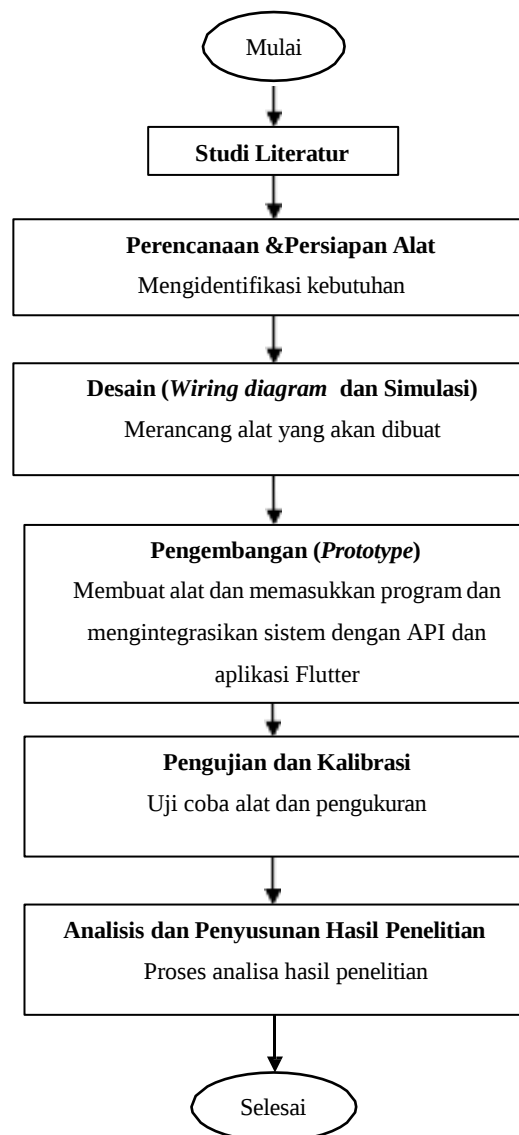
No	Nama alat	Spesifikasi	Kegunaan	Jumlah
1	Laptop	Intel core i3, NVIDIA GFORCE 940MX, Ram 2GB	Sebagai alat pendukung untuk memprogram alat	1 unit
2	ESP8266	16 MB, 32 BIT, USB type C	Mikrokontroler	1 unit
3	SCD41 NDIR SENSOR	4,5-5,5 V , Suhu 0-50°C	Sensor Suhu	1 buah
4	LCD	LCD16X2 I ² C	Menampilkan data	1 buah
5	Kabel	Kabel Jumper	Menghubungkan antar komponen	1 Set
6	Blynk	Aplikasi Blynk android dan web	Sebagai alat pendukung berupa Aplikasi mobile berbasis IoT untuk monitoring jarak jauh	
7	Breadboard	Dimensi 47x35x8.5mm	Media perakitan dan koneksi antar komponen	1 buah
8	AirVisual Pro	100-240 V AC, LCD 5 Inc	Sebagai alat Pendukung untuk Kalibrasi	1 unit
9	Arduino IDE	Arduino 1.8.19	Sebagai alat pendukung untuk pemrograman system	

3.2.2 Bahan

Pada penelitian ini data diperoleh dari hasil pengukuran kualitas udara berupa data Suhu, Kelembaban, dan CO₂ yang dilakukan pada rentang waktu 08.00-17.00 WIB di ruang H5, ruang Seminar, Laboratorium Teknik Digital dan Laboratorium Teknik Komputer, Gedung H, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

3.3 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan dalam penelitian ini terdapat pada diagram alir pada gambar dibawah ini :



Gambar 11. Diagram Alir Penelitian

1. Studi Literatur

Tahap awal penelitian dilakukan dengan studi literatur untuk mendapatkan landasan teori dan pemahaman terhadap konsep yang relevan dengan penelitian. Referensi diperoleh dari jurnal, buku, artikel ilmiah, dan sumber-sumber terpercaya lainnya yang berkaitan dengan sensor, metode perancangan alat, serta pendekatan penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya.

Tujuannya adalah untuk:

- a. Memahami teori dasar dan teknologi yang akan digunakan
- b. Mengidentifikasi permasalahan yang relevan
- c. Menentukan metode dan pendekatan terbaik untuk penelitian

2. Perencanaan & Persiapan Alat

Pada tahap ini dilakukan perencanaan kebutuhan alat dan bahan yang diperlukan. Daftar komponen disusun berdasarkan hasil studi literatur dan spesifikasi sistem yang akan dibuat. Persiapan juga mencakup pembelian, pengujian awal komponen, serta penentuan alat bantu seperti software yang dibutuhkan.

Langkah-langkahnya meliputi:

- a. Menentukan komponen utama
- b. Menyiapkan alat bantu seperti breadboard, kabel jumper, dll
- c. Instalasi perangkat lunak yang mendukung proses desain dan pemrograman

3. Desain (*Wiring diagram* dan Simulasi)

Setelah alat dan kebutuhan ditentukan, dilakukan proses desain sistem. Diagram rangkaian (*wiring diagram*) dibuat untuk menggambarkan hubungan antar komponen. Simulasi dilakukan untuk memastikan rangkaian berjalan sesuai tujuan sebelum dibuat secara fisik.

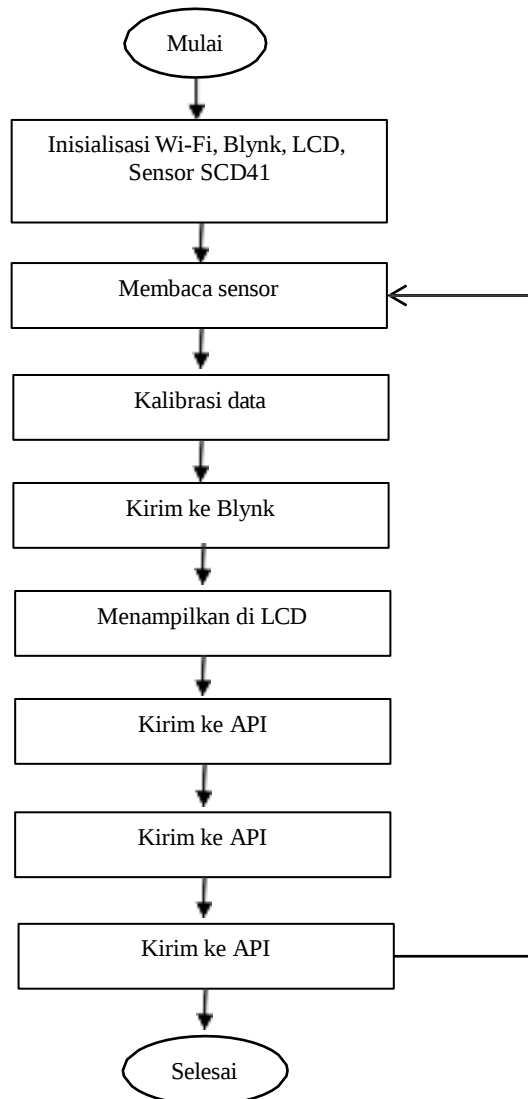
Kegiatan pada tahap ini:

- a. Membuat *wiring diagram*
- b. Menyusun logika program awal
- c. Melakukan simulasi (jika memungkinkan) untuk menguji fungsionalitas rangkaian

4. Pengembangan (*Prototype*)

Pada tahap ini dilakukan implementasi dari desain ke bentuk fisik berupa *Prototype*. Proses melibatkan perakitan komponen sesuai dengan *wiring diagram* serta pemrograman mikrokontroler agar sistem dapat bekerja sesuai fungsinya. Langkah-langkah pada tahap ini sebagai berikut :

- a. Merakit seluruh komponen
- b. Meng-upload program ke mikrokontroler
- c. Memastikan semua komponen berfungsi (sensor membaca data, komunikasi data berjalan)
- d. Memastikan sistem yang telah dibuat dapat terhubung ke Blynk



Gambar 12. Alur sistem monitoring kualitas udara dalam ruangan

5. Pengujian dan Kalibrasi

Setelah *Prototype* selesai, dilakukan pengujian untuk memastikan sistem berjalan dengan baik. Kalibrasi dilakukan terutama pada sensor untuk memastikan hasil pengukuran akurat. Pengujian dilakukan dalam beberapa skenario agar performa sistem dapat diketahui secara menyeluruh.

Kegiatan meliputi:

- a. Uji fungsi tiap komponen
- b. Kalibrasi sensor dengan membandingkan hasil sensor dan alat ukur terstandar industri (Air Visual Pro).
- c. Pengujian sistem secara keseluruhan dalam lingkungan yang sesuai dengan tujuan penelitian

6. Analisis dan Penyusunan Hasil Penelitian

Data hasil pengujian dan pengamatan dianalisis untuk menilai performa sistem. Hasil dibandingkan dengan target awal atau penelitian sejenis untuk mengetahui kelebihan dan kekurangannya. Kemudian dilakukan penyusunan laporan hasil yang menjelaskan pencapaian dan evaluasi sistem.

Analisis mencakup:

- a. Keakuratan alat/sensor
- b. Responsivitas sistem
- c. Keandalan dalam kondisi nyata
- d. Identifikasi kendala dan perbaikan yang diperlukan

7. Uji sistem ke API dan Aplikasi Mobile (Lokal)

- a. ESP8266 dikonfigurasi untuk mengirim data secara periodik menggunakan HTTP POST ke endpoint API yang dibuat oleh Erik. Data yang dikirim meliputi suhu, kelembaban, dan CO₂ dalam format JSON.
- b. API ini menangani penyimpanan data ke dalam database server lokal atau cloud.
- c. Aplikasi Flutter yang dikembangkan oleh Angga terhubung ke API tersebut untuk menampilkan data secara real-time maupun historis, dalam bentuk angka, tabel, dan grafik.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, dan pengujian *Prototype* sistem monitoring suhu, kelembaban, dan konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) berbasis IoT yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem monitoring berhasil dikembangkan menggunakan sensor DHT11 untuk membaca suhu dan kelembaban, serta sensor SCD41 untuk membaca konsentrasi CO₂, yang terhubung dengan NodeMCU sehingga dapat digunakan untuk melakukan evaluasi dan pemantauan udara di lokasi penelitian.
2. Berdasarkan hasil kalibrasi diperoleh persamaan linear $y = a + b \cdot x$ sehingga diperoleh penurunan rata-rata selisih suhu dari 1,77 sebelum kalibrasi menjadi 1,28 setelah kalibrasi, demikian juga dengan rata-rata selisih pengukuran kelembaban dari 8,26 menjadi 3,59, dan rata-rata selisih CO₂ dari 86,65 menjadi 28,71.
3. Suhu cenderung stabil meskipun banyak orang dalam ruangan namun kelembaban menngkat/menurun dengan bertambahnya orang dalam ruangan. sementara itu nilai CO₂ meningkat signifikan saat jumlah orang dalam ruangan meningkat dan turun perlahan saat jumlah orang dalam ruangan berkurang.

5.2 Saran

Agar sistem dapat dikembangkan lebih lanjut dan memberikan hasil yang lebih optimal, berikut beberapa saran yang dapat diberikan :

1. Tambahkan modul penyimpanan data seperti MicroSD card agar data histori dapat disimpan dan dianalisis jangka panjang.
2. Salah satu kendala dari ESP8266 adalah sering disconnect Wi-Fi oleh karenanya untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar sistem dilengkapi dengan buffer penyimpanan data sementara agar proses pengiriman data ke platform IoT seperti Blynk tetap stabil meskipun terjadi gangguan jaringan atau keterlambatan pembacaan sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] WHO, “What are the WHO Air Quality Guidelines?,” World Health Organization (WHO). [Daring]. Tersedia pada: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>
- [2] Redaksi, “1.824 Warga Lampung Terjangkit ISPA, Tersebar di 11 Daerah Didominasi Anak-Anak,” *Berdikari*, 7 September 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://berdikari.co/2023/09/07/1824-warga-lampung-terjangkit-ispa-tersebar-di-11-daerah-didominasi-anak-anak/>
- [3] “Poor air quality found to affect mental health in many ways,” University of Oxford, Jul 2023. Diakses: 20 Juni 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.ox.ac.uk/news/2023-07-06-poor-air-quality-found-affect-mental-health-many-ways>
- [4] K. Bhui dkk., “Air Quality and Mental Health: Evidence, challenges and future directions,” *BJPsych Open*, vol. 9, no. 4, hlm. e120, Jul 2023, doi: 10.1192/bjo.2023.507.
- [5] A. Khan dkk., “Environmental pollution is associated with increased risk of psychiatric disorders in the US and Denmark,” *PLOS Biol.*, vol. 17, no. 8, hlm. e3000353, Agu 2019, doi: 10.1371/journal.pbio.3000353.
- [6] L. S. L. Purba dan N. Harefa, “Pengaruh Kandungan Oksigen Udara Sekolah Terhadap Konsentrasi Belajar Siswa,” *J. EduMatSains*, hlm. 169–182, Jan 2020.
- [7] W. C. Dewi, M. Raharjo, dan N. E. Wahyuningsih, “Literatur Review : Hubungan Antara Kualitas Udara Ruang Dengan Gangguan Kesehatan Pada Pekerja,” *-Nadaa J. Kesehat. Masy.*, vol. 8, no. 1, hlm. 88, Jun 2021, doi: 10.31602/ann.v8i1.4815.
- [8] Suharyo widagdo, “Kualitas Udara Dalam Ruang Kerja,” *Pus. Teknol. Reakt. Dan Keselam. Nukl. - - BATAN*, vol. Vol.13, Agustus 2009.
- [9] V. Loftness, B. Hakkinen, O. Adan, dan A. Nevalainen, “Elements That Contribute to Healthy Building Design,” *Environ. Health Perspect.*, vol. 115, no. 6, hlm. 965–970, Jun 2007, doi: 10.1289/ehp.8988.
- [10] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), “Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI),” *No EPA-454B-18-007*, Sep 2018, [Daring]. Tersedia pada: <https://www.airnow.gov/>
- [11] Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Dan Republik Indonesia, ““Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor: 13 Tahun 2012,” Jakarta, Mei 2012.
- [12] A. H. Yafie dan D. Mutiari, “Keterkaitan Antara Kenyamanan Termal Dengan Pemustaka Di Perpustakaan Salatiga,” *SIAR-IV 2023*, Diakses: 7 Mei 2025. [Daring]. Tersedia pada: <http://siar.ums.ac.id/>

- [13] A. W. Wijaya, “Kajian Sebaran Konsentrasi Karbon Dioksida (CO₂) dalam Tanah Pada Sebagian Kawasan Karst Jonggrangan,” Universitas Gadjah Mada, 2020. Diakses: 7 Mei 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/192837>
- [14] L. Amelia Safitri, “Literature Review: Kebijakan dan Teknologi Untuk Mereduksi Dampak Buruk Dari CO₂ Pada Lingkungan,” *J. Sci. MANDALIKA JSM E-ISSN 2745-5955 P-ISSN 2809-0543*, vol. 3, no. 7, hlm. 715–722, Jul 2022, doi: 10.36312/10.36312/vol3iss7pp715-722.
- [15] R. Iftitah dan S. Izzah, “Studi Serapan Karbon Dioksida (CO₂) Udara Ambien Oleh Tumbuhan Air Menggunakan Indikator Nilai Kumulatif Konsentrasi (Net-CO₂-Con),” *Inst. Teknol. Sepuluh Novemb.*, vol. VOL 03, hlm. 100, 2018.
- [16] C. Yong dan A. Keys, “Decarbonisation options for large volume organic chemicals production LyondellBasell Rotterdam,” hlm. 1–68, Jan 2021.
- [17] PubChem, “Carbon Dioxide.” Diakses: 8 Mei 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/280>
- [18] N. Sutresna dan R. Muhammad, *Kimia Untuk Kelas X Semester 1*, 1 ed., vol. 01. Bandung: PT. Grafindo Media Pratama, 2008. Diakses: 9 Oktober 2025. [Daring]. Tersedia pada: https://books.google.co.id/books?id=wLVWQ0Rwc1IC&pg=PA55&dq=Struktur+co2&hl=id&newbks=1&newbks_redir=0&source=gb_mobile_search&ovdme=1&sa=X&ved=2ahUKEwiZy8W69piQAxWR4jgGHVTGMhwQ6AF6BAGLEAM#v=onepage&q=Struktur%20co2&f=false
- [19] Tri Sulistyorini, Nelly Sofi, dan Erma Sova, “Pemanfaatan Nodemcu Esp8266 Berbasis Android (Blynk) Sebagai Alat Mematikan Dan Menghidupkan Lampu,” *J. Ilm. Tek.*, vol. 1, no. 3, hlm. 40–53, Sep 2022, doi: 10.56127/juit.v1i3.334.
- [20] R. Hermawan dan A. Abdurrohman, “Pemanfaatan Teknologi Internet Of Things Pada Alarm Sepeda Motor Menggunakan Nodemcu Lolin V3 Dan Media Telegram,” *Infotronik J. Teknol. Inf. Dan Elektron.*, vol. 5, no. 2, hlm. 58, Des 2020, doi: 10.32897/infotronik.2020.5.2.453.
- [21] Components101, “NodeMCU ESP8266 Pinout, Features, and Datasheet.” [Daring]. Tersedia pada: <https://components101.com/development-boards/nodemcu-esp8266-pinout-features-and-datasheet>
- [22] Dr. Koz, “How Does an NDIR CO₂ Sensor Work?,” Forensics Detectors. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.forensicsdetectors.com/blogs/articles/how-does-an-ndir-co2-sensor-work>
- [23] S. AG, “SCD41 - Improved CO₂ accuracy with extended measurement range and single-shot mode.” Diakses: 18 Juni 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://sensirion.com/products/catalog/SCD41>
- [24] OSEPP, “DHT11 Datasheet.” [Daring]. Tersedia pada: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/download/2193416/OSEPP/DHT11.html>
- [25] Prasetyo, Ivan P S, dan Qisthi Al Hazmi Hr, “Sistem Pemantauan Suhu dan Kelembaban Ruangan Secara Real-Time Berbasis Web Server,” *J. Technol. Inform. JoTI*, vol. 1, no. 1, hlm. 56–60, Okt 2019, doi: 10.37802/joti.v1i1.12.

- [26] Ahmad Hunaepi, Ahmad Roihan, dan Ahmad Nurtursina, “Perancangan Sistem Kehadiran Pendidik Dan Tenaga Kependidikan Berbasis Mikrokontroler Esp32Cam,” *J. Sist. Inf. Dan Teknol. SINTEK*, vol. 3, no. 2, hlm. 61–67, Jul 2023, doi: 10.56995/sintek.v3i2.60.
- [27] Winstar Display, “I2C LCD Display - Winstar Display,” Winstar Display. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.winstar.com.tw/products/lcd-display/cog-lcd-module-display/i2c-lcd-display.html>
- [28] A. J. A. Firdaus, D. Pramono, dan W. Purnomo, “Pengembangan Sistem Informasi UPT Kalibrasi Dinas Kesehatan Kabupaten Malang Berbasis WEB,” *J. Sist. Inf. Teknol. Inf. Dan Edukasi Sist. Inf.*, vol. 1, no. 1, Agu 2020, doi: 10.25126/justsi.v1i1.3.
- [29] C. Sulaeman dan K. Kusnadi, “Kalibrasi Sensor Temperatur Dengan Metoda Perbandingan dan Simulasi,” *J. Poli-Teknol.*, vol. 10, no. 2, Mar 2013, doi: 10.32722/pt.v10i2.2.
- [30] P. U. Rakhmawati, “Analisis Komunikasi Platform Internet of Things Aplikasi Blynk,” vol. 9, no. 2502, 2024.
- [31] C. B. D. Kuncoro, A. Amaris, dan A. F. Permana, “Smart Wireless CO2 Sensor Node for IoT Based Strategic Monitoring Tool of The Risk of The Indoor SARS-CoV-2 Airborne Transmission,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 21, hlm. 10784, Okt 2022, doi: 10.3390/app122110784.
- [32] J. Jo, B. Jo, J. Kim, S. Kim, dan W. Han, “Development of an IoT-Based Indoor Air Quality Monitoring Platform,” *J. Sens.*, vol. 2020, hlm. 1–14, Jan 2020, doi: 10.1155/2020/8749764.
- [33] S. Heengama dan K. Heengama, “A Cost-Effective IoT-Based Intelligent Indoor Air Quality Monitoring,” *J. Emerg. Investig.*, 2023, doi: 10.59720/23-024.
- [34] L. Pang, C. Luo, dan W. Pan, “Research on the Impact of Indoor Control Quality Monitoring Based on Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 11, hlm. 139614–139627, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3336706.
- [35] A. Di Gilio dkk., “CO2 concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission,” *Environ. Res.*, vol. 202, hlm. 111560, Nov 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.111560.
- [36] O. O. Abalaka, J. Essien, C. Chimezie, dan M. Ogharandukun, “Enhancing Patients Outcomes and Infection Control through Smart Indoor Air Quality Monitoring Systems,” *J. Comput. Commun.*, vol. 12, no. 06, hlm. 25–37, 2024, doi: 10.4236/jcc.2024.126003.
- [37] M. D. Fernández-Ramos, F. Moreno-Puche, P. Escobedo, P. A. García-López, L. F. Capitán-Vallvey, dan A. Martínez-Olmos, “Optical portable instrument for the determination of CO2 in indoor environments,” *Talanta*, vol. 208, hlm. 120387, Feb 2020, doi: 10.1016/j.talanta.2019.120387.
- [38] R. Wiryasaputra, C.-Y. Huang, E. Kristiani, P.-Y. Liu, T.-K. Yeh, dan C.-T. Yang, “Review of an intelligent indoor environment monitoring and management system for COVID-19 risk mitigation,” *Front. Public Health*, vol. 10, hlm. 1022055, Jan 2023, doi: 10.3389/fpubh.2022.1022055.
- [39] C. E. Akbaba dan G. Dişken, “Feedforward Neural Network-Based Indoor Air Quality Detection System,” *Int. J. Appl. Methods Electron. Comput.*, hlm. 4, Des 2023, doi: 10.58190/ijamec.2023.64.

- [40] L. Fitria, R. A. Wulandari, E. Hermawati, dan D. Susanna, "Kualitas Udara Dalam Ruang Perpustakaan Universitas "X" Ditinjau Dari Kualitas Biologi, Fisik, dan Kimiawi," *DESEMBER 2008*, vol. VOL. 12, NO. 2, hlm. 76–82.
- [41] "Research on Indoor Air Monitoring System Based on STM32," *Acad. J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 5, no. 7, 2022, doi: 10.25236/AJETS.2022.050708.
- [42] M. Komarudin, S. R. Sulistyanti, Suharso, M. Irsyad, H. D. Septama, dan T. Yulianti, "Improving Low-Cost Carbon Dioxide Sensor Accuracy for Environmental Air Quality Monitoring Systems," dalam *2023 International Conference on Converging Technology in Electrical and Information Engineering (ICCTEIE)*, Bandar Lampung, Indonesia: IEEE, Okt 2023, hlm. 1–5. doi: 10.1109/ICCTEIE60099.2023.10366775.
- [43] S. R. Sulitiyanti, M. Komarudin, F. X. A. Setyawan, H. D. Septama, T. Yulianti, dan M. F. Ammar, "Analyzing the Impact of Occupancy Patterns on Indoor Air Quality in University Classrooms Using a Real-Time Monitoring System," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 15, no. 10, 2024, doi: 10.14569/IJACSA.2024.0151051.