

HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR SINGKATAN	xiv
INTISARI	xv
ABSTRACT	xvi
BAB I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori	10
2.2.1 Standar Tingkat Konsentrasi CO ₂ dalam Ruang	10
2.2.1.1 Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023	10
2.2.1.2 <i>European Standard EN 13779</i>	12
2.2.1.3 <i>Canada - Residential Indoor Air Quality Guidelines - Carbon Dioxide</i>	13
2.2.1.4 <i>USA - National Institute for Occupational Safety and Health Pocket Guide to Chemical Hazards</i>	14
2.2.1.5 <i>Singapore - SS54:2016</i>	15
2.2.2 Pengembangan <i>Firmware</i> pada <i>Platform ESP32</i>	16
2.2.2.1 Pengembangan <i>Firmware</i>	16
2.2.2.2 <i>I2C</i>	17
2.2.2.3 <i>ESP32 Development Board</i>	25
2.2.2.4 <i>PlatformIO IDE</i>	28
2.2.3 Sensor CO ₂	29

2.2.3.1	Sensor Optik	29
2.2.3.2	Sensor Elektrokimia	34
2.2.4	Sensirion SCD41	40
2.2.5	MQ-135.....	43
2.3	Analisis Perbandingan Metode	43
2.4	Hipotesis.....	47
BAB III Metode Penelitian.....		48
3.1	Alat dan Bahan Tugas akhir	48
3.1.1	Alat Tugas akhir.....	48
3.1.2	Bahan Tugas akhir	48
3.2	Metode yang Digunakan.....	49
3.2.1	Perancangan Perangkat	49
3.2.2	Pengembangan <i>Firmware</i>	51
3.2.2.1	Pengembangan Fungsi Perintah	51
3.2.2.2	Pengembangan Fungsi <i>Cyclic Redundancy Check 8 Bit</i> ..	71
3.2.2.3	Pengembangan Fungsi Penentuan Kualitas Udara	77
3.2.3	Pengujian	80
3.2.4	Keterbatasan Penelitian	81
3.3	Alur Tugas Akhir	82
BAB IV Hasil dan Pembahasan.....		85
4.1	Pengujian Perintah - Perintah pada Sensor SCD41	85
4.1.1	<i>Start Periodic Measurement</i>	87
4.1.2	<i>Read Measurement</i>	89
4.1.3	<i>Stop Periodic Measurement</i>	96
4.1.4	<i>Get Data Ready Status</i>	98
4.1.5	<i>Set Sensor Altitude</i>	103
4.1.6	<i>Get Sensor Altitude</i>	106
4.1.7	<i>Set Ambient Pressure</i>	111
4.1.8	<i>Get Ambient Pressure</i>	114
4.1.9	<i>Set Automatic Self Calibration Enabled</i>	118
4.1.10	<i>Get Automatic Self Calibration Enabled</i>	121
4.1.11	<i>Persist Settings</i>	126
4.1.12	<i>Reinit</i>	128
4.2	Pengujian Komunikasi I2C antara ESP32 dengan SCD41	131
4.2.1	Kondisi <i>Start</i> dan <i>Stop</i>	131
4.2.2	Alamat Sensor.....	135
4.2.3	Bit Data dan ACK/NACK	137
4.2.4	Kecepatan Komunikasi	140
4.2.5	Hasil Pengujian I2C.....	141



4.3	Pengujian Sensor untuk Mengukur Konsentrasi CO ₂	141
4.3.1	Pengujian di Ruang Sekretariat UKM e-Sports UGM	143
4.3.2	Pengujian Kinerja SCD41 dengan MQ-135	146
4.3.3	Pengujian Interval Pengukuran yang Optimal	147
4.3.4	Pengujian di Ruang Container DTETI UGM.....	149
4.3.5	Pengujian di Laboratorium Elektronika Dasar DTETI UGM.....	152
4.3.6	Perbandingan Kualitas Udara di Ketiga Lokasi	155
BAB V	Kesimpulan dan Saran.....	157
5.1	Kesimpulan.....	157
5.2	Saran.....	157
DAFTAR PUSTAKA	159
L.1	<i>Source Code</i>	L-164
L.1.1	<i>Source Code</i> Python untuk <i>Plotting</i> Data CO ₂	L-164

Tabel 2.1	Perbandingan aspek-aspek penelitian	45
Tabel 3.1	Daftar perintah sensor SCD41	53
Tabel 3.2	Keterangan CRC-8 yang digunakan pada SCD41	72
Tabel 4.1	Perbandingan Interval untuk MAE CO ₂ , Daya, dan Skor Terbobot ..	147
Tabel 4.2	Kualitas udara berdasarkan nilai rata-rata tertimbang (8 jam) pada ketiga lokasi, sesuai dengan standar Permenkes	155
Tabel 4.3	Data konsentrasi CO ₂ pada ketiga ruang	155

Gambar 2.1	Arsitektur I2C	18
Gambar 2.2	Kondisi <i>start</i> dalam I2C	20
Gambar 2.3	Kondisi <i>stop</i> dalam I2C	20
Gambar 2.4	<i>Byte</i> pertama setelah prosedur <i>start</i>	22
Gambar 2.5	Alamat 10-bit saat <i>master</i> sebagai <i>transmitter</i>	22
Gambar 2.6	Alamat 10-bit saat <i>master</i> sebagai <i>receiver</i>	23
Gambar 2.7	Gambaran umum ESP32 <i>development board</i>	25
Gambar 2.8	Tata letak pin pada ESP32 <i>development board</i>	27
Gambar 2.9	Tampilan halaman utama PlatformIO pada Visual Studio Code...	28
Gambar 2.10	Skema prinsip kerja sensor NDIR	30
Gambar 2.11	Skema prinsip kerja sensor serat optik	32
Gambar 2.12	Skema prinsip kerja sensor sol-gel optik	33
Gambar 2.13	Skema prinsip kerja sensor berbasis oksida logam	36
Gambar 2.14	Skema prinsip kerja sensor NASICON	37
Gambar 2.15	(a) Lapisan tipis PHMB diletakkan pada <i>metasurface</i> . Skema ini digunakan untuk mendeteksi gas CO ₂ melalui metode interogasi panjang gelombang, (b) Reaksi antara gas CO ₂ dan gugus fungsi yang mengandung amida.	39
Gambar 2.16	Bentuk sensor SCD41	40
Gambar 2.17	Ilustrasi sensor NDIR fotoakustik	41
Gambar 2.18	MQ-135	43
Gambar 3.1	Rangkaian perangkat	49
Gambar 3.2	<i>UML class diagram</i> untuk file <i>header</i>	56
Gambar 3.3	Diagram alir <i>sequence</i> pengiriman	58
Gambar 3.4	<i>Send I2C sequence</i>	59
Gambar 3.5	Diagram alir <i>sequence</i> penulisan <i>offset</i> suhu	60
Gambar 3.6	<i>Write I2C sequence</i>	63
Gambar 3.7	Diagram alir <i>sequence</i> pembacaan	64
Gambar 3.8	<i>Read I2C sequence</i>	66
Gambar 3.9	Diagram alir <i>sequence send and fetch</i>	68
Gambar 3.10	<i>Send command and fetch result I2C sequence</i>	70
Gambar 3.11	Diagram alir fungsi CRC 8-Bit	76
Gambar 3.12	Diagram alir contoh implementasi fungsi-fungsi penentuan kualitas udara	78
Gambar 3.13	Diagram alir penelitian	82
Gambar 4.1	Hasil rangkaian perangkat	87
Gambar 4.2	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>start_periodic _measurement</i>	88
Gambar 4.3	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>read_measurement</i>	90
Gambar 4.4	Tangkapan sinyal penerimaan data dari perintah <i>read _measurement</i>	92
Gambar 4.5	Hasil tampilan <i>serial monitor</i> untuk perintah <i>read_measurement</i>	92
Gambar 4.6	Tangkapan sinyal penerimaan data CO ₂ dari perintah <i>read _measurement</i>	93

Gambar 4.7	Tangkapan sinyal penerimaan data suhu dari perintah <i>read_measurement</i>	94
Gambar 4.8	Tangkapan sinyal penerimaan data suhu dari perintah <i>read_measurement</i>	95
Gambar 4.9	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>stop_periodic_measurement</i>	97
Gambar 4.10	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>get_data_ready_status</i>	99
Gambar 4.11	Tangkapan sinyal penerimaan data dari perintah <i>get_data_ready_status</i>	101
Gambar 4.12	Hasil tampilan <i>serial monitor</i> untuk perintah <i>get_data_ready_status</i>	101
Gambar 4.13	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>set_sensor_altitude</i>	104
Gambar 4.14	Pembacaan sebelum dan sesudah pengaturan ketinggian	105
Gambar 4.15	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>get_sensor_altitude</i>	107
Gambar 4.16	Tangkapan sinyal penerimaan data dari perintah <i>get_sensor_altitude</i>	109
Gambar 4.17	Hasil tampilan <i>serial monitor</i> untuk perintah <i>get_sensor_altitude</i>	110
Gambar 4.18	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>set_ambient_pressure</i>	112
Gambar 4.19	Pembacaan sebelum dan sesudah pengaturan tekanan udara sekitar	114
Gambar 4.20	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>get_ambient_pressure</i>	115
Gambar 4.21	Tangkapan sinyal penerimaan data dari perintah <i>get_ambient_pressure</i>	117
Gambar 4.22	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>set_automatic_self_calibration_enabled</i>	120
Gambar 4.23	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>get_automatic_self_calibration_enabled</i>	122
Gambar 4.24	Tangkapan sinyal penerimaan data dari perintah <i>get_automatic_self_calibration_enabled</i>	124
Gambar 4.25	Hasil tampilan <i>serial monitor</i> untuk perintah <i>get_automatic_self_calibration_enabled</i>	125
Gambar 4.26	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>persist_settings</i>	127
Gambar 4.27	Tangkapan sinyal pengiriman perintah <i>reinit</i>	129
Gambar 4.28	Pengaturan ketinggian sensor sebelum dan sesudah perintah <i>reinit</i>	130
Gambar 4.29	Sinyal pada jalur SDA dan SCL dalam keadaan <i>idle</i> dan saat komunikasi I2C berlangsung.	132
Gambar 4.30	Sinyal I2C untuk kondisi <i>start</i>	133
Gambar 4.31	Sinyal I2C untuk kondisi <i>stop</i>	134
Gambar 4.32	Sinyal I2C yang menunjukkan alamat sensor SCD41 ketika (a) transmisi dan (b) penerimaan.	135
Gambar 4.33	Sinyal I2C ketika tidak ada <i>slave</i> yang terhubung pada <i>master</i>	136
Gambar 4.34	Urutan <i>frame</i> yang berisi 8 bit data dan 1 bit ACK/NACK.	137
Gambar 4.35	Bit NACK yang terbentuk pada komunikasi penerimaan data.	138
Gambar 4.36	Bit NACK yang terbentuk saat perintah tidak dikenali dikirim.	139
Gambar 4.37	Cara 1 bit data dikirim dalam komunikasi I2C.	140
Gambar 4.38	Konsentrasi CO ₂ di Ruang UKM e-Sports UGM pada berbagai hari (lanjut pada halaman berikutnya)	143
Gambar 4.38	Konsentrasi CO ₂ di Ruang UKM e-Sports UGM pada berbagai hari (lanjutan)	144



Gambar 4.39	Ruang Sekretariat UKM e-Sports UGM.....	144
Gambar 4.40	Tingkat Konsentrasi CO ₂ (SCD41) dan IAQ (MQ-135) di LIT ...	146
Gambar 4.41	Konsentrasi CO ₂ di Ruang Container DTETI UGM pada berbagai hari (lanjut pada halaman berikutnya)	149
Gambar 4.41	Konsentrasi CO ₂ di Ruang Container DTETI UGM pada berbagai hari (lanjutan)	150
Gambar 4.42	Ruangan Container DTETI FT UGM	150
Gambar 4.43	Konsentrasi CO ₂ di Laboratorium Elektronika Dasar DTETI UGM pada berbagai hari (lanjut pada halaman berikutnya)	152
Gambar 4.43	Konsentrasi CO ₂ di Laboratorium Elektronika Dasar DTETI UGM pada berbagai hari (lanjutan)	153
Gambar 4.44	Laboratorium Elektronika Dasar DTETI FT UGM	153

DAFTAR SINGKATAN

ADDR	=	<i>Address</i>
ACK	=	<i>Acknowledge</i>
CO ₂	=	Karbon Dioksida
EEPROM	=	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
FT	=	Fakultas Teknik
GPIO	=	<i>General-Purpose Input/Output</i>
IDA	=	<i>Indoor Air</i>
IDE	=	<i>Integrated Development Environment</i>
I ² C	=	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IoT	=	<i>Internet of Things</i>
LSB	=	<i>Least Significant Bit</i>
MA	=	<i>Moving Average</i>
MSB	=	<i>Most Significant Bit</i>
NACK	=	<i>No Acknowledge</i>
NDIR	=	<i>Non-dispersive Infra-red</i>
ppm	=	<i>Parts per million</i>
RAM	=	<i>Random Access Memory</i>
ROM	=	<i>Read-Only Memory</i>
SCL	=	<i>Serial Clock Line</i>
SDA	=	<i>Serial Data Line</i>
TWA	=	<i>Time-Weighted Average</i>
UGM	=	Universitas Gadjah Mada
UKM	=	Unit Kegiatan Mahasiswa