



**RANCANG BANGUN SISTEM PERINGATAN DINI
KUALITAS UDARA PORTABEL BERBASIS ESP32
MENGUNAKAN SENSOR MQ-135, PMS5003, DAN DHT22**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Syarat Menyelesaikan Pendidikan Pada
Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik Industri
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro

Disusun Oleh:

Rahmatul Amri

40040622650053

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN TEKNIK LISTRIK INDUSTRI
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI
SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2026**

LEMBAR PERSETUJUAN TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN SISTEM PERINGATAN DINI KUALITAS UDARA
PORTABEL BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN SENSOR MQ-135,
PMS5003, DAN DHT22

Diajukan Oleh : Rahmatul Amri
NIM : 40040622650053

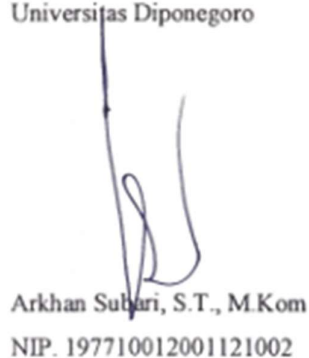
Menyetujui,
Dosen Pembimbing,



Yuniarto, S.T, M.T
NIP. 197106151998021001

Tanggal 27/07/2026

Mengetahui
Ketua Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik Industri
Departemen Teknik Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro



Arkhan Subari, S.T., M.Kom
NIP. 197710012001121002

Tanggal 31/07/2026

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN SISTEM PERINGATAN DINI KUALITAS UDARA
PORTABEL BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN SENSOR MQ-135,
PMS5003, DAN DHT22

Diajukan oleh : Rahmatul Amri
Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji pada

Hari : Senin

Tanggal : 20 Juli 2026

Penguji I



Dista Yoel Tadeus, ST, MT

NIP. 198812282015041002

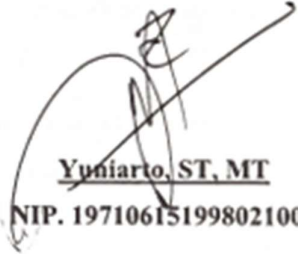
Penguji II



Fakhruddin Mangkusmito, ST, MT

NIP. 198908202019031012

Penguji III



Yuniarto, ST, MT

NIP. 197106151998021001

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Listrik Industri
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro



Arkhan Subari, S.T., M.Kom

NIP.197710012001121002

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Rahmatul Amri
NIM : 40040622650053
Program Studi : Sarjana Terapan Teknik Listrik Industri Departemen
Teknologi Industri Sekolah Vokasi Universitas
Diponegoro
Judul Tugas Akhir : Rancang Bangun Sistem Peringatan Dini Kualitas
Udara Portabel Berbasis ESP32 Menggunakan Sensor
MQ-135, PMS5003, Dan DHT22

Dengan ini saya menyatakan bahwa judul tugas akhir ini belum pernah diajukan sebelumnya untuk mendapatkan gelar keahlian di sebuah perguruan tinggi. Sejauh pengetahuan saya, tidak ada karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang saya rujuk secara tertulis dalam naskah ini dan tercantum dalam daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti plagiat dalam tugas akhir ini, maka saya bersedia mendapat sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI. No.17 Tahun 2010 dan Undang-Undang yang berlaku.

Semarang, 20 Juli 2026
Yang membuat Pernyataan



Rahmatul Amri
NIM. 40040622650053

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas Akhir ini saya persembahkan untuk:

1. Allah Subhanahu Wa Ta'ala, yang senantiasa memberikan kemudahan dan kelancaran dalam menyelesaikan Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini.
2. Orang tua dan keluarga yang telah menjadi dukungan penulis untuk segera menyelesaikan laporan ini.
3. Bapak Arkhan Subari, S.T., M.Kom. selaku Kepala Program Studi Sarjana Terapan Teknik Listrik Industri Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.
4. Bapak Yuniarto, S.T, M.T. selaku Dosen Pembimbing yang senantiasa memberikan arahan dan dukungan dalam penyusunan laporan hingga menyetujui laporan Tugas Akhir ini.
5. Seluruh dosen dan tenaga pendidik Program Studi Teknik Listrik Industri Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.
6. Teman seperjuangan Gilang, Vito, Amin yang selalu menemani progress pengerjaan Tugas Akhir Penulis.
7. Kepada GRUP Kontolodon selaku teman dekat penulis yang kebersamaan penulis selama berada di perkuliahan sejak 2022 sampai 2026.
8. Rekan-rekan Teknik Listrik Industri 2022 yang selalu berjuang Bersama dari awal masa perkuliahan hingga lulus.
9. Seluruh pihak yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
10. Serta, untuk diri saya sendiri yang telah bertahan dan terus berjuang tanpa lelah hingga tersusunnya Tugas Akhir ini.

ABSTRAK

Polusi udara merupakan salah satu ancaman serius terhadap kesehatan manusia, namun keberadaannya sulit dideteksi secara langsung oleh indera penglihatan sehingga diperlukan sistem pemantauan yang mampu memberikan peringatan dini secara cepat dan akurat. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem peringatan dini kualitas udara portabel berbasis mikrokontroler ESP32 yang mengintegrasikan sensor MQ-135 untuk mengukur konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂), sensor PMS5003 untuk mengukur konsentrasi partikulat PM2.5, serta sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan udara. Hasil pengukuran ditampilkan secara real-time melalui LCD 16x2 I2C, dilengkapi indikator visual LED WS2812 dan indikator suara buzzer yang aktif apabila kualitas udara melewati ambang batas yang telah ditentukan. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sistem terhadap alat ukur komersial pada beberapa kondisi lingkungan, meliputi ruangan tertutup tanpa aktivitas, ruangan tertutup dengan aktivitas merokok, serta area terbuka dengan tingkat lalu lintas dan sirkulasi udara yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan sensor MQ-135 menghasilkan rata-rata error sebesar 1,03% pada pengukuran CO₂, sensor PMS5003 menghasilkan rata-rata error 1,79% pada pengukuran PM2.5, sedangkan sensor DHT22 menghasilkan error 3,23% pada pengukuran suhu dan 0% pada pengukuran kelembapan terhadap alat ukur komersial. Pengujian pada empat kondisi lingkungan yang berbeda menunjukkan sistem mampu membedakan tingkat pencemaran udara dengan baik, ditandai lonjakan nilai PM2.5 hingga lebih dari 25 kali lipat pada ruangan dengan aktivitas merokok dibandingkan ruangan dengan udara bersih, serta respons LED dan buzzer yang konsisten terhadap ambang batas kualitas udara pada seluruh 20 kali pengambilan data tanpa ditemukan kesalahan klasifikasi. Dengan tingkat akurasi pengukuran yang baik dan respons indikator yang andal, sistem yang dirancang layak digunakan sebagai alat peringatan dini kualitas udara portabel pada lingkungan sehari-hari.

Kata Kunci: kualitas udara, ESP32, MQ-135, PMS5003, DHT22, peringatan dini, portable

ABSTRACT

Air pollution is one of the most serious threats to human health, yet it is difficult to detect directly with the naked eye, so a monitoring system capable of providing fast and accurate early warnings is needed. This study aims to design and build a portable air quality early warning system based on the ESP32 microcontroller that integrates an MQ-135 sensor to measure carbon dioxide (CO₂) concentration, a PMS5003 sensor to measure PM2.5 particulate concentration, and a DHT22 sensor to measure temperature and humidity. The measurement results are displayed in real time through a 16x2 I2C LCD, supported by a WS2812 LED as a visual indicator and a buzzer as an audible alarm that is activated when air quality exceeds the predetermined threshold. Testing was carried out by comparing the system's readings with a commercial measuring instrument under several environmental conditions, including a closed room with no activity, a closed room with smoking activity, and open areas with different traffic levels and air circulation. The test results show that the MQ-135 sensor produced an average error of 1.03% in CO₂ measurement, the PMS5003 sensor produced an average error of 1.79% in PM2.5 measurement, while the DHT22 sensor produced an error of 3.23% in temperature measurement and 0% in humidity measurement compared to the commercial reference instrument. Testing across four different environmental conditions showed that the system was able to clearly distinguish air pollution levels, indicated by a PM2.5 spike of more than 25 times in a room with smoking activity compared to a clean room, as well as consistent LED and buzzer responses to the air quality threshold across all 20 data collection trials without any classification errors. With good measurement accuracy and reliable indicator response, the developed system is considered suitable for use as a portable air quality early warning device in everyday environments.

Keywords: air quality, ESP32, MQ-135, PMS5003, DHT22, early warning, portable

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan Rahmat dan Hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan sekaligus menyusun laporan Tugas Akhir dengan judul “Rancang Bangun Sitem Monitoring Kecepatan dan Jumlah Kendaraan Di Jalan Lingkungan Berbasis Sensor Photo Beam” sebagai salah satu syarat bagi penulis dalam menyelesaikan program studi Sarjana Terapan di Teknik Listrik Industri Universitas Diponegoro.

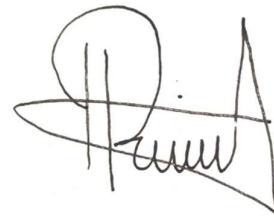
Laporan Tugas Akhir ini diharapkan dapat menambah kreativitas dan pengetahuan yang baik bagi penulis maupun pembaca laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam tersusunnya laporan ini dengan baik. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai dengan baik.
2. Orang Tua serta Keluarga yang telah memberi do'a dan dukungan kepada penulis untuk selalu semangat dalam menjalani masa pendidikan hingga tuntas.
3. Prof Dr. Ir. Budiyo, M.Si. selaku Dekan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.
4. Bapak Arkhan Subari, S.T., M.Kom. selaku Ketua Program Studi Teknik Listrik Industri Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.
5. Bapak Yuniarto, S.T., M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah membantu proses penyelesaian tugas akhir saya.
6. Kepada Grup Kontrolodan selaku teman dekat penulis yang kebersamaan penulis selama berada di perkuliahan sejak 2022 sampai 2026.
7. Rekan-rekan Teknik Listrik Industri 2022 yang selalu berjuang bersama dari awal masa perkuliahan hingga lulus.
8. Seluruh pihak yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
9. Serta, untuk diri saya sendiri yang telah bertahan dan terus berjuang tanpa lelah hingga tersusunnya Laporan Tugas Akhir ini.

Usaha maksimal dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini tidak luput dari kekurangan karena keterbatasan pengetahuan dan kekhilafan penulis. Oleh karena itu, penulis mengharapkan masukan, saran, dan kritik yang membangun dari pembaca untuk kesempurnaan laporan ini. Akhir kata penulis berharap semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan wawasan kita semua. Semoga Allah SWT memberkati usaha yang kita lakukan, aamiin.

Semarang, 20 Juli 2026

Yang membuat Pernyataan

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rahmatul Amri', with a large circular flourish at the top and a horizontal line crossing through the middle.

Rahmatul Amri

NIM. 40040622650053

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN TUGAS AKHIR.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR.....	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Tugas Akhir.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.4.1 Bagi Penulis	3
1.4.2 Bagi Mahasiswa dan Pembaca	4
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II LANDASAN TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori	9
2.2.1 Kualitas Udara.....	9

2.2.2	Karbon Dioksida (CO ₂).....	10
2.2.3	Particulate Matter 2.5 (PM2.5).....	11
2.2.4	Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU).....	12
2.2.5	Suhu dan Kelembapan.....	14
2.2.6	ESP32.....	15
2.2.7	DHT 22	18
2.2.8	PMS5003.....	21
2.2.9	MQ-135.....	23
2.2.10	BUZZER.....	28
2.2.11	LED WS2812	30
2.2.12	LCD 16X2 I2C.....	32
2.2.13	TP 4056.....	34
2.2.14	MT3608.....	36
2.2.15	BATERAI LP403040.....	38
2.2.16	Arduino Uno	39
BAB III PERANCANGAN TUGAS AKHIR		41
3.1	Perancangan Hardware.....	41
3.1.1	Diagram Blok.....	41
3.1.2	Cara Kerja Blok Diagram.....	42
3.1.3	Wiring Diagram	44
3.1.4	Rangkaian Sumber daya dengan ESP32	46
3.1.5	Rangkaian DHT22 dengan ESP32	48
3.1.6	Rangkaian MQ-135 dengan ESP32	50
3.1.7	Rangkaian PMS5003 dengan ESP32	51
3.1.8	Rangkaian LCD I2C dengan ESP32	53

3.1.9	Rangkaian Buzzer dengan ESP32.....	54
3.1.10	Rangkaian LED WS2812 dengan ESP32	56
3.1.11	Desain 3 Dimensi Alat	57
3.2	Perancangan Perangkat Lunak	59
3.2.1	Flowchart	59
3.2.2	Cara Kerja Sistem	60
BAB IV PEMBUATAN ALAT		62
4.1	Pembuatan Prototipe.....	62
4.2	Alat dan Bahan	63
4.3	Pembuatan Perangkat Keras	64
4.3.1	Perancangan Mekanik	65
4.3.2	Perancangan Alat	67
4.3.3	Perancangan PCB.....	68
4.4	Pembuatan Perangkat Lunak	69
4.4.1	Kalibrasi Sensor MQ135 untuk Pengukuran CO ₂	69
4.4.2	Konfigurasi MQ135 untuk Pengukuran CO ₂	72
4.4.3	Konfigurasi PMS5003.....	74
4.4.4	Konfigurasi DHT22	75
4.4.5	Konfigurasi LCD 16X2 I2C.....	76
4.4.6	Konfigurasi Buzzer	77
4.4.7	Konfigurasi LED.....	78
BAB V PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT		79
5.1	Prosedur Pengujian dan Pengukuran	79
5.1.1	Langkah-langkah Pengujian.....	80
5.1.2	Peralatan Pengujian.....	81

5.2	Pengujian dan Analisa Alat	82
5.2.1	Pengujian Sensor MQ135	83
5.2.2	Pengujian Sensor PMS5003	84
5.2.3	Pengujian Sensor DHT22	86
5.2.4	Pengujian Output Sistem	87
5.2.5	Analisis Daya Tahan Baterai Pada Alat	89
5.3	Pengujian Keseluruhan Sistem	91
5.3.1	Perbandingan Data 1 dan Data 2	92
5.3.2	Perbandingan Data 3 dan Data 4	95
5.4	Analisis Keseluruhan Sistem	98
5.4.1	Rekapitulasi dan Peringkat Kondisi Lingkungan	98
BAB VI PENUTUP		100
6.1	Kesimpulan	100
6.2	Saran	101
DAFTAR PUSTAKA		103
LAMPIRAN		106

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Board ESP32.....	17
Gambar 2. 2 Sensor DHT22	19
Gambar 2. 3 PMS5003	22
Gambar 2. 4 Sensor MQ-135.....	24
Gambar 2. 5 Buzzer	29
Gambar 2. 6 LED WS2812B.....	31
Gambar 2. 7 LCD I2C	33
Gambar 2. 8 TP4056.....	34
Gambar 2. 9 MT3608	36
Gambar 2. 10 Baterai LP 403040	38
Gambar 2. 11 Software Arduino Ide	40
Gambar 3. 1 Diagram Blok	42
Gambar 3. 2 Wiring Diagram Alat	44
Gambar 3. 3 Rangkaian Sumber daya dengan ESP32.....	46
Gambar 3. 4 Rangkaian DHT22 dengan ESP32	48
Gambar 3. 5 Rangkaian MQ-135 dengan ESP32	50
Gambar 3. 6 Rangkaian PMS5003 dengan ESP 32.....	51
Gambar 3. 7 Rangkaian LCD I2C dengan ESP32.....	53
Gambar 3. 8 Rangkaian Buzzer dengan ESP32	54
Gambar 3. 9 Rangkaian LED WS2812 dengan ESP32.....	56
Gambar 3. 10 Desain 3D Ukuran Alat	57
Gambar 3. 11 Desain 3D Tampak Samping.....	58
Gambar 3. 12 Flowchart Sistem	59
Gambar 4. 1 Desain 3D Perancangan Mekanik.....	66
Gambar 4. 2 Posisi Penempatan Komponen	67
Gambar 4. 3 Perancangan PCB	68
Gambar 4. 4 Program Kalibrasi Sensor MQ135 untuk Pengukuran CO ₂	71
Gambar 4. 5 Konfigurasi MQ135 untuk Pengukuran CO ₂	72
Gambar 4. 6 Konfigurasi PMS5003	74
Gambar 4. 7 Konfigurasi DHT22	75

Gambar 4. 8 Konfigurasi LCD16X2 I2C	76
Gambar 4. 9 Konfigurasi Buzzer	77
Gambar 4. 10 Konfigurasi LED	78

DAFTAR TABEL

Tabel 2- 1 Keterangan Kategori Konsentrasi CO ₂	11
Tabel 2- 2 Keterangan Konsentrasi PM 2.5 di udara	12
Tabel 2- 3 Nilai ISPU	13
Tabel 2- 4 Keterangan Pin DHT22.....	19
Tabel 2- 5 Spesifikasi DHT22	20
Tabel 2- 6 Keterangan Pin PMS5003	22
Tabel 2- 7 Spesifikasi PMS5003	23
Tabel 2- 8 Keterangan Pin MQ-135	24
Tabel 2- 9 Spesifikasi MQ-135	25
Tabel 2- 10 Titik potong Karbon Dioksida berdasarkan Datasheet MQ135.....	26
Tabel 2- 11 Titik potong pada Kelembapan 33%RH	27
Tabel 2- 12 Titik potong pada Kelembapan 85%RH	27
Tabel 2- 13 Keterangan Pin Buzzer	29
Tabel 2- 14 Spesifikasi Buzzer.....	29
Tabel 2- 15 Keterangan Pin LED WS281	31
Tabel 2- 16 Spesifikasi LED WS2812	31
Tabel 2- 17 Keterangan Pin LCD I2C	33
Tabel 2- 18 Spesifikasi LCD I2C	34
Tabel 2- 19 Keterangan Pin TP 4056	35
Tabel 2- 20 Spesifikasi TP4056	35
Tabel 2- 21 Keterangan Pin MT3608.....	37
Tabel 2- 22 Spesifikasi MT3608	37
Tabel 2- 23 Keterangan Pin LP 403040	39
Tabel 2- 24 Spesifikasi LP 403040	39
Tabel 3- 1 Konfigurasi Rangkaian Sumber daya dengan ESP32	47
Tabel 3- 2 Konfigurasi Rangkaian DHT22 dengan ESP32.....	49
Tabel 3- 3 Konfigurasi Rangkaian MQ-135 dengan ESP32	51
Tabel 3- 4 Konfigurasi Rangkaian PMS5003 dengan ESP32	52
Tabel 3- 5 Konfigurasi Rangkaian LCD I2C dengan ESP32	54
Tabel 3- 6 Konfigurasi Rangkaian Buzzer dengan ESP32.....	55

Tabel 3- 7 Konfigurasi Rangkaian LED WS2812 dengan ESP32	57
Tabel 4- 1 Bahan Pembuatan Tugas Akhir.....	63
Tabel 4- 2 Alat Yang Digunakan	64
Tabel 4- 3 Parameter dan hasil kalibrasi sensor MQ135.....	71
Tabel 5- 1 Alat Pembanding	82
Tabel 5- 2 Pengujian Sensor MQ135	83
Tabel 5- 3 Pengujian Sensor PMS5003.....	85
Tabel 5- 4 Pengujian Sensor DHT22	86
Tabel 5- 5 Pengujian Output Sistem.....	87
Tabel 5- 6 Konsumsi Arus Komponen Berdasarkan Datasheet	89
Tabel 5- 7 Keterangan Data 1	92
Tabel 5- 8 Table hasil pembacaan sensor pada Data 1.....	93
Tabel 5- 9 Keterangan Data 2.....	93
Tabel 5- 10 Tabel hasil pembacaan sensor pada Data 2.....	94
Tabel 5- 11 Rekapitulasi perbandingan Data 1 dan Data 2	94
Tabel 5- 12 Keterangan Data 3.....	95
Tabel 5- 13 Tabel hasil pembacaan sensor pada Data 3.....	96
Tabel 5- 14 Keterangan Data 4.....	96
Tabel 5- 15 Tabel hasil pembacaan sensor pada Data 4.....	96
Tabel 5- 16 Rekapitulasi perbandingan Data 3 dan Data 4	97
Tabel 5- 17 rekapitulasi rata-rata hasil pembacaan sensor	98

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Program Rancang Bangun Alat di Arduino Ide.....	106
Lampiran 2 Datasheet MQ-135.....	118
Lampiran 3 Datasheet PMS5003.....	119
Lampiran 4 Datasheet DHT22	120
Lampiran 5 Proses Pembuatan	120
Lampiran 6 Data 1 (Ruangan Tertutup Tanpa Orang)	121
Lampiran 7 Data 2 (Ruangan Tertutup Dengan 3 Orang Merokok).....	123
Lampiran 8 Data 3 (Tepi Jalan Raya dengan Lalu Lintas Padat).....	124
Lampiran 9 Data 4 (Jogging Track Undip)	126
Lampiran 10 Dokumentasi Pengambilan Data.....	128

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Polusi udara merupakan salah satu ancaman paling serius terhadap kesehatan manusia di tingkat global. Berbagai data menunjukkan bahwa polusi udara menempati posisi sebagai penyebab kematian terbesar kedua di dunia setelah kebiasaan merokok, dengan estimasi mencapai sekitar 7 juta kematian setiap tahunnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa kualitas udara yang buruk tidak hanya berdampak pada lingkungan, tetapi juga memberikan konsekuensi signifikan terhadap kesehatan masyarakat. [1]

Selain berdampak pada kesehatan, polusi udara juga berkontribusi terhadap kerusakan lingkungan, khususnya melalui fenomena efek rumah kaca. Efek ini terjadi akibat meningkatnya konsentrasi karbon dioksida (CO_2) dan gas rumah kaca lainnya di atmosfer. Peningkatan konsentrasi CO_2 terutama disebabkan oleh aktivitas pembakaran bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, serta bahan organik lainnya yang melampaui kapasitas alami tumbuhan dan lautan dalam menyerap gas tersebut. Akibatnya, radiasi panas yang dipantulkan oleh permukaan bumi semakin banyak terperangkap di atmosfer. Semakin tinggi konsentrasi gas rumah kaca, semakin besar pula panas matahari yang tertahan di permukaan bumi, sehingga memicu peningkatan suhu global. [2]

Gas-gas pencemar di udara umumnya tidak dapat diamati secara langsung oleh indera penglihatan manusia. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara secara real-time menjadi suatu kebutuhan yang sangat penting. Pengukuran berbagai parameter lingkungan seperti karbon dioksida (CO_2), suhu, kelembapan, serta partikulat debu halus ($\text{PM}_{2.5}$) secara terintegrasi mampu memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai kondisi kualitas udara. Informasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat agar lebih peduli terhadap kondisi lingkungan, khususnya kualitas udara di sekitar aktivitas sehari-hari.

Dalam upaya melakukan pengukuran tersebut, penggunaan sensor yang tepat menjadi faktor utama. Sensor MQ-135 dapat dimanfaatkan untuk mendeteksi gas CO_2 , sementara sensor PMS5003 digunakan untuk mengukur konsentrasi

partikulat debu halus PM2.5. Selain itu, sensor DHT22 berfungsi untuk mengukur parameter suhu dan kelembapan udara. Seluruh sensor tersebut dapat diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 yang memiliki kemampuan komputasi dan konektivitas yang baik. Pemanfaatan ESP32 memungkinkan pengembangan sistem pemantauan kualitas udara yang praktis dan efisien, di mana data dari berbagai sensor dapat diakuisisi secara kontinu dan ditampilkan secara langsung (real-time).

Dalam sistem yang dirancang, data yang diperoleh merupakan hasil pembacaan dari berbagai parameter kualitas udara, meliputi konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂), partikulat debu halus (PM2.5), suhu, serta kelembapan udara yang diukur menggunakan sensor-sensor yang telah terpasang. Data tersebut kemudian diproses oleh mikrokontroler sebagai pusat kendali sistem untuk menghasilkan informasi yang terintegrasi dan mudah dipahami.

Selanjutnya, hasil pengukuran akan ditampilkan secara real-time melalui layar LCD 16x2 I2C sebagai media visual utama yang menyajikan nilai parameter lingkungan secara numerik. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan LED WS2812 yang berfungsi sebagai indikator visual berbasis warna untuk menunjukkan tingkat kualitas udara, serta buzzer sebagai indikator peringatan dini (alarm) apabila parameter yang terukur melebihi ambang batas yang telah ditentukan. Dengan adanya kombinasi tampilan visual dan peringatan suara, sistem ini diharapkan mampu memberikan informasi yang cepat, jelas, dan responsif terhadap kondisi kualitas udara di lingkungan sekitar.

Dengan adanya sistem pemantauan kualitas udara, diharapkan mampu memberikan peringatan dini secara cepat dan akurat terhadap kondisi lingkungan yang berpotensi berbahaya. Hal ini menjadi langkah preventif dalam mengurangi risiko terjadinya berbagai penyakit pernapasan akibat paparan polusi udara. Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis tertarik untuk mengangkat tugas akhir dengan judul “RANCANG BANGUN SISTEM PERINGATAN DINI KUALITAS UDARA PORTABEL BERBASIS ESP32 MENGGUNAKAN SENSOR MQ-135, PMS5003, DAN DHT22”. Melalui penelitian ini, penulis bertujuan untuk merancang dan mengembangkan suatu sistem peringatan dini yang mampu menjadi solusi dalam pemantauan kualitas udara secara berkelanjutan, serta memberikan

informasi yang akurat dan mudah diakses oleh pengguna. Sistem yang dikembangkan diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya menjaga kualitas udara demi kesehatan dan kelestarian lingkungan.

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana merancang sistem pemantauan kualitas udara portable berbasis ESP32?
2. Bagaimana mengintegrasikan sensor MQ-135, PMS5003, dan DHT22?
3. Bagaimana menentukan ambang batas parameter kualitas udara dan menghasilkan peringatan dini berdasarkan data sensor?
4. Bagaimana sistem menampilkan informasi kualitas udara secara real-time?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Berdasarkan perumusan masalah yang telah ditetapkan, tujuan khusus dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun sistem peringatan dini kualitas udara portable berbasis ESP32.
2. Mengintegrasikan sensor MQ-135, PMS5003, dan DHT22 pada sistem berbasis ESP32 untuk memperoleh data kualitas udara secara real-time, serta mengetahui tingkat kesesuaian pembacaan sensor terhadap alat ukur komersial.
3. Mengimplementasikan ambang batas parameter kualitas udara sebagai acuan sistem peringatan dini berbasis LED WS2812 dan buzzer.
4. Menampilkan dan mengirimkan informasi kualitas udara secara real-time melalui media yang tersedia.

1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Bagi Penulis

Penelitian ini menjadi sarana bagi penulis untuk mengimplementasikan ilmu yang telah diperoleh selama perkuliahan ke dalam bentuk nyata berupa perancangan sistem peringatan dini kualitas udara portabel berbasis ESP32. Selain itu, penulis memperoleh pengalaman dalam mengintegrasikan sensor MQ-135, PMS5003, dan DHT22, serta melakukan proses perancangan, pengujian, dan

analisis sistem secara langsung. Penelitian ini juga dapat meningkatkan kemampuan penulis dalam pemecahan masalah serta penyusunan karya ilmiah.

1.4.2 Bagi Mahasiswa dan Pembaca

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dan sumber pembelajaran bagi mahasiswa dan pembaca dalam memahami konsep sistem tertanam (embedded system), khususnya dalam pengembangan alat pemantau kualitas udara berbasis mikrokontroler. Selain itu, penelitian ini memberikan wawasan mengenai cara kerja dan integrasi sensor gas, partikulat, suhu, dan kelembapan dalam satu sistem yang bekerja secara real-time. Dengan demikian, penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan penelitian selanjutnya yang lebih inovatif dan aplikatif.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup permasalahan dibatasi sebagai berikut:

1. Sistem yang dirancang hanya melakukan pengukuran parameter kualitas udara yang meliputi karbon dioksida (CO_2), suhu, kelembapan, serta partikulat debu halus ($\text{PM}_{2.5}$).
2. Pengolahan data dilakukan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali sistem.
3. Hasil pengukuran ditampilkan secara lokal melalui layar LCD 16x2 I2C tanpa adanya penyimpanan data jangka panjang.
4. Sistem tidak dilengkapi dengan konektivitas internet (non-IoT), sehingga tidak mendukung pemantauan jarak jauh, penyimpanan berbasis cloud, maupun notifikasi melalui web atau aplikasi.
5. Sumber daya listrik sistem hanya menggunakan baterai tipe 403040 tanpa adanya integrasi dengan sumber daya eksternal lainnya.
6. Kalibrasi sensor MQ-135 dilakukan berdasarkan kurva karakteristik datasheet menggunakan metode regresi power, sedangkan sensor PMS5003 dan DHT22 menggunakan pengaturan standar dari masing-masing sensor.
7. Perancangan mekanik hanya difokuskan pada fungsi proteksi perangkat dengan menggunakan casing standar, tanpa analisis desain ergonomis atau ketahanan lingkungan secara mendalam.

8. Pengujian sistem dilakukan pada empat titik lokasi dengan kondisi lingkungan tertentu, dengan durasi pengujian selama 25 menit dan interval pengambilan data setiap 5 menit pada masing-masing lokasi, sehingga diperoleh 5 data pengukuran per lokasi yang masih terbatas untuk mewakili kondisi kualitas udara secara representatif.
- Sistematika Penulisan Laporan Tugas Akhir

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini memiliki sistematika penyusunan laporan agar dapat memaksimalkan pembahasan yang disampaikan dan penyusunan Tugas Akhir ini menjadi lebih tersusun, terarah, terstruktur, jelas, dan baik. Sistematika penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

HALAMAN JUDUL

HALAMAN PENGESAHAN

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

ABSTRAK

ABSTRACT

HALAMAN PERSEMBAHAN

KATA PENGANTAR

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR LAMPIRAN

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas latar belakang perancangan Tugas Akhir, identifikasi serta perumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, metode penyusunan, serta sistematika penulisan Tugas Akhir.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini membahas tinjauan pustaka serta landasan teori yang digunakan sebagai dasar dan acuan dalam penyusunan Tugas Akhir.

BAB III PERANCANGAN TUGAS AKHIR

Bab ini menjelaskan tahapan perancangan sistem yang meliputi diagram blok alat, wiring diagram, prinsip kerja alat, serta flowchart pengoperasian sistem.

BAB IV PEMBUATAN ALAT

Bab ini membahas proses pembuatan alat yang meliputi tahap perakitan perangkat, implementasi sistem, serta integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak hingga alat dapat berfungsi sesuai dengan perancangan yang telah ditetapkan.

BAB V PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

Bab ini membahas parameter-parameter yang diukur beserta nilai hasil pengujian. Selain itu, dijelaskan pula metode dan jenis pengujian yang dilakukan, serta analisis terhadap hasil pengukuran. Analisis tersebut dilakukan dengan membandingkan data hasil pengujian dengan parameter yang telah ditetapkan guna memastikan kinerja alat sesuai dengan tujuan penelitian.

BAB VI PENUTUP

Pada Bab ini menyajikan kesimpulan yang diperoleh dari hasil simulasi alat serta memberikan saran untuk pengembangan lebih lanjut.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sebagai dasar dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis melakukan studi literatur terhadap berbagai penelitian yang berkaitan dengan sensor-sensor kualitas udara. Beberapa penelitian yang relevan dijadikan sebagai bahan referensi dan pertimbangan dalam pengembangan sistem.

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ega Julia Mentari dengan judul “Prototype Alat Pembersih Udara Dari Debu dan Asap Rokok di Ruangan Berbasis Logika Fuzzy Dengan Sistem Notifikasi Alarm”, sistem yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266 dengan dukungan sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas, sensor debu GP2Y1010AU0F untuk mendeteksi partikulat, serta sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembapan, di mana sistem ini dirancang untuk mendeteksi keberadaan asap rokok dan debu di dalam ruangan dan secara otomatis mengaktifkan proses penyaringan udara menggunakan exhaust fan berdasarkan aturan kontrol logika fuzzy, serta dilengkapi buzzer sebagai notifikasi alarm dan pengharum ruangan untuk meningkatkan kenyamanan setelah proses penyaringan selesai; hasil pengujian menunjukkan bahwa alat mampu bekerja dengan baik dalam mendeteksi kondisi udara berdasarkan ambang batas tertentu seperti gas >150 ppm dan debu >200 ppm, serta memberikan respon otomatis berupa aktivasi kipas, buzzer, dan sistem penyaring udara, sekaligus menampilkan informasi kondisi udara melalui LCD secara real-time sesuai dengan rule logika fuzzy, sehingga alat ini berpotensi digunakan sebagai solusi efektif dalam menjaga kualitas udara di dalam ruangan [3].
2. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Rizky Faradi dkk. dengan judul “Pengukuran Kualitas Udara Menggunakan Sensor MQ-135 dan DHT11”, sistem yang dikembangkan berupa alat pengukuran kualitas udara dengan memanfaatkan sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas polutan

seperti CO dan CO₂ serta sensor DHT11 untuk mengukur suhu dan kelembapan udara, di mana data hasil pembacaan sensor diproses oleh mikrokontroler Arduino dan ditampilkan melalui LCD secara langsung sebagai informasi kondisi udara di lingkungan sekitar. Sistem ini dirancang untuk memantau kualitas udara berdasarkan parameter konsentrasi gas (PPM), suhu, dan kelembapan, serta mengklasifikasikan kondisi udara ke dalam kategori tertentu seperti “Aman” dan “Berbahaya” untuk CO₂ serta beberapa kategori ISPU untuk CO. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat mampu bekerja dengan baik dalam mendeteksi tingkat pencemaran udara dan menampilkan data secara real time, sehingga dapat membantu masyarakat dalam mengetahui kondisi kualitas udara dan meningkatkan kesadaran terhadap dampak polusi terhadap Kesehatan. [4]

3. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Veronika Asri T., Khoirul Warits, dan Muh. Nur Irfan dengan judul “Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis IoT dengan Sensor MQ-135 dan DHT22”, sistem yang dikembangkan bertujuan untuk memantau kualitas udara secara real time menggunakan sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas berbahaya dan DHT22 untuk mengukur suhu serta kelembapan. Data hasil pengukuran diproses dan dikirimkan melalui sistem IoT serta ditampilkan kepada pengguna melalui platform Telegram sebagai media notifikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan informasi kondisi udara secara akurat serta notifikasi status kualitas udara (baik atau buruk), sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pemantauan lingkungan secara praktis dan efisien [5].

Berdasarkan tinjauan terhadap penelitian-penelitian di atas, dapat disimpulkan bahwa sistem pemantauan kualitas udara berbasis sensor MQ-135, PMS5003, dan DHT22 dengan mikrokontroler ESP32 belum banyak dikembangkan secara terintegrasi dalam satu perangkat portabel yang dilengkapi sistem peringatan dini secara lokal. Oleh karena itu, penelitian ini hadir sebagai pengembangan yang menggabungkan ketiga sensor tersebut dalam satu sistem portabel berbasis baterai

dengan indikator peringatan berupa buzzer dan LED WS2812, serta menampilkan data secara real-time melalui LCD 16×2.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kualitas Udara

Udara merupakan salah satu faktor penting dalam menunjang kehidupan. Namun, seiring dengan meningkatnya pembangunan perkotaan dan pertumbuhan sektor industri, kualitas udara mengalami penurunan. Aktivitas industri yang semakin berkembang serta meningkatnya jumlah kendaraan bermotor menjadi penyebab utama terjadinya pencemaran udara, sehingga kondisi udara menjadi kurang sehat bagi kehidupan. Pencemaran udara dapat diartikan sebagai menurunnya kualitas udara akibat masuknya zat pencemar, yang menyebabkan perubahan komposisi udara hingga tidak lagi sesuai dengan fungsinya sebagai udara yang layak untuk dihirup. [6]

Seiring dengan perkembangan zaman dan meningkatnya kebutuhan manusia, kualitas udara mengalami penurunan yang signifikan sehingga memicu terjadinya pencemaran udara. Sumber pencemaran umumnya berasal dari berbagai aktivitas manusia, seperti emisi hasil pembakaran sampah, transportasi, serta kegiatan industri yang menghasilkan zat berbahaya ke atmosfer. Udara tercemar didefinisikan sebagai udara yang mengandung zat, energi, atau komponen lain yang tidak diinginkan dan dapat mengganggu keseimbangan lingkungan. Kandungan gas di udara sangat beragam, di antaranya terdapat gas-gas yang berpotensi membahayakan kesehatan. Salah satu dampak kesehatan yang sering terjadi akibat pencemaran udara adalah gangguan pada sistem pernapasan, seperti infeksi saluran pernapasan. Apabila kualitas udara di suatu lingkungan berada dalam kondisi buruk, maka hal tersebut dapat menurunkan tingkat kesehatan dan kenyamanan lingkungan. Oleh karena itu, kualitas udara perlu memenuhi standar kesehatan tertentu, sehingga diperlukan upaya pengendalian dan penanggulangan untuk menjaga serta meningkatkan kualitas udara agar tetap stabil dan layak bagi kehidupan. [7]

2.2.2 Karbon Dioksida (CO₂)

Kualitas udara merupakan faktor penting yang berpengaruh terhadap kesehatan dan produktivitas manusia. Sebagian besar aktivitas manusia berlangsung di lingkungan tertutup sehingga paparan terhadap pencemar udara menjadi perhatian utama dalam kesehatan masyarakat. Tingkat pencemaran udara dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti sumber polutan, kondisi lingkungan, karakteristik bangunan, serta aktivitas manusia yang berlangsung di dalamnya. Dalam kondisi tertentu, konsentrasi polutan di lingkungan tertutup dapat lebih tinggi dibandingkan dengan udara luar.

Salah satu indikator utama dalam menilai kualitas udara adalah konsentrasi karbon dioksida (CO₂). Gas ini dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar fosil dan aktivitas respirasi manusia. Peningkatan kadar CO₂ dapat menurunkan kualitas udara serta berkontribusi terhadap perubahan iklim dan efek rumah kaca. Selain CO₂, kualitas udara juga dipengaruhi oleh keberadaan polutan lain seperti Volatile Organic Compounds (VOCs), partikulat, aldehida, bakteri, dan jamur. Berbagai polutan tersebut umumnya berasal dari emisi kendaraan, penggunaan bahan kimia, material bangunan, serta aktivitas pembersihan.

Faktor lingkungan dan aktivitas manusia memiliki peranan besar dalam menentukan tingkat pencemaran udara. Lokasi yang berdekatan dengan sumber emisi, penggunaan material tertentu, serta kurangnya ventilasi dapat meningkatkan konsentrasi polutan di udara. Oleh karena itu, diperlukan upaya pemantauan dan pengelolaan kualitas udara secara berkelanjutan guna menciptakan lingkungan yang sehat, aman, dan nyaman bagi manusia.[8]

Dalam penelitian ini, sensor MQ-135 dimanfaatkan untuk mengestimasi konsentrasi CO₂ di udara berdasarkan kurva karakteristik sensor yang diperoleh dari datasheet. Proses konversi nilai resistansi sensor menjadi konsentrasi CO₂ dalam satuan PPM dilakukan menggunakan pendekatan regresi power dengan persamaan $PPM = a \times (R_s/R_o)^b$, di mana nilai koefisien a dan b diperoleh melalui digitisasi kurva karakteristik datasheet MQ-135 menggunakan aplikasi WebPlotDigitizer.

Berikut adalah klasifikasi konsentrasi CO₂ di udara beserta dampaknya

Tabel 2- 1 Keterangan Kategori Konsentrasi CO₂

Kategori (PPM)	Keterangan
0 – 50 PPM	Kadar normal di area terbuka
50 – 100 PPM	Umumnya ditemukan di ruangan dengan ventilasi yang baik
100 – 1000 PPM	Menunjukkan kualitas udara yang mulai menurun dan bisa menyebabkan rasa kantuk ringan.
1.000 – 2.000 PPM	Kualitas udara yang cukup buruk, memicu sakit kepala, rasa kantuk berat, serta suasana udara terasa pengap dan tidak nyaman; dapat juga menurunkan konsentrasi, meningkatnya detak jantung, serta menyebabkan mual ringan,
>3.000 PPM	Mencerminkan kondisi udara yang sangat buruk dan tidak normal. Paparan dalam kadar ini bisa menimbulkan efek toksik atau 14
>5.000 PPM	Kadar yang sangat berbahaya karena dapat menyebabkan kekurangan oksigen secara serius.

2.2.3 Particulate Matter 2.5 (PM2.5)

Particulate Matter 2.5 (PM2.5) merupakan partikel halus yang tersuspensi di udara dengan diameter aerodinamis kurang dari atau sama dengan 2,5 mikrometer (μm). Partikel ini berasal dari berbagai sumber, baik alami maupun antropogenik, seperti proses pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor, kegiatan industri, pembakaran biomassa, serta reaksi kimia di atmosfer yang menghasilkan senyawa seperti sulfat, nitrat, amonia, logam berat, karbon, dan aerosol organik. Ukurannya yang sangat kecil menjadikan PM2.5 sebagai salah satu parameter kualitas udara yang paling berbahaya, karena partikel ini dapat menembus sistem pernapasan bagian atas dan masuk langsung ke dalam alveoli paru-paru[9].

Paparan PM2.5 secara terus-menerus dapat menyebabkan inflamasi, kerusakan jaringan paru, serta penurunan sistem imun sehingga meningkatkan risiko terjadinya berbagai penyakit pernapasan seperti pneumonia, asma, dan bronkitis

kronis [9]. Selain dampak pada sistem pernapasan, PM2.5 juga berpotensi masuk ke dalam aliran darah dan memicu gangguan kardiovaskular [10]. Oleh karena itu, pemantauan konsentrasi PM2.5 secara real-time menjadi langkah penting dalam upaya perlindungan kesehatan masyarakat dari dampak polusi udara.

Salah satu faktor risiko yang berkontribusi terhadap peningkatan kasus pneumonia adalah paparan polusi udara, terutama Particulate Matter (PM2.5). PM2.5 merupakan partikel halus yang berasal dari proses pembakaran dan campuran berbagai senyawa kimia seperti sulfat, nitrat, amonia, logam berat, karbon, serta aerosol organik. Ukurannya yang sangat kecil memungkinkan partikel ini masuk hingga ke alveoli paru-paru dan memicu gangguan pada sistem pernapasan. Paparan PM2.5 secara terus-menerus dapat menyebabkan inflamasi, kerusakan jaringan paru, serta penurunan sistem imun sehingga meningkatkan risiko terjadinya infeksi pneumonia. [11]

Tabel 2- 2 Keterangan Konsentrasi PM 2.5 di udara

Konsentrasi PM2.5	Keterangan
0 – 15.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Baik
15.6 – 55.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sedang
55.5 – 150.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Tidak sehat
150.5 – 250.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sangat Tidak Sehat
>250.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Berbahaya

2.2.4 Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) adalah angka yang tidak mempunyai satuan yang menggambarkan kondisi mutu udara ambien di lokasi tertentu, yang didasarkan kepada dampak terhadap kesehatan manusia, nilai estetika, dan makhluk hidup lainnya [12]. ISPU ditetapkan melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 14 Tahun 2020 sebagai pengganti Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 45 Tahun 1997, dengan penambahan dua parameter baru yaitu PM2.5 dan Hidrokarbon (HC) [12]. Saat ini, perhitungan ISPU mencakup tujuh parameter pencemar udara, yaitu PM10, PM2.5, NO₂, SO₂, CO, O₃, dan HC [12].

Konversi konsentrasi PM2.5 (dalam $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ke nilai ISPU dilakukan menggunakan persamaan interpolasi linear sebagai berikut [12]:

$$I = ((I_a - I_b) / (X_a - X_b)) \times (X_x - X_b) + I_b$$

$$I = \frac{(I_a - I_b)}{(X_a - X_b)} (X_x - X_b) + I_b$$

- **I** = ISPU terhitung
- **I_a** = ISPU batas atas
- **I_b** = ISPU batas bawah
- **X_a** = Konsentrasi ambien batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- **X_b** = Konsentrasi ambien batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- **X_x** = Konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

di mana I adalah ISPU terhitung, I_a adalah ISPU batas atas, I_b adalah ISPU batas bawah, X_a adalah konsentrasi ambien batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), X_b adalah konsentrasi ambien batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), dan X_x adalah konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [12].

Tabel 2- 3 Nilai ISPU

Nilai ISPU	Kategori	Rentang PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0 – 50	Baik	0 – 15,5
51 – 100	Sedang	15,6 – 55,4
101 – 200	Tidak Sehat	55,5 – 150,4
201 – 300	Sangat Tidak Sehat	150,5 – 250,4
301 – 500	Berbahaya	> 250,4

Dalam penelitian ini, nilai ISPU PM2.5 dihitung secara real-time oleh mikrokontroler ESP32 berdasarkan data konsentrasi PM2.5 yang diperoleh dari sensor PMS5003, kemudian ditampilkan pada LCD 16×2 sebagai informasi kualitas udara yang mudah dipahami oleh pengguna,

2.2.5 Suhu dan Kelembapan

Temperatur suhu yang terlalu rendah dapat merugikan manusia, sehingga manusia mengalami gangguan kesehatan seperti hypotermia, dan sebaliknya apa bila cuaca panas dapat mengakibatkan dehidrasi sampai dengan heat stroke. Oleh karena itu batas aman temperatur suhu yang dianjurkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan RI No 1077 tahun 2011 bahwasnya suhu yang baik berada pada rentang 18 -30°C. [13]

Kelembapan udara adalah banyaknya kandungan uap air di udara (atmosfer). Udara atmosfer adalah campuran dari udara kering dan uap air. Kelembapan udara ditentukan oleh banyaknya uap air dalam udara. Kalau tekanan uap air dalam udara mencapai maksimum . maka mulailah terjadi pengembunan. Temperature dimana terjadi pengembunan disebut titik embun. Tingkat kelembapan bervariasi menurut suhu. Semakin hangat suhu udara, semakin banyak uap air yang dapat ditampung. Semakin rendah suhu udara, semakin sedikit jumlah uap air yang dapat ditampung. Jadi pada siang hari yang panas dapat menjadi lebih lembab dibandingkan dengan hari yang dingin. Kemampuan udara untuk menampung uap air dipengaruhi oleh suhu. Jika udara jenuh uap air dinaikkan suhunya, maka udara tersebut menjadi tidak jenuh uap air. Sebaliknya, jika udara tidak jenuh uap air suhunya diturunkan dan kerapatan airnya dijaga konstan, maka udara tersebut akan mendekati kondisi jenuh uap air. Jadi ketika udara hangat naik dan mulai mendingin, lama kelamaan akan kehilangan kemampuan untuk menahan /menampung uap air. [6]

Dampak dari kelembapan persentase perhitungan yang terukur apabila tinggi maupun rendah dapat menyebabkan suburnya pertumbuhan mikroorganisme. Baiknya persentase kelembapan yang dianjurkan oleh standar Peraturan Menteri Kesehatan RI No 1077 tahun 2011 berada pada rentang nilai >40%, Sebaliknya, apabila konsentrasi kelembapan melebihi 60%, kondisi tersebut dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme seperti jamur dan bakteri yang berpotensi membahayakan kesehatan penghuni ruangan. Dalam penelitian ini, sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara secara real-time sebagai data pendukung dalam proses koreksi pembacaan sensor MQ-135 terhadap pengaruh suhu dan kelembapan lingkungan.

2.2.6 ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis System on Chip (SoC) yang mengintegrasikan kemampuan komunikasi nirkabel berupa Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n dan Bluetooth versi 4.2 dalam satu chip. Perangkat ini dilengkapi dengan prosesor berperforma tinggi, memori internal, serta antarmuka General Purpose Input Output (GPIO) yang mendukung berbagai kebutuhan pengembangan sistem tertanam (embedded system). Integrasi fitur komunikasi dan pemrosesan data tersebut menjadikan ESP32 banyak digunakan pada implementasi sistem Internet of Things (IoT), khususnya pada aplikasi pemantauan dan pengendalian secara real-time. Selain itu, ESP32 mampu mendukung konektivitas jaringan Wi-Fi secara langsung tanpa memerlukan modul tambahan, sehingga desain perangkat menjadi lebih ringkas, efisien, dan hemat daya. [14]

Board ESP32 tersedia dalam beberapa varian konfigurasi GPIO, di antaranya versi 30 GPIO dan 36 GPIO yang memiliki fungsi operasional serupa. Pada penelitian ini digunakan varian 30 GPIO karena memiliki tambahan dua pin Ground (GND) yang mempermudah proses integrasi perangkat keras. Seluruh pin pada board telah dilengkapi label identifikasi sehingga memudahkan proses perancangan dan pengkabelan sistem. Selain itu, board ESP32 telah dilengkapi antarmuka USB to UART yang mendukung proses pemrograman menggunakan perangkat lunak pengembangan seperti Arduino IDE. Sumber daya pada board dapat diberikan melalui konektor USB Type-C yang mendukung kemudahan penggunaan serta kompatibilitas dengan berbagai perangkat catu daya modern.[14]

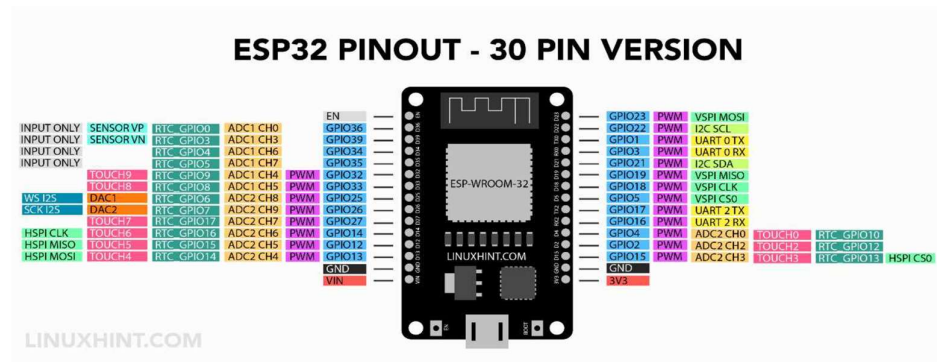
Dalam implementasinya, ESP32 sering digunakan sebagai pusat kendali dalam sistem berbasis sensor. Pada sistem pemantauan kualitas udara, ESP32 dapat mengolah data dari sensor gas seperti MQ-135, sensor partikulat seperti PMS5003, serta sensor suhu dan kelembapan seperti DHT22. Data yang diperoleh kemudian diproses untuk menentukan kondisi lingkungan dan dapat digunakan untuk memberikan peringatan dini kepada pengguna melalui indikator visual maupun audio. Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pusat kendali yang membaca data dari sensor MQ-135 melalui pin ADC (GPIO 32), sensor PMS5003 melalui komunikasi UART (GPIO 16 dan 17), sensor DHT22 melalui pin digital (GPIO 4),

serta mengendalikan LCD 16×2 I2C (GPIO 21 dan 22), LED WS2812 (GPIO 25), dan buzzer (GPIO 19) sebagai output sistem peringatan dini. Sebagai mikrokontroler yang memiliki fitur lengkap dan performa tinggi, ESP32 menjadi salah satu pilihan utama di kalangan pengembang Internet of Things (IoT). Popularitasnya didukung oleh berbagai keunggulan yang mampu memenuhi kebutuhan sistem modern yang efisien dan fleksibel. Beberapa kelebihan utama dari ESP32 antara lain sebagai berikut:

1. ESP32 menggunakan prosesor dual-core Xtensa LX6 dengan kecepatan hingga 240 MHz, sehingga mampu memberikan kinerja yang optimal untuk menjalankan berbagai aplikasi secara simultan.
2. Perangkat ini dilengkapi dengan memori RAM sebesar 520 KB serta memori flash hingga 4 MB, yang memungkinkan pengolahan program dengan tingkat kompleksitas yang cukup tinggi.
3. ESP32 mendukung konektivitas nirkabel berupa Wi-Fi standar 802.11 b/g/n dan Bluetooth Low Energy (BLE), sehingga memungkinkan komunikasi data yang stabil, cepat, dan efisien.
4. Modul ini telah dilengkapi dengan antena Wi-Fi internal, serta mendukung penggunaan antena eksternal untuk meningkatkan kualitas sinyal, khususnya pada komunikasi Bluetooth.
5. Dari sisi pemrograman, ESP32 dapat dikembangkan menggunakan Arduino IDE maupun ESP-IDF yang merupakan framework resmi dari Espressif Systems, sehingga memberikan fleksibilitas bagi pengembang.
6. ESP32 menyediakan banyak pin General Purpose Input Output (GPIO) yang mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti ADC, DAC, PWM, SPI, I2C, dan UART, sehingga memudahkan integrasi dengan berbagai perangkat elektronik.
7. Selain itu, ESP32 juga memiliki fitur hemat energi berupa mode deep sleep yang sangat berguna untuk aplikasi yang membutuhkan konsumsi daya rendah, terutama pada perangkat berbasis baterai.

Dengan berbagai keunggulan yang dimilikinya, ESP32 sangat tepat dimanfaatkan sebagai pusat pengendali dalam beragam sistem berbasis Internet of

Things (IoT). Kemampuannya dalam mengolah data, didukung dengan konektivitas nirkabel yang andal, menjadikannya ideal untuk berbagai aplikasi seperti sistem otomasi rumah pintar, pemantauan lingkungan berbasis sensor, hingga pengembangan teknologi di bidang robotika.



Gambar 2. 1 Board ESP32

ESP32 memiliki beragam pin yang dirancang untuk mendukung berbagai kebutuhan dalam sistem elektronika maupun aplikasi Internet of Things (IoT). Setiap pin memiliki fungsi tertentu yang memungkinkan integrasi dengan berbagai perangkat seperti sensor, aktuator, dan modul komunikasi. Berikut ini adalah penjelasan mengenai susunan pin pada ESP32 :

1. Pin 3V3 – Menyediakan tegangan sebesar 3.3V yang dapat digunakan untuk memberi daya pada sensor atau perangkat eksternal yang membutuhkan tegangan rendah.
2. Pin GND – Berfungsi sebagai ground atau titik referensi tegangan dalam suatu rangkaian elektronika.
3. Pin EN (Enable) – Digunakan untuk mengaktifkan modul ESP32. Jika pin ini diberi logika LOW, maka sistem akan melakukan reset.
4. Pin BOOT – Digunakan untuk menentukan mode booting. Biasanya dihubungkan ke GND saat proses upload program berlangsung.
5. Pin GPIO0 – Merupakan pin input/output digital yang juga berperan dalam pemilihan mode boot.

6. Pin GPIO1 hingga GPIO39 – Merupakan pin digital multifungsi yang dapat digunakan sebagai input maupun output untuk berbagai keperluan seperti membaca sensor, mengontrol perangkat, dan komunikasi antar modul.
7. Pin ADC – Digunakan sebagai input analog untuk membaca sinyal analog dari sensor seperti suhu, gas, atau potensiometer.
8. Pin AREF – Berfungsi sebagai referensi tegangan eksternal untuk meningkatkan akurasi pembacaan sinyal analog.
9. Pin TX0 dan RX0 – Digunakan sebagai jalur komunikasi serial UART utama untuk proses pengiriman (TX) dan penerimaan (RX) data, umumnya terhubung ke komputer.
10. Pin TX2 dan RX2 – Merupakan jalur komunikasi UART tambahan yang digunakan jika dibutuhkan lebih dari satu komunikasi serial.
11. Pin SDA dan SCL – Digunakan untuk komunikasi I2C, biasanya untuk menghubungkan sensor digital atau modul display seperti OLED.
12. Pin SCK, MISO, dan MOSI – Digunakan dalam komunikasi SPI untuk menghubungkan ESP32 dengan perangkat eksternal seperti modul SD card atau sensor berbasis SPI.
13. Pin SCK, SD0, CMD, dan D0–D4 – Merupakan pin khusus untuk komunikasi SDIO yang digunakan pada perangkat penyimpanan seperti kartu SD.
14. Pin DAC1 dan DAC2 – Digunakan sebagai output analog yang mampu mengubah sinyal digital menjadi sinyal analog.
15. Pin VP dan VN – Digunakan sebagai input analog tambahan untuk keperluan pengukuran tegangan.
16. Pin GPIO34 hingga GPIO39 – Merupakan pin input-only (hanya sebagai input) yang dilengkapi dengan fitur internal seperti pull-up dan pull-down untuk menjaga kestabilan sinyal.

2.2.7 DHT 22

DHT22 merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara pada suatu lingkungan, seperti ruangan tertutup atau kubikel. Sensor ini sering dipilih karena memiliki tingkat akurasi yang lebih baik