

RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN KUALITAS UDARA BERBASIS *LOW-COST SENSOR*

HAIKAL ANANDIRA SYAFEI



**GEOFISIKA DAN METEOROLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
Bogor Indonesia

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul “ RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN KUALITAS UDARA BERBASIS *LOW-COST SENSOR*” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, April 2026

Haikal Anandira Syafei
G2401221081

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



ABSTRAK

HAIKAL ANANDIRA SYAFEI. Rancang Bangun Sistem Pengukuran Kualitas Udara Berbasis *Low-Cost Sensor*. Dibimbing oleh IDUNG RISDIYANTO.

Polusi udara menjadi isu lingkungan yang semakin signifikan di wilayah perkotaan akibat pesatnya urbanisasi, aktivitas industri, dan pertumbuhan penduduk. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara secara kontinu menjadi sangat penting untuk menyediakan informasi yang tepat waktu guna mendukung pengelolaan lingkungan dan perlindungan kesehatan masyarakat. Namun, instrumen pemantauan konvensional berbiaya tinggi dan memerlukan infrastruktur yang kompleks, sehingga membatasi penerapannya di banyak lokasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara portabel dan berbiaya rendah dengan teknologi *Internet of Things* (IoT). Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32-C3 yang terintegrasi dengan sensor multi-parameter ZPHS01B untuk mengukur PM_{2.5}, CO, O₃, NO₂, suhu, dan kelembaban relatif. Data pengukuran diproses oleh mikrokontroler dan dikirimkan melalui koneksi internet ke server, disimpan dan ditampilkan melalui *dashboard* pemantauan secara *real-time*. Kinerja sensor dievaluasi melalui kolokasi selama 14 hari dengan alat referensi di Jakarta Mobile Station (JMS). Analisis statistik menggunakan korelasi, bias, root mean square error (RMSE), dan metode Bland–Altman menunjukkan bahwa sensor memiliki kesesuaian yang tinggi untuk parameter meteorologi seperti suhu dan kelembaban, sementara pengukuran PM_{2.5} menunjukkan korelasi yang lebih rendah dan gas CO, O₃, dan NO₂ menunjukkan deviasi yang lebih besar. Metode kalibrasi tambahan masih diperlukan untuk meningkatkan akurasi pengukuran polutan dari sensor berbiaya rendah.

Kata Kunci: internet of things, mikrokontroler, pemantauan kualitas udara, polutan, sensor berbiaya rendah.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



ABSTRACT

HAIKAL ANANDIRA SYAFEI. Design and Development of a Low-Cost Sensor-Based Air Quality Measurement System. Supervised by IDUNG RISDIYANTO.

Air pollution has become an increasingly significant environmental issue in urban areas due to rapid urbanization, industrial activities, and population growth. Therefore, continuous air quality monitoring is essential to provide timely information to support environmental management and public health protection. However, conventional monitoring instruments are expensive and require complex infrastructure, limiting their implementation in many locations. This study aims to design and develop a portable and low-cost air quality monitoring system based on Internet of Things (IoT) technology. The system utilizes an ESP32-C3 microcontroller integrated with a ZPHS01B multi-parameter sensor to measure PM_{2.5}, CO, O₃, NO₂, temperature, and relative humidity. Measurement data are processed by the microcontroller and transmitted via an internet connection to a server, where they are stored and displayed through a real-time monitoring dashboard. Sensor performance was evaluated through a 14-day co-location experiment with a reference instrument at the Jakarta Mobile Station (JMS). Statistical analyses using correlation, bias, root mean square error (RMSE), and the Bland–Altman method indicated that the sensor showed high agreement for meteorological parameters such as temperature and relative humidity, while PM_{2.5} measurements exhibited lower correlation and gaseous pollutants (CO, O₃, and NO₂) showed larger deviations. Additional calibration methods are still required to improve the accuracy of pollutant measurements obtained from low-cost sensors.

Keywords: air quality monitoring, Internet of Things, low-cost sensor, microcontroller, pollutants

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026¹
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN KUALITAS UDARA BERBASIS *LOW-COST SENSOR*

HAIKAL ANANDIRA SYAFEI

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains pada
Program Studi Meteorologi Terapan

**GEOFISIKA DAN METEOROLOGI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Skripsi:

- 1 Givo Alsepan, S.Si., M.Sc., Ph.D.
- 2 Izzatul Hafizah, S.Si., M.Si.



Judul Skripsi : Rancang Bangun Sistem Pengukuran Kualitas Udara Berbasis
Low-Cost Sensor

Nama : Haikal Anandira Syafei

NIM : G2401221081

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing :
Dr. Idung Risdiyanto, S.Si., M.Sc.



Diketahui oleh

Ketua Departemen Geofisika dan Meteorologi:
Dr. Ana Turyanti, S.Si., M.T.
NIP 19710707 199803 2 002



Tanggal Ujian:
23 April 2026

Tanggal Lulus:



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Agustus 2025 sampai bulan Mei 2026 ini ialah rancang bangun, dengan judul “RANCANG BANGUN SISTEM PENGUKURAN KUALITAS UDARA BERBASIS LOW-COST SENSOR

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Dr. Idung Risdiyanto, S.Si., M.Sc., yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada pembimbing akademik, moderator seminar, dan penguji luar komisi pembimbing. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada:

1. Orang tua beserta keluarga penulis yang selalu menjadi sumber kekuatan, doa, dan semangat yang tak pernah putus. Tanpa cinta dan dukungan mereka, pencapaian ini tidak akan pernah terwujud.
2. Pimpinan dan seluruh staf Divisi Udara, Laboratorium Lingkungan Hidup Daerah DKI Jakarta yang telah menerima, membimbing, dan membantu selama saya berada di sana.
3. Keluarga besar Civita59ahar, angkatan 59 GFM, yang telah menjadi rumah kedua yang hangat, penuh kebersamaan, dan keceriaan selama masa perkuliahan penulis, terima kasih atas setiap kenangan indah yang telah terukir.
4. Kepada dia yang senantiasa menemani setiap langkah penulis dalam proses penyusunan karya ini, terima kasih atas doa yang tak pernah putus, semangat yang terus menguatkan, serta kehadiran yang menjadi sumber ketenangan dan motivasi bagi penulis.
5. GFM Boyz, yang telah menjadi sahabat sekaligus keluarga bagi penulis di luar kehidupan akademis, terima kasih atas setiap tawa, canda, dan kebersamaan yang terjalin. Momen-momen tersebut menjadi sumber kekuatan dan penguat langkah penulis dalam menjalani perjalanan perkuliahan ini.

Bogor, April 2026

Haikal Anandira Syafei



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Sensor Kualitas Udara Berbiaya Rendah	3
2.2 Sensor Winsen ZPHS01B	4
2.3 Mekanisme Kerja Sensor	5
2.4 Konversi satuan parameter	9
III METODE	11
3.1 Waktu dan Tempat	11
3.2 Alat dan Bahan	11
3.3 Prosedur Kerja	11
3.4 Analisis Galat	12
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	15
4.1 Desain Sistem	15
4.2 Implementasi dan Evaluasi Performa Alat	20
V SIMPULAN DAN SARAN	37
5.1 Simpulan	37
5.2 Saran	37
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN	45
RIWAYAT HIDUP	67



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR GAMBAR

1	Gambar 2.1 Sensor Winsen ZPHS01B	4
2	Gambar 2.2 Sensor PM (Winsen 2021)	5
3	Gambar 2.3 Mekanisme hamburan laser pada sensor (Oimette 2023)	5
4	Gambar 2.4 Sensor NO ₂ (Winsen 2021)	6
5	Gambar 2.5 Sensor suhu dan kelembaban (Winsen 2022)	6
6	Gambar 2.6 Sensor TVOC (Winsen 2020)	6
7	Gambar 2.7 Metode semikonduktor sensor (Zhang <i>et al.</i> 2019)	7
8	Gambar 2.8 Sensor O ₃ (Winsen 2021)	7
9	Gambar 2.9 Sensor CH ₂ O (Winsen 2020)	7
10	Gambar 2.10 Sensor CO (Winsen 2023)	8
11	Gambar 2.11 Analogi mekanisme kerja sensor elektrokimia (Shanbhag <i>et al.</i> 2023)	8
12	Gambar 2.12 Sensor CO ₂ (Winsen 2023)	9
13	Gambar 2.13 Skematik diagram NDIR (Jha 2022)	9
14	Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	11
15	Gambar 4.1 Skematik instrumen	15
16	Gambar 4.2 Desain tiga dimensi penutup alat, bagian badan utama (A), alas (B), dan penutup atas (C)	16
17	Gambar 4.3 Sketsa instrumen tampak samping (A) dan tampak depan (B)	16
18	Gambar 4.4 Sketsa enclosure sensor tampak depan (A) dan tampak samping (B)	17
19	Gambar 4.5 Tampilan Arduino IDE	17
20	Gambar 4.6 Mekanisme pengiriman dan penampilan data	19
21	Gambar 4.7 Tampilan Dashboard	20
22	Gambar 4.8 Grafik nilai PM _{2.5} JMS dan ZPHS01B	21
23	Gambar 4.9 Grafik nilai CO dengan satuan sama (A) dan satuan berbeda (B)	22
24	Gambar 4.10 Grafik nilai O ₃ dengan satuan sama (A) dan satuan berbeda	23
25	Gambar 4.11 Grafik nilai NO ₂ dengan satuan sama (A) dan satuan berbeda (B)	24
26	Gambar 4.12 Grafik nilai Suhu JMS dan ZPHS01B	24
27	Gambar 4.13 Grafik nilai Kelembaban JMS dan ZPHS01B	25
28	Gambar 4.14 Scatter plot PM _{2.5}	26
29	Gambar 4.15 Scatter plot CO	26
30	Gambar 4.16 Scatter plot O ₃	27
31	Gambar 4.17 Scatter plot NO ₂	27
32	Gambar 4.18 <i>Scatter plot</i> Temperatur	28
33	Gambar 4.19 <i>Scatter plot</i> Kelembaban	28
34	Gambar 4.20 Grafik Bland-Altman PM _{2.5}	30
35	Gambar 4.21 Grafik Bland-Altman CO	30
36	Gambar 4.22 Grafik Bland-Altman NO ₂	31
37	Gambar 4.23 Grafik Bland-Altman O ₃	31
38	Gambar 4.24 Grafik Bland-Altman suhu	32

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



39	Gambar 4.25 Grafik Bland-Altman kelembaban	32
40	Gambar 4.26 Grafik Nilai PM2.5, PM10, dan Curah Hujan	33
41	Gambar 4.27 Grafik nilai O3 pengamatan	34
42	Gambar 4.28 Grafik nilai NO2 pengamatan	35
43	Gambar 4.29 Grafik nilai CO pengamatan	35

@Hak cipta milik IPB University

DAFTAR LAMPIRAN

44	Lampiran 1 Glosarium	47
45	Lampiran 2 Spesifikasi lengkap zphs01b	49
46	Lampiran 3 Kode pemrograman instrumen	51

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.