

**ANALISIS KESTABILAN AKURASI DATA PENGUKURAN  
TEKANAN UDARA PADA SENSOR BMP280**

**TUGAS AKHIR**



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA  
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI KEMARITIMAN  
UNIVERSITAS MARITIM RAJA ALI HAJI  
TANJUNGPINANG  
2025**

# **ANALISIS KESTABILAN AKURASI DATA PENGUKURAN TEKANAN UDARA PADA SENSOR BMP280**

Tugas Akhir

Skema Skripsi

*Tugas Akhir diajukan sebagai salah satu persyaratan memperoleh gelar Sarjana*

*Teknik pada Program Studi Teknik Elektro*



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA  
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI KEMARITIMAN  
UNIVERSITAS MARITIM RAJA ALI HAJI  
TANJUNGPINANG  
2025**

## **PERNYATAAN MENGENAI TUGAS AKHIR DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Dengan ini saya menyatakan bahwa tugas akhir berjudul "Judul Tugas Akhir" adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi 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.

Apabila di kemudian hari terbukti pernyataan saya tidak benar dan melanggar peraturan yang berlaku dalam karya tulis dan hak intelektual, maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima untuk ditarik kembali oleh Universitas Maritim Raja Ali Haji dan menerima sanksi lainnya sesuai dengan peraturan yang berlaku. Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Universitas Maritim Raja Ali Haji.

Tanjungpinang, 28 Januari 2025



*Theddy Kurnia Sandi*  
NIM 2001010031

© Hak Cipta Milik Universitas Maritim Raja Ali Haji, Tahun 2021

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 Universitas Maritim Raja Ali Haji.*

*Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Maritim Raja Ali Haji.*

## HALAMAN PERSETUJUAN

Judul : Analisis Kestabilan Akurasi Data Pengukuran  
Tekanan Udara pada Sensor BMP280  
Nama : Theddy Kurnia Sandi  
NIM : 2001010031  
Program Studi : Teknik Elektro  
Tanggal Persetujuan : 1 Desember 2025



## HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Analisis Kestabilan Akurasi Data Pengukuran Tekanan Udara pada Sensor BMP280  
Nama : Theddy Kurnia Sandi  
NIM : 2001010031

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Komisi Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk melaksanakan tugas akhir dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman, Universitas Maritim Raja Ali Haji.

### KOMISI PENGUJI

|             |                                          |                    |
|-------------|------------------------------------------|--------------------|
| Ketua       | : M. Hasbi Sidqi Alajuri, S.I.K., M.Si   | (.....) 05/01/2026 |
| Anggota I   | : Basyaruddin Ismail Harahap, S.Pd., M.T | (.....) 05/01/2026 |
| Anggota II  | : Feri Irawan, S.Kom., M.Kom             | (.....) 05/01/2026 |
| Anggota III | : Hollanda Arief Kusuma, S.I.K., M.Si    | (.....) 05/01/2026 |
| Anggota IV  | : Bavitra, S.Si., M.Si                   | (.....) 05/01/2026 |

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro Dan Informatika



Hollanda Arief Kusuma, S.I.K., M.Si  
NIP. 19890401201903016

Tanggal Ujian: 16 Desember 2025 Tanggal Lulus: 16 Desember 2025

## ABSTRAK

Theddy Kurnia Sandi. 2025. Analisis Kestabilan Akurasi Data Pengukuran Tekanan Udara pada Sensor BMP280. Skripsi. Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman, Universitas Maritim Raja Ali Haji. Pembimbing I: Hollanda Arief Kusuma, S.IK., M.Si. Pembimbing II: Bavitra, M.Si.

Tekanan udara merupakan salah satu parameter penting dalam pemantauan cuaca yang memerlukan alat ukur dengan tingkat akurasi dan kestabilan yang baik. Salah satu sensor tekanan udara yang banyak digunakan adalah BMP280 karena ukurannya yang kecil, konsumsi daya rendah, dan biaya yang relatif terjangkau. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis akurasi, kestabilan, dan karakteristik penyimpangan pengukuran tekanan udara menggunakan sensor BMP280. Penelitian ini menggunakan empat sensor BMP280 yang diuji dan dibandingkan dengan data referensi dari *Automatic Weather Station* (AWS) untuk mengetahui kinerja masing-masing sensor pada kondisi lingkungan sebenarnya. Pengambilan data dilakukan setiap satu menit selama dua bulan sehingga diperoleh lebih dari 340.000 data pengukuran. Data yang diperoleh dianalisis untuk mengetahui tingkat akurasi dan pola penyimpangan sensor sebelum dan sesudah dilakukan kalibrasi menggunakan metode regresi linier. Uji Levene digunakan untuk mengetahui homogenitas variansi antar sensor, sedangkan analisis residu dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan pembacaan sensor. Selain itu, nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) digunakan untuk mengukur besar error sensor terhadap data referensi AWS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian sensor telah memiliki akurasi dan kestabilan yang baik pada kondisi awal sehingga proses kalibrasi tidak memberikan peningkatan yang signifikan. Salah satu sensor menunjukkan penyimpangan yang cukup besar sebelum kalibrasi, namun mengalami perbaikan akurasi setelah dilakukan kalibrasi. Sebaliknya, terdapat sensor yang masih menunjukkan ketidakstabilan pembacaan yang ditunjukkan oleh pola residu berbentuk kipas. Secara keseluruhan, keempat sensor mampu mengikuti pola perubahan tekanan udara yang direkam AWS dengan tingkat kestabilan yang berbeda-beda sesuai karakteristik masing-masing sensor. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sensor BMP280 tetap dapat digunakan sebagai alat pemantauan tekanan udara berbiaya rendah untuk kebutuhan pemantauan cuaca skala sederhana.

**Kata kunci:** BMP280, tekanan udara, regresi linier, kalibrasi, RMSE, uji homogenitas, residu sensor

## **ABSTRACT**

*Theddy Kurnia Sandi. 2025. Analysis of Accuracy Stability of Air Pressure Measurement Data Using the BMP280 Sensor. Undergraduate Thesis. Electrical Engineering Study Program, Faculty of Engineering and Maritime Technology, Raja Ali Haji Maritime University. Supervisor I: Hollanda Arief Kusuma, S.IK., M.Si. Supervisor II: Bavitra, M.Si.*

*Air pressure is an important parameter in weather monitoring that requires measurement instruments with good accuracy and stability. One of the widely used air pressure sensors is the BMP280 due to its compact size, low power consumption, and relatively low cost. This study aims to analyze the accuracy, stability, and deviation characteristics of air pressure measurements using the BMP280 sensor. The study employs four BMP280 sensors, which are tested and compared with reference data from an Automatic Weather Station (AWS) to evaluate the performance of each sensor under real environmental conditions. Data were collected every minute for two months, resulting in more than 340,000 measurement data points. The collected data were analyzed to determine the accuracy level and deviation patterns of the sensors before and after calibration using the linear regression method. Levene's test was applied to assess the homogeneity of variance among sensors, while residual analysis was conducted to evaluate measurement stability. In addition, the Root Mean Square Error (RMSE) was used to quantify the measurement error relative to the AWS reference data. The results indicate that some sensors already exhibited good accuracy and stability under initial conditions, so calibration did not provide a significant improvement. One sensor showed relatively large deviations before calibration but experienced a notable improvement in accuracy after calibration. In contrast, another sensor continued to exhibit measurement instability, as indicated by a fan-shaped residual pattern. Overall, all four sensors were able to follow the air pressure variation patterns recorded by the AWS, although their stability levels differed according to the characteristics of each sensor. These results demonstrate that the BMP280 sensor remains suitable as a low-cost air pressure monitoring device for simple-scale weather monitoring applications.*

**Keywords:** *BMP280, air pressure, linear regression, calibration, RMSE, homogeneity test, sensor residuals*

## PRAKATA

Assalamu'alaikum warahamtullahi wabarakatuh.

Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya Penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Analisis Kestabilan Akurasi Data Pengukuran Tekanan Udara pada Sensor BMP280” dengan baik. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak mendapatkan bimbingan, dukungan dan saran serta bantuan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini perkenankanlah penulis menyampaikan mengucapkan terima kasih Penulis sampaikan kepada:

1. Kedua orang tua yang sangat saya cintai Bapak Sasmi Armizan dan Ibu Yeye Marliza serta adik saya Naira Sasmita, atas curahan kasih sayang dan pengorbanan yang tak terbatas dari sejak kecil hingga saat ini dan menjadi penyemangat dalam penulis
2. Ibu Martaleti Bettiza, S.Si., M.Sc selaku Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman, Universitas Maritim Raja Ali Haji;
3. Bapak Hollanda Arief Kusuma, S.IK., M.Si selaku Dosen Pembimbing I sekaligus Penasehat Akademik dan Ketua Jurusan Teknik Elektro Dan Informatika Universitas Maritim Raja Ali Haji;
4. Bapak Bavitra, M.Si selaku Dosen Pembimbing II Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Dan Teknologi Kemaritiman, Universitas Maritim Raja Ali Haji;
5. Bapak Dedi Harianto Panjaitan, S.T selaku Teknisi BMKG Stasiun Meteorologi Kelas I Hang Nadim Batam dan pembimbing lapangan yang telah sangat membantu dalam melaksanakan penelitian skripsi saya selama ini.
6. Keluarga besar Nenek Saya Mutirah yang telah mendoakan dan mendukung dari awal kuliah hingga sampai detik ini. Penulis mengucapkan terimakasih banyak atas dukungannya.
7. Riska Rahmadhani sebagai support sistem selama melaksanakan penelitian skripsi ini saya berterimakasih.
8. Teman-teman seperjuangan (Ali Susanto, Harmahara Saputra, Muhazri, Givanda Ariadi, Kurnia Sandi, Muhammad Ridwan, Helferdi Wilson).

Kehadiran dan bantuan mereka sangat membantu disaat hilang arah dan penguat jika ada kekurangan dalam penelitian serta telah mewarnai sekaligus memudahkan langkah Penulis dalam menyelesaikan studi.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun agar penelitian di masa mendatang dapat disusun dengan lebih baik. Penulis menyusun skripsi ini dengan harapan dapat memberikan manfaat, baik dalam pengembangan ilmu pengetahuan maupun sebagai bahan referensi bagi pembaca, mahasiswa, peneliti, serta masyarakat umum. Atas perhatian dan dukungan yang telah diberikan, penulis menyampaikan terima kasih.

Assalamu'alaikum warahamtullahi wabarokatuh.

Tanjungpinang, 05 Januari 2025



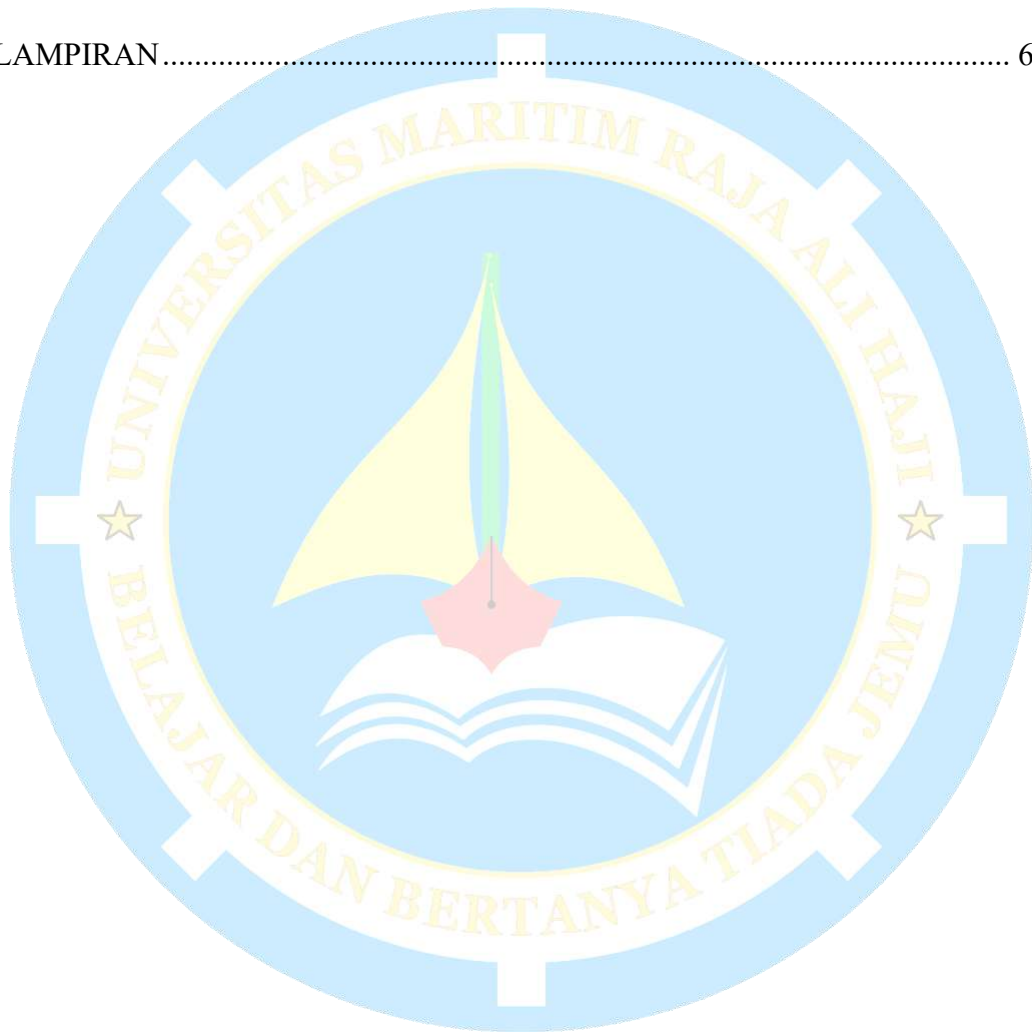
  
Theddy Kurnia Sandi

## DAFTAR ISI

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| COVER .....                       | 1    |
| HALAMAN PERSETUJUAN.....          | iv   |
| HALAMAN PENGESAHAN.....           | v    |
| ABSTRAK.....                      | vi   |
| <i>ABSTRACT</i> .....             | vii  |
| PRAKATA.....                      | viii |
| DAFTAR ISI.....                   | x    |
| DAFTAR TABEL.....                 | xiii |
| DAFTAR GAMBAR .....               | xiv  |
| DAFTAR LAMPIRAN.....              | xvi  |
| BAB I PENDAHULUAN.....            | 1    |
| A. Latar Belakang .....           | 1    |
| B. Perumusan Masalah .....        | 4    |
| C. Batasan Penelitian .....       | 4    |
| D. Tujuan Penelitian .....        | 4    |
| E. Manfaat Penelitian .....       | 4    |
| BAB II KAJIAN LITERATUR.....      | 6    |
| A. Tinjauan Pustaka .....         | 6    |
| B. Landasan Teori.....            | 7    |
| 1. Tekanan Udara .....            | 7    |
| 2. Akuisisi Data.....             | 8    |
| 3. Reresi Linear .....            | 8    |
| 4. Uji Homogenitas .....          | 9    |
| 5. Uji <i>Levene's Test</i> ..... | 10   |

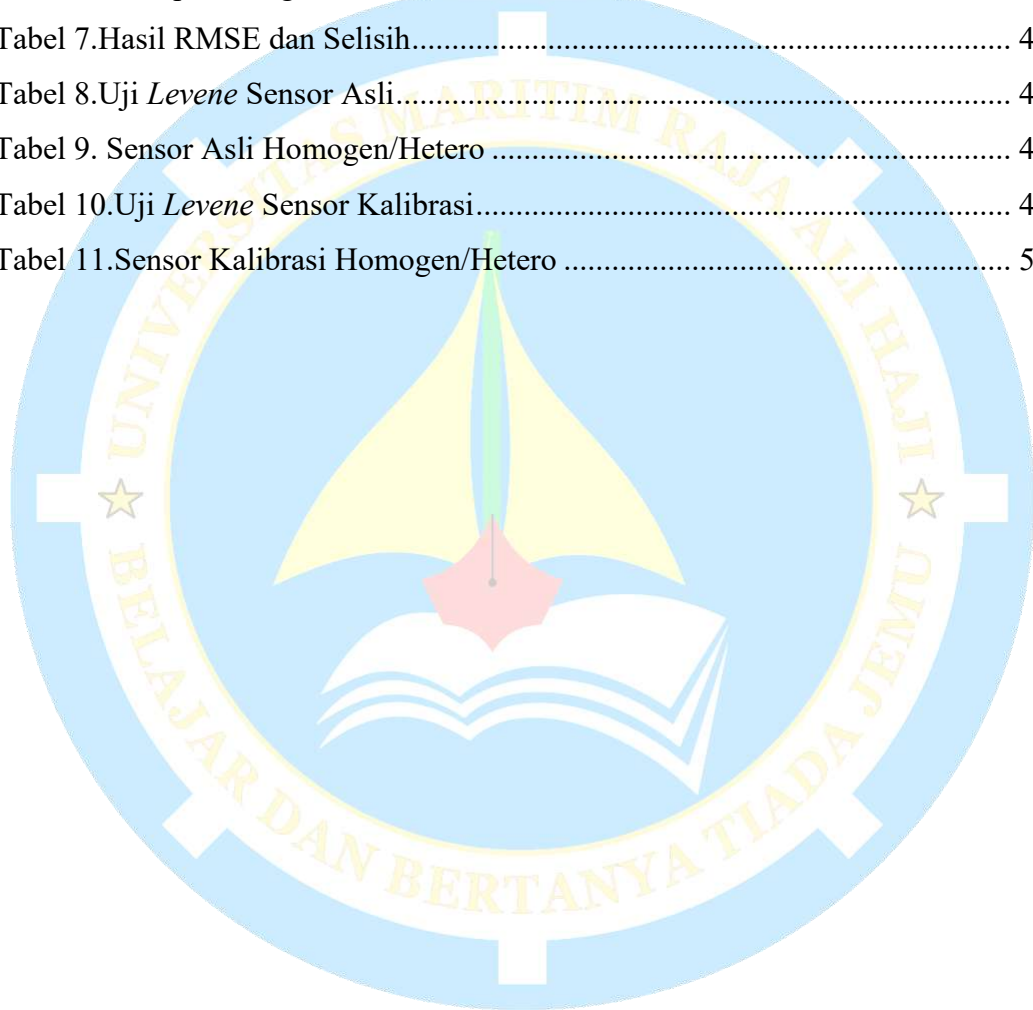
|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 6. NTP (Network Time Protocol).....                 | 11 |
| C. Komponen.....                                    | 12 |
| 1. Mikrokontroler ESP32 .....                       | 12 |
| 2. Modul Micro SD .....                             | 13 |
| 3. Sensor Tekanan BMP280.....                       | 14 |
| BAB III METODE PENELITIAN.....                      | 16 |
| A. Waktu dan Tempat Penelitian.....                 | 16 |
| B. Bahan dan Alat.....                              | 16 |
| C. Kriteria Akurasi dan Kestabilan Sensor.....      | 17 |
| D. Prosedur Pelaksanaan Penelitian.....             | 18 |
| E. Prosedur Perancangan Sistem.....                 | 19 |
| F. Perancangan Sistem Pengukuran Tekanan Udara..... | 20 |
| 1. Perancangan Elektrical.....                      | 21 |
| 2. Perancangan Mekanik.....                         | 22 |
| 3. Perancangan Firmware.....                        | 22 |
| G. Prosedur Uji Lapangan.....                       | 29 |
| H. Pengolahan dan Analisis Data.....                | 30 |
| 1. Kalibrasi Sensor .....                           | 30 |
| 2. Uji homogenitas.....                             | 31 |
| 4. Uji Lanjut.....                                  | 33 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....                    | 34 |
| A. Kalibrasi Sensor .....                           | 34 |
| B. Uji Lapangan.....                                | 36 |
| C. Uji Akurasi Sensor BMP280.....                   | 42 |
| D. Uji Homogenitas .....                            | 45 |
| 1. Uji Residu .....                                 | 45 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 2. Uji <i>Levene's</i> Test..... | 48 |
| E. Pembahasan.....               | 50 |
| BAB V SIMPULAN DAN SARAN .....   | 56 |
| A. Simpulan .....                | 56 |
| B. Saran.....                    | 56 |
| DAFTAR PUSTAKA .....             | 58 |
| LAMPIRAN.....                    | 65 |



## DAFTAR TABEL

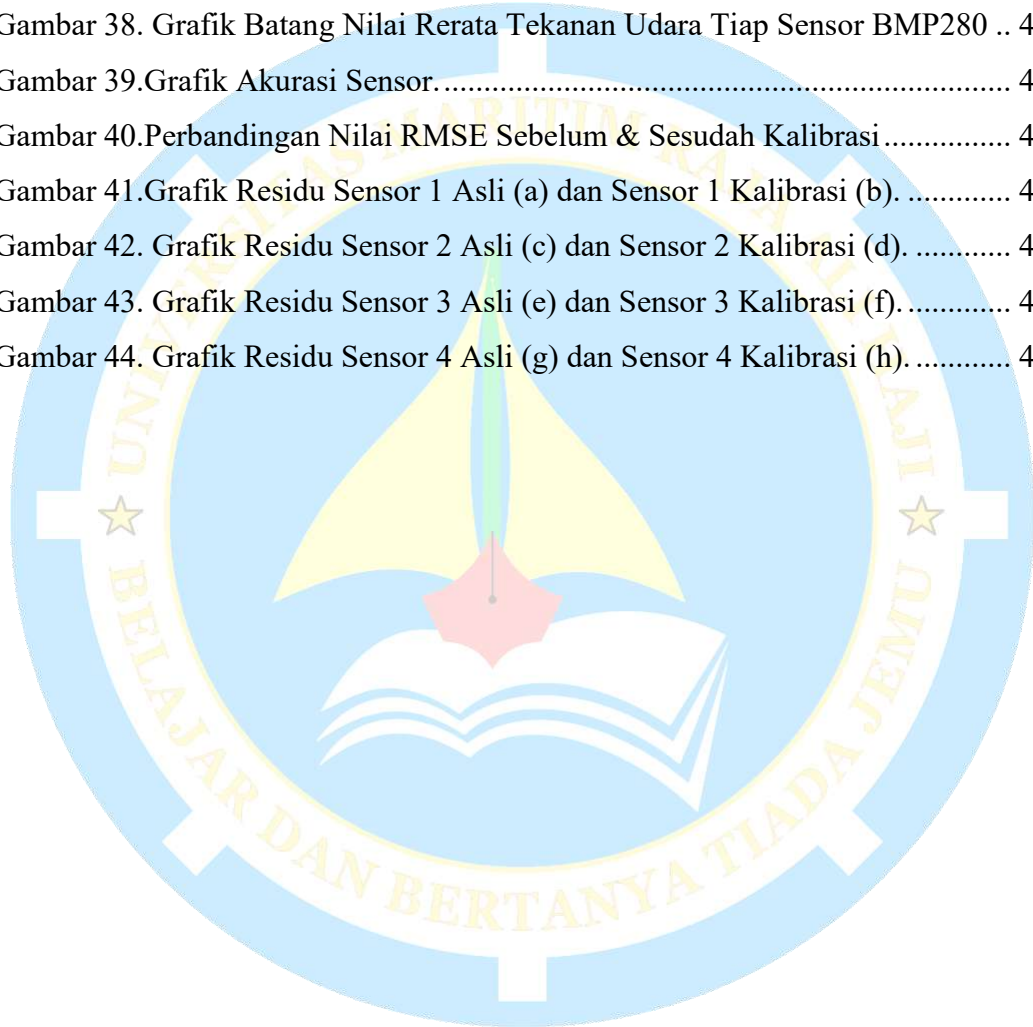
|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 1. Bahan yang digunakan .....                            | 17 |
| Tabel 2. Alat yang digunakan .....                             | 17 |
| Tabel 3. Hasil regresi linear setiap sensor BMP280 .....       | 34 |
| Tabel 4. Data Cuplikan Pengukuran Tekanan Udara .....          | 38 |
| Tabel 5. Selisih Rata-rata Sebelum dan Sesudah Kalibrasi ..... | 38 |
| Tabel 6. Hasil perhitungan nilai rata-rata akurasi .....       | 42 |
| Tabel 7. Hasil RMSE dan Selisih.....                           | 44 |
| Tabel 8. Uji <i>Levene</i> Sensor Asli.....                    | 48 |
| Tabel 9. Sensor Asli Homogen/Hetero .....                      | 49 |
| Tabel 10. Uji <i>Levene</i> Sensor Kalibrasi.....              | 49 |
| Tabel 11. Sensor Kalibrasi Homogen/Hetero .....                | 50 |



## DAFTAR GAMBAR

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1. Tekanan Udara .....                                               | 7  |
| Gambar 2. Grafik Tekanan Udara.....                                         | 8  |
| Gambar 3. Grafik Regresi Linear.....                                        | 9  |
| Gambar 4. Grafik Homogenitas ( Homoscedasticity ).....                      | 10 |
| Gambar 5. Grafik tidak homogen ( Heteroskedasticity ) .....                 | 10 |
| Gambar 6. Board Mikrokontroller ESP32. ....                                 | 12 |
| Gambar 7. ESP32 DEV.Board Pinout. ....                                      | 13 |
| Gambar 8. Wemos Micro SD Card.....                                          | 14 |
| Gambar 9. Modul Sensor BMP280.....                                          | 15 |
| Gambar 10. Lokasi Stasiun Meteorologi Kelas I Hang Nadim Batam.....         | 16 |
| Gambar 11. Diagram Alir Penelitian. ....                                    | 19 |
| Gambar 12. Diagram Perancangan Sistem.....                                  | 20 |
| Gambar 13. Diagram Blok Sistem Pengukuran Tekanan Udara.....                | 21 |
| Gambar 14. <i>Wiring Diagram</i> Sistem Pengukuran Tekanan Udara.....       | 22 |
| Gambar 15. Diagram Firmware .....                                           | 23 |
| Gambar 16. Library.....                                                     | 24 |
| Gambar 17. Inisialisasi Nama Wifi dan Pasword .....                         | 24 |
| Gambar 18. Inisialisasi ke platform Iot.....                                | 24 |
| Gambar 19. Inisialisasi konfigurasi Waktu dari Internet .....               | 25 |
| Gambar 20. Inisialisai File pada kartu SD .....                             | 25 |
| Gambar 21. Fungsi untuk mendapatkan waktu lokal.....                        | 26 |
| Gambar 22. Fungsi untuk membuat file baru.....                              | 26 |
| Gambar 23. Inisialisasi Wifi. ....                                          | 26 |
| Gambar 24. Inisialisasi untuk mendapatkan waktu secara tepat.....           | 27 |
| Gambar 25. Inisialisasi SD card .....                                       | 27 |
| Gambar 26. Menampilkan ke serial monitor jika sensor mengalami kegagalan .. | 28 |
| Gambar 27. Membaca nilai suhu dan tekanan .....                             | 28 |
| Gambar 28. Inisialisasi SD open.....                                        | 28 |
| Gambar 29. Platform penyimpanan di ThingSpeak.....                          | 29 |
| Gambar 30. Mengatur interval waktu .....                                    | 29 |
| Gambar 31. Diagram Prosedur Uji Lapangan.....                               | 30 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 32. Hasil Grafik Regresi Linear : Sensor 1 (a), Sensor 2 (b), Sensor 3 (c), Sensor 4 (d)..... | 35 |
| Gambar 33. Sensor Barometer Digital Vaisalla.....                                                    | 37 |
| Gambar 34. Alat Pengukuran Tekanan Udara. ....                                                       | 37 |
| Gambar 35. Grafik Selisih rata-rata Data Sensor AWS.....                                             | 39 |
| Gambar 36. Grafik Pola Tekanan Udara sebelum Kalibrasi.....                                          | 40 |
| Gambar 37. Grafik Pola Tekanan Udara setelah Kalibrasi.....                                          | 41 |
| Gambar 38. Grafik Batang Nilai Rerata Tekanan Udara Tiap Sensor BMP280 ..                            | 41 |
| Gambar 39. Grafik Akurasi Sensor.....                                                                | 42 |
| Gambar 40. Perbandingan Nilai RMSE Sebelum & Sesudah Kalibrasi.....                                  | 44 |
| Gambar 41. Grafik Residu Sensor 1 Asli (a) dan Sensor 1 Kalibrasi (b). ....                          | 46 |
| Gambar 42. Grafik Residu Sensor 2 Asli (c) dan Sensor 2 Kalibrasi (d). ....                          | 46 |
| Gambar 43. Grafik Residu Sensor 3 Asli (e) dan Sensor 3 Kalibrasi (f). ....                          | 47 |
| Gambar 44. Grafik Residu Sensor 4 Asli (g) dan Sensor 4 Kalibrasi (h). ....                          | 47 |



## DAFTAR LAMPIRAN

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| Lampiran 1. Keseluruhan Program BMP280.....            | 66 |
| Lampiran 2. Kode QR Data Pengukuran Tekanan Udara..... | 71 |
| Lampiran 3. Dokumentasi Penelitian.....                | 72 |



# BAB I

## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Tekanan udara merupakan salah satu parameter penting dalam ilmu meteorologi yang berperan besar dalam menentukan kerapatan udara [1]. Tekanan udara juga sangat penting dalam ilmu meteorologi karena tekanan udara mempengaruhi kondisi cuaca dan perubahan pola lingkungan [2]. Pengukuran tekanan udara digunakan untuk membantu analisis dan prediksi cuaca, mendukung upaya mitigasi bencana, serta mendukung berbagai aktivitas manusia yang bergantung pada informasi cuaca yang di prediksi menggunakan *Automatic Weather Station* (AWS).

*Automatic Weather Station* (AWS) merupakan sistem pemantauan cuaca otomatis yang terdiri dari berbagai sensor untuk mengukur sejumlah parameter meteorologis. Salah satu parameter yang diukur AWS adalah tekanan udara. Sensor yang digunakan untuk mengukur tekanan udara pada AWS umumnya merupakan barometer digital. Sensor ini mampu mendeteksi tekanan atmosfer dengan tingkat presisi yang tinggi. Beberapa jenis sensor barometrik yang sering digunakan untuk pengukuran tekanan udara antara lain BMP280, BME280, DPS310, dan MS5611.

Sensor – sensor tersebut tidak hanya mengukur tekanan udara, tetapi juga mengukur suhu dan kelembaban [3].

Performa sensor dengan tingkat akurasi yang rendah dalam hasil pengukuran dapat berdampak pada analisis cuaca dan prediksi iklim, seperti menghasilkan data yang menyimpang, menurunkan ketepatan data pengukuran, memberikan hasil pengukuran yang tidak akurat [4]. Data yang tidak valid akan berpengaruh terhadap analisis data untuk mendapatkan informasi cuaca yang dibutuhkan dalam berbagai keperluan pemantauan seperti pertanian, penerbangan, dan mitigasi bencana [5]. Kestabilan sensor diperlukan untuk menghasilkan data yang tetap reliable dengan jangka waktu tertentu dalam pengukuran secara real-time di berbagai kondisi lingkungan [6]. Sensor yang stabil tidak akan mengalami perubahan nilai pengukuran yang signifikan akibat faktor eksternal seperti suhu dan tekanan. Sedangkan sensor yang mengalami *drift* atau ketidakstabilan data dapat menurunkan keandalan sistem pemantauan [7].

Sensor BMP280 merupakan salah satu sensor multifungsi yang dirancang untuk keperluan pengukuran tekanan udara dan suhu dengan tingkat presisi tinggi [8]. Keunggulan sensor BMP280 dalam sistem pemantauan adalah konsumsi daya yang rendah, harga yang terjangkau, ukuran yang kecil dan sensor ini memiliki akurasi tekanan udara sekitar  $\pm 1$  hPa dengan resolusi 0,16 Pa. Selain itu, BMP280 telah dilengkapi dengan kalibrasi internal pabrik, yang langsung dapat digunakan tanpa proses kalibrasi manual [9]. Melalui perbandingan antara kinerja sensor BMP280 dan sensor tekanan udara pada *Automatic Weather Station* (AWS), dapat dinilai sejauh mana sensor BMP280 mampu menghasilkan data yang akurat dan stabil untuk mendukung pemantauan cuaca otomatis.

Penelitian tekanan udara menggunakan sensor BMP280 telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, Penelitian yang dilakukan oleh Desi Oktvia, memberikan gambaran awal mengenai kualitas sensor. Penelitian tersebut masih terbatas dalam hal cakupan waktu dalam pengambilan data sekitar 3 hari dan hanya menggunakan satu metode kalibrasi, sehingga belum mencerminkan performa sensor dalam aplikasi pemantauan jangka panjang. Penelitian tersebut memberikan informasi terkait tingkat akurasi dan presisi BMP280. Prosedur analisis kestabilan sensor pada penelitian ini dilakukan melalui uji *Analysis of Variance* (ANOVA) yang dilengkapi dengan uji lanjut Tukey untuk mengetahui perbedaan antar sensor secara lebih rinci. Selanjutnya, proses kalibrasi diterapkan dengan metode regresi linier guna meningkatkan kesesuaian data sensor terhadap alat acuan. Evaluasi hasil kalibrasi dilakukan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE), yang berfungsi untuk mengukur besarnya tingkat kesalahan rata-rata kuadrat. Nilai RMSE yang lebih rendah menunjukkan bahwa kesalahan pengukuran sensor berkurang, sehingga akurasi data semakin baik, serta membuktikan potensi BMP280 sebagai sensor berbiaya rendah untuk pengembangan *Automatic Weather Station* (AWS) jika diuji dan dikalibrasi dengan tepat [10].

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Yogi Pratama telah melakukan uji performa sensor BMP280 melalui regresi linear berganda. Penelitian tersebut membahas kestabilan data sensor dengan pengambilan data selama 3 hari. Rentang waktu pengambilan yang telah dilakukan data perhari setiap 10 menit. Namun, penelitian ini belum melakukan pembandingan secara sistematis terhadap

kestabilan performa sensor dalam berbagai kondisi operasional, seperti yang dibutuhkan pada sistem pemantauan cuaca otomatis *Automatic Weather Station* (AWS). Penelitian ini menggunakan 10 sensor BMP280 dengan rentang hasil pengukuran tekanan udara 101.219,34421 Pa hingga 101.219,34429 Pa. Penelitian tersebut menggunakan data pembanding pengukuran tekanan udara dari BMKG Batam sebesar 101.219,34424 Pa. Penelitian ini melakukan analisis data dengan menggunakan regresi linier berganda yang mampu menurunkan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dari 0,13%-0,40% menjadi 0,000000010%-0,000000041%. Meskipun demikian, peningkatan performa dibandingkan regresi linier biasa hanya sekitar 0-0,0038%, sehingga penggunaannya dinilai tidak memberikan manfaat signifikan [11].

Berdasarkan permasalahan di atas, maka perlu dilakukan penelitian untuk menganalisis tingkat kestabilan sensor BMP280. Penulis berencana melakukan penelitian tentang pengujian sensor BMP280 dengan membandingkan hasilnya terhadap nilai acuan dari *Automatic Weather Station* (AWS) untuk menilai tingkat kestabilan sensor. Penelitian ini dilakukan berlangsung selama tiga bulan, lebih panjang dibandingkan penelitian sebelumnya, dengan pengambilan data setiap 1 menit selama 1 hari penuh. Analisis data penulis akan melakukan uji Homogenitas dengan menggunakan dua variansi uji residu dan uji *levene* digunakan untuk menguji apakah terdapat perbedaan signifikan antara hasil pengukuran tekanan udara dari empat sensor BMP280 terhadap acuan AWS, sehingga dapat dinilai kestabilan dan konsistensi akurasi sensor dalam jangka waktu pengamatan. Penelitian ini juga menggunakan regresi linear untuk menganalisis keterkaitan antara data yang diperoleh dari sensor dengan nilai acuannya, penelitian juga menggunakan metode analisis uji homogenitas varians (penyebaran data) yang sama atau tidak, digunakan untuk mengetahui keseragaman distribusi data antar kelompok pengukuran [12]. Pada tahap analisis, metrik kuantitatif seperti *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) diterapkan untuk mengevaluasi tingkat kesalahan dan mengukur keandalan sensor. RMSE secara khusus berfungsi untuk menilai besar rata-rata kesalahan kuadrat dari hasil pengukuran, sehingga semakin kecil nilai RMSE menunjukkan bahwa sensor BMP280 semakin akurat dan stabil dalam mendeteksi tekanan udara. Oleh karena

itu, penulis akan melakukan penelitian tentang "Analisis Kestabilan Akurasi Data Pengukuran Tekanan Udara pada Sensor BMP280".

### **B. Perumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana tingkat kestabilan dan akurasi sensor BMP280 dalam mengukur parameter tekanan udara.

### **C. Batasan Penelitian**

Batasan masalah dari penelitian ini diuraikan tidak meluas dan mampu dibahas dengan baik sesuai batasan keilmuan peneliti. Beberapa batasan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan sensor BMP280.
2. Penelitian ini diuji di Stasiun Meteorologi Kelas I Hang Nadim Batam.
3. Penelitian ini mengukur tekanan udara.
4. Penelitian ini menganalisis dan membandingkan kestabilan akurasi sensor BMP280 dengan sensor AWS.

### **D. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini untuk membandingkan kestabilan akurasi sensor BMP280 dalam mengukur tekanan udara (milibar/mb) dengan data *Automatic Weather Station* (AWS). Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perbedaan kondisi pengujian terhadap konsistensi data yang dihasilkan sensor, serta mengevaluasi kesesuaian performa sensor BMP280 melalui pendekatan statistik seperti , regresi linear, uji homogenitas, uji residu dan uji *levane*.

### **E. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Pengujian ini dilakukan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai performa sensor BMP280 dalam hal kestabilan, akurasi, dan presisi pengukuran tekanan udara. Hasil pengujian ini dapat menjadi dasar dalam menentukan kelayakan penggunaan sensor BMP280 pada sistem pemantauan cuaca otomatis (AWS), terutama dalam lingkungan yang membutuhkan ketelitian data atmosferik

2. Bagi komunitas akademik dan peneliti, penelitian ini berkontribusi dalam memperkaya literatur mengenai evaluasi sensor lingkungan, serta menjadi referensi untuk penelitian lanjutan di bidang kalibrasi sensor, analisis data, pengembangan teknologi IoT yang bergantung pada akurasi data pengukuran dalam sistem pemantauan cuaca.



## **BAB II**

### **KAJIAN LITERATUR**

#### **A. Tinjauan Pustaka**

Tekanan udara merupakan tenaga yang bekerja untuk menggerakkan massa udara dalam satuan wilayah tertentu dari satu tempat ke tempat lainnya. Tekanan udara sangat dipengaruhi oleh tingkat kepadatan atau kerapatan (densitas) massa udara dan dapat diukur menggunakan sensor-sensor pengukur tekanan udara [13]. Sensor tekanan udara berfungsi untuk mengukur besarnya tekanan udara di lingkungan sekitar dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat diproses secara digital. Beberapa sensor yang umum digunakan dalam pengukuran tekanan udara antara lain BMP280, BME280, BMP180 [14][15][16] .

Sensor tekanan udara diintegrasikan dengan mikrokontroler untuk pengambilan data dan kendali sistem ESP32. ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama dalam membaca, memproses, serta mengirimkan data dari sensor BMP280 [17]. Data yang diperoleh dari pengukuran tekanan udara dengan sensor dianalisis menggunakan berbagai metode statistik seperti regresi linear, uji homogenitas, uji residu, dan uji *levene*.

Regresi linear digunakan dalam proses kalibrasi sensor untuk meningkatkan akurasi pengukuran. Rachmawati et al.,(2024) [18] menggunakan metode regresi untuk mengetahui tingkat akurasi dan ketelitian Sensor BME280 dengan melakukan kalibrasi melalui pendekatan regresi linear.

Uji homogenitas digunakan untuk memastikan bahwa variabilitas data antar kelompok bersifat seragam. Agustian et al.,(2025) [19] membahas Pengujian homogenitas dan normalitas merupakan langkah awal yang sangat penting dalam analisis statistik parametrik.

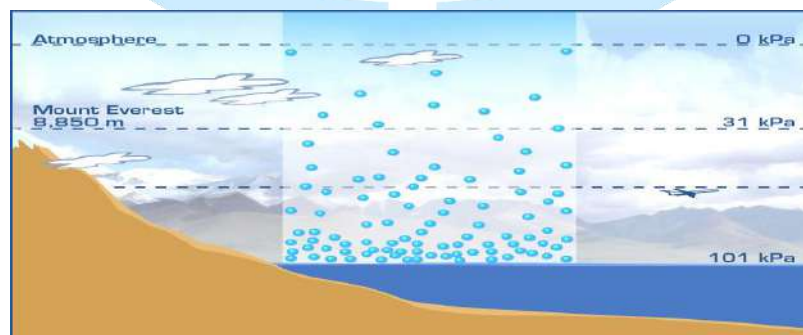
Uji residu digunakan untuk mengevaluasi apakah model regresi memenuhi asumsi-asumsi dasar, seperti kenormalan, kemandirian, dan pola sebaran residu yang acak. Melalui uji ini dapat diketahui apakah terdapat pola tertentu pada residu yang menandakan bahwa model regresi kurang tepat atau masih perlu perbaikan. Maharani et al. 2024 [20] menggunakan uji residu untuk menentukan apakah variabilitas kesalahan (residu) dalam model regresi tetap konstan atau berubah-ubah untuk setiap nilai variabel independen.

Uji *Levene* digunakan untuk untuk menguji apakah variansi beberapa kelompok data adalah homogen melalui pendekatan statistik. Pengujian ini menilai kesamaan variansi antar kelompok dan menentukan apakah data memenuhi asumsi homogenitas yang diperlukan dalam analisis parametrik. Widya Prasetyandari [21] menggunakan uji *levene* untuk mengetahui apakah 2 kelompok data memiliki kesamaan atau berasal dari populasi yang sama.

## B. Landasan Teori

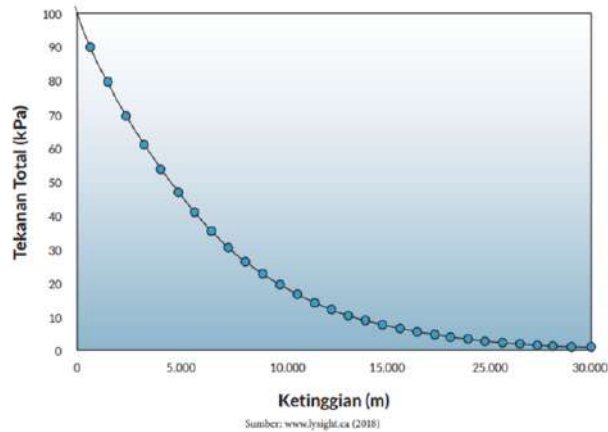
### 1. Tekanan Udara

Tekanan udara adalah gaya per satuan luas yang diberikan oleh udara yang merupakan hasil dari molekul udara yang bergerak secara acak dan bertabrakan dengan permukaan atau benda-benda di sekitarnya. Tekanan udara sangat penting dalam berbagai konteks fisika dan meteorologi, seperti dalam pemahaman tentang cuaca, pembentukan awan, dan pergerakan udara. Tekanan udara juga merupakan salah satu komponen utama yang memengaruhi pola cuaca di Bumi [22]. Dalam meteorologi, sistem tekanan tinggi dan tekanan rendah sangat berpengaruh terhadap kondisi cuaca. Sistem tekanan tinggi biasanya dikaitkan dengan cuaca cerah dan stabil, sedangkan sistem tekanan rendah sering menandakan kemungkinan hujan atau badai. Ilustrasi mengenai sistem tekanan tinggi dan rendah dapat dilihat pada Gambar 1. Dengan memahami tekanan udara, para ahli meteorologi dapat memprediksi cuaca dengan lebih akurat dan membantu masyarakat untuk mempersiapkan diri terhadap perubahan cuaca [23]. Pada (Gambar 2) menyajikan grafik distribusi atau perubahan tekanan udara dalam rentang waktu tertentu yang dapat digunakan untuk menganalisis tekanan total dari ketinggian .



Gambar 1. Tekanan Udara

(Sumber : : <https://shorturl.at/XLnG4> )



Gambar 2. Grafik Tekanan Udara.  
( Sumber: <https://shorturl.at/XLnG4> )

## 2. Akuisisi Data

Sistem akuisisi data merupakan suatu sistem yang dirancang untuk mengambil, merekam, dan menyiapkan data dari lingkungan fisik agar dapat diproses lebih lanjut secara digital. Sistem ini berperan penting dalam mengubah informasi dari fenomena fisik (seperti tekanan, suhu, kelembaban) menjadi sinyal digital yang dapat dianalisis dan disimpan oleh komputer atau mikrokontroler. Pada umumnya, sistem akuisisi data terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain: sensor sebagai alat pengukur, mikrokontroler atau unit pemroses sebagai pengendali utama, serta media penyimpanan atau komunikasi seperti SD card atau modul WiFi. Komponen saling terintegrasi untuk memastikan data yang dihasilkan bersifat cepat, akurat, dan real-time. Pemilihan metode dan perangkat dalam sistem akuisisi data bertujuan untuk menyederhanakan proses pengambilan dan pengolahan data, meningkatkan efisiensi, serta meminimalkan kesalahan. Dengan demikian, data yang diperoleh dapat langsung digunakan untuk keperluan analisis, visualisasi, atau pengambilan keputusan berbasis data [24].

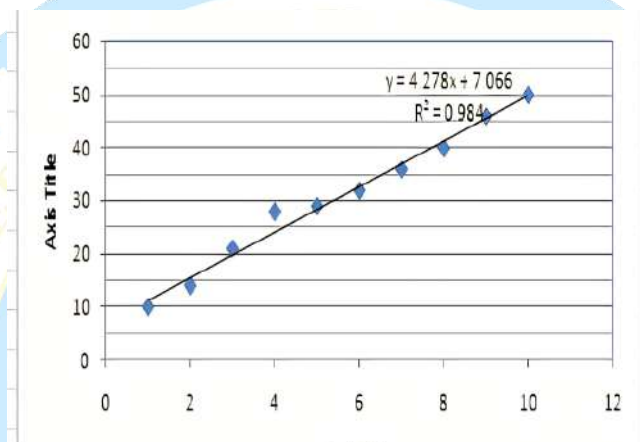
## 3. Reresi Linear

Regresi linear adalah sebuah analisis statistik yang mempelajari hubungan antara satu variabel tak bebas dan satu variabel bebas. Metode ini dapat digunakan untuk menguji sejauh mana hubungan sebab-akibat antara faktor penyebab (X)

terhadap variabel akibat (Y) contoh grafik regresi linear dapat dilihat pada Gambar 3 [25]. Rumus regresi linear dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$y = ax + b \quad (1)$$

- $y$  = variabel dependen (target)
- $x$  = variabel independen (prediktor)
- $a$  = koefisien regresi (kemiringan garis)
- $b$  = intercept (konstanta)



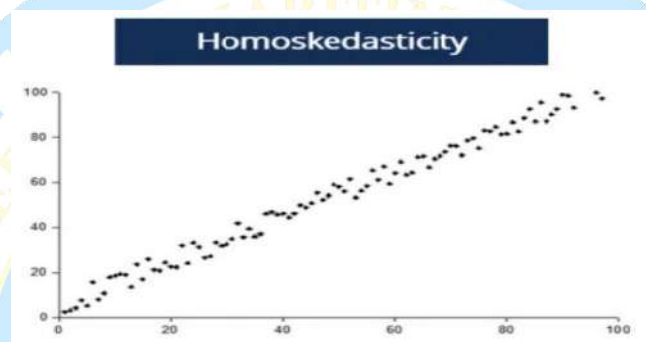
Gambar 3. Grafik Regresi Linear  
( Sumber: <https://1lnk.dev/9GYYu> )

#### 4. Uji Homogenitas

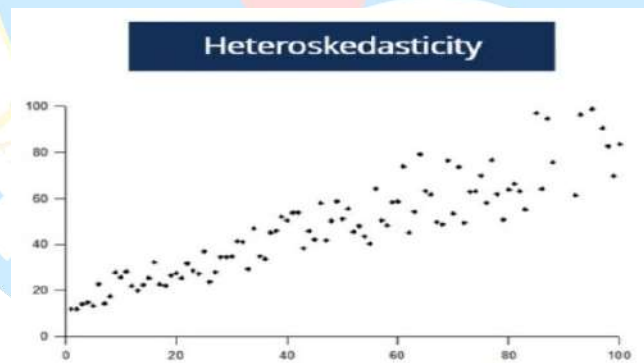
Uji homogenitas digunakan untuk mengetahui apakah beberapa varians populasi memiliki nilai yang sama atau tidak. Uji ini penting dalam proses validasi data untuk memastikan bahwa sebaran variansi antar kelompok bersifat seragam. Homogenitas variansi menunjukkan bahwa data memiliki tingkat penyebaran yang konsisten antar kelompok sehingga layak digunakan untuk analisis statistik parametrik [26]. Uji homogenitas umumnya dilakukan sebelum analisis lanjutan untuk melihat kestabilan performa sensor, terutama ketika membandingkan hasil pengukuran dari beberapa sensor atau antara sensor dengan alat acuan. Jika variansi antarkelompok setara, maka perbedaan nilai yang muncul berasal dari perbedaan data pengukuran, bukan karena variasi penyebaran yang tidak merata. [27] . Selain itu, proses analisis juga dilengkapi dengan uji residu untuk mengevaluasi apakah

model regresi memenuhi asumsi dasar, seperti kenormalan residu, sebaran residu yang acak, serta tidak adanya pola tertentu yang menunjukkan ketidaktepatan model. Uji residu ini berperan penting dalam memastikan bahwa model kalibrasi yang digunakan benar-benar valid dan dapat menggambarkan hubungan antara sensor dan nilai acuan secara akurat.

Ilustrasi mengenai data yang memiliki varians homogen melalui sebaran residu dapat dilihat pada Gambar 4, sedangkan contoh varians yang tidak homogen ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Grafik Homogenitas ( Homoscedasticity )  
( Sumber : <https://shorturl.at/rPnIm> )



Gambar 5. Grafik tidak homogen ( Heteroskedasticity )  
( Sumber : <https://shorturl.at/rPnIm> )

## 5. Uji *Levene's Test*

Uji *Levene* ( *Levene* 1960 ) digunakan untuk menguji kesamaan varians dari beberapa populasi. Uji *Levene* merupakan uji alternatif dari uji Bartlett. Jika ada bukti yang kuat bahwa data berdistribusi normal atau mendekati normal, maka uji

Bartlett lebih baik digunakan. Uji *Levene* menggunakan analisis varian satu arah. Data ditransformasikan dengan jalan mencari selisih masing-masing skor dengan rata-rata kelompoknya [28]. Pengujian homogenitas pada penelitian ini mengacu pada statistik Uji *Levene*, di mana formulasi perhitungannya dapat dilihat pada Persamaan 2.

$$W = \frac{(n - k) \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Z}_i - \bar{Z})^2}{(k - 1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2} \quad (2)$$

- $n$  = total jumlah seluruh data
- $n_i$  = jumlah data pada kelompok
- $Z_{ij}$  = nilai deviasi absolut suatu data terhadap median atau mean pada kelompok ke- $i$
- $\bar{Z}_i$  = rata-rata nilai deviasi absolut pada kelompok ke- $i$
- $\bar{Z}$  = rata-rata keseluruhan dari  $\bar{Z}_i$

## 6. NTP (Network Time Protocol)

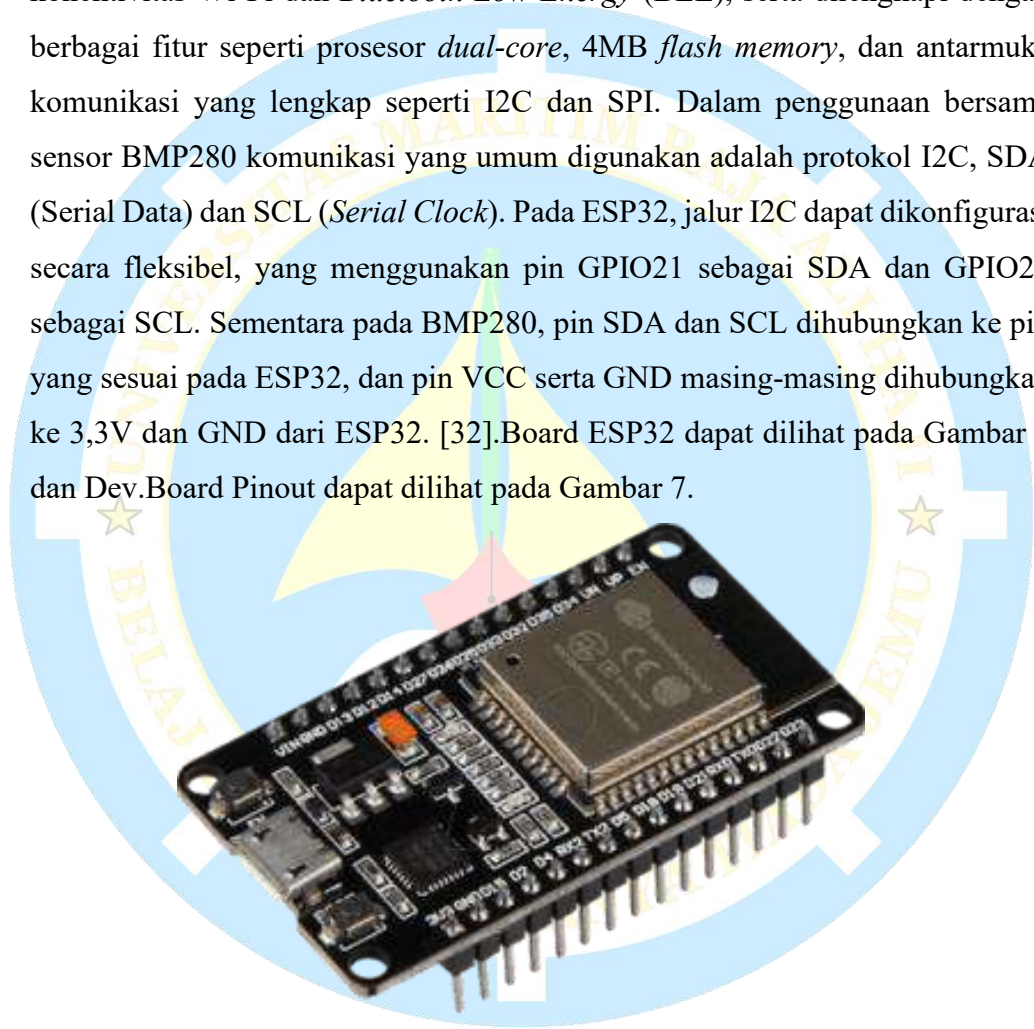
NTP (*Network Time Protocol*) adalah protokol yang berfungsi untuk menyinkronkan waktu antar komputer dalam suatu jaringan. Sinkronisasi waktu merupakan salah satu topik dalam ilmu komputer yang bertujuan untuk menyeragamkan waktu pada setiap elemen dalam suatu sistem jaringan [29]. Jika tidak ada mekanisme sinkronisasi, meskipun awalnya waktu telah diatur dengan akurat, perbedaan waktu antar elemen sistem akan terjadi seiring berjalannya waktu akibat penyimpangan pada masing-masing clock. NTP menggunakan algoritma Marzullo dengan referensi skala waktu UTC (*Coordinated Universal Time*). Biasanya, jaringan NTP mendapatkan informasi waktu dari sumber yang dapat dipercaya, Seperti Server di NTP (*Network Time Protocol*) digunakan untuk menyediakan waktu yang akurat dan tersinkronisasi kepada perangkat-perangkat dalam jaringan [30]. Server ini mengambil referensi waktu dari sumber yang sangat presisi, seperti jam atom atau GPS (pada stratum 1), dan menyebarkannya ke klien atau server lain di tingkat bawahnya (stratum 2, 3, dst). Dengan bantuan server NTP, semua perangkat dalam suatu sistem atau jaringan dapat memiliki waktu yang sama, yang penting untuk keperluan logging, keamanan, komunikasi jaringan,

sistem terdistribusi, serta berbagai proses yang membutuhkan sinkronisasi waktu yang konsisten [31].

## C. Komponen

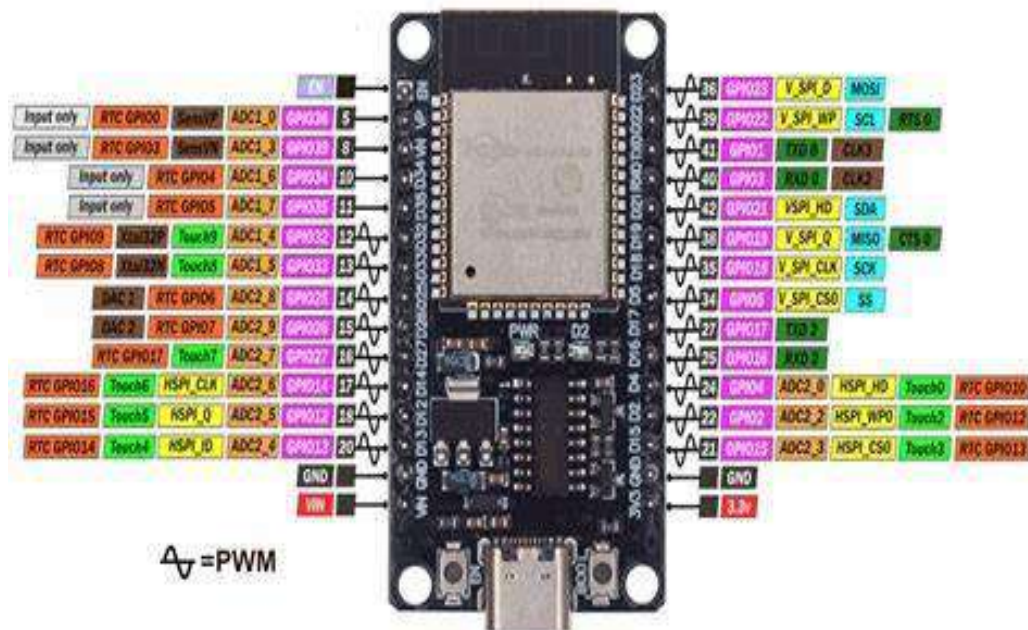
### 1. Mikrokontroler ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler buatan *Espressif Systems* yang mendukung konektivitas Wi-Fi dan *Bluetooth Low Energy* (BLE), serta dilengkapi dengan berbagai fitur seperti prosesor *dual-core*, 4MB *flash memory*, dan antarmuka komunikasi yang lengkap seperti I2C dan SPI. Dalam penggunaan bersama sensor BMP280 komunikasi yang umum digunakan adalah protokol I2C, SDA (Serial Data) dan SCL (*Serial Clock*). Pada ESP32, jalur I2C dapat dikonfigurasi secara fleksibel, yang menggunakan pin GPIO21 sebagai SDA dan GPIO22 sebagai SCL. Sementara pada BMP280, pin SDA dan SCL dihubungkan ke pin yang sesuai pada ESP32, dan pin VCC serta GND masing-masing dihubungkan ke 3,3V dan GND dari ESP32. [32]. Board ESP32 dapat dilihat pada Gambar 6 dan Dev.Board Pinout dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Board Mikrokontroler ESP32.

( Sumber: <https://shorturl.at/5iBYo> )



Gambar 7. ESP32 DEV.Board Pinout.  
( Sumber: <https://shorturl.at/rnpAm> )

## 2. Modul Micro SD

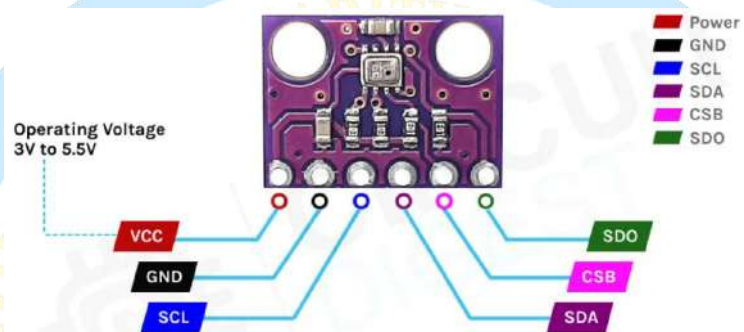
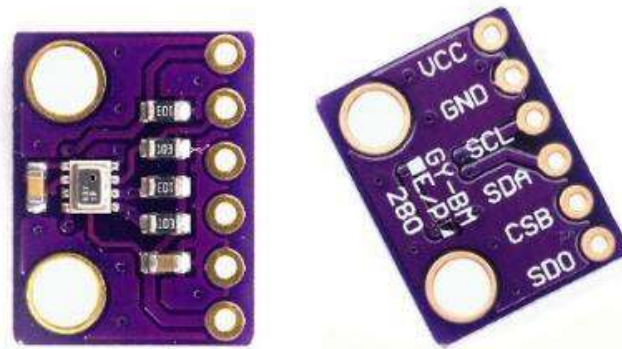
Wemos Micro SD Card (Gambar 8) adalah modul penyimpanan tambahan yang menggunakan kartu MicroSD dan bekerja melalui antarmuka komunikasi SPI (Serial Peripheral Interface). Modul ini digunakan dalam aplikasi pencatatan data atau penyimpanan file pada berbagai proyek mikrokontroler. Modul ini memiliki empat jalur utama komunikasi SPI, yaitu MOSI (Master Out Slave In) yang berfungsi untuk mengirimkan data dari mikrokontroler ke kartu MicroSD, MISO (Master In Slave Out) yang menerima data dari kartu MicroSD ke mikrokontroler, SCK (Serial Clock) yang memberikan sinyal clock untuk sinkronisasi pertukaran data, dan CS (Chip Select) yang digunakan untuk mengaktifkan modul saat proses komunikasi berlangsung. Modul ini dirancang untuk bekerja pada tegangan 3.3V [33].



Gambar 8. Wemos Micro SD Card  
( Sumber: <https://shorturl.at/kpsEF> )

### 3. Sensor Tekanan BMP280

Sensor BMP 280 (Gambar 9) merupakan sensor digital barometrik buatan Bosch Sensortec yang dirancang khusus untuk pemantauan tekanan udara dan suhu. BMP280 ini versi penyempurnaan dari BMP180 dan BMP085, dengan keunggulan dalam hal akurasi, resolusi, serta konsumsi daya yang lebih rendah, BMP280 mampu mengukur tekanan dalam rentang 300 hPa hingga 1100 hPa (hektopascal), yang setara dengan 30.000 Pa hingga 110.000 Pa (pascal) dengan ketinggian 0 hingga 9000 meter di atas permukaan laut. Satuan hektopascal (hPa) merupakan turunan dari pascal (Pa), di mana  $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$ . Dalam meteorologi, hPa lebih praktis digunakan karena tekanan udara umumnya berada pada kisaran ratusan hingga ribuan hPa. Misalnya, tekanan standar di permukaan laut sekitar 1013 hPa (setara 101.300 Pa). Pada sensor BMP280, rentang pengukuran 300–1100 hPa berarti sama dengan 30.000–110.000 Pa. Dengan menggunakan hPa, angka lebih ringkas dan mudah dipahami tanpa mengurangi ketelitian. Sensor ini dilengkapi dengan pengukuran suhu yang membantu meningkatkan akurasi data tekanan melalui kompensasi suhu internal. BMP280 menggunakan komunikasi digital melalui protokol I2C atau SPI, yang memudahkan integrasi dengan berbagai jenis mikrokontroler, seperti Arduino, ESP32. Resolusi tinggi dari sensor ini memungkinkan pengguna untuk mendeteksi perubahan tekanan kecil yang dapat digunakan untuk pengukuran ketinggian (altitude) atau deteksi cuaca mikro [34].

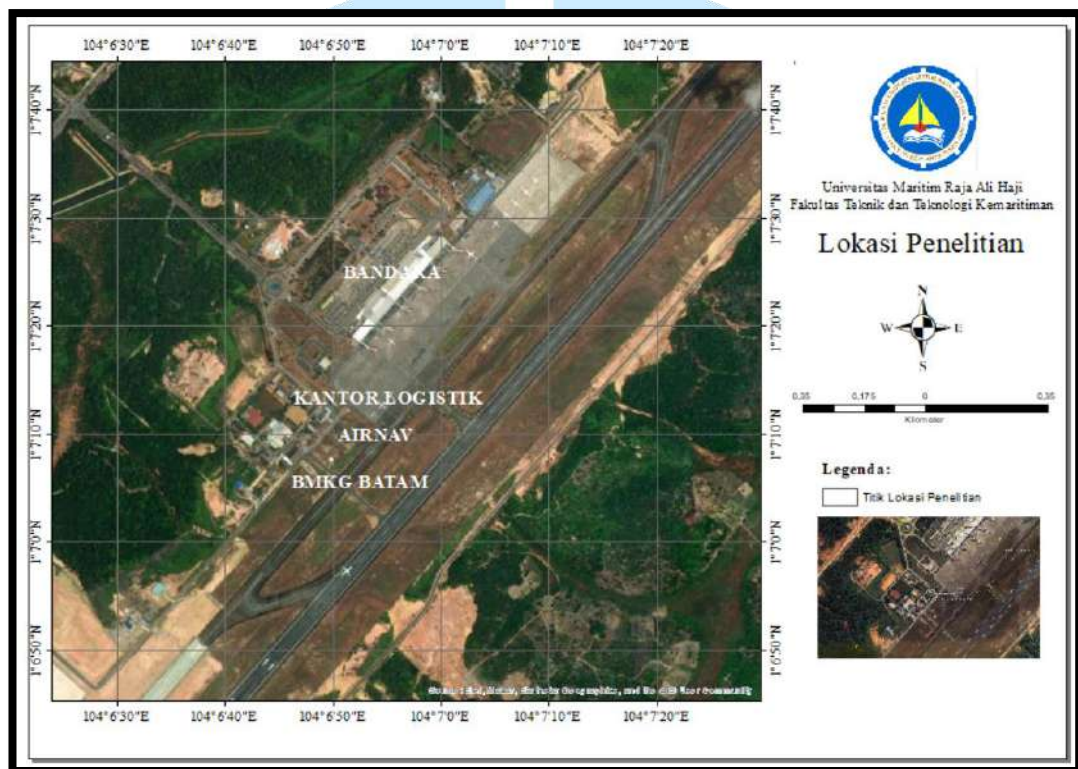


Gambar 9. Modul Sensor BMP280  
( Sumber: <https://11nq.com/vygme> )

### BAB III METODE PENELITIAN

#### A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini direncanakan akan dilakukan pada bulan September 2025 sampai November 2025. Perancangan dan pengujian alat dilaksanakan di Stasiun Meteorologi Kelas I Hang Nadim di Batam (Gambar 10). Pengambilan data dilakukan di BMKG Kelas I Hang Nadim Batam.



Gambar 10. Lokasi Stasiun Meteorologi Kelas I Hang Nadim Batam  
(Sumber : Arcgis)

#### B. Bahan dan Alat

Penelitian ini memerlukan alat dan bahan yang digunakan untuk perancangan alat pengukuran tekanan udara. Alat dan bahan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Bahan yang digunakan

| No | Nama Perangkat | Jumlah | Fungsi                                             |
|----|----------------|--------|----------------------------------------------------|
| 1  | Laptop         | 1      | Penulisan,Pemrograman,Desain<br>,dan Analisis Data |
| 2  | Solder         | 1      | MenghubunSgkan komponen elektronik                 |
| 3  | Multimeter     | 1      | Mengukur Tegangan,Arus,Hambatan                    |
| 4  | Bor            | 1      | Membuat Lubang                                     |

Tabel 2. Alat yang digunakan

| No | Nama Perangkat       | Jumlah | Fungsi                                                      |
|----|----------------------|--------|-------------------------------------------------------------|
| 1  | ESP 32               | 4      | Mikrokontroler untuk mengontrol<br>dan memproses data.      |
| 2  | PCB                  | 4      | Jalur konektivitas antar komponen                           |
| 3  | Wemos Micro SD Card  | 4      | Menyimpan data dari sensor ke<br>kartu Micro SD.            |
| 4  | Modul Sensor BMP 280 | 4      | Mengukur tekanan udara dan<br>suhu.                         |
| 5  | Kepala Charger       | 1      | Sumber daya listrik untuk mengisi<br>daya ESP32 melalui USB |
| 6  | Kabel USB            | 4      | Menghubungkan ESP32 ke<br><i>charger</i> atau komputer.     |
| 7  | Kartu Micro SD       | 4      | Media penyimpanan data hasil<br>pembacaan sensor.           |
| 8  | Panel box            | 1      | Tempat pelindung rangkaian                                  |

### C. Kriteria Akurasi dan Kestabilan Sensor

Berdasarkan dokumen teknis *Bosch Sensortec* mengenai prosedur *Outgoing Quality Control* (OQC), setiap modul BMP280 diuji secara acak sebelum proses pengemasan untuk memastikan bahwa selisih pembacaan tekanan terhadap mesin referensi masih berada dalam batas toleransi  $\pm 3$  hPa [35]. Toleransi tersebut telah mempertimbangkan pengaruh *Temperature Coefficient Offset* (TCO), stabilitas

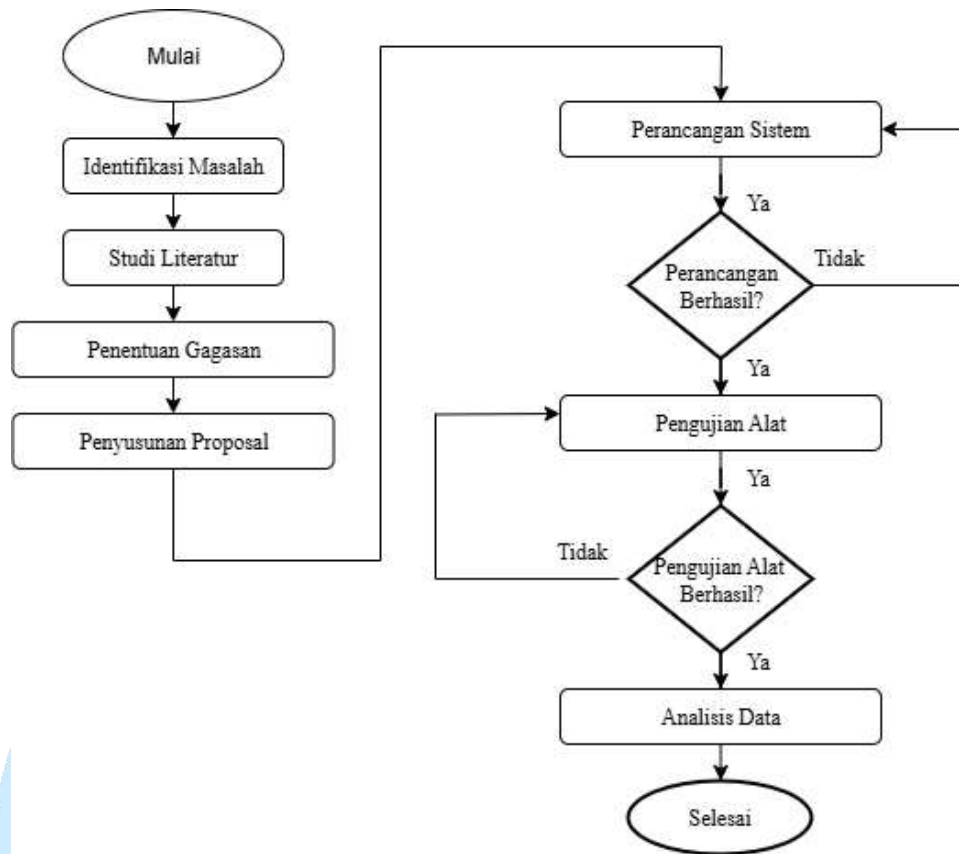
jangka panjang, deviasi alat referensi, margin variasi produksi, serta kesalahan dispersi antarunit sensor.

Dengan merujuk pada standar OQC tersebut, batas  $\pm 3$  hPa digunakan sebagai acuan kelayakan awal sensor sebelum dilakukan perbandingan terhadap data tekanan udara dari AWS. Toleransi ini dijadikan dasar untuk menilai apakah sensor berada dalam standar akurasi pabrik serta mampu mempertahankan konsistensi pembacaan selama proses pengukuran.

Evaluasi akurasi dilakukan dengan mengamati selisih pembacaan sensor terhadap nilai acuan. Sensor dinyatakan memenuhi kriteria apabila nilai deviasi tidak melampaui  $\pm 3$  hPa. Selain akurasi, kestabilan sensor juga dianalisis melalui konsistensi pembacaan pada berbagai waktu dan kondisi pengukuran. Sensor yang tetap berada dalam batas toleransi tersebut dianggap memiliki performa yang stabil serta layak digunakan untuk pemantauan tekanan udara.

#### **D. Prosedur Pelaksanaan Penelitian**

Prosedur penelitian ini diawali dengan identifikasi masalah untuk mengetahui permasalahan yang akan diteliti. Setelah itu dilakukan studi literatur dengan menelaah berbagai sumber referensi yang relevan sebagai dasar teori. Berdasarkan hasil kajian, ditentukan gagasan penelitian yang kemudian dirumuskan dalam bentuk proposal. Tahap selanjutnya adalah perancangan sistem yang meliputi penyusunan rancangan perangkat keras maupun perangkat lunak. Apabila rancangan sistem dinyatakan berhasil, proses dilanjutkan pada tahap pengujian alat. Namun, jika rancangan belum berhasil maka dilakukan perbaikan hingga sesuai dengan kebutuhan penelitian. Pada tahap pengujian, alat yang telah dirancang diuji untuk memastikan kinerja dan fungsinya berjalan dengan baik. Jika pengujian belum berhasil maka dilakukan perbaikan dan pengujian ulang. Apabila alat sudah dinyatakan berhasil, maka proses berikutnya adalah analisis data untuk memperoleh hasil sesuai dengan tujuan penelitian. Rangkaian prosedur penelitian ini ditutup dengan tahap penyimpulan yang ditandai dengan selesainya seluruh kegiatan penelitian Gambar 11.

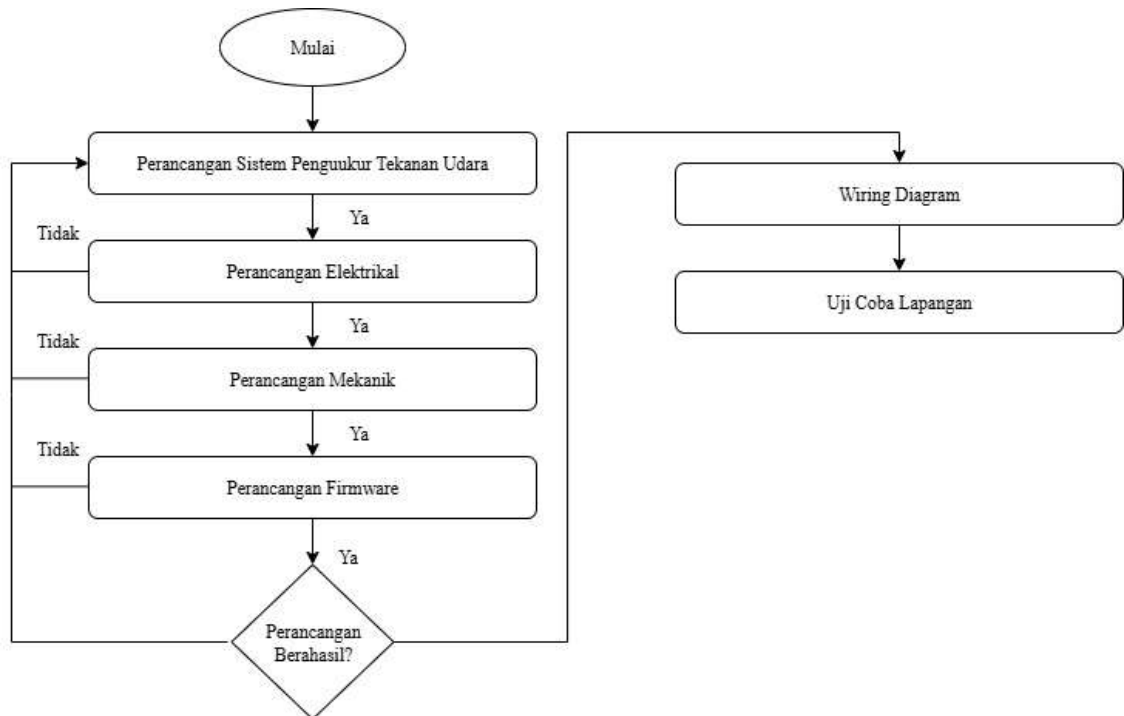


Gambar 11. Diagram Alir Penelitian.

#### E. Prosedur Perancangan Sistem

Proses penelitian ini diawali dengan tahap perancangan sistem pengukur tekanan udara yang bertujuan untuk menyusun konsep dasar dari alat yang akan dikembangkan. Setelah itu, proses dilanjutkan pada perancangan elektrikal yang mencakup penyusunan rancangan rangkaian serta koneksi antar komponen, perancangan mekanik yang berfokus pada penataan dan perlindungan komponen dalam wadah atau panel, serta perancangan firmware yang berfungsi untuk mengatur pembacaan sensor, pengolahan data, hingga penyimpanan hasil pengukuran. Seluruh tahapan perancangan tersebut kemudian melalui proses evaluasi untuk memastikan apakah sistem telah bekerja sesuai dengan kebutuhan dan tujuan penelitian. Apabila rancangan dinyatakan berhasil, maka penelitian dilanjutkan dengan penyusunan wiring diagram sebagai acuan penyambungan pin antar komponen, dan pada tahap akhir dilakukan uji coba lapangan untuk

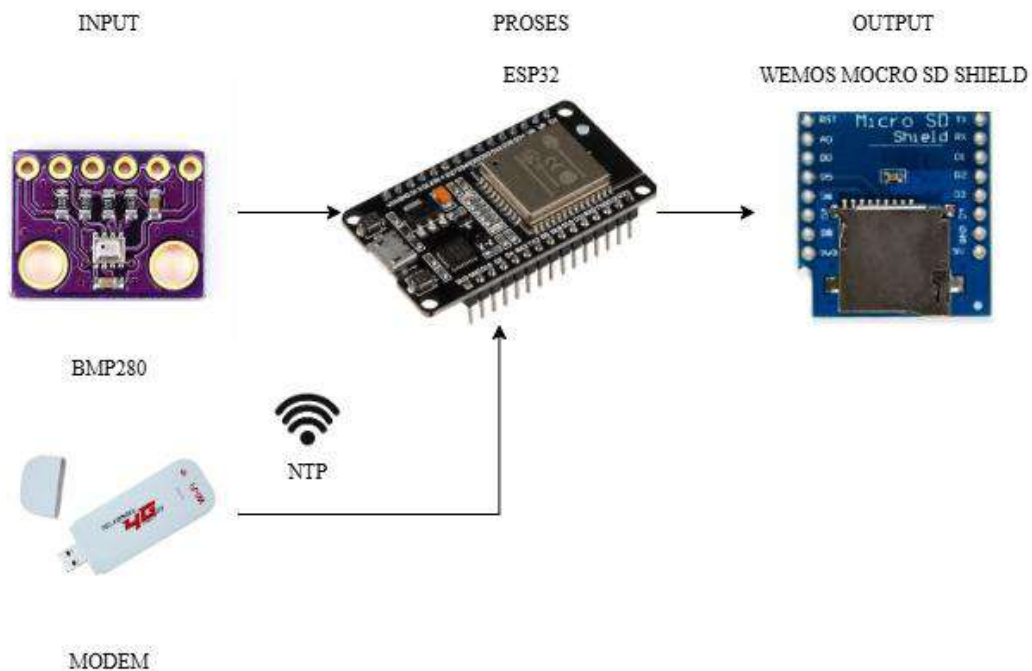
mengetahui kinerja sistem dalam kondisi sebenarnya. Diagram alir dari tahapan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Diagram Perancangan Sistem.

#### F. Perancangan Sistem Pengukuran Tekanan Udara

Sistem pengukuran tekanan udara akan dirancang menggunakan beberapa komponen utama yaitu sensor tekanan BMP280, modem wifi (NTP), ESP32, dan Wemos Micro SD Card. Sensor BMP280 digunakan untuk mengukur tekanan udara. Modem WiFi dengan protokol NTP (*Network Time Protocol*) digunakan untuk sinkronisasi waktu agar pencatatan data memiliki penanda waktu yang akurat. ESP32 berfungsi untuk menerima dan membaca data yang didapatkan dari sensor BMP280, kemudian diolah dan disimpan dalam kartu Micro SD. Diagram blok sistem yang akan dirancang dapat dilihat pada Gambar 13.

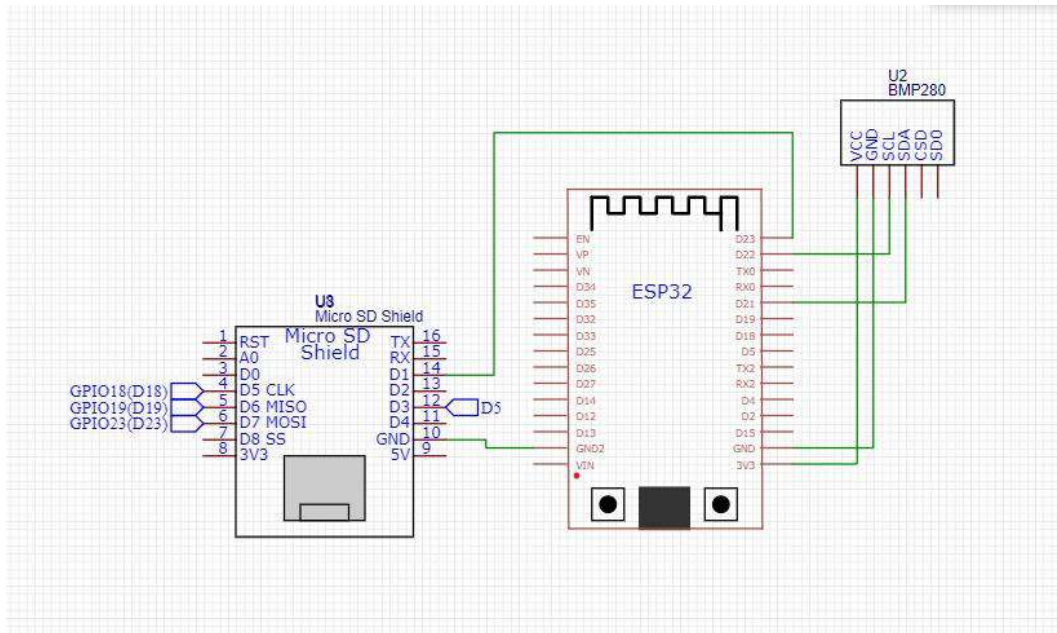


Gambar 13. Diagram Blok Sistem Pengukuran Tekanan Udara.

### 1. Perancangan Elektrikal

Perancangan elektrikal merupakan tahap penyusunan rancangan hubungan kelistrikan antar komponen yang digunakan dalam sistem pengukuran tekanan udara. Pada tahap ini ditentukan bagaimana sensor BMP280, mikrokontroler ESP32, dan modul Wemos Micro SD Card Shield saling terhubung melalui jalur listrik dan pin input-output. Selain itu, perancangan elektrikal juga mencakup penentuan sumber daya yang sesuai agar sistem dapat bekerja stabil, termasuk penyediaan tegangan dan arus yang dibutuhkan oleh masing-masing komponen.

Agar sistem dapat berfungsi dengan baik, diperlukan pengaturan tata letak koneksi yang rapi sehingga meminimalkan terjadinya gangguan sinyal maupun kesalahan pembacaan sensor. Penggunaan jalur komunikasi I2C untuk koneksi sensor dengan mikrokontroler, serta jalur wSPI untuk modul penyimpanan data, juga menjadi bagian penting dalam tahap ini. Hasil dari perancangan elektrikal diwujudkan dalam bentuk diagram koneksi (wiring diagram) yang menjadi acuan utama pada proses perakitan alat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. *Wiring Diagram* Sistem Pengukuran Tekanan Udara

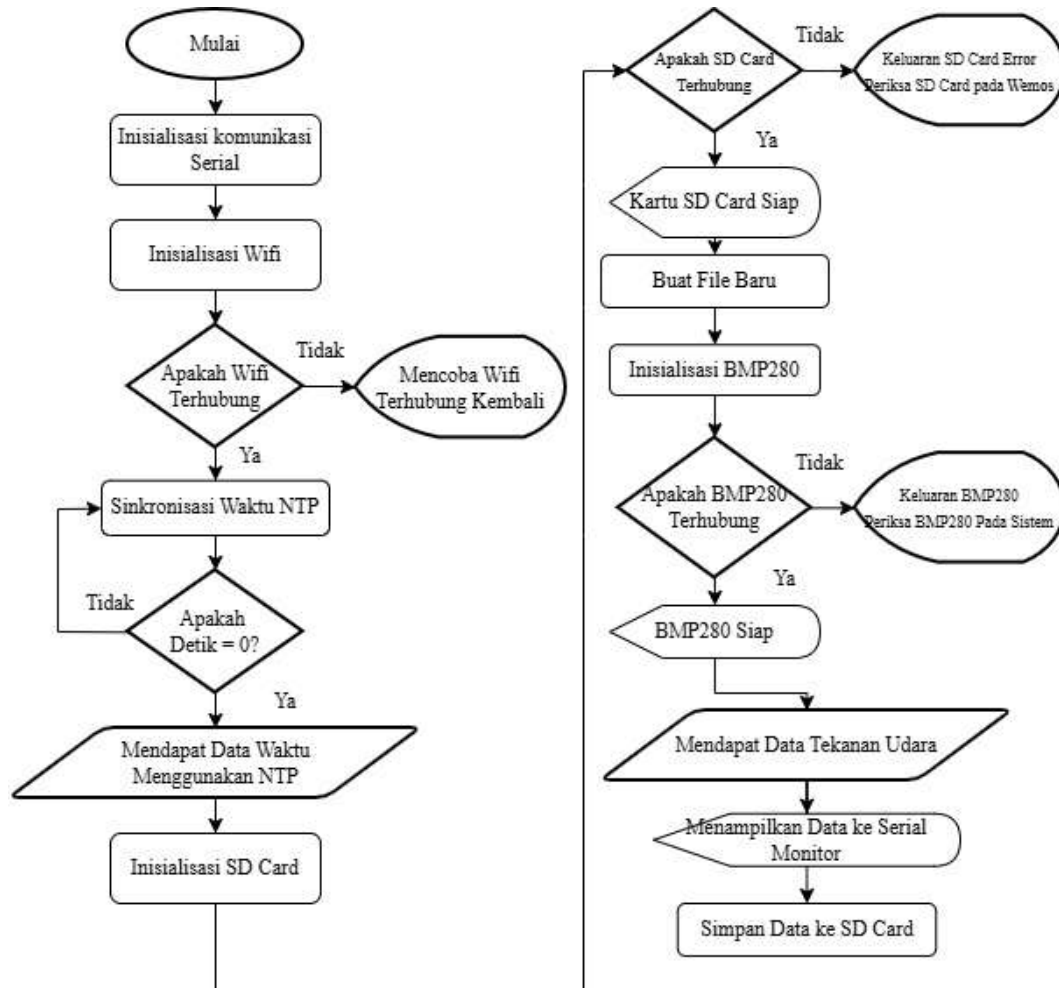
## 2. Perancangan Mekanik

Perancangan mekanik merupakan tahap penyusunan rancangan fisik atau bentuk dari sistem pengukur tekanan udara. Tahap ini berfokus pada penempatan komponen seperti sensor BMP280, mikrokontroler ESP32, serta modul Wemos Micro SD Card Shield di dalam sebuah wadah atau panel box yang dirancang agar dapat melindungi perangkat dari kondisi lingkungan luar seperti debu, panas, maupun kelembaban. Selain itu, perancangan mekanik juga mempertimbangkan aspek kerapian susunan, kemudahan dalam perawatan, serta kestabilan sistem agar alat dapat beroperasi secara optimal. Hasil perancangan mekanik diwujudkan dalam bentuk desain fisik yang nantinya akan menjadi acuan dalam pembuatan dan perakitan sistem pengukur tekanan udara.

## 3. Perancangan Firmware

Perancangan firmware merupakan tahap pengembangan perangkat lunak yang ditanamkan pada mikrokontroler ESP32 untuk mengatur jalannya sistem. Pada tahap ini dibuat program yang berfungsi untuk membaca data dari sensor BMP280, melakukan pengolahan sederhana jika diperlukan, serta menyimpan data hasil pengukuran ke dalam Wemos Micro SD Card Shield. Firmware juga dirancang agar

sistem dapat berjalan secara otomatis, mulai dari inisialisasi sensor, pengambilan data secara berkala, pencatatan dengan penanda waktu (timestamp), hingga penyimpanan data dalam format yang mudah diolah pada tahap analisis digram firmware dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Diagram Firmware

Firmware BMP280 diawali dengan memasukkan *library* yang digunakan yaitu *library wire.h* untuk inisialisasi pembacaan alamat I2C sensor BMP280. Setelah itu menambahkan *library "config.h"* untuk menyimpan konfigurasi dan pengaturan program. Kemudian menambahkan *library <SPI.H>* untuk komunikasi SPI dengan perangkat seperti kartu SD. Lalu menambahkan *library <SD.h>* Untuk membaca dan menulis data pada kartu SD. Kemudian mendeklarasikan *library* sensor secara default menggunakan "Adafruit\_BMP280 bmp;". Selanjutnya memerlukan *library <WiFi.h>* Untuk menghubungkan Arduino ke jaringan WiFi

dan juga memerlukan *library* “*time.h*” Untuk pengaturan waktu dan pencatatan waktu. Dan juga mendeklarasikan *library* “*ThingSpeak.h*” Untuk mengirim data sensor ke platform IoT ThingSpeak. Dan <*WiFiManager.h*> Untuk mengelola koneksi WiFi dengan antarmuka yang mudah digunakan (Gambar 16).

```
1  #include <Wire.h>
2  #include "config.h"
3  #include <SPI.h>
4  #include <SD.h>
5  #include <Adafruit_BMP280.h>
6  #include <WiFi.h>
7  #include "time.h"
8  #include "ThingSpeak.h"
9  #include <WiFiManager.h>
```

Gambar 16. Library.

Kemudian memasukkan jaringan yang digunakan ke dalam variabel *SSID* dan *password* untuk melakukan pembacaan wifi agar ESP32 terhubung ke internet untuk mendapatkan waktu dari server NTP, Dan memerlukan Objek *WiFiClient* digunakan untuk berkomunikasi dengan server melalui internet (Gambar 17).

```
11 const char* ssid = "POCO"; // your network SSID (name)
12 const char* password = "31072001"; // your network password
13 WiFiClient client;
```

Gambar 17. Inisialisasi Nama Wifi dan Pasword

Kemudian memasukan program Platform Iot yang dimana *myChannelNumber* ialah Nomor saluran ThingSpeak, Sedangkan *myWriteAPIKey* adalah kunci api untuk mengirim data ke saluran platform iot (Gambar 18).

```
15 unsigned long myChannelNumber = 2444939;
16 const char * myWriteAPIKey = "FDLILY9Y9X5CFARS";
```

Gambar 18. Inisialisasi ke platform Iot

Setelah itu melakukan inialisasi variabel *timeinfo* untuk konfigurasi struktur waktu dari internet yang terdiri dari detik, menit, jam, dan tanggal yang disimpan pada variabel *timeinfo*, Kemudian mendefinisikan variabel “*ntpserver*”, “*gmtOffset\_sec*”, dan “*daylightOffset\_sec*” untuk konfigurasi dan mendapatkan waktu dari server NTP. Variabel *ntpserver* berfungsi untuk meminta waktu dari

pool.ntp.org yang merupakan server waktu. Variabel *gmtOffset\_sec* berfungsi untuk menentukan offset dalam hitungan detik antara zona waktu yang digunakan dengan GMT. Variabel *daylightOffset\_sec* berfungsi untuk mendefinisikan offset dalam detik untuk waktu siang (Gambar 19).

```
18 struct tm timeinfo;
19 int tahun;
20 byte bulan, hari, jam, menit, detik;
21 const char* ntpServer = "pool.ntp.org";
22 const long gmtOffset_sec = 7*3600;
23 const int daylightOffset_sec = 0;
```

Gambar 19. Inisialisasi konfigurasi Waktu dari Internet

Selanjutnya memasukan program File *myFile* yang berfungsi untuk Membuat objek untuk mengelola file pada kartu SD. Dan *float* suhu, tekanan berfungsi untuk Menyimpan nilai suhu dan tekanan dari sensor. Juga memerlukan fungsi Adafruit\_BMP280 bmp untuk Membuat objek untuk berkomunikasi dengan sensor BMP280 melalui I2C (Gambar 20).

```
25 File myFile;
26 float suhu, tekanan;
27 Adafruit_BMP280 bmp; // I2C
```

Gambar 20. Inisialisai File pada kartu SD

Kemudian kita perlu memberikan Fungsi *void* ambilWaktu yang digunakan untuk mendapatkan waktu lokal saat ini dan memberikan fungsi *Serial.print(&timeinfo, "%m %d %Y %H:%M:%S");* yang berfungsi untuk mencetak ke Serial Monitor dalam format "bulan hari tahun jam:menit". Dan juga memberikan fungsi *Serial.println ("Failed to obtain time");* untuk Mencetak pesan "Failed to obtain time" ke Serial Monitor jika *getLocalTime* gagal mendapatkan waktu. Dan *return* untuk mengakhiri eksekusi fungsi jika *getLocalTime* gagal mendapatkan waktu (Gambar 21).

```

29 void ambilWaktu()
30 {
31     struct tm timeinfo;
32     if (!getLocalTime(&timeinfo)) {
33         Serial.println("Failed to obtain time");
34         return;
35     }
36     Serial.print(&timeinfo, "%m %d %Y %H:%M:%S");
37 }

```

Gambar 21. Fungsi untuk mendapatkan waktu lokal.

Kemudian memerlukan *String newFileName* untuk Membuat Nama File Baru: Misalnya, dengan menggabungkan *fileName* dengan *fileNumber* untuk membuat *"/File1"*, *"/File2"*, dan seterusnya. Dan juga untuk menentukan file mana yang sedang diproses atau ditulis, serta menyimpannya atau membacanya dari memori atau kartu SD (Gambar 22).

```

50 String newFileName, fileName = "/File";
51 int fileNumber = 1;

```

Gambar 22. Fungsi untuk membuat file baru.

Selanjutnya pada *void setup* berfungsi untuk pengecekan wifi yang terhubung. Pemanggilan fungsi *Wifi.status* menggunakan logika *while* dan juga fungsi inisialisasi ke platform iot *ThingSpeak* (Gambar 23).

```

53 void setup()
54 {
55     Serial.begin(115200);
56
57     //connect to WiFi
58     WiFi.mode(WIFI_STA);
59     Serial.printf("Connecting to %s ", ssid);
60     WiFi.begin(ssid, password);
61     // if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
62     // Serial.print(".");
63     while(WiFi.status() != WL_CONNECTED ){
64         delay(500);
65         Serial.print(".");
66     }
67     Serial.println("\nConnected. ");
68
69     ThingSpeak.begin(client); // Initialize ThingSpeak

```

Gambar 23. Inisialisasi Wifi.

Kemudian menggunakan fungsi '*configTime*' yang digunakan untuk mengatur zona waktu dan server NTP (*Network Time Protocol*) yang akan digunakan untuk mendapatkan waktu secara tepat (Gambar 24).

```
71 //init and get the time
72 configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
73 struct tm timeinfo;
74 getLocalTime(&timeinfo);
```

Gambar 24. Inisialisasi untuk mendapatkan waktu secara tepat.

Pada *void setup* terdapat juga perintah pengecekan kartu SD yang ditampilkan di serial monitor, jika kartu SD terbaca maka akan menampilkan "*initialization done.*" dan jika tidak maka akan menampilkan "*initialization failed!*". Serta menggunakan logika *While* untuk Memastikan bahwa setiap file yang dibuat memiliki nama yang berbeda untuk menghindari eror atau kehilangan data (Gambar 25)

```
88 Serial.print("Initializing SD card...");
89 if (!SD.begin(5)) {
90     Serial.println("initialization failed!");
91     while (1);
92 }
93 // Open the data file for writing
94 while (SD.exists(fileName + String(fileNumber) + ".txt")) {
95     fileNumber++;
96 }
```

Gambar 25. Inisialisasi SD card

Dan juga ada fungsi yang dimana Jika *bmp.begin()* mengembalikan *false* atau 0, itu berarti sensor BMP280 tidak dapat dikenali atau terdeteksi dengan benar. Pesan error ditampilkan di Serial Monitor yang memberi tahu pengguna tentang masalah yang mungkin terjadi, seperti masalah kabel penghubung atau alamat sensor yang salah. dan Informasi tambahan tentang *sensorID()* dari objek *bmp* dicetak, yang memberikan informasi identifikasi sensor yang terdeteksi. Dan program masuk ke dalam *loop while(1)* yang tidak berujung jika sensor tidak terdeteksi, yang menghentikan eksekusi lebih lanjut dari program (Gambar 26).

```

116   if (!status) {
117       Serial.println(F("Could not find a valid BMP280 sensor, check wiring or "
118                       "try a different address!"));
119       Serial.print("SensorID was: 0x"); Serial.println(bmp.sensorID(), 16);
120       Serial.print("        ID of 0xFF probably means a bad address, a BMP 180 or BMP 085\n");
121       Serial.print("        ID of 0x56-0x58 represents a BMP 280,\n");
122       Serial.print("        ID of 0x60 represents a BME 280.\n");
123       Serial.print("        ID of 0x61 represents a BME 680.\n");
124       while (1) delay(10);
125   }

```

Gambar 26. Menampilkan ke serial monitor jika sensor mengalami kegagalan

Pada *void loop* dimulai dengan fungsi untuk membaca nilai suhu dan tekanan dari sensor BMP280 yang dimana nilai ini akan disimpan dalam variabel ‘suhu’ dan ‘tekanan’ (Gambar 27).

```

141 void loop(){
142     float suhu = bmp.readTemperature();
143     float tekanan = bmp.readPressure();

```

Gambar 27. Membaca nilai suhu dan tekanan

Dan pada *void loop* juga didapat diinisialisasikan ke dalam fungsi “*myFile = SD.open(newFileName, FILE\_APPEND);*”. Selanjutnya logika *if* pada pernyataan *myFile* menyimpan data ke dalam kartu SD yang terdiri dari waktu, tekanan, dan suhu menggunakan fungsi “*myfile.print*” dan fungsi “*myFile.close*” untuk keluar dari file sebelumnya ( Gambar 28).

```

160   myFile = SD.open(newFileName, FILE_APPEND);
161   if (myFile) {
162       //Serial.print("Writing to data.txt...");
163       configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
164       struct tm timeinfo;
165       getLocalTime(&timeinfo);
166       myFile.print(&timeinfo, "%m %d %Y %H:%M:%S");
167       myFile.print(", ");
168       myFile.print(suhu);
169       myFile.print(", ");
170       myFile.println(tekanan);
171       *
172       // close the file:
173       myFile.close();
174   }

```

Gambar 28. Inisialisasi SD open

Dan selanjutnya ada fungsi ‘*else*’ yang berfungsi untuk menampilkan Pesan “*error opening data.txt*” akan dicetak ke Serial Monitor untuk memberi tahu pengguna bahwa ada masalah dengan membuka file. Kemudian juga terdapat Fungsi *ThingSpeak.setField (field, value)* digunakan untuk menetapkan nilai suhu

ke *field* 5 dan nilai tekanan ke *field* 6 pada pesan yang akan dikirim ke *ThingSpeak*. Ini mempersiapkan data yang akan dikirim ke server *ThingSpeak* ( Gambar 29).

```
175     else {  
176         // if the file didn't open, print an error:  
177         Serial.println("error opening data.txt");  
178     }  
179  
180     ThingSpeak.setField(5, suhu );  
181     ThingSpeak.setField(6, tekanan );  
182 }
```

Gambar 29. Platform penyimpanan di ThingSpeak

Dan ada fungsi *delay* yang digunakan untuk mengatur interval waktu antara pengiriman data ke *ThingSpeak*, memberikan waktu bagi sistem untuk menyelesaikan operasi sebelum mengirim data selanjutnya (Gambar 30).

```
delay(60000);  
}
```

Gambar 30. Mengatur interval waktu

### G. Prosedur Uji Lapangan

proses uji lapangan sistem pengukur tekanan udara yang telah dirancang. Proses dimulai dengan persiapan alat, yaitu memastikan seluruh komponen seperti sensor BMP280, mikrokontroler ESP32, Wemos Micro SD Card Shield, serta modem WiFi dalam kondisi baik dan siap digunakan. Tahap berikutnya adalah pemasangan alat di lokasi pengujian, di mana perangkat diletakkan pada posisi yang sesuai agar dapat merekam data tekanan udara secara optimal. Setelah pemasangan selesai, dilakukan sinkronisasi waktu menggunakan protokol NTP (Network Time Protocol) melalui koneksi WiFi. Tahapan ini penting agar data yang tersimpan memiliki penanda waktu yang akurat. Selanjutnya, sistem akan masuk ke tahap pengambilan data sensor, yaitu proses pembacaan nilai tekanan udara secara otomatis oleh sensor BMP280. Data yang diperoleh kemudian masuk ke tahap penyimpanan data, di mana seluruh hasil pembacaan disimpan dalam kartu Micro SD sehingga dapat diakses dan dianalisis lebih lanjut. Setelah semua tahapan dilalui, proses uji lapangan dinyatakan selesai diagram prosedur uji lapangan dapat dilihat pada Gambar 31.



Gambar 31. Diagram Prosedur Uji Lapangan

## H. Pengolahan dan Analisis Data

### 1. Kalibrasi Sensor

Akurasi sensor diperlukan pada alat pengukuran tekanan udara yang akurat dengan cara kalibrasi sensor. Kalibrasi adalah seberapa tepat dan akurat data yang diperoleh ketika melakukan sebuah pengukuran [36]. Kalibrasi sensor BMP280 menggunakan perbandingan antara data sensor BMP280 dan Sensor AWS dengan menggunakan metode Regresi Linear. Pengkalibrasian bertujuan untuk mengetahui seberapa akurat sensor yang digunakan dengan mencari nilai *Root Mean Square Error* (RMSE), nilai *error* dan akurasi. Uji akurasi instrumen dilakukan dengan menghitung *Root Mean Square Error* (Haq et al., 2021). RMSE dapat dilihat pada Persamaan 4. Kemudian dilakukan pengukuran untuk mencari nilai error dapat dilihat pada Persamaan 5. Setelah mendapatkan nilai error, kemudian mencari nilai persen error rata-rata yang dapat dilihat pada Persamaan 6 [38]. Dari perhitungan kesalahan relatif (ER), nilai akurasi dapat dihitung dari hasil pengukuran dengan Persamaan 7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_b - x_a)^2}{n}} \quad (4)$$

Dimana,

RMSE = nilai Root Mean Square Error

$x_a$  = nilai pengukuran

$x_b$  = nilai sebenarnya

$n$  = jumlah data

$$\text{Persentase Error (\%)} = \left| \frac{\text{Nilai Aktual} - \text{Nilai Sensor}}{\text{Nilai Aktual}} \right| \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{Error Rata - rata (\%)} = \frac{\sum \text{Error (\%)}}{\text{Banyak data Error (\%)}} \quad (6)$$

$$\text{Akurasi} = 100\% - \text{Error Rata - rata} \quad (7)$$

Persamaan regresi linear juga digunakan untuk mendapatkan hasil pengukuran sensor yang telah dikalibrasi dengan perbandingan Regresi Linear. Selain itu, nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) dapat diperoleh untuk menunjukkan keceratan nilai sensor dengan nilai kalibrator. Persamaan regresi linear dapat dilihat pada Persamaan 8 [39]. Koefisien determinasi dapat dilihat pada Persamaan 9.

$$y = ax + b \quad (8)$$

Dimana,

Y = Variabel Terikat

a = Intercept

b = Koefisien Variabel X

X = Variabel Bebas

$$R^2 = 1 - \frac{SS \text{ Error}}{SS \text{ Total}} = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

Dimana,

$y_i$  = Observasi Respon ke-i

$\hat{y}_i$  = Rata-rata Respon ke-i

$\bar{y}$  = Rata-rata Respon ke I

## 2. Uji homogenitas

Uji homogenitas varians merupakan metode statistik yang digunakan untuk menentukan apakah dua kelompok data memiliki variansi yang setara. Uji ini

penting dalam penilaian kestabilan data pengukuran, khususnya untuk mengetahui apakah sensor memiliki performa yang konsisten dibandingkan alat acuan. Dalam penelitian ini, sensor BMP280 dibandingkan dengan data pembanding dari *Automatic Weather Station* (AWS) guna menilai kestabilan pembacaan tekanan udara dan suhu. Uji homogenitas dilakukan untuk melihat apakah variansi pembacaan sensor BMP280 dan AWS memiliki nilai yang setara, sehingga mencerminkan kestabilan kinerja sensor [40].

Uji homogenitas sangat bermanfaat dalam konteks pengujian stabilitas sensor, karena jika variansi sensor tidak berbeda secara signifikan dari variansi alat pembanding (AWS), maka sensor dapat dikategorikan stabil dan layak digunakan untuk pemantauan lingkungan. Pengujian dilakukan pada tingkat signifikansi 0,05 ( $\alpha = 5\%$ ) untuk menentukan kesetaraan variansi antara sensor BMP280 dan AWS. Dalam penelitian ini, uji homogenitas tidak berfungsi sebagai pengujian hipotesis utama, melainkan sebagai uji prasyarat yang memastikan bahwa data memenuhi asumsi sebelum dilakukan analisis lanjutan, seperti uji residu dan analisis regresi.

Hipotesis uji homogenitas variansi dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

- $H_0$  (hipotesis nol): variansi data antara sensor BMP280 dan AWS adalah sama (homogen).
- $H_a$  (hipotesis alternatif): variansi data antara sensor BMP280 dan AWS berbeda (tidak homogen).

Dasar pengambilan keputusan:

- A. Jika nilai signifikansi  $> 0,05 \rightarrow H_0$  diterima dan  $H_a$  ditolak, artinya variansi sensor BMP280 dan AWS dianggap sama. Hal ini menunjukkan bahwa sensor BMP280 stabil karena memiliki variansi yang sebanding dengan AWS.
- B. Jika nilai signifikansi  $< 0,05 \rightarrow H_0$  ditolak dan  $H_a$  diterima, artinya terdapat perbedaan variansi yang signifikan antara sensor BMP280 dan AWS. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor BMP280 tidak stabil dibandingkan AWS.

#### 4. Uji Lanjut

Uji lanjut digunakan untuk memperdalam analisis terhadap hasil pengukuran tekanan udara dari sensor BMP280. Tahap ini dilakukan dengan pengujian menggunakan empat buah sensor BMP280 secara bersamaan. Penggunaan empat sensor dimaksudkan sebagai bentuk perulangan (replikasi) dalam penelitian, sehingga hasil pengukuran dapat diuji konsistensinya dan tidak hanya bergantung pada satu sensor saja. Dengan adanya perulangan, data yang diperoleh menjadi lebih reliabel, akurat, serta mampu menggambarkan kestabilan performa sensor secara menyeluruh.

Setiap sensor ditempatkan berdekatan agar mendapatkan kondisi lingkungan yang sama, sehingga perbedaan pembacaan yang muncul benar-benar berasal dari performa sensor itu sendiri dan bukan dari faktor eksternal seperti suhu atau tekanan udara yang tidak merata. Data tekanan udara dari keempat sensor BMP280 dan AWS direkam secara berkala sesuai interval waktu yang ditentukan. Selanjutnya, data dianalisis menggunakan regresi linear dan analisis residual untuk melihat tingkat kesesuaian pembacaan sensor terhadap AWS, serta dilanjutkan dengan uji *Levene* untuk menilai homogenitas varians residual. Melalui rangkaian uji ini, dapat diketahui sensor mana yang memiliki stabilitas pembacaan lebih baik dan apakah terdapat perbedaan yang signifikan dalam kestabilan error antarsensor.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

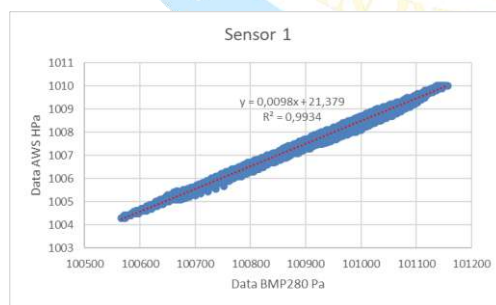
### A. Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor merupakan proses pengaturan ulang atau penyesuaian parameter atau karakteristik suatu komponen elektronika agar sesuai dengan standar atau spesifikasi yang telah ditentukan [41]. Kalibrasi ini menggunakan metode regresi linier sederhana dengan model persamaan  $y = ax + b$ , di mana  $a$  merupakan kemiringan garis (*slope*) dan  $b$  merupakan nilai potong (*intercept*) [42].

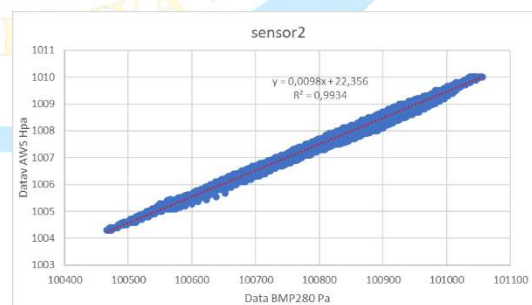
Hasil analisis regresi linier yang disajikan pada Tabel 3 dan grafik pada Gambar 32 menunjukkan bahwa keempat sensor BMP280 memiliki hubungan linier yang sangat kuat dengan data AWS. Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang tinggi pada setiap sensor menunjukkan bahwa variasi data tekanan udara dari AWS dapat dijelaskan dengan sangat baik oleh hasil pembacaan sensor. Hal ini berarti bahwa sensor sudah memiliki akurasi yang tinggi bahkan sebelum dilakukan proses kalibrasi.

Tabel 3. Hasil regresi linear setiap sensor BMP280

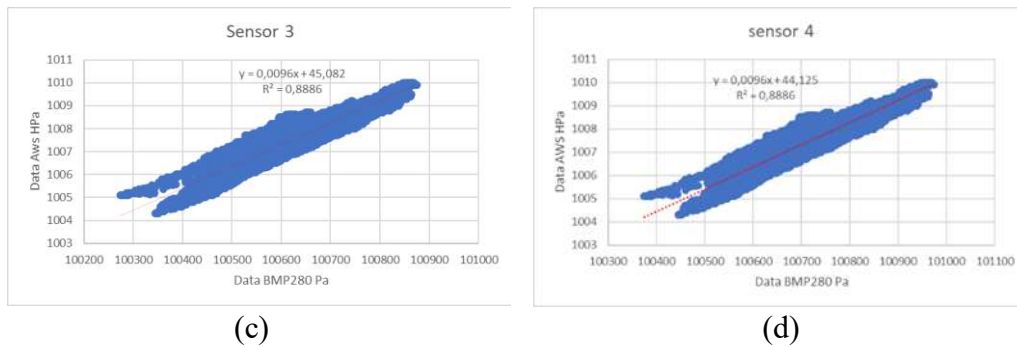
| Sensor   | Persamaan Regresi dari Grafik | Nilai Intercept (b) | Nilai Slope (a) | $R^2$  |
|----------|-------------------------------|---------------------|-----------------|--------|
| Sensor 1 | $y = 0.0098x + 21.379$        | 21.379              | 0.0098          | 0.9934 |
| Sensor 2 | $y = 0.0098x + 22.356$        | 22.356              | 0.0098          | 0.9934 |
| Sensor 3 | $y = 0.0096x + 45.082$        | 45.082              | 0.0096          | 0.8886 |
| Sensor 4 | $y = 0.0096x + 44.125$        | 44.125              | 0.0096          | 0.8886 |



(a)



(b)



(c) (d)  
Gambar 32. Hasil Grafik Regresi Linear : Sensor 1 (a), Sensor 2 (b), Sensor 3 (c), Sensor 4 (d).

Empat sensor BMP280 yang digunakan menunjukkan kemampuan berbeda-beda dalam mengikuti nilai AWS. Hasil regresi linier memperlihatkan nilai slope dan intercept sebagai indikator seberapa dekat pembacaan sensor terhadap nilai acuan. Sensor 1 memiliki slope 0,9914 dan intercept 8,0284, yang menandakan bahwa setiap kenaikan 1 hPa pada AWS akan diikuti kenaikan sekitar 0,99 hPa oleh Sensor 1 nilai yang sangat mendekati ideal. Hal ini diperkuat oleh nilai  $R^2$  0,9934 yang menunjukkan bahwa 99,34% perubahan nilai AWS dapat dijelaskan oleh sensor 1. Sensor 2 memiliki performa serupa dengan slope 0,9913 dan intercept 8,0584, serta nilai  $R^2$  yang sama (0,9934). Kedua sensor ini dapat dikatakan memiliki tingkat keakuratan tinggi. Sensor 3 memiliki slope 0,8753 dan intercept 95,5301 nilai slope yang cukup jauh dari angka 1 menunjukkan bahwa respons Sensor 3 terhadap perubahan tekanan udara masih kurang, sehingga pembacaannya cenderung lebih kecil dari nilai sebenarnya. Sensor 4 slope yang diperoleh sebesar 0,8931 dengan intercept 87,6503 hasil ini menunjukkan bahwa Sensor 4 masih belum stabil karena pembacaannya sering menyimpang dari nilai acuan.”

Meskipun dilakukan analisis regresi linier untuk memperoleh nilai slope dan intercept hasilnya menunjukkan bahwa nilai koreksi yang dihasilkan tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap hasil pembacaan sensor dengan kata lain proses kalibrasi tidak mengubah hasil pengukuran secara signifikan karena sensor BMP280 sudah menunjukkan performa yang stabil dan akurat sejak awal pengambilan data. Hasil ini juga memperlihatkan bahwa perangkat sensor bekerja dengan konsisten terhadap variasi tekanan udara harian, sehingga proses kalibrasi lebih berfungsi sebagai validasi kestabilan akurasi, bukan sebagai penyesuaian

ulang nilai. Berdasarkan kondisi ini dapat diasumsikan bahwa sensor BMP280 yang digunakan sudah memenuhi standar pengukuran yang cukup baik namun tidak dikatakan sangat baik dan tidak memerlukan proses kalibrasi tambahan untuk digunakan dalam pengukuran tekanan udara jangka panjang.

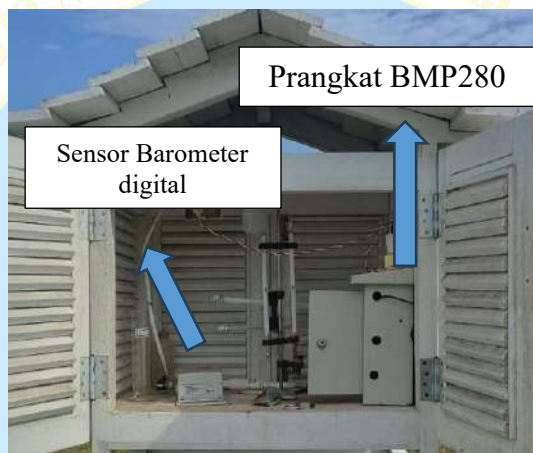
Sebagai langkah lanjutan, hasil persamaan regresi yang diperoleh tetap dimasukkan ke dalam program Arduino Uno agar sistem pembacaan tekanan udara tetap mampu menampilkan nilai yang telah terverifikasi secara otomatis. Dengan cara ini data yang ditampilkan oleh sistem merupakan hasil yang sudah melalui proses validasi meskipun koreksi numeriknya tidak memberikan perubahan signifikan. Implementasi ini memastikan bahwa sistem sensor tetap efisien, stabil, dan siap digunakan untuk tahap pengujian lapangan serta analisis akurasi dan homogenitas pada bagian berikutnya

## **B. Uji Lapangan**

Pengambilan data dilakukan selama dua bulan di Stasiun Meteorologi Kelas I Hang Nadim Batam pada tanggal 09 September 2025 – 09 Oktober 2025, dengan interval waktu pengambilan data setiap satu menit. Sistem pengukuran terdiri dari empat buah sensor BMP280, yaitu sensor 1, sensor 2, sensor 3, dan sensor 4, yang dihubungkan dengan mikrokontroler ESP32 serta dilengkapi penyimpanan data menggunakan kartu MicroSD. Sebagai alat pembanding, digunakan data tekanan udara dari *Automatic Weather Station* (AWS) sensor Barometer Digital vaisalla dapat dilihat pada Gambar 33. Peletakan perangkat BMP280 dapat dilihat pada Gambar 34.



Gambar 33. Sensor Barometer Digital Vaisalla



Gambar 34. Alat Pengukuran Tekanan Udara.

Selama proses pengamatan, setiap sensor menghasilkan 1.440 data cuplikan pengukuran per hari (karena  $60 \text{ menit} \times 24 \text{ jam}$ ), sehingga dalam waktu dua bulan terkumpul sekitar 345.600 data pengukuran dari empat sensor. Data pengukuran parameter tekanan udara dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4.Data Cuplikan Pengukuran Tekanan Udara Sebelum dan Sesudah Kalibrasi

| waktu_aws           | aws     | sensor1 kalibrasi | sensor2 kalibrasi | sensor3 kalibrasi | sensor4 kalibrasi | sensor1 asli | sensor2 asli | sensor3 asli | sensor4 asli |
|---------------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2025-09-09 13:31:00 | 1008,3  | 1013,24           | 1010,58           | 1005,06           | 1010,99           | 1010,33      | 1008,39      | 999,98       | 1007,15      |
| 2025-09-09 13:32:00 | 1008,22 | 1013,24           | 1010,64           | 1004,8            | 1010,89           | 1010,33      | 1008,45      | 999,71       | 1007,05      |
| 2025-09-09 13:33:00 | 1008,2  | 1013,22           | 1010,63           | 1004,91           | 1010,83           | 1010,31      | 1008,44      | 999,82       | 1006,98      |
| 2025-09-09 13:34:00 | 1008,2  | 1013,2            | 1010,63           | 1004,88           | 1010,78           | 1010,29      | 1008,44      | 999,79       | 1006,93      |
| 2025-09-09 13:35:00 | 1008,2  | 1013,2            | 1010,62           | 1004,83           | 1010,72           | 1010,29      | 1008,43      | 999,74       | 1006,87      |
| 2025-09-09 13:36:00 | 1008,2  | 1013,15           | 1010,62           | 1004,84           | 1010,67           | 1010,24      | 1008,43      | 999,75       | 1006,82      |
| 2025-09-09 13:37:00 | 1008,2  | 1013,16           | 1010,63           | 1004,84           | 1010,65           | 1010,25      | 1008,44      | 999,75       | 1006,8       |
| 2025-09-09 13:38:00 | 1008,2  | 1013,17           | 1010,61           | 1004,52           | 1010,61           | 1010,26      | 1008,42      | 999,41       | 1006,76      |
| 2025-09-09 13:39:00 | 1008,2  | 1013,2            | 1010,66           | 1004,88           | 1010,67           | 1010,29      | 1008,47      | 999,79       | 1006,82      |
| 2025-09-09 13:40:00 | 1008,2  | 1013,19           | 1010,66           | 1004,54           | 1010,65           | 1010,28      | 1008,47      | 999,44       | 1006,8       |
| 2025-09-09 13:41:00 | 1008,24 | 1013,2            | 1010,66           | 1004,44           | 1010,66           | 1010,29      | 1008,47      | 999,33       | 1006,81      |
| 2025-09-09 13:42:00 | 1008,27 | 1013,21           | 1010,68           | 1004,6            | 1010,68           | 1010,3       | 1008,49      | 999,5        | 1006,83      |
| 2025-09-09 13:43:00 | 1008,24 | 1013,19           | 1010,68           | 1004,56           | 1010,67           | 1010,28      | 1008,49      | 999,46       | 1006,82      |
| 2025-09-09 13:44:00 | 1008,25 | 1013,19           | 1010,66           | 1004,61           | 1010,69           | 1010,28      | 1008,47      | 999,51       | 1006,84      |
| 2025-09-09 13:45:00 | 1008,3  | 1013,2            | 1010,67           | 1004,68           | 1010,7            | 1010,29      | 1008,48      | 999,58       | 1006,85      |
| 2025-09-09 13:46:00 | 1008,3  | 1013,22           | 1010,68           | 1004,57           | 1010,73           | 1010,31      | 1008,49      | 999,47       | 1006,88      |
| 2025-09-09 13:47:00 | 1008,3  | 1013,23           | 1010,69           | 1004,7            | 1010,76           | 1010,32      | 1008,5       | 999,6        | 1006,91      |
| 2025-09-09 13:48:00 | 1008,3  | 1013,26           | 1010,73           | 1004,71           | 1010,79           | 1010,35      | 1008,54      | 999,61       | 1006,94      |
| 2025-09-09 13:49:00 | 1008,3  | 1013,3            | 1010,78           | 1004,76           | 1010,83           | 1010,39      | 1008,6       | 999,66       | 1006,98      |

Berdasarkan hasil pengukuran tekanan udara selama dua bulan diperoleh rentang nilai tekanan udara antara 1004 hingga 1012 hPa dengan variasi cuaca yang sering berubah terutama saat terjadi hujan memberikan pengaruh terhadap perubahan tekanan udara sehingga data yang diperoleh menunjukkan fluktuasi yang lebih besar sepanjang periode pengamatan, data hasil pengukuran dari setiap sensor kemudian dibandingkan dengan data AWS untuk menilai tingkat kestabilan dan akurasi masing-masing sensor. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa keempat sensor BMP280 mampu merekam perubahan tekanan udara dengan pola yang relatif sama dengan AWS artinya sistem sensor bekerja dengan baik dan responsif terhadap perubahan tekanan udara di lingkungan sekitar.

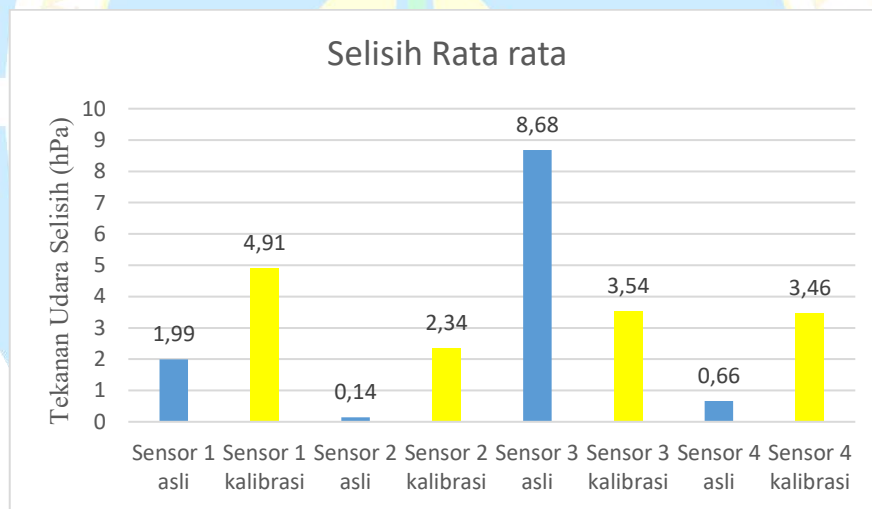
Perbandingan hasil pengukuran antara sensor BMP280 dan data AWS ditampilkan dalam bentuk selisih rata-rata sebelum dan sesudah kalibrasi. Nilai ini digunakan untuk melihat seberapa besar penyimpangan hasil pembacaan sensor terhadap nilai acuan hasil perhitungan selisih rata-rata dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Selisih Rata-rata Sebelum dan Sesudah Kalibrasi dengan Batas Toleransi  $\pm 3$  hPa

| Sensor   | Sebelum Kalibrasi ( $\pm$ hPa) | Keterangan                  | Setelah Kalibrasi ( $\pm$ hPa) | Keterangan                   |
|----------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Sensor 1 | 1,99                           | $\leq 3$ hPa (baik)         | 4,91                           | $> 3$ hPa (melampaui batas)  |
| Sensor 2 | 0,14                           | $\leq 3$ hPa (baik)         | 2,34                           | $\leq 3$ hPa (baik)          |
| Sensor 3 | 8,68                           | $> 3$ hPa (melampaui batas) | 3,54                           | mendekati batas (cukup baik) |

| Sensor   | Sebelum Kalibrasi ( $\pm$ hPa) | Keterangan          | Setelah Kalibrasi ( $\pm$ hPa) | Keterangan                   |
|----------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Sensor 4 | 0,66                           | $\leq 3$ hPa (baik) | 3,46                           | mendekati batas (cukup baik) |

Sebagian besar sensor menunjukkan hasil pengukuran yang stabil dengan nilai selisih di bawah  $\pm 3$  hPa. Sensor 2 memiliki nilai selisih paling kecil baik sebelum maupun sesudah kalibrasi, menunjukkan performa paling stabil dan akurat di antara keempat sensor. Sensor 3 mengalami penurunan selisih yang cukup signifikan setelah proses kalibrasi, menandakan adanya peningkatan hasil pengukuran. Sementara Sensor 1 dan sensor 4 menunjukkan perubahan kecil, namun tetap berada dalam batas toleransi pengukuran yang dapat diterima grafik batang selisih rata-rata dapat dilihat pada Gambar 35. Grafik tersebut menggambarkan pola perubahan selisih rata-rata antara setiap sensor dan alat acuan AWS sebelum dan sesudah dilakukan proses kalibrasi.

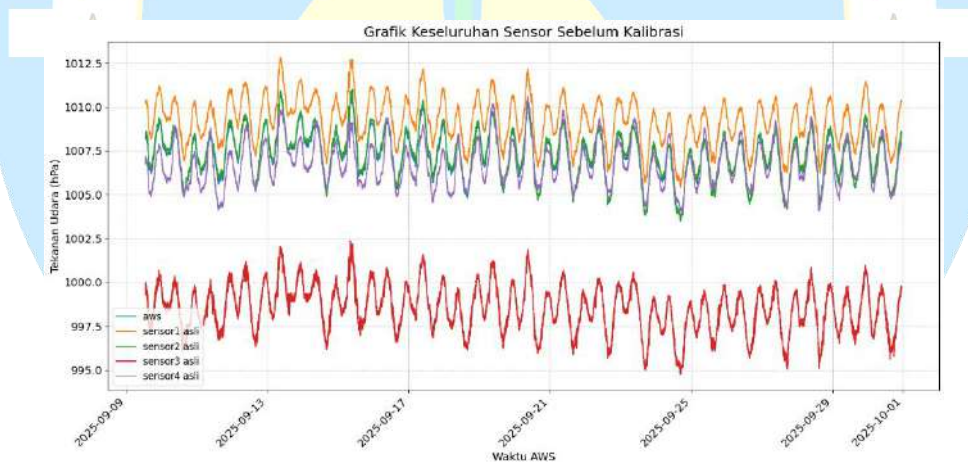


Gambar 35. Grafik Selisih rata-rata Data Sensor AWS.

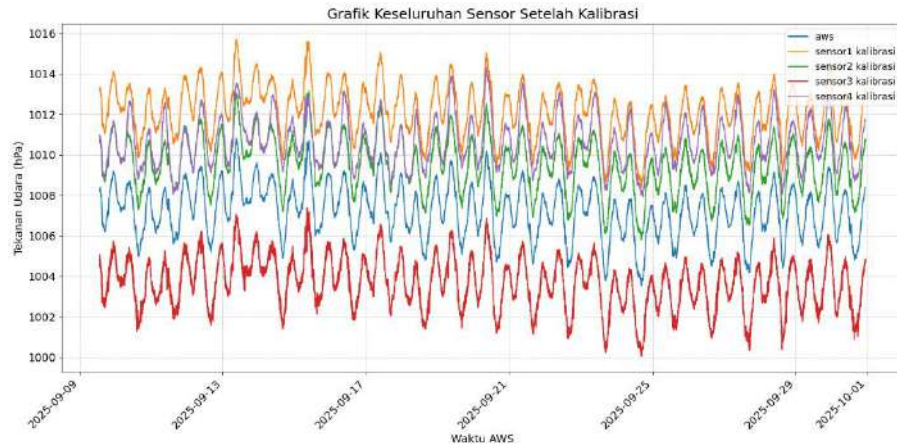
Berdasarkan hasil grafik diatas terlihat bahwa sebagian besar sensor menunjukkan penurunan nilai selisih setelah proses kalibrasi dilakukan. Sensor 2 memiliki perbedaan yang paling kecil terhadap nilai acuan AWS, sedangkan sensor 3 mengalami perubahan yang paling signifikan dari sebelumnya memiliki selisih tertinggi hingga mendekati batas toleransi setelah kalibrasi. Sensor 1 dan sensor 4

menunjukkan sedikit variasi nilai, namun masih dalam rentang yang wajar dan tidak menunjukkan penyimpangan besar terhadap alat acuan.

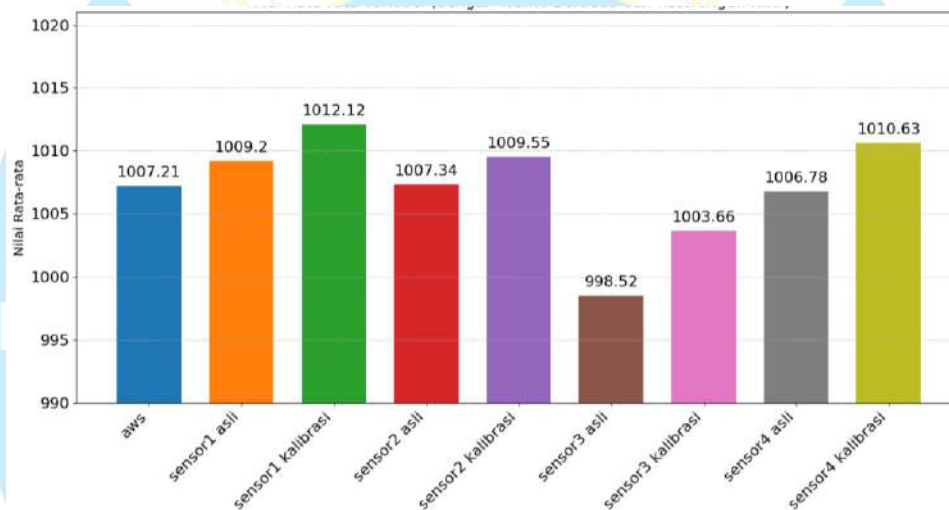
Pola hasil pengukuran tekanan udara juga divisualisasikan pada Gambar 36 dan Gambar 37 yang menampilkan perbandingan nilai tekanan udara antara hasil pembacaan sensor BMP280 dan data acuan AWS sebelum dan sesudah kalibrasi. Dari grafik tersebut terlihat bahwa pola perubahan tekanan udara dari keempat sensor mengikuti tren yang sama dengan nilai acuan AWS. Sensor 2 memiliki hasil pengukuran yang paling stabil dibandingkan sensor lainnya, dengan nilai yang hampir selalu mendekati hasil pengukuran AWS dan rata-rata selisih kurang dari  $\pm 3$  hPa. Nilai pembacaan dari sensor 1 dan sensor 4 menunjukkan pola yang konsisten terhadap *Automatic Weather Station* AWS dengan fluktuasi yang relatif kecil sensor 3 memperlihatkan variasi pembacaan yang sedikit lebih besar pada beberapa periode pengamatan. Hasil pengukuran tekanan udara juga divisualisasikan dalam bentuk grafik batang nilai rata-rata seperti yang ditampilkan pada Gambar 38.



Gambar 36. Grafik Pola Tekanan Udara sebelum Kalibrasi.



Gambar 37. Grafik Pola Tekanan Udara setelah Kalibrasi.



Gambar 38. Grafik Batang Nilai Rerata Tekanan Udara Tiap Sensor BMP280

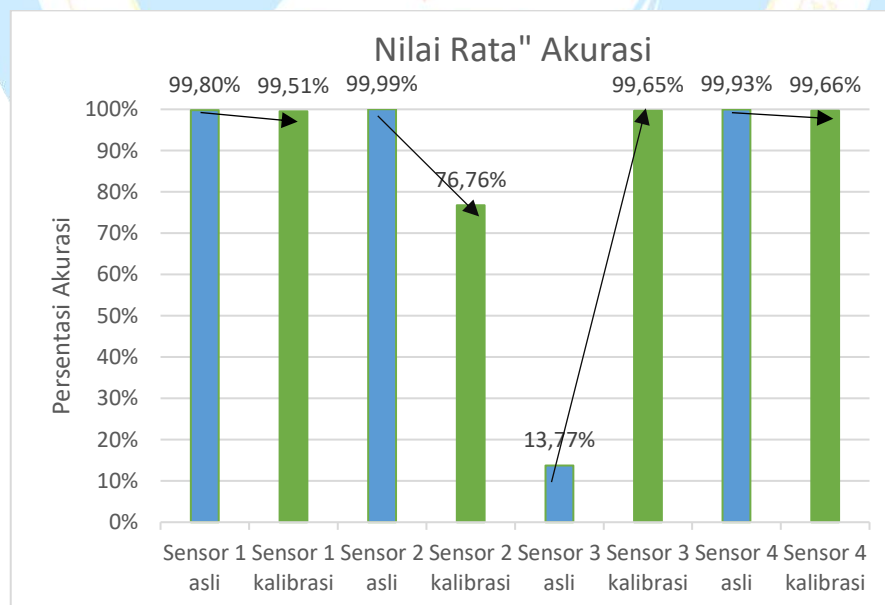
Secara keseluruhan, hasil uji lapangan menunjukkan bahwa sensor BMP280 memiliki kemampuan yang baik dalam merekam tekanan udara di lapangan dengan tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap AWS. Perbedaan kecil antar sensor disebabkan oleh karakteristik masing-masing sensor dan faktor lingkungan di sekitar alat, namun hasil pengukuran setelah proses kalibrasi memperlihatkan bahwa seluruh sensor bekerja dengan stabil dan hasilnya dapat diterima untuk keperluan pengamatan tekanan udara.

### C. Uji Akurasi Sensor BMP280

Uji akurasi merupakan proses untuk menilai tingkat kedekatan hasil pengukuran sensor terhadap nilai acuan [43]. Berdasarkan hasil perhitungan akurasi yang disajikan pada Tabel 6 terlihat bahwa setiap sensor memberikan respons yang berbeda terhadap proses kalibrasi. Sebagian sensor sudah memiliki akurasi tinggi sebelum kalibrasi namun beberapa sensor mengalami peningkatan maupun penurunan setelah kalibrasi. Perubahan akurasi tersebut kemudian divisualisasikan pada grafik nilai rata-rata akurasi sensor BMP280 sebelum dan sesudah kalibrasi terhadap data acuan Automatic Weather Station (AWS) yang dapat dilihat pada Gambar 39. Secara keseluruhan hasil ini menunjukkan bahwa efektivitas kalibrasi tidak sama pada setiap sensor dan sangat bergantung pada kondisi awal sensor.

Tabel 6. Hasil perhitungan nilai rata-rata akurasi

| Nilai Rata Rata    | Akurasi |
|--------------------|---------|
| Sensor 1 asli      | 99,80%  |
| Sensor 1 kalibrasi | 99,51%  |
| Sensor 2 asli      | 99,99%  |
| Sensor 2 kalibrasi | 76,76%  |
| Sensor 3 asli      | 13,77%  |
| Sensor 3 kalibrasi | 99,65%  |
| Sensor 4 asli      | 99,93%  |
| Sensor 4 kalibrasi | 99,66%  |



Gambar 39. Grafik Nilai Rata-Rata Akurasi Sensor.

Berdasarkan hasil grafik diatas terlihat bahwa setiap sensor memiliki tingkat akurasi yang berbeda antara kondisi sebelum dan sesudah kalibrasi. Arah panah pada grafik menunjukkan perubahan akurasi masing-masing sensor di mana panah naik menandakan adanya peningkatan akurasi setelah proses kalibrasi sedangkan panah turun menunjukkan adanya sedikit penurunan akurasi pada sensor tertentu.

Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar sensor telah memiliki tingkat akurasi yang tinggi sejak awal pengukuran. Sensor 1 dan sensor 4 menunjukkan kestabilan yang baik dengan nilai akurasi yang relatif konstan pada kedua kondisi tersebut. Sensor 2 mengalami sedikit penurunan akurasi setelah kalibrasi yang menandakan adanya perubahan pada karakteristik dari hasil pembacaan pengukuran tetapi masih berada dalam kategori akurasi yang baik dan layak digunakan. Berbeda dengan Sensor 3 yang memperlihatkan peningkatan akurasi paling signifikan setelah dilakukan proses kalibrasi. Hal ini menunjukkan bahwa prosedur kalibrasi yang diterapkan mampu memperbaiki ketidaksesuaian pembacaan sensor terhadap nilai acuan. Secara keseluruhan grafik ini menggambarkan bahwa setiap sensor memiliki respon yang berbeda terhadap proses kalibrasi di mana sebagian besar sensor tetap stabil sementara satu sensor mengalami peningkatan akurasi yang cukup jelas.

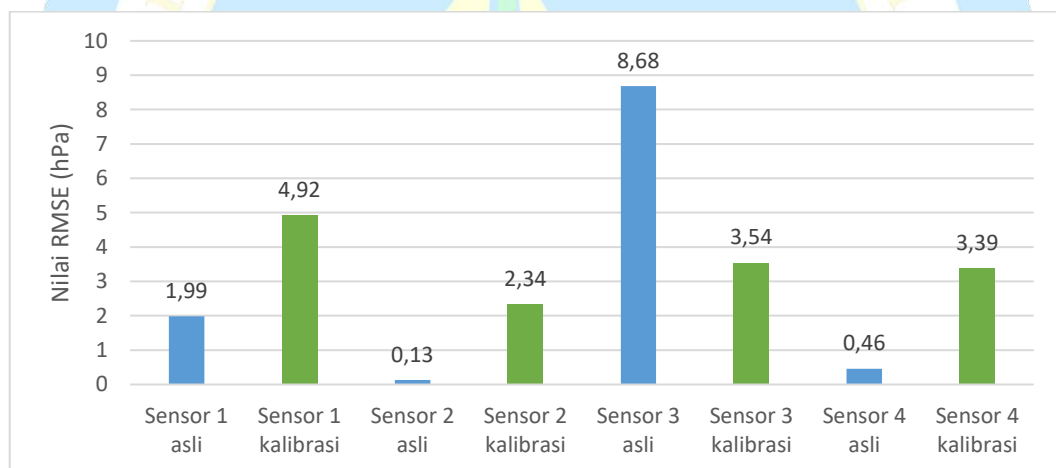
Berdasarkan grafik terlihat bahwa beberapa sensor justru mengalami penurunan akurasi setelah kalibrasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor tersebut telah memiliki akurasi yang baik sejak awal, sehingga penerapan koreksi kalibrasi menyebabkan perubahan pembacaan yang tidak diperlukan (*over-correction*). Selain itu, proses pengujian yang dilakukan dengan pengaturan tekanan secara manual membuat data kalibrasi rentan terhadap ketidakkonsistenan, terutama pada tekanan rendah yang mudah dipengaruhi gangguan dan efek histerisis [44]. Akibatnya persamaan kalibrasi yang terbentuk kurang merepresentasikan kondisi sebenarnya, sehingga ketika diterapkan pada seluruh data pengukuran, koreksi yang diberikan justru menjauhkan hasil pembacaan sensor dari nilai referensi dan menyebabkan penurunan akurasi sebagaimana terlihat pada grafik.

Selanjutnya untuk melihat seberapa jauh hasil pengukuran sensor mendekati nilai acuan dilakukan analisis menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE).

RMSE digunakan untuk menilai tingkat ketelitian akurasi sensor dengan cara mengukur seberapa besar perbedaan antara hasil pengukuran sensor dan nilai acuan (AWS) semakin kecil nilai RMSE maka semakin tinggi ketelitian sensor dalam mengukur tekanan udara [45]. Nilai RMSE sama selisih sebelum dan sesudah kalibrasi untuk masing-masing sensor dapat dilihat pada Tabel 7 yang menunjukkan bahwa Sensor 1, Sensor 2, dan Sensor 4 mengalami peningkatan nilai RMSE setelah kalibrasi, sedangkan Sensor 3 mengalami penurunan RMSE. Grafik perbandingan nilai RMSE antar sensor dapat dilihat pada Gambar 40.

Tabel 7. Hasil RMSE dan Selisih

| Sensor | RMSE Asli | RMSE Kalibrasi | Selisih Asli | Selisih Kalibrasi |
|--------|-----------|----------------|--------------|-------------------|
| 1      | 1,99      | 4,92           | 1,99         | 4,91              |
| 2      | 0,13      | 2,34           | 0,14         | 2,34              |
| 3      | 8,68      | 3,54           | 8,68         | 3,54              |
| 4      | 0,46      | 3,39           | 0,66         | 3,39              |



Gambar 40. Perbandingan Nilai RMSE Sebelum & Sesudah Kalibrasi

Dari grafik diatas terlihat bahwa sensor 3 mengalami perbaikan paling besar dengan penurunan nilai RMSE dari 8,68 menjadi 3,54 setelah proses kalibrasi. Penurunan ini mendukung hasil uji akurasi sebelumnya yang menunjukkan bahwa kalibrasi sangat efektif dalam memperbaiki performa Sensor 3. Sensor 2 justru mengalami peningkatan nilai RMSE dari 0,13 menjadi 2,34 setelah kalibrasi. Hal ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi pada sensor ini kurang berhasil karena kesalahan pengukuran justru meningkat. Sensor 1 nilai RMSE naik dari 1,99 menjadi 4,91 dan Sensor 4 nilai RMSE meningkat dari 0,46 menjadi 3,39. Kenaikan

RMSE pada kedua sensor tersebut menandakan bahwa kalibrasi tidak memberikan pengaruh positif terhadap kualitas pengukurannya. Secara keseluruhan, RMSE yang lebih tinggi setelah kalibrasi menunjukkan bahwa hasil pengukuran sensor semakin menyimpang dari nilai acuan AWS.

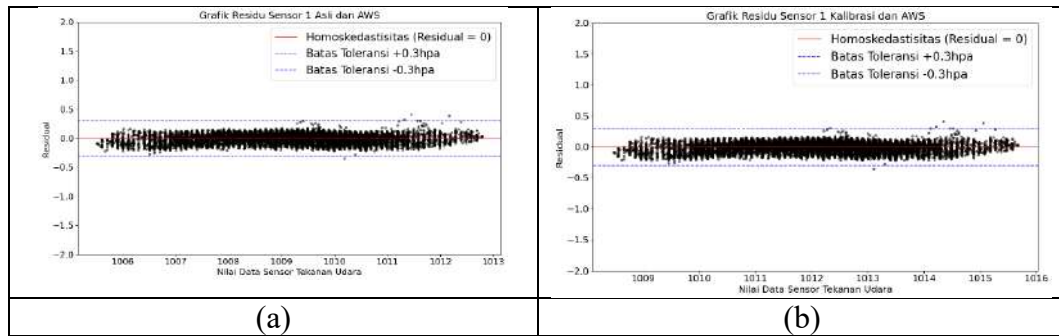
Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kalibrasi tidak sepenuhnya diperlukan untuk Sensor 1, Sensor 2, dan Sensor 4 karena ketiganya sudah menunjukkan performa yang cukup baik sebelum kalibrasi dilakukan maka dapat dikatakan penambahan proses kalibrasi justru berpotensi menurunkan kinerja sensor yang sebenarnya sudah stabil

#### **D. Uji Homogenitas**

Uji homogenitas dilakukan untuk mengetahui apakah varians dari nilai residual antar sensor bersifat homogenitas (*homoskedastisitas*) atau tidak (*heteroskedastisitas*) [46]. Pengujian ini penting dilakukan agar dapat memastikan bahwa tingkat ketelitian pengukuran dari setiap sensor BMP280 konsisten terhadap nilai acuan dari AWS. Semakin homogen sebaran nilai residual terhadap garis nol, maka semakin stabil sensor tersebut dalam mengukur tekanan udara di berbagai kondisi.

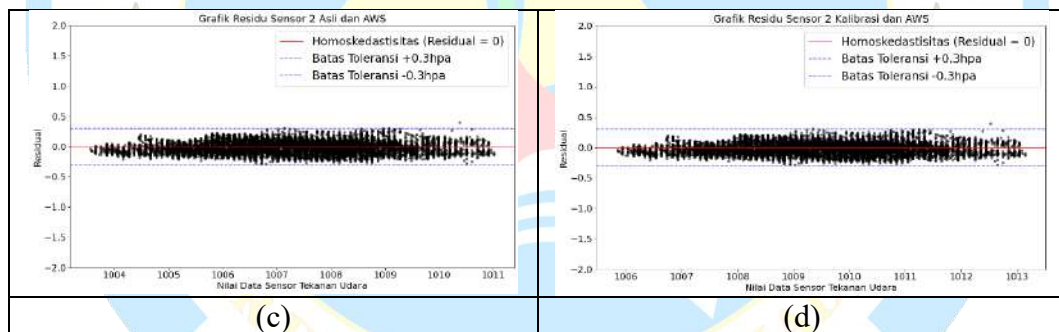
##### **1. Uji Residu**

Uji residu dilakukan untuk melihat homogenitas secara visual melalui pola sebaran titik residu antara hasil pengukuran sensor BMP280 dan data acuan AWS. Berdasarkan hasil analisis grafik residu antara sensor BMP280 dengan data acuan AWS diperoleh bahwa pada sensor 1 asli sebaran titik residual cenderung merata di sekitar garis nol dan berada dalam batas toleransi  $\pm 0,3$ . Sensor 1 memiliki sifat homoskedastisitas atau varians yang stabil terhadap seluruh rentang nilai tekanan udara (Gambar 41(a)). Setelah dilakukan kalibrasi, sensor 1 kalibrasi juga menunjukkan pola yang serupa, bahkan titik-titik residual terlihat lebih rapat di sekitar garis nol (Gambar 41(b)). Dengan demikian proses kalibrasi terbukti mampu memperbaiki konsistensi hasil pengukuran sensor 1 menjadikannya lebih setabil dan akurat terhadap nilai acuan AWS.



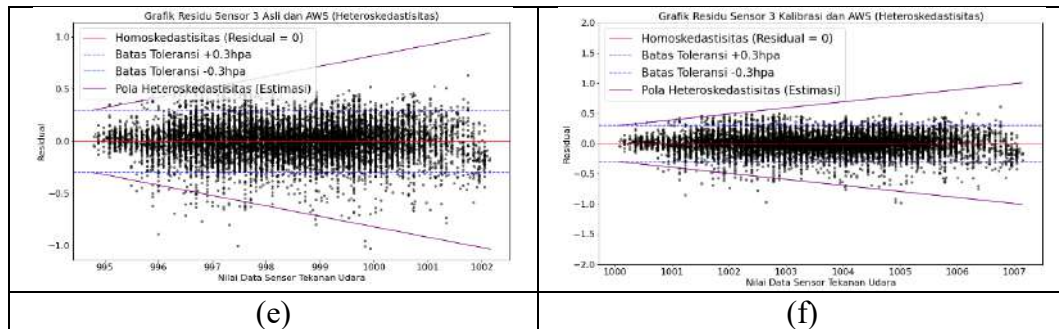
Gambar 41. Grafik Residu Sensor 1 Asli (a) dan Sensor 1 Kalibrasi (b).

Hasil serupa juga terlihat pada sensor 2 asli di mana sebaran titik residual tampak merata dan tidak membentuk pola tertentu. Nilai residual berada di sekitar garis nol dan tidak menunjukkan kecenderungan melebar ke satu arah tertentu (Gambar 42(c)). Setelah dilakukan kalibrasi sensor 2 kalibrasi memperlihatkan hasil yang semakin baik, dengan distribusi titik residual yang lebih simetris dan terpusat pada garis nol (Gambar 42(d)). Hal ini menandakan bahwa proses kalibrasi pada sensor 2 berhasil meningkatkan kestabilan pengukuran tekanan udara serta memperkecil penyimpangan terhadap nilai acuan AWS.



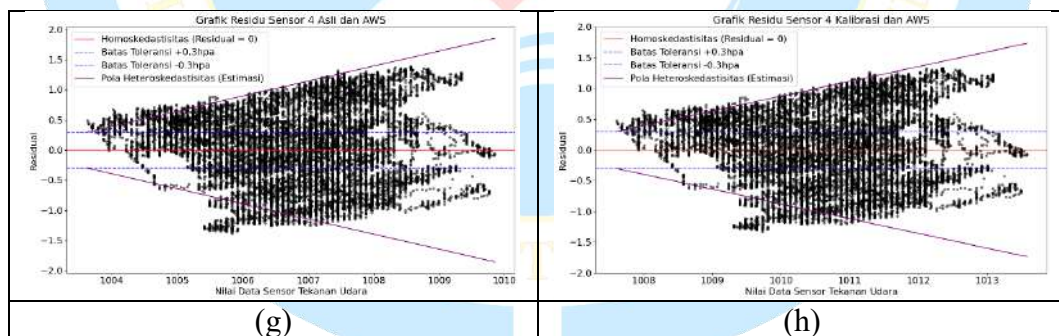
Gambar 42. Grafik Residu Sensor 2 Asli (c) dan Sensor 2 Kalibrasi (d).

Berbeda dengan sensor 3 asli yang memperlihatkan sebaran residual sedikit lebih lebar dibandingkan sensor lainnya. Meskipun titik-titik residual tetap berada di sekitar garis nol, terdapat sedikit peningkatan variasi pada beberapa rentang nilai tekanan (Gambar 43(e)). Setelah dilakukan kalibrasi sensor 3 kalibrasi menunjukkan perbaikan signifikan, di mana sebaran residual menjadi lebih homogen dan mendekati pola ideal homoskedastisitas walaupun terdapat sedikit penyebaran residu tetapi tetap dikategorikan heterokadastisitas (Gambar 43(f)).



Gambar 43. Grafik Residu Sensor 3 Asli (e) dan Sensor 3 Kalibrasi (f).

Selanjutnya hasil yang berbeda tampak pada sensor 4 asli di mana titik-titik residual membentuk pola menyerupai kipas (*fan shape*) [47]. Pola ini menandakan adanya gejala *heteroskedastisitas*, yaitu kondisi di mana variasi residual meningkat seiring naiknya nilai fitted (Gambar 44(g)). Artinya error pengukuran sensor 4 tidak seragam di seluruh rentang nilai tekanan udara, sehingga tingkat ketelitian sensor ini kurang stabil dibandingkan dengan sensor lainnya. Setelah dilakukan kalibrasi, sensor 4 kalibrasi masih menunjukkan pola yang sama meskipun penyebaran residual tampak sedikit lebih terpusat dibandingkan sebelumnya (Gambar 44(h)). Kondisi ini menunjukkan bahwa proses kalibrasi belum sepenuhnya berhasil mengatasi perbedaan varians pada sensor 4 karena faktor sensitivitas sensor yang berbeda atau pengaruh lingkungan saat pengukuran.



Gambar 44. Grafik Residu Sensor 4 Asli (g) dan Sensor 4 Kalibrasi (h).

Berdasarkan keseluruhan hasil grafik residu, dapat disimpulkan bahwa tidak semua sensor memiliki tingkat kestabilan yang sama. Sensor 1 dan Sensor 2 menunjukkan pola residu yang stabil dan rapat sehingga termasuk sensor yang paling homogen [48]. Sensor 3 pada awalnya kurang stabil namun setelah dilakukan proses kalibrasi pola residunya menjadi lebih terpusat sehingga sensor

ini berfungsi lebih baik tetapi blom dikatakan homogen karena masih terdapat penyebaran resiidu. Sensor 4 tetap memperlihatkan pola kipas baik sebelum maupun sesudah kalibrasi, yang berarti variansinya masih berubah-ubah dan belum stabil. Dengan demikian, hanya dua sensor yang menunjukkan peningkatan kestabilan setelah kalibrasi, sedangkan Sensor 3 dan Sensor 4 masih memerlukan penyesuaian lebih lanjut agar performanya mendekati sensor lainnya.

## 2. Uji *Levene's Test*

Uji *Levene's Test* digunakan bertujuan untuk melihat apakah penyebaran data dari setiap sensor memiliki variansi yang sama (homogen) atau berbeda (heterogen) uji ini menggunakan JASP untuk mendapatkan nilai *Levene' Test*. Berdasarkan hasil uji *Levene* pada data sensor asli, diperoleh nilai  $F = 10,35$  dengan nilai signifikansi  $p < 0,001$  dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Uji *Levene* Sensor Asli

| <i>Test for Equality of Variances (Levene's)</i> |       |        |        |
|--------------------------------------------------|-------|--------|--------|
| F                                                | df1   | df2    | P      |
| 10.35                                            | 4.000 | 148900 | < .001 |

Karena nilai  $p$  lebih kecil dari 0,05, maka hasil ini menunjukkan bahwa data pengukuran tekanan udara sebelum kalibrasi belum homogen terhadap AWS. Variansi antar sensor BMP280 masih berbeda secara signifikan, sehingga tingkat kestabilan pembacaan tekanan udara antar sensor belum seragam. Kondisi ini dapat disebabkan oleh adanya perbedaan karakteristik internal pada tiap sensor faktor suhu lingkungan, maupun kondisi atmosfer saat pengukuran berlangsung.

Namun, ketika dilihat lebih lanjut melalui hasil grafik residu sensor asli, tingkat homogenitas masing-masing sensor berbeda. Sensor 1 dan Sensor 2 menunjukkan pola residu yang rapat dan stabil di sekitar garis nol sehingga keduanya dapat dikategorikan homogen. Sensor 3 memiliki residu yang menyebar lebih lebar tetapi masih dikatakan homogen karena titik residu lebih banyak mendekati garis nol, sedangkan Sensor 4 memperlihatkan pola residu berbentuk

kipas (heteroskedastisitas). Oleh karena itu, Sensor 4 termasuk tidak homogen pada kondisi awal sebelum kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Sensor Asli Homogen/Hetero

| Sensor Asli | Homogen/Hetero | Alasan                                                        |
|-------------|----------------|---------------------------------------------------------------|
| 1           | Homogen        | Residu rapat di sekitar garis nol variansi stabil             |
| 2           | Homogen        | Residu paling rapat dan simetris                              |
| 3           | Hetero         | Ada penyebaran residu meskipun secara grafik terlihat homogen |
| 4           | Hetero         | Pola residual membentuk “kipas” (heteroskedastisitas)         |

Setelah dilakukan proses kalibrasi dengan menggunakan metode regresi linier, Uji *Levene's* Test kembali dilakukan untuk melihat apakah variansi antar sensor sudah menjadi homogen. Pengujian dilakukan menggunakan JASP dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 10. Berdasarkan hasil uji *Levene* pada data sensor kalibrasi diperoleh nilai  $F = 26,39$  dengan nilai signifikansi  $p < 0,001$ . Nilai  $p$  yang masih lebih kecil dari 0,05 menunjukkan bahwa secara keseluruhan data sensor setelah kalibrasi tetap tidak homogen.

Tabel 10. Uji *Levene* Sensor Kalibrasi

| Test for Equality of Variances (Levene's) |       |        |        |
|-------------------------------------------|-------|--------|--------|
| F                                         | df1   | df2    | P      |
| 26.39                                     | 4.000 | 148912 | < .001 |

Meskipun demikian, analisis lebih lanjut menggunakan grafik residu menunjukkan adanya perbaikan pada beberapa sensor. Sensor 1 dan Sensor 2 memperlihatkan pola residu yang semakin rapat dan stabil setelah kalibrasi, sehingga keduanya dapat dikategorikan homogen. Sensor 3 mengalami sedikit penyebaran residu yang melebihi batas toleransi ( $\pm 3$  hPa) meskipun secara grafik homogen. Berbeda dengan ketiga sensor tersebut, Sensor 4 masih menampilkan pola residual berbentuk kipas yang menandakan adanya heteroskedastisitas, sehingga Sensor 4 tetap tidak homogen meskipun telah melalui proses kalibrasi.

Tabel 11. Sensor Kalibrasi Homogen/Hetero

| Sensor Kalibrasi | Homogen/Hetero | Alasan                                                                               |
|------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                | Homogen        | Residu rapat di sekitar garis nol variansi stabil                                    |
| 2                | Homogen        | Residu paling rapat dan simetris                                                     |
| 3                | Hetero         | Residu menyebar cukup melebihi setandar deviasi ( $\pm 3$ hPa) variansi tidak stabil |
| 4                | Hetero         | Pola residual membentuk “kipas” (heteroskedastisitas)                                |

Hasil ini menunjukkan bahwa secara statistik, variansi data hasil kalibrasi juga belum sepenuhnya homogen terhadap data acuan AWS. Namun, jika dibandingkan dengan data sebelum kalibrasi, dapat dilihat adanya peningkatan kestabilan pola pengukuran pada sebagian besar sensor.

Hal ini terlihat dari hasil analisis residual yang menunjukkan bahwa Sensor 1 dan Sensor 2 sudah memiliki sebaran titik residual yang relatif merata di sekitar garis nol tanpa membentuk pola tertentu, menandakan bahwa variansi ketiga sensor tersebut sudah lebih stabil setelah kalibrasi. Sensor 3 masih dikatakan homogen meskipun ada sedikit penyebaran residu dan Sensor 4 masih menunjukkan pola residual yang melebar yang mengindikasikan adanya heteroskedastisitas variansi. Bisa dikatakan ini terjadi disebabkan oleh faktor sensitivitas sensor terhadap perubahan tekanan atau kondisi kalibrasi yang belum optimal pada sensor tersebut.

### E. Pembahasan

Selama proses penelitian fenomena tekanan udara yang diukur di Stasiun Meteorologi Kelas I Hang Nadim Batam mengalami perubahan yang cukup dinamis dengan rentang 1004–1012 hPa. Fluktuasi ini dipengaruhi oleh kondisi cuaca yang berubah-ubah dan sering terjadi hujan pada saat intensitas hujan meningkat nilai tekanan udara cenderung mengalami penurunan, sedangkan ketika cuaca cerah atau tidak ada hujan tekanan udara kembali meningkat secara bertahap[49].

Fenomena tersebut sesuai dengan konsep dasar bahwa tekanan udara akan turun ketika udara menjadi jenuh oleh uap air dan semakin lembab [50]. Kondisi cuaca di BMKG Batam yang cenderung berubah dalam waktu relatif singkat menyebabkan pola tekanan udara tidak stabil sehingga sensor BMP280 harus mampu memberikan pembacaan yang cepat, konsisten, dan mengikuti perubahan tersebut. Oleh karena itu, penting untuk melihat bagaimana performa setiap sensor BMP280 dalam pengukuran data tekanan udara dibandingkan dengan AWS sebagai acuan.

Pengukuran tekanan udara menggunakan empat sensor BMP280. Namun terdapat dua sensor yang mengalami *drift* kestabilan sehingga pembacaannya tidak konsisten dan tidak sejalan dengan data AWS yang melebihi  $\pm 3\text{hPa}$ . Sensor yang mengalami drift ketidaksesuaian dengan data AWS dalam mengukur tekanan udara yaitu Sensor 3 dan Sensor 4. Penyebab ketidaksesuaian tersebut adalah adanya kesalahan pada tahap pemrograman, di mana nilai hasil kalibrasi yang seharusnya digunakan untuk Sensor 3 justru menggunakan dengan nilai kalibrasi milik Sensor 4 sehingga Sensor 3 tidak menggunakan hasil kalibrasinya sendiri ini terjadi karena minim nya waktu saat input program. Sementara itu Sensor 4 tetap menunjukkan pola drift meskipun sudah menggunakan nilai kalibrasinya dengan benar. Hal ini terlihat dari pola residu yang membentuk *fan shape* (heteroskedastisitas), menandakan variansi error yang tidak stabil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa Sensor 4 memiliki sensitivitas yang lebih rendah atau kualitas komponen yang kurang baik dibandingkan sensor lainnya, sehingga pembacaan tekanan udara menjadi tidak homogen / tidak stabil sepanjang periode pengamatan. Faktor lain seperti ketidakstabilan internal sensor, toleransi pabrik yang lebih besar, atau degradasi komponen juga dapat menyebabkan Sensor 4 tidak mampu mempertahankan kestabilan variansi seperti Sensor 1 dan Sensor 2 [51]. Oleh karena itu, pada tahap pemrograman dan penerapan hasil kalibrasi diperlukan ketelitian dan kehati-hatian agar setiap sensor menerima nilai kalibrasinya masing-masing dan tidak terjadi pertukaran nilai seperti yang terjadi pada Sensor 3 dan Sensor 4.

Akurasi sensor BMP280 dianalisis dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap data acuan AWS. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tiga sensor

yaitu Sensor 1, Sensor 2, dan Sensor 4 sudah memiliki tingkat akurasi yang sangat baik sejak awal. Kondisi ini menandakan bahwa ketiga sensor tersebut sudah mampu mengikuti nilai tekanan udara dengan cukup stabil meskipun belum diberi koreksi menggunakan regresi linier. Sebaliknya, Sensor 3 menunjukkan akurasi yang jauh lebih rendah pada kondisi awal sehingga penyimpangannya terhadap nilai acuan cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa Sensor 3 membutuhkan proses kalibrasi untuk memperbaiki kualitas pembacaannya [52].

Setelah dilakukan kalibrasi menggunakan model regresi linier, terlihat adanya perubahan performa yang berbeda pada masing-masing sensor. Sensor 3 mengalami peningkatan akurasi paling besar, yang menunjukkan bahwa kalibrasi sangat membantu sensor dengan tingkat penyimpangan tinggi. Berbeda dengan Sensor 3, ketiga sensor lainnya justru mengalami sedikit penurunan akurasi setelah kalibrasi. Penurunan ini terjadi karena ketiga sensor tersebut sudah akurat sejak awal, sehingga penerapan model kalibrasi justru menggeser pembacaan yang sebelumnya sudah tepat. Dengan kata lain, kalibrasi tidak selalu diperlukan jika sensor sudah menunjukkan performa yang baik sebelum koreksi. Hal ini dapat dikatakan perubahan nilai akurasi disebabkan bahwa setiap sensor memiliki tingkat penyimpangan yang berbeda-beda terhadap nilai acuan AWS. Perbedaan perubahan akurasi setelah kalibrasi ini menunjukkan bahwa setiap sensor memiliki karakteristik error yang berbeda-beda. Oleh karena itu, untuk memahami seberapa besar kesalahan pembacaan yang terjadi pada tiap sensor perlu dilanjutkan menggunakan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE).

Berdasarkan analisis *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk mengetahui besarnya selisih atau error antara pembacaan sensor BMP280 dan nilai acuan AWS. Nilai RMSE yang lebih kecil menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat ketelitian yang lebih baik dalam mengukur tekanan udara [53]. Pada penelitian ini, RMSE dianalisis untuk mengevaluasi perubahan performa masing-masing sensor sebelum dan sesudah kalibrasi menggunakan persamaan regresi linier. Dari hasil perbandingan RMSE Sensor 1 dan Sensor 2 menunjukkan nilai RMSE yang cukup kecil sebelum kalibrasi. RMSE ini mengindikasikan bahwa kedua sensor tersebut sebenarnya sudah akurat dan stabil tanpa memerlukan penyesuaian tambahan. Namun setelah diterapkan persamaan kalibrasi, RMSE keduanya mengalami

peningkatan. Sensor 2 menunjukkan bahwa pemberian persamaan kalibrasi justru menggeser data yang sebelumnya sudah baik, sehingga ketelitian sensor sedikit menurun. Kondisi ini sejalan dengan teori bahwa kalibrasi tidak selalu memberikan hasil yang lebih baik apabila sensor sudah memiliki performa yang stabil sejak awal. Berbeda dengan dua sensor lainnya seperti Sensor 3 justru mengalami perbaikan yang signifikan setelah penerapan persamaan kalibrasi. Sebelum kalibrasi Sensor 3 memiliki RMSE sangat tinggi yang menandakan bahwa pembacaannya jauh dari nilai AWS. Setelah diterapkan persamaan regresi linier, nilai RMSE turun drastis. Penurunan ini menandakan bahwa Sensor 3 memang membutuhkan koreksi agar pembacaannya dapat lebih mendekati nilai acuan. Hal ini juga memperkuat bahwa kalibrasi efektif diterapkan pada sensor yang memiliki bias besar. Sensor 4 memiliki tingkat ketelitian yang sangat baik pada kondisi awal sebelum kalibrasi. Namun setelah diberikan persamaan kalibrasi, tingkat ketelitiannya justru menurun karena error pengukurannya menjadi lebih besar. Kondisi ini serupa dengan Sensor 1 dan Sensor 2, yang juga mengalami peningkatan error setelah proses kalibrasi diterapkan..

Secara keseluruhan analisis RMSE menunjukkan bahwa penerapan persamaan kalibrasi hanya memberikan manfaat nyata pada Sensor 3 yang memiliki error terbesar sebelum dikoreksi. Sementara itu pada Sensor 1, Sensor 2, dan Sensor 4, penerapan kalibrasi justru menyebabkan peningkatan error. Dengan demikian, kalibrasi regresi linier pada penelitian ini efektif untuk memperbaiki sensor yang tidak presisi, tetapi tidak diperlukan pada sensor yang sudah menunjukkan kinerja akurat sejak awal. Hal ini menunjukkan bahwa sensor BMP280 memiliki karakteristik yang berbeda-beda pada setiap unitnya. Sensor yang sudah memiliki pembacaan baik sejak awal cenderung tidak mengalami peningkatan performa setelah kalibrasi bahkan mengalami penurunan. Sebaliknya, sensor yang memiliki error besar sebelum kalibrasi seperti Sensor 3 sangat terbantu oleh proses kalibrasi sehingga nilai RMSE menjadi jauh lebih rendah.

Evaluasi performa sensor BMP280 tidak berhenti pada akurasi dan RMSE, melainkan mencakup pengujian kestabilan variansi agar dapat memastikan kualitas pengukuran secara menyeluruh. Oleh karena itu, uji homogenitas dilakukan melalui

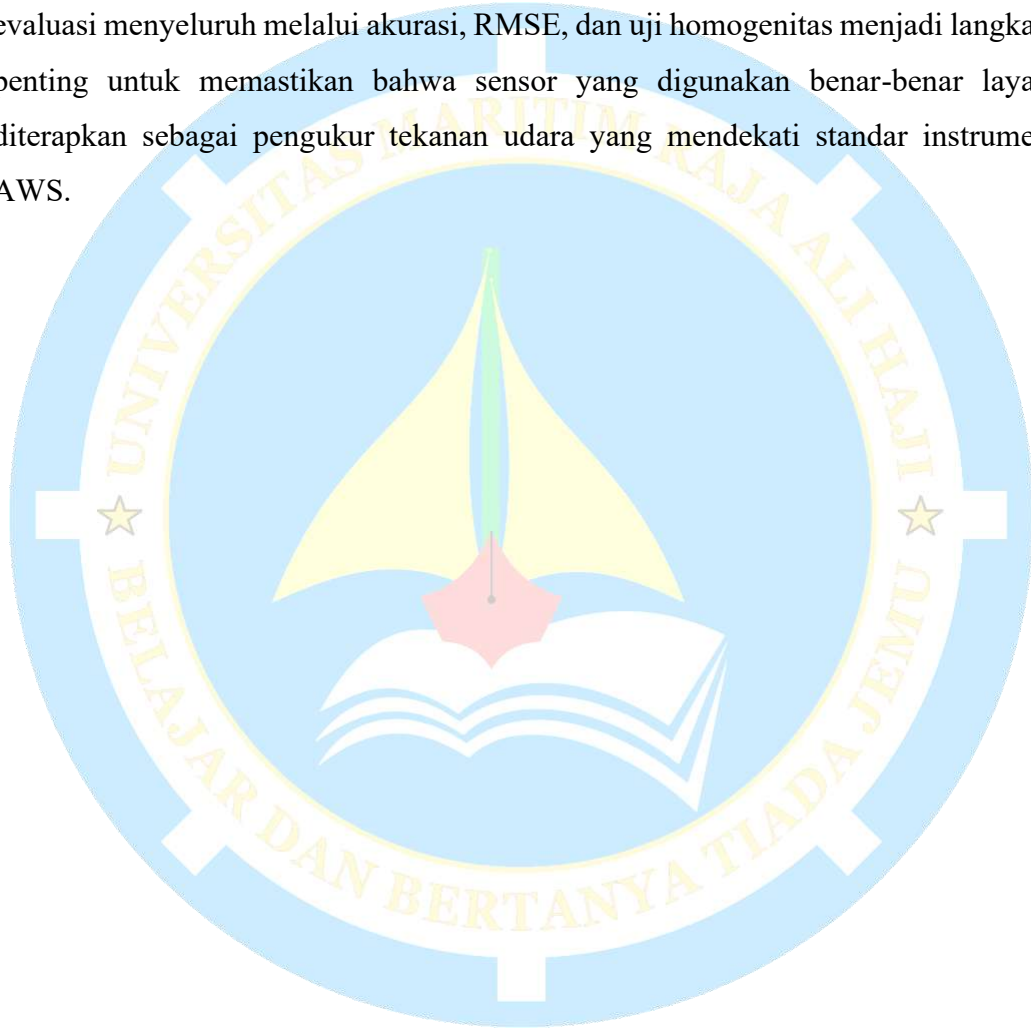
analisis residu dan Uji *Levene* guna menilai apakah sensor memiliki pola error yang seragam selama proses pengukuran.

Pengujian homogenitas dilakukan untuk memastikan apakah keempat sensor BMP280 memiliki variansi error yang stabil terhadap nilai acuan AWS. Kestabilan variansi penting dilakukan karena sensor yang akurat sekalipun dapat dianggap kurang layak jika variansi errornya tidak konsisten [54]. Pada penelitian ini, homogenitas dievaluasi melalui analisis pola residu serta Uji *Levene*.

Kondisi ini mengindikasikan bahwa secara grafik kedua sensor tersebut memenuhi karakteristik homoskedastisitas, yaitu variansi error yang stabil sepanjang rentang pengukuran. Dengan kata lain, tidak terdapat peningkatan atau penurunan variansi yang signifikan pada nilai residualnya sehingga Sensor 1 dan Sensor 2 dapat dikategorikan stabil berdasarkan evaluasi visual.

Namun, hasil Uji *Levene* menunjukkan nilai signifikansi  $< 0,001$  pada kedua sensor tersebut. Kondisi ini terjadi karena Uji *Levene* sangat sensitif terhadap jumlah data yang besar, sehingga perbedaan variansi yang sangat kecil sekalipun dapat menghasilkan keputusan tidak homogen atau heteroskedastisitas secara statistik [55]. Dalam penelitian ini hasil pengukuran data yang diperoleh berkisaran lebih dari 345.000 data, hasil tersebut tidak mencerminkan ketidakstabilan yang bersifat praktis. Justru, pola grafik residu dan konsistensi error pada Sensor 1 dan Sensor 2 menunjukkan bahwa kedua sensor ini tetap stabil dan layak digunakan. Selanjutnya grafik residu Sensor 3 setelah kalibrasi menunjukkan pola yang lebih teratur dibandingkan sebelum dilakukan penyesuaian. Meskipun demikian, sebagian titik residual masih menyebar melewati batas homoskedastisitas sehingga Sensor 3 tetap dikategorikan memiliki kecenderungan heteroskedastisitas ringan. Hal ini mengindikasikan bahwa stabilitas variansi Sensor 3 belum sebaik Sensor 1 dan Sensor 2. Sebaliknya, Sensor 4 menunjukkan pola residu yang jelas membentuk *fan shape*, yang merupakan indikasi kuat terjadinya heteroskedastisitas. Variansi error meningkat seiring dengan naiknya nilai fitted, sehingga Sensor 4 memiliki tingkat kestabilan paling rendah dibandingkan sensor lainnya. Hasil Uji *Levene* yang juga menghasilkan nilai signifikansi  $< 0,001$  memperkuat bahwa variansi Sensor 4 memang tidak homogen dan cenderung tidak stabil sepanjang periode pengamatan.

Hal ini menunjukkan bahwa sensor BMP280 memiliki performa yang bervariasi pada setiap unitnya, di mana sebagian sensor mampu memberikan pembacaan yang akurat, presisi, dan stabil, sedangkan sebagian lainnya membutuhkan proses kalibrasi tambahan untuk mengurangi bias dan meningkatkan ketelitian pengukuran. Perbedaan karakteristik tiap sensor ini menegaskan bahwa kualitas pembacaan BMP280 sangat dipengaruhi oleh kondisi hardware, stabilitas internal sensor, serta proses konfigurasi dan pemrogramannya. Dengan demikian, evaluasi menyeluruh melalui akurasi, RMSE, dan uji homogenitas menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa sensor yang digunakan benar-benar layak diterapkan sebagai pengukur tekanan udara yang mendekati standar instrumen AWS.



## **BAB V**

### **SIMPULAN DAN SARAN**

#### **A. Simpulan**

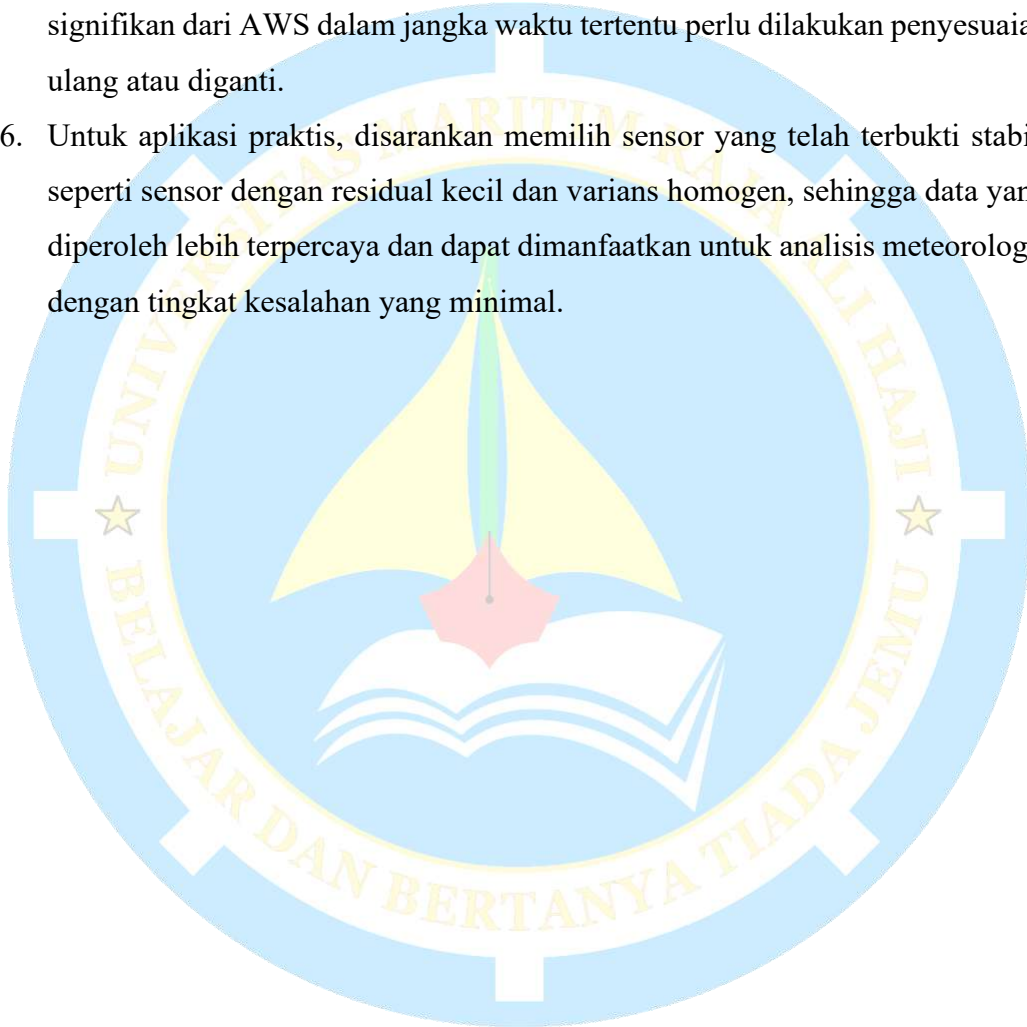
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan telah berhasil dianalisis tingkat akurasi dan kestabilan pembacaan tekanan udara dari empat sensor BMP280. Analisis dilakukan menggunakan regresi linier, analisis residu, serta uji *Levene* untuk menilai homogenitas varians. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap sensor BMP280 memiliki karakteristik performa yang berbeda dalam mengukur tekanan udara. Perbedaan ini terlihat dari variasi nilai residual, sebaran error terhadap AWS, serta hasil uji *Levene* yang menandakan adanya perbedaan varians error antarsensor. Melalui regresi linier, diperoleh informasi bahwa sebagian besar sensor mampu mengikuti pola perubahan tekanan udara AWS dengan cukup baik, ditunjukkan oleh nilai slope yang mendekati 1 dan nilai error yang relatif kecil. Akurasi sensor dinilai melalui besar kecilnya nilai error, sedangkan presisi dipahami melalui konsistensi residual dan kestabilan varians. Berdasarkan hasil analisis, Sensor 1 dan Sensor 2 menunjukkan performa paling stabil dengan residual kecil dan pola sebaran yang homogen, sedangkan Sensor 4 memiliki tingkat error yang lebih besar dan pola residu tidak seragam, sehingga menunjukkan presisi yang paling rendah di antara sensor lain.

#### **B. Saran**

1. Kalibrasi rutin perlu dilakukan sebelum sensor BMP280 digunakan untuk pemantauan tekanan udara, terutama pada sensor yang menunjukkan nilai error besar atau pola residu tidak stabil. Proses kalibrasi menggunakan regresi linier terbukti mampu meningkatkan akurasi dan presisi pembacaan sensor.
2. Pengujian homogenitas varians, seperti uji *Levene*, disarankan dilakukan pada setiap unit sensor agar kestabilan pembacaan dapat dinilai secara menyeluruh. Sensor dengan varians residual tidak homogen sebaiknya tidak digunakan untuk keperluan pengukuran jangka panjang.
3. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jumlah sensor yang lebih banyak, sehingga karakteristik performa sensor BMP280 dapat dipetakan

dengan lebih komprehensif dan perbedaan antarsensor dapat dianalisis secara lebih mendalam.

4. Pengujian dalam kondisi cuaca yang lebih beragam, seperti saat hujan, angin kencang, dan perubahan suhu ekstrem, perlu dilakukan untuk mengetahui kestabilan sensor dalam situasi atmosfer yang dinamis.
5. Penggunaan sensor sebaiknya disertai monitoring secara berkala, baik terhadap akurasi maupun stabilitas residu. Sensor yang menunjukkan penyimpangan signifikan dari AWS dalam jangka waktu tertentu perlu dilakukan penyesuaian ulang atau diganti.
6. Untuk aplikasi praktis, disarankan memilih sensor yang telah terbukti stabil, seperti sensor dengan residual kecil dan varians homogen, sehingga data yang diperoleh lebih terpercaya dan dapat dimanfaatkan untuk analisis meteorologis dengan tingkat kesalahan yang minimal.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Nuridhati, Y. Ruhiat, and Y. Guntara, "Analisis Suhu Udara, Kelembapan Udara, dan Tekanan Udara Terhadap Curah Hujan," *Jurnal Pendidikan Fisika*, vol. 6, no. 2, pp. 96–100, Jun. 2025, Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.eurekaunima.com/index.php/jpfunima/article/view/438>
- [2] A. Luthfiarta, A. Febriyanto, H. Lestiawan, and W. Wicaksono, "Analisa Prakiraan Cuaca dengan Parameter Suhu, Kelembaban, Tekanan Udara, dan Kecepatan Angin Menggunakan Regresi Linear Berganda," *JOINS (Journal of Information System)*, vol. 5, no. 1, pp. 10–17, May 2020, doi: 10.33633/joins.v5i1.2760.
- [3] M. Awaluddin, Syahrir, A. Zarkasi, and E. R. Putri, "Rancang Bangun Prototipe Monitoring Suhu dan Kelembaban Udara Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Laboratorium Kalibrasi Balai Pengujian dan Sertifikasi Mutu Barang Samarinda," *Progressive Physics Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 132–141, Jun. 2022, Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.fmipa.unmul.ac.id/index.php/ppj/article/view/910>
- [4] A. S. Wijaya, I. Y. Zaki, M. R. Maulana, and P. Diptya Widayaka, "Automatic Private Weather Station (APWS) Prototype Using Node MCU with Telegram Monitoring," *Indonesian Journal of Electrical and Electronics Engineering (INAJEEE)*, vol. 6, no. 2, pp. 19–22, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.26740/inajeee.v6n1>
- [5] Pradika, Pramatha, Putra, and Yuda, "Rancang Bangun Sistem Pengolahan Data Curah Hujan Automatic Weather Stations (AWS) di Stasiun Klimatologi Jembrana Bali," *Jurnal Pengabdian Informatika*, vol. 1, no. 4, pp. 1035–1042, Aug. 2023, Accessed: Jul. 28, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal1.unud.ac.id/index.php/jupita/article/view/405/370>
- [6] Akhmad Mutohar, "Prototipe Alat Monnitoring Kualitas Udara di Ruang Operasi yang Terintegrasi Berbasis IoT," Skripsi, Universitas Islam Sultan Agung, 2021.
- [7] M. Yafis, M. R. Arafah, M. S. Ramadhan, and P. Kurniawan, "Aplikasi Rangkaian Sistem Otomasi pada mesin Sealer Perekat Cup di Gerai Teh Poci," *Journal Of Industrial Engineering & Tecnology Innovation*, vol. 02, no. 02, pp. 98–105, Apr. 2025, [Online]. Available: <https://journal.lenvari.org/jieti/article/view/195>
- [8] S. N. Yurika, I. Sucahyo, and M. Yantidewi, "Rancang Bangun Alat Pengukur Ketinggian, Tekanan Udara, Dan Temperatur Udara Dengan

- Bluetooth Low Energy,” *Inovasi Fisika Indonesia*, vol. 10, no. 3, pp. 1–8, 2021, doi: 10.26740/ifi.v10n3.p1-8.
- [9] Marzuarman, Stephan, M. Afridon, N. Budianto, D. Mirza Rinaldi, and B. Prasetyo, “Rancang Bangun Stasiun Pemantau Cuaca Berbasis Internet of Things (IoT),” *Seminar Nasional Industri dan Teknologi (SNIT)*, no. 1, pp. 159–180, Dec. 2024, Accessed: Aug. 18, 2025. [Online]. Available: <https://snit-polbeng.org/eprosiding/index.php/snit/article/view/628>
- [10] Desi Oktavia, “Analisis Akurasi dan Presisi Sensor BMP280 untuk Akuisisi Tekanan Udara,” Skripsi, Universitas Maritim Raja Ali Haji, 2022.
- [11] Yogi Pratama, “Uji Performa BMP280: Kalibrasi Sensor Pengukuran Tekanan Udara dengan Regresi Linear Berganda,” Skripsi, Universitas Maritim Raja Ali Haji, 2023.
- [12] S. S. Dewi, R. Ermina, V. A. Kasih, F. Hefiana, A. Sunarmo, and R. Widianingsih, “Analisis Penerapan Metode One Way Anova Menggunakan Alat Statistik SPSS,” *Jurnal Riset Akuntansi Soedirman*, vol. 2, no. 2, pp. 121–132, Dec. 2023, [Online]. Available: <https://jos.unsoed.ac.id/index.php/jras/article/view/10815>
- [13] H. S. Bintang, H. Khairunnisa, and G. Qomaruzzaman, “Pengaruh Tekanan Udara Nozzle pada Mesin Muratec Vortex Spinning terhadap Kualitas Benang,” *Jurnal Tekstil*, vol. 5, no. 1, pp. 19–26, Jun. 2022, Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: <https://jute.aktekstilsolo.ac.id/index.php/jurnal/article/view/19>
- [14] Yuliani, T. Suhendra, and H. A. Kusuma, “Analisis Perbandingan Akurasi Pada Sensor Tekanan BMP280 dan BME280,” *Student Online Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 31–37, Mar. 2022, Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: <https://soj.umrah.ac.id/index.php/SOJFT/article/view/1565>
- [15] M. A. Triawan, Husnawati, and F. Humam, “Sistem Pemantauan Lingkungan Menggunakan Sensor BME280 Berbasis Internet of Things,” *Generic*, vol. 15, no. 2, pp. 37–41, 2023, doi: 10.18495/generic.v15i2.154.
- [16] Jefri Al Bukhori, “Implementasi Sensor BME280 pada Sistem Pemantauan dan Klasifikasi Cuaca Berbasis INTERNET OF THINGS (IoT),” Skripsi, Politeknik Negeri Jakarta, 2025.
- [17] U. Nugraha, R. Munadi, and Sussi, “Pemantauan Gas Metana Pada Biodigester Melalui Mobile Application,” *e-Proceeding of Engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 5950–5953, Dec. 2024, [Online]. Available: <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/view/24723>
- [18] A. V. Rachmawati, M. Yantidewi, and Penelitian, “Analisis Kalibrasi Sensor BME280 dengan Pendekatan Regresi Linear pada Pengukuran Temperatur,

Kelembaban Relatif, dan Titik Embun,” *Jurnal Kolaboratif Sains*, vol. 7, no. 5, pp. 1589–1597, 2024, doi: 10.56338/jks.v7i5.5272.

- [19] A. Agustian, K. Lisdiana, A. Suryana, and M. Nursalman, “Analisis Statistik Uji Normalitas dan Homogenitas Data Nilai Mata Pelajaran dengan Menggunakan Python,” *Journal Al-Ibanah*, vol. 10, no. 1, pp. 51–56, Jan. 2025, [Online]. Available: <https://journal.iaipibandung.ac.id/index.php/ibanah/article/view/307>
- [20] A. Z. Maharani, Annundi Angelin Sherlina, F. W. Wulansari, I. A. Susanti, and O. Ardhiarisca, “Pengaruh Belanja Modal dan Belanja Pegawai Terhadap Pendapatan Asli Daerah Pemerintahan Provinsi Jawa Barat,” *Jurnal Rumpun Manajemen dan Ekonomi*, vol. 1, no. 3, pp. 65–74, Jul. 2024, Accessed: Dec. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.ejurnal.kampusakademik.co.id/index.php/jrme/article/view/1416>
- [21] C. Widya Prasetyandari, “Perbandingan Kinerja Keuangan PT. Bank Syariah Indonesia, Tbk (BSI) Sebelum dan Sesudah di Merger,” <https://ejournal.steialfurqon.ac.id/index.php/adl/article/view/42>, vol. 3, no. 2, pp. 135–142, Nov. 2022, Accessed: Dec. 09, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal.steialfurqon.ac.id/index.php/adl/article/view/42>
- [22] M. Razzaaq, L. H. Lubis, and R. Sirait, “Studi Pengaruh Suhu dan Tekanan Udara terhadap Gaya Angkat Pesawat,” *Jurnal Riset Inovasi Pembelajaran Fisika*, vol. 7, no. 2, pp. 102–111, Nov. 2024, [Online]. Available: <http://ojs.unimal.ac.id/index.php/relativitas/index>
- [23] A. M. Siregar, Tukino, S. Faisal, A. Fauzi, and I. Kadori, “Klasifikasi Untuk Prediksi Cuaca Menggunakan Esemble Learning,” *Jurnal Pengkajian dan Penerapan Teknik Informatika*, vol. 13, no. 2, pp. 138–147, Sep. 2020, doi: 10.33322/petir.v13i2.998.
- [24] R. Listiana and A. Febrianto, “Analisis Akuisisi Data pada Sistem SCADA Pengaturan Tekanan Udara,” *Journal Informatics and Electronics Engineering*, vol. 02, no. 01, pp. 1–5, Jun. 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.poltekdedc.ac.id/index.php/jiee/article/view/602>
- [25] Wahyudi, Jumrianto \*, and A. Syakur, “Kalibrasi Sensor Tegangan dan Sensor Arus dengan Menerapkan Rumus Regresi Linear menggunakan Software Bascom AVR Info Articles,” *Journal of Systems, Information Technology, and Electronics Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2020, Accessed: Aug. 11, 2025. [Online]. Available: <http://ejournal.ivet.ac.id/index.php/jsitee>
- [26] U. Usmadi, “Pengujian Persyaratan Analisis (Uji Homogenitas Dan Uji Normalitas),” *Inovasi Pendidikan*, vol. 7, no. 1, pp. 50–62, 2020, doi: 10.31869/ip.v7i1.2281.

- [27] A. Q. Sari, Sukestiyarno, and A. Agoestanto, "Batasan Prasyarat Uji Normalitas dan Uji Homogenitas pada Model Regresi Linear," *Unnes Journal of Mathematics*, vol. 6, no. 2, pp. 168–177, 2017, [Online]. Available: <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ujm>
- [28] Usmani, "Pengujian Persyaratan Analisis (Uji Homogenitas dan Uji Normalitas)," *Inovasi Pendidikan*, vol. 7, no. 1, pp. 50–62, Mar. 2020, Accessed: Nov. 30, 2025. [Online]. Available: <http://eprints.umsb.ac.id/id/eprint/246>
- [29] S. Rosad and D. Alfaji, "Penerapan Papan Informasi Digital Secara Real Time Menggunakan Network Time Protocol Berbasis Website," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 8, no. 2, pp. 20–25, 2024, [Online]. Available: <https://www.ejournal.itn.ac.id/index.php/jati/article/view/7947>
- [30] A. Nabillah, M. Rifqi, and S. Maesaroh, "Implementasi Kebijakan Grup Policy untuk Mitigasi Risiko Keamanan pada Server di PT XYZ," *Ilmiah Sains dan Teknologi*, vol. 9, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2025, Accessed: Aug. 07, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal.lppm-unbaja.ac.id/index.php/saintek/article/view/3912>
- [31] D. R. Akhiruddin and T. Sutabri, "Analisis Peningkatan Keamanan Pada Simple Network Time Protocol (SNTP) Untuk Mendeteksi Cybercrime Dalam Aktifitas Jaringan Menggunakan Metode Firewall," *Blantika Multidisciplinary Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 21–32, Feb. 2023, doi: 10.57096/blantika.v2i1.9.
- [32] I. P. A. W. Widyatmika, N. P. A. W. Indrawati, I. W. W. A. Prastya, I. K. Darminta, I. G. N. Sangka, and A. A. N. G. Sapteka, "Perbandingan Kinerja Arduino Uno dan ESP32 Terhadap Pengukuran Arus dan Tegangan," *Jurnal Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 13, no. 1, pp. 35–47, 2021, doi: 10.5614/joki.2021.13.1.4.
- [33] Singgih Winarko, "Analisis Pengaruh Penggunaan Metode Charging & Discharging pada Kecepatan Pengisian dan Pengosongan Baterai," Skripsi, Universitas Lampung, 2021.
- [34] B. Satria, Rahmani, M. E. Dalimunthe, M. Iqbal, and Bertauli, "Implementasi Weather Station Berbasis IoT Dengan ESP32 Beni," *Seminar Nasional & Call For Paper Sinergi Multidisiplin Sosial Humaniora dan Sains Teknologi*, vol. 1, no. 1, pp. 9–20, Jul. 2024, [Online]. Available: <https://proceeding.pancabudi.ac.id/index.php/SMSHDST/article/view/43>
- [35] Bosch Sensortec GmbH, "BMP280 End-of-line Offset Calibration BMP280: Application Note (End-of-line Offset Calibration)," Jerman, Nov. 2019. Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://community.bosch->

[sensortec.com/mems-sensors-forum-jrmujtaw/post/bmp280-sensor-accuracy-8516RJhJD0E1A6W](https://sensortec.com/mems-sensors-forum-jrmujtaw/post/bmp280-sensor-accuracy-8516RJhJD0E1A6W)

- [36] Sugeng, T. N. Nizar, D. A. Jatmiko, R. Hartono, and Y. Y. Kerlooza, "Kalibrasi Sensor Monitoring Cuaca pada Area Lokal untuk Meningkatkan Akurasi pada Sensor Biaya Rendah," *Komputika : Jurnal Sistem Komputer*, vol. 13, no. 2, pp. 277–287, 2024, doi: 10.34010/komputika.v13i2.13949.
- [37] N. A. Haq, Khomsin, and D. G. Pratomo, "The Design of an Arduino Based Low-Cost Ultrasonic Tide Gauge with the Internet of Things (Iot) System," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 698, no. 1, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/698/1/012004.
- [38] M. Susantok, A. U. A. Wibowo, M. Akbar, and Rahul, "Peningkatan Akurasi Sistem Pemantauan Suhu Dan Kelembapan Pada Laboratorium Pengujian Benih Tanaman Menggunakan Inversi Regresi Linier," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 12, no. 1, pp. 153–164, Feb. 2025, doi: 10.25126/jtiik.2025129083.
- [39] G. N. Ayuni and D. Fitrihanah, "Penerapan Metode Regresi Linear Untuk Prediksi Penjualan Properti pada PT XYZ," *Jurnal Telematika*, vol. 14, no. 2, pp. 79–86, Apr. 2020, Accessed: Jul. 28, 2025. [Online]. Available: <https://journal.ithb.ac.id/index.php/telematika/article/view/321>
- [40] K. Aprilina, T. A. Nuraini, and A. Sopaheluwakan, "Uji Statistik Perbandingan Suhu Udara Dari Peralatan Otomatis Dan Manual," *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 18, no. 1, pp. 13–20, Nov. 2018, doi: 10.31172/jmg.v18i1.396.
- [41] Y. A. Miftahulumudin, M. Munadi, and M. N. Setiawan, "Kalibrasi Sensor Pada Sistem Data Akuisisi Alat Uji Unjuk Kerja Turbin Angin," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 12, no. 1, pp. 65–70, Jan. 2024, Accessed: Nov. 24, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/42601>
- [42] F. D. F. Amaral, A. Warsito, and E. S. Mumpuni, "Penentuan Koefisien Ekstingsi Cluster Bintang IC 4665 Menggunakan Metode Regresi Linear Dengan Pemrograman PYTHON," *Jurnal Fisika : Fisika Sains dan Aplikasinya*, vol. 10, no. 1, pp. 36–41, Apr. 2025, Accessed: Nov. 24, 2025. [Online]. Available: <https://ejurnal.undana.ac.id/index.php/FISA/article/view/20705>
- [43] I. Inayah, "Analisis Akurasi Sistem Sensor IR MLX90614 dan Sensor Ultrasonik berbasis Arduino terhadap Termometer Standar," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 10, no. 4, pp. 428–434, Oct. 2021, doi: 10.25077/jfu.10.4.428-434.2021.

- [44] A. Laksono and I. G. A. WIdagda, "Kalibrasi Alat Pengukur Tekanan Atmosfer Nirkabel Berbasis dan ESP-12S Menggunakan Pressure Chamber," *Buletin Fisika*, vol. 23, no. 1, pp. 1–11, Feb. 2022, Accessed: Dec. 27, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.harianregional.com/buletinfisika/full-68043>
- [45] Hikmah, Asrirawan, Apriyanto, and Nilawati, "Peramalan Data Cuaca Ekstrim Indonesia Menggunakan Model ARIMA dan Recurrent Neural Network," *Jambura Journal of Mathematics*, vol. 5, no. 1, pp. 230–242, Feb. 2023, doi: 10.34312/jjom.v5i1.17496.
- [46] Nurhaswinda *et al.*, "Tutorial uji normalitas dan uji homogenitas dengan menggunakan aplikasi SPSS," *Jurnal Cahaya Nusantara*, vol. 1, no. 2, pp. 55–68, Jan. 2025, Accessed: Nov. 24, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.cahayapublikasi.com/index.php/jcn/article/view/25>
- [47] A. Setyawan, M. Hadijati, and N. W. Switrayni, "Analisis Masalah Heteroskedastisitas Menggunakan Generalized Least Square dalam Analisis Regresi," *Eigen Mathematics Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 61–72, Dec. 2020, Accessed: Dec. 27, 2025. [Online]. Available: <https://eigen.unram.ac.id/index.php/eigen/article/view/43>
- [48] S. P. Rahmasari, H. Permadi, and J. Tesmanto, "Pengaruh Kompetensi Pemasaran Digital terhadap Kepuasan Kerja Karyawan di Pt Sumber Alfaria Trijaya, TBK (Alfamart) Kota Bekasi," *Economics and Digital Business Review*, vol. 7, no. 1, pp. 254–265, Mar. 2025, Accessed: Dec. 27, 2025. [Online]. Available: <https://ojs.stieamkop.ac.id/index.php/ecotal/article/view/3041>
- [49] I. Bukhori, C. Fatih, and Analianasari, "Analisis Peramalan Produksi Caisim di PT XYZ Bogor," *Karya Ilmiah Mahasiswa [AGRIBISNIS]*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2018, Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://repository.polinela.ac.id/202/>
- [50] A. Nadhil Edar and A. Wahyuni, "Pengaruh Suhu dan Kelembaban Terhadap Rasio Kelembaban dan Entalpi (Studi Kasus: Gedung UNIFA Makassar)," *LOSARI Jurnal Arsitektur Kota dan Pemukiman*, vol. 6, no. 2, pp. 102–114, Aug. 2021, Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://jurnalftlama.umi.ac.id/index.php/losari/article/view/311>
- [51] R. Kariandinata, A. Hidayat, U. Koswara, W. Hambali Hidayat, and A. Suganda, "Pengaruh Antara Kinerja dan Gaya Kepemimpinan Kepala Sekolah Terhadap Kompetensi Guru di SDN Sukasari Cileunyi Bandung," *Jurnal Studi Guru dan Pembelajaran*, vol. 8, no. 2, pp. 1086–1100, May 2025, Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://e-journal.my.id/jsqp/article/view/6507>

- [52] S. Sugeng, T. N. Nizar, D. A. Jatmiko, R. Hartono, and Y. Y. Kerlooza, "Kalibrasi Sensor Monitoring Cuaca pada Area Lokal untuk Meningkatkan Akurasi pada Sensor Biaya Rendah," *Komputika : Jurnal Sistem Komputer*, vol. 13, no. 2, pp. 277–287, Oct. 2024, Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://ojs.unikom.ac.id/index.php/komputika/article/view/13949>
- [53] E. P. Nugroho, A. Anisyah, D. S. Al Fathin, M. N. Y. Amadudin, M. S. Ramadhani, and Yosafat, "Pemodelan Sistem Monitoring Kualitas Udara Pintar Berbasis Internet of Things dengan Pendekatan Machine Learning," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 12, no. 2, pp. 469–480, Apr. 2025, Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://jtiik.ub.ac.id/index.php/jtiik/article/view/9195>
- [54] B. Dwinarto, E. B. Laconi, and A. Jayanegara, "Uji Homogenitas dan Stabilitas Bungkil Kedelai Sebagai Bahan Standar pada Pengujian Nutrien di Laboratorium Pakan," *Jurnal Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan*, vol. 22, no. 3, pp. 159–165, Dec. 2024, Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <https://journal.ipb.ac.id/index.php/jurnalintp/article/view/59392>
- [55] P. Anjarwati, N. Eka Mayangsari, and T. Azis Ramadani, "Analisis Statistik Pengaruh Dosis dan Waktu Kontak Adsorpsi dalam Menurunkan Kandungan Logam Berat Cu Menggunakan Nanokristal Selulosa-Magnetik Nanopartikel," *Conference Proceeding on Waste Treatment Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 45–48, Nov. 2025, Accessed: Dec. 01, 2025. [Online]. Available: <http://journal.ppns.ac.id/index.php/CPWTT/article/view/3850>



## **LAMPIRAN**

## Lampiran 1. Keseluruhan Program BMP280

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <WiFi.h>
#include "time.h"
#include "ThingSpeak.h"
#include <WiFiManager.h>

const char* ssid = "ALAT"; // your network SSID (name)
const char* password = "31072001"; // your network password
WiFiClient client;

unsigned long myChannelNumber = 2444939;
const char * myWriteAPIKey = "FDLILY9Y9X5CFARS";

struct tm timeinfo;
int tahun;
byte bulan, hari, jam, menit, detik;
const char* ntpServer = "pool.ntp.org";
const long  gmtOffset_sec = 7*3600;
const int    daylightOffset_sec = 0;

File myFile;
float suhu, tekanan;
Adafruit_BMP280 bmp; // I2C

void ambilWaktu()
{
    struct tm timeinfo;
    if (!getLocalTime(&timeinfo)) {
        Serial.println("Failed to obtain time");
        return;
    }
    Serial.print(&timeinfo, "%m %d %Y %H:%M:%S");
}
```

```

void cekWaktu() {

    if (!getLocalTime(&timeinfo)) {
        Serial.println("Failed to obtain time");
        return;
    }
    detik = timeinfo.tm_sec;

    Serial.println("detik = " + String(detik));
}

String newFileName, fileName = "/File";
int fileNumber = 1;

void setup()
{
    Serial.begin(115200);

    //connect to WiFi
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    Serial.printf("Connecting to %s ", ssid);
    WiFi.begin(ssid, password);
    // if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
    // Serial.print(".");
    while(WiFi.status() != WL_CONNECTED ){
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("\nConnected. ");

    ThingSpeak.begin(client); // Initialize ThingSpeak

    //init and get the time
    configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
    struct tm timeinfo;
    getLocalTime(&timeinfo);

```

```

jam = timeinfo.tm_hour;
menit = timeinfo.tm_min;
detik = timeinfo.tm_sec;

hari = timeinfo.tm_mday;
bulan = timeinfo.tm_mon + 1;
tahun = timeinfo.tm_year + 1900;

//disconnect WiFi as it's no longer needed
// WiFi.disconnect(true);
// WiFi.mode(WIFI_OFF);

Serial.print("Initializing SD card...");
if (!SD.begin(5)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    while (1);
}
// Open the data file for writing
while (SD.exists(fileName + String(fileNumber) + ".txt")) {
    fileNumber++;
}

newFileName = fileName + String(fileNumber) + ".txt";
myFile = SD.open(newFileName, FILE_APPEND);

if (myFile) {
    myFile.println("        Waktu        Suhu        Tekanan");
    myFile.close();
}
else {
    Serial.println("Error opening datalog.txt");
}

Serial.println("initialization done.");
//sensor
while (!Serial) delay(100); // wait for native usb
Serial.println(F("BMP280 test"));
unsigned status;

```

```

//status = bmp.begin(BMP280_ADDRESS_ALT, BMP280_CHIPID);
status = bmp.begin(0x76);
if (!status) {
    Serial.println(F("Could not find a valid BMP280 sensor,
check wiring or "
                    "try a different address!"));
    Serial.print("SensorID was: 0x");
Serial.println(bmp.sensorID(), 16);
    Serial.print("        ID of 0xFF probably means a bad
address, a BMP 180 or BMP 085\n");
    Serial.print("        ID of 0x56-0x58 represents a BMP 280,\n");
    Serial.print("        ID of 0x60 represents a BME 280.\n");
    Serial.print("        ID of 0x61 represents a BME 680.\n");
    while (1) delay(10);
}

/* Default settings from datasheet. */
bmp.setSampling(Adafruit_BMP280::MODE_NORMAL, /* Operating
Mode. */
                Adafruit_BMP280::SAMPLING_X2, /* Temp.
oversampling */
                Adafruit_BMP280::SAMPLING_X16, /* Pressure
oversampling */
                Adafruit_BMP280::FILTER_X16, /*
Filtering. */
                Adafruit_BMP280::STANDBY_MS_500); /* Standby
time. */

cekWaktu();
while (detik != 0) {
    cekWaktu();
    delay(1000);
}

}

void loop(){
    float suhu, tekanan1, tekanan2;
    suhu = bmp.readTemperature();
    tekanan1 = bmp.readPressure();
    tekanan2 = bmp.readPressure();
    tekanan2 = 0.0096*tekanan2 + 44.125;

```

```

ambilWaktu();
Serial.print(", Suhu: ");
Serial.print(suhu);
Serial.print(" °C, Tekanan1: ");
Serial.print(tekanan1 / 100.0); // ubah ke hPa
Serial.print(" hPa, Tekanan2 ");
Serial.print(tekanan2);
Serial.println(" hPa");

myFile = SD.open(newFileName, FILE_APPEND);
if (myFile) {

    configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
    struct tm timeinfo;
    getLocalTime(&timeinfo);
    myFile.print(&timeinfo, "%m %d %Y %H:%M:%S");
    myFile.print(", ");
    myFile.print(suhu);
    myFile.print(", ");
    myFile.println(tekanan1);
    myFile.print(", ");
    myFile.println(tekanan2);
    myFile.close();
}
else {
    Serial.println("error opening data.txt");
}

ThingSpeak.setField(7, tekanan1 );
ThingSpeak.setField(8, tekanan2 );

int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber,
myWriteAPIKey );
if(x == 200){
    Serial.println("Channel update successful." );
}
else{

```

```
        Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code  
" + String(x) );  
    }  
    delay(60000);  
}
```

Lampiran 2. Kode QR Data Pengukuran Tekanan Udara



### Lampiran 3. Dokumentasi Penelitian



## BIODATA



Theddy Kurnia Sandi, lahir di Batam pada tanggal 31 Juli 2001. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Sasmi Armizan dan Ibu Yeye Marliza. Penulis hobi bermain badminton.

Pada tahun 2008 penulis memulai pendidikan dasar di SD Negeri 001 Bengkong di Batam, dan saat kelas 3 SD pindah ke Lingga pada tahun 2010 di SD 008 Lingga Utara selesainya pada tahun 2014. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan ke SMP Negeri 1 Lingga Utara dan lulus pada tahun 2017. Setelah itu pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke SMA Negeri 1 Lingga Utara dan lulus pada tahun 2020. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan perguruan tinggi di Universitas Maritim Raja Ali Haji (UMRAH), Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman (FTTK), Jurusan Teknik Elektro dan Informatika.

Penulis menyelesaikan pendidikan pada tahun 2025, di Fakultas Teknik dan Teknologi Kemaritiman Universitas Maritim Raja Ali Haji dengan melakukan penelitian yang berjudul “ **Analisis Kestabilan Akurasi Data Pengukuran Tekanan Udara pada Sensor BMP280**”.