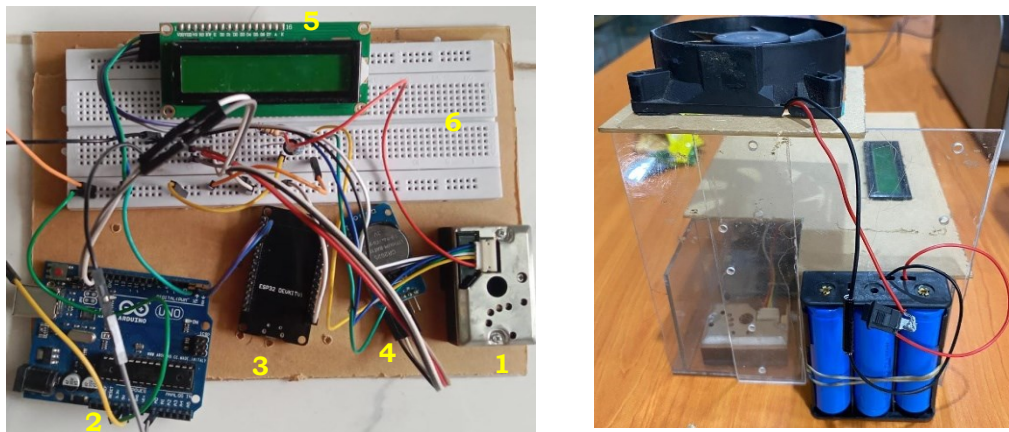


IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan kinerja sensor GP2Y1010AU0F dalam dua kondisi: menggunakan kipas dan tanpa kipas, dalam pengukuran *particulate matter* (PM) 2.5 di ruangan tertutup. Penelitian meliputi empat tahap: perancangan sistem, kalibrasi sensor, pengujian kinerja, dan evaluasi akurasi terhadap alat referensi.

4.1 Merancang sistem

Perancangan sistem pengukuran kualitas udara ini dilakukan dengan menggabungkan beberapa komponen utama, yaitu ESP32 sebagai mikrokontroler, sensor GP2Y1010AU0F sebagai pendeteksi partikel debu (PM2.5), LCD 16 × 2 untuk tampilan data, RTC DS3231 sebagai pencatat waktu, serta kipas 12 volt berdiameter 3 cm yang dipasang di depan sensor. Tujuan dari rancangan ini adalah membangun sistem yang tidak hanya mampu mendeteksi kualitas udara, tetapi juga mencatat hasil pengukuran secara presisi berdasarkan waktu actual.



Gambar 1. Rancangan alat

Pada gambar 7, digunakan beberapa komponen utama yang memiliki peran masing-masing dalam proses pemantauan kualitas udara berbasis mikrokontroler. Komponen pertama (ditunjukkan oleh nomor 1) adalah sensor GP2Y1010AU0F, yaitu sensor debu optik yang digunakan untuk mendeteksi partikel debu di udara. Sensor ini bekerja dengan prinsip deteksi cahaya yang dipantulkan oleh partikel debu yang masuk melalui celah sensor. Untuk memastikan aliran udara yang konstan ke dalam sensor, digunakan kipas tambahan yang bekerja secara terpisah dari sistem utama dengan kecepatan angin tetap sebesar 0.15 m/s, sehingga sensor dapat mengambil sampel udara secara stabil dan konsisten.

Komponen kedua (nomor 2) adalah Arduino Uno, yang berfungsi sebagai pengendali utama untuk menerima sinyal analog dari sensor GP2Y1010AU0F. Arduino Uno kemudian mengolah sinyal ini menjadi nilai digital yang mewakili konsentrasi partikel debu. Data ini kemudian dikirimkan ke mikrokontroler lain untuk proses lebih lanjut. Komponen ketiga (nomor 3) adalah ESP32, yang digunakan untuk menangani proses komunikasi data, baik itu untuk penyimpanan cloud, koneksi Wi-Fi, atau pengiriman data secara nirkabel. ESP32 menerima data dari Arduino Uno melalui komunikasi serial, lalu dapat memproses atau meneruskannya ke platform monitoring secara daring.

Untuk mencatat waktu dan tanggal pengambilan data, digunakan modul RTC DS3231 (nomor 4). RTC ini berperan untuk mencatat waktu secara *real-time*, sehingga setiap data yang dihasilkan dapat dilabeli dengan timestamp yang akurat. RTC DS3231 memiliki ketepatan tinggi dan dilengkapi baterai cadangan sehingga tetap berfungsi meskipun catu daya utama terputus. Semua komponen ini dirangkai dan diuji pada papan *breadboard* (nomor 5), yang memungkinkan fleksibilitas dalam perakitan rangkaian dan pengujian koneksi antar komponen secara sementara sebelum dilakukan penyolderan tetap.

LCD 16 × 2 (nomor 6) yang menampilkan informasi berupa nilai konsentrasi debu dan waktu pembacaan. Modul I2C pada LCD memungkinkan penggunaan dua pin komunikasi saja (SDA dan SCL), sehingga menghemat pin pada mikrokontroler. Dengan konfigurasi ini, alat dapat secara real-time menampilkan data kepada pengguna tanpa perlu perangkat tambahan lainnya. Rangkaian ini dirancang untuk dapat bekerja secara mandiri maupun terintegrasi ke dalam sistem monitoring berbasis IoT, dengan penekanan pada efisiensi konsumsi daya dan keandalan data.

4.2 Kalibrasi sensor GP2Y1010AU0F

Proses kalibrasi sensor GP2Y1010AU0F dilakukan untuk menentukan hubungan antara tegangan output analog sensor dan konsentrasi partikel debu (*Particulate Matter* (PM) 2.5) yang diukur oleh alat referensi. Sensor ini bekerja dengan prinsip pemantulan cahaya inframerah oleh partikel debu di udara. Ketika jumlah partikel meningkat, intensitas cahaya yang dipantulkan juga meningkat, sehingga menghasilkan tegangan output yang lebih tinggi. Oleh karena itu, perlu dilakukan kalibrasi agar tegangan output dapat dikonversi menjadi nilai konsentrasi PM2.5 yang akurat.

Tabel 1. Data sebelum kalibrasi

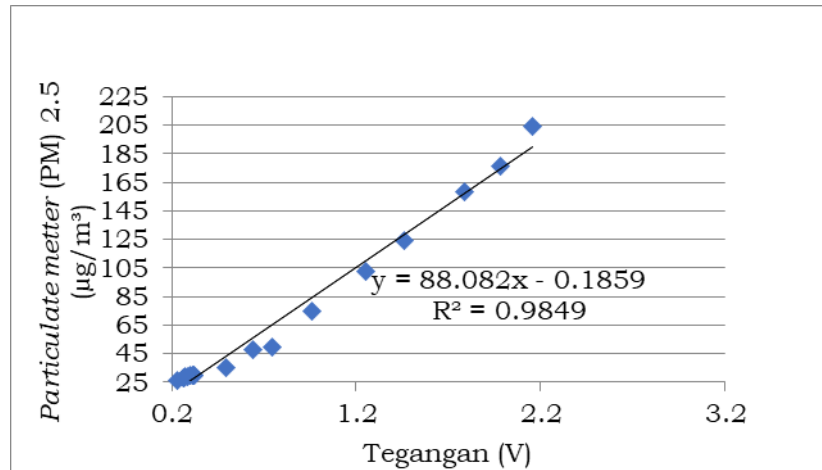
Tegangan (V)	PM 2.5 alat referensi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Konversi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
0.288	29	25
0.322	30	28

0.234	26	20
0.317	30	27
0.303	30	26
0.312	30	27
0.322	30	28
0.743	50	65
1.459	124	128
1.789	158	157
2.154	204	189
1.983	176	174
1.254	103	110
0.962	75	84
0.643	48	56
0.493	35	43
0.264	28	23
0.273	29	23
0.264	28	23

Pada tabel 5, hasil pembacaan sensor PM GP2Y1010AU0F ditampilkan dalam bentuk grafik yang mengirim data ke server *Thingspeak*. Grafik tersebut mencerminkan perubahan konsentrasi *Particulate Matter* (PM) 2.5 selama periode waktu tertentu. Namun, pembacaan awal sensor ini masih berada di luar kategori partikulat yang telah ditetapkan oleh alat *Air Quality*, sehingga diperlukan proses kalibrasi sensor terlebih dahulu agar hasil pembacaan menjadi lebih akurat dan sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh alat tersebut. Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan metode regresi yang menghubungkan nilai ADC (*Analog Digital Converter*) dari sensor dengan nilai tegangan yang telah dikonversi menggunakan persamaan:

$$\text{Voltage} = \text{Nilai ADC} * 5 / 1023 \quad (5)$$

Data tegangan yang diperoleh (dengan nilai antara 0.234 Volt hingga 2,154 Volt) merupakan hasil pembacaan sensor yang sudah dikonversi dari nilai ADC ke tegangan menggunakan persamaan ini. Nilai tegangan ini kemudian dikalibrasi menggunakan metode regresi untuk menyesuaikan pembacaan sensor dengan standar konsentrasi *Particulate Matter* (PM) 2.5 yang telah ditetapkan oleh alat *Air Quality Detector*. Dengan menggunakan fungsi *trendline* (garis tren) pada grafik *scatter plot*, *Excel* menghitung persamaan regresi terbaik berdasarkan metode kuadrat terkecil (*least squares*), yang menghasilkan hubungan linier antara nilai tegangan dan konsentrasi *Particulate Matter* (PM) 2.5.



Gambar 2. Grafik regresi linear sensor GP2Y1010AU0F

Pada gambar 8, hasil regresi tersebut diperoleh persamaan $y = 88.082x - 0.1859$ di mana x adalah tegangan sensor (dalam Volt) dan y adalah estimasi konsentrasi *Particulate Matter* (PM) 2.5 (dalam $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Angka 88.082 menunjukkan besarnya kenaikan nilai *Particulate Matter* (PM) 2.5 untuk setiap 1 volt peningkatan tegangan sensor, sementara angka 0.1589 merupakan nilai dasar *Particulate Matter* (PM) 2.5 ketika tegangan sensor berada di nol (*intersep*). Selain itu, diperoleh pula nilai koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0.9849$, yang menunjukkan bahwa model regresi ini mampu menjelaskan 98.49% variasi data *Particulate Matter* (PM) 2.5 berdasarkan perubahan tegangan. Nilai R^2 yang tinggi ini menunjukkan bahwa hubungan antara data sensor dan alat referensi cukup kuat dan dapat diandalkan sebagai dasar kalibrasi.

Pengambilan data sensor, konversi nilai ADC ke tegangan, pencocokan data dengan nilai acuan dari alat *Air Quality Detector*, kemudian dilanjutkan dengan analisis regresi linear untuk memperoleh model kalibrasi. Hasil akhir dari proses ini adalah persamaan regresi yang dapat digunakan untuk mengubah pembacaan tegangan sensor menjadi estimasi konsentrasi *Particulate Matter* (PM) 2.5 yang lebih akurat, serta dapat diandalkan dalam sistem pemantauan kualitas udara secara real-time.

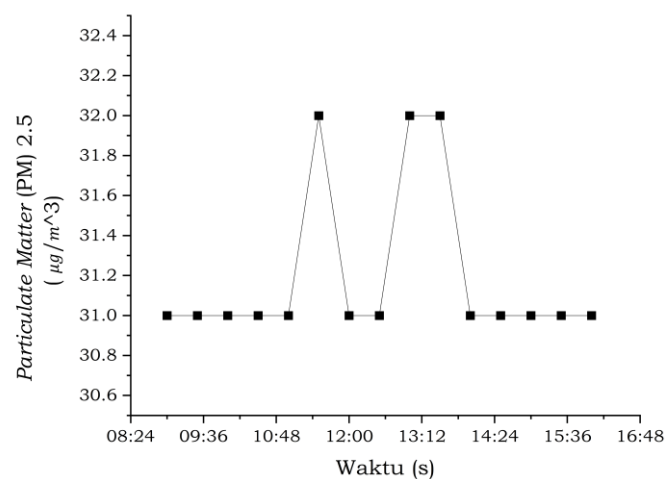
4.3 Mengevaluasi akurasi dan presisi

Pengujian sensor GP2Y1010AU0F pada penelitian ini dilakukan dalam dua kondisi berbeda, yaitu dengan bantuan kipas dan tanpa bantuan kipas. Tujuan dari perbedaan metode ini adalah untuk mengetahui pengaruh aliran udara terhadap kemampuan sensor dalam mendeteksi konsentrasi partikel *Particulate Matter* (PM) 2.5 di dalam ruang uji berukuran $(100 \times 100 \times 100)$ cm. Pada pengujian dengan kipas, udara di dalam ruang uji dibuat bersirkulasi

secara aktif sehingga partikel tersuspensi dapat terdistribusi lebih merata menuju area deteksi sensor. Sebaliknya, pada pengujian tanpa kipas, pergerakan udara hanya mengandalkan aliran alami tanpa bantuan alat pendorong. Perbandingan hasil dari kedua metode ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai tingkat kepekaan dan kestabilan sensor GP2Y1010AU0F terhadap variasi kondisi aliran udara di lingkungan tertutup.

Tabel 2. Data pengujian menggunakan kipas

waktu	alat referensi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sensor GP2Y1010AU0F ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
09:00	32	31
09:30		31
10:00		31
10:30		31
11:00		31
11:30		32
12:00		31
12:30		31
13:00		32
13:30		32
14:00		31
14:30		31
15:00		31
15:30		31
16:00		31



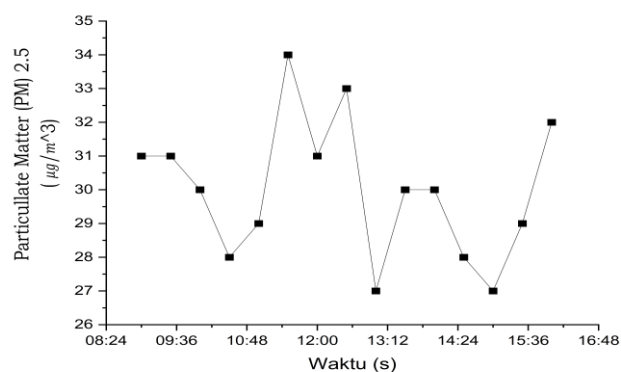
Gambar 3. Grafik pengujian menggunakan kipas

Pada gambar 9, pengujian sensor GP2Y1010AU0F pada data ini menunjukkan hasil pengukuran yang relatif stabil di kisaran 30–32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

dengan nilai referensi sebesar $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mayoritas data berada di angka $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hal ini mengindikasikan bahwa sensor mampu memberikan hasil pembacaan yang cukup konsisten. Berdasarkan data pengujian menggunakan kipas, diperoleh nilai rata-rata pengukuran konsentrasi *Particulate Matter* (PM) 2.5 oleh sensor sebesar $31,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sedangkan nilai rata-rata pengukuran menggunakan alat referensi adalah $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Selisih keduanya memberikan *error absolut* sebesar $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Jika dihitung terhadap nilai rata-rata alat referensi, diperoleh *error relatif* sebesar $1,87\%$. Nilai ini menunjukkan bahwa penggunaan kipas membantu meminimalkan perbedaan antara hasil pengukuran sensor dan alat referensi, sehingga akurasi sensor meningkat dan konsistensi data lebih terjaga.

Tabel 3. Data pengujian tanpa menggunakan kipas

waktu	alat referensi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Sensor GP2Y1010AU0F ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
09:00	30	31
09:30		31
10:00		30
10:30		28
11:00		29
11:30		34
12:00		31
12:30		33
13:00		27
13:30		30
14:00		30
14:30		28
15:00		27
15:30		29
16:00		32



Gambar 4. Grafik pengujian menggunakan tanpa kipas

Pada gambar 10, hasil pengukuran diperoleh nilai rata-rata sebesar $30,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai ini dibandingkan dengan nilai referensi sebesar $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sehingga selisih antara rata-rata hasil pengukuran dan nilai referensi adalah $0,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Selisih ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran sedikit lebih tinggi dibandingkan nilai referensi, namun perbedaannya sangat kecil, yaitu sekitar 0,93% dari nilai referensi. Hal ini mengindikasikan bahwa alat ukur yang digunakan cukup akurat karena deviasi relatif terhadap standar tergolong rendah. Selain itu, penyebaran data yang berada di sekitar nilai referensi menunjukkan konsistensi hasil pengukuran, walaupun terdapat beberapa nilai yang sedikit menyimpang (misalnya $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atau $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$), yang kemungkinan disebabkan oleh variasi kondisi pengukuran atau ketidakstabilan putaran kipas pada saat tertentu.

Pada pengujian tanpa kipas, konsentrasi *Particulate Matter* (PM) 2.5 yang terukur menunjukkan fluktuasi yang cukup besar di awal, lalu mengalami penurunan signifikan seiring waktu. Hal ini terjadi karena partikel debu yang dilepaskan tidak tersebar merata di udara, melainkan cenderung terkonsentrasi di dekat sumber pelepasan dan mulai mengendap akibat gravitasi. Kondisi ini membuat nilai pembacaan sensor bervariasi, yang berpengaruh pada akurasi (perbedaan terhadap alat referensi) dan presisi (konsistensi antar pembacaan).

Sebaliknya, pada pengujian dengan kipas, aliran udara buatan membantu mencampur partikel debu sehingga distribusinya lebih merata di seluruh ruangan. Kipas juga mencegah partikel cepat mengendap, membuat konsentrasi partikel di udara lebih stabil selama periode pengukuran. Kondisi ini menghasilkan pembacaan sensor yang lebih dekat dengan nilai referensi (akurasi lebih tinggi) dan memiliki variasi data yang lebih kecil (presisi lebih baik). Perbedaan ini terjadi karena keberadaan kipas mempengaruhi mekanisme transport partikel di udara. Pada kondisi tanpa kipas, partikel bergantung pada difusi alami yang sangat lambat, sehingga terjadi gradien konsentrasi antar titik. Sementara dengan kipas, proses konveksi paksa mempercepat pencampuran udara, meniadakan gradien konsentrasi, dan menjaga partikel tetap tersuspensi lebih lama.

4.3.1 Evaluasi akurasi

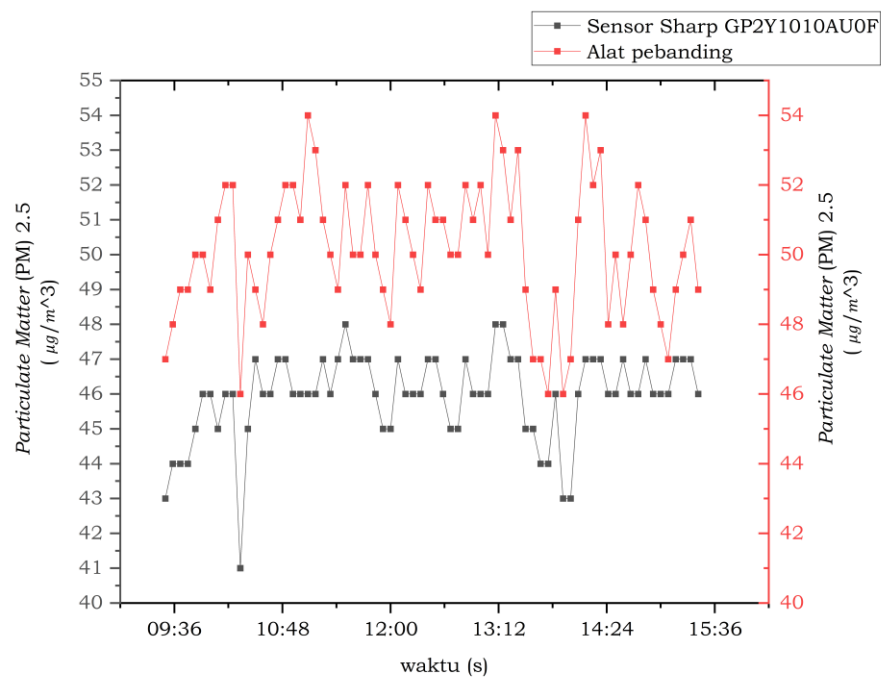
Pengujian sensor dilakukan di dalam ruang uji berukuran ($100 \times 100 \times 100$) cm yang bersifat tertutup untuk meminimalkan pengaruh kondisi lingkungan luar seperti pergerakan udara, kelembapan, maupun kontaminasi partikel dari luar ruangan. Di dalam ruang tersebut ditempatkan sensor GP2Y1010AU0F sebagai perangkat uji serta alat *Air Quality Detector* sebagai instrumen referensi standar. Kedua perangkat diletakkan pada posisi yang

berdekatan dengan ketinggian dan orientasi yang sama agar memperoleh paparan partikel udara dalam kondisi yang setara. Pengaturan ini dilakukan dengan tujuan untuk memastikan bahwa setiap perubahan konsentrasi partikulat *Particulate Matter* (PM) 2.5 di dalam ruangan dapat terdeteksi secara seragam oleh kedua alat, sehingga hasil perbandingan data lebih akurat dan dapat dipertanggung jawabkan.

Proses akuisisi data dilakukan dengan interval waktu 5 menit sekali selama periode pengamatan. Pemilihan interval tersebut bertujuan agar data yang diperoleh memiliki resolusi waktu yang cukup detail untuk melihat dinamika perubahan konsentrasi partikulat, namun tetap efisien dalam proses pencatatan. Selama pengujian, kondisi ruangan dijaga tetap stabil tanpa adanya gangguan aliran udara eksternal maupun aktivitas lain yang dapat memengaruhi distribusi partikel. Dengan prosedur ini, diharapkan hasil pengukuran yang diperoleh mampu memberikan gambaran akurasi dan stabilitas sensor.

Tabel 4. Pengukuran akurasi

waktu	Sensor GP2Y1010AU0F ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<i>Air</i> <i>Quality</i> <i>Detetor</i> ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	<i>Error</i> <i>Absolut</i>	<i>Error</i> <i>Relative</i> (%)	Akurasi (%)
9:30	43	47	4	8.51	91.48
9:35	44	48	4	8.33	91.66
9:40	44	49	5	10.2	89.79
9:45	44	49	5	10.20	89.79
9:50	45	50	5	10	90
.					
.					
.					
15:05	46	47	1	2.12	97.87
15:10	47	49	2	4.08	95.91
15:15	47	50	3	6	94
15:20	47	51	4	7.84	92.15
15:25	46	49	3	6.12	93.87
Rata-rata	45.93	50.12	4.19	8.29	91.7



Gambar 5. Grafik akurasi sensor *Particulate Matter* (PM) 2.5

Pada tabel 8, hasil pengolahan data, sensor GP2Y1010AU0F menunjukkan rata-rata akurasi sebesar 91,70% dengan nilai error absolut rata-rata 4,19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan error relatif sebesar 8,30% terhadap alat referensi. Nilai akurasi ini tergolong cukup baik, karena mayoritas hasil pengukuran berada di atas 90%, meskipun masih terdapat fluktuasi pada beberapa titik pengukuran dengan kisaran akurasi antara 85% hingga 97%. Variasi akurasi tersebut dapat disebabkan oleh keterbatasan sensitivitas sensor optik yang bekerja dengan prinsip hamburan cahaya, sehingga hasil pembacaan sangat dipengaruhi oleh ukuran, jumlah, serta sifat optik partikel debu. Selain itu, faktor lingkungan seperti distribusi partikel dalam ruang uji, arah aliran udara. Meskipun demikian, hasil evaluasi secara keseluruhan menunjukkan bahwa sensor ini memiliki keandalan yang cukup tinggi dalam memantau konsentrasi PM2.5, khususnya untuk analisis tren kualitas udara.

4.3.2 Evaluasi Presisi

Pengujian presisi dilakukan untuk mengetahui sejauh mana sensor GP2Y1010AU0F mampu menghasilkan data yang konsisten pada setiap pengulangan pengukuran dalam kondisi yang sama. Presisi berfokus pada kestabilan hasil pembacaan sensor terhadap partikel *Particulate Matter* (PM) 2.5, tanpa mempertimbangkan kedekatannya dengan nilai standar. Dengan kata lain, uji presisi bertujuan untuk memastikan bahwa variasi antar data yang

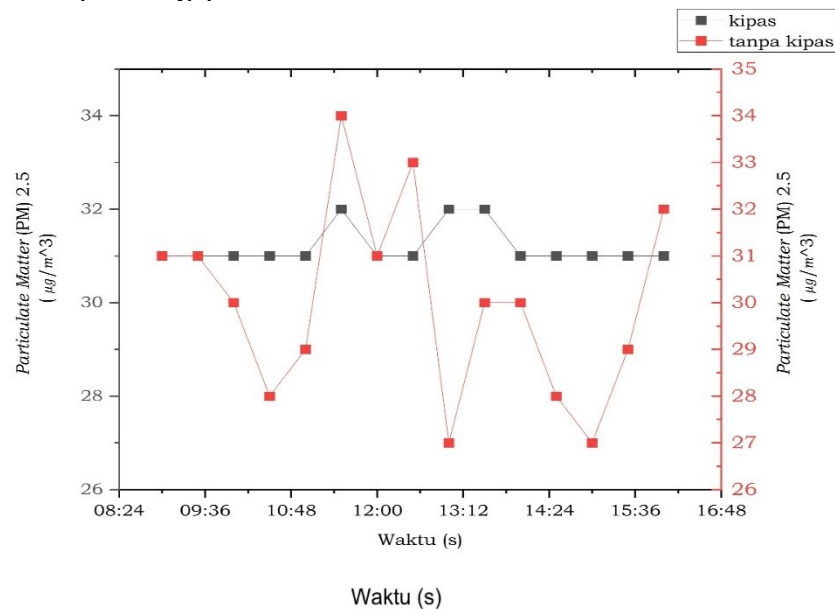
dihasilkan sensor relatif kecil, sehingga sensor dapat diandalkan dalam memantau tren kualitas udara secara berulang.

Tabel 5. Deviasi dan presisi

Rata - rata	Standar deviasi	Presisi (%)
45.93	1.27	97.23

Pada tabel 9, hasil analisis menunjukkan bahwa rata-rata nilai konsentrasi PM2.5 yang terbaca oleh sensor GP2Y1010AU0F adalah 45,93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan nilai deviasi standar sebesar 1,27. Nilai deviasi standar yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa sebaran data hasil pengukuran sensor berada dekat dengan nilai rata-ratanya, sehingga tingkat variasi atau penyimpangan antar data cukup rendah. Dengan kata lain, meskipun terdapat sedikit fluktuasi antar pembacaan, secara umum data sensor cenderung stabil.

Selain itu, nilai presisi sensor yang diperoleh mencapai 97,23%, yang berarti bahwa hasil pengukuran sensor memiliki konsistensi yang tinggi. Presisi yang mendekati 100% menandakan bahwa pengulangan pengukuran dalam kondisi yang sama menghasilkan nilai yang hampir serupa, sehingga sensor dapat diandalkan dari sisi kestabilan data. Hal ini memperkuat dugaan bahwa variasi *error* atau perbedaan antara sensor dan alat referensi lebih disebabkan oleh keterbatasan akurasi sensor terhadap standar, bukan oleh ketidakstabilan internal



Gambar 6. Grafik perbandingan kipas dan tanpa kipas

Pada gambar 12, presisi menunjukkan hasil berbeda pada dua kondisi. Pada kondisi dengan kipas, sensor menghasilkan rata-rata pembacaan sebesar

31,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, error absolut rata-rata 0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, akurasi 98,28% dan presisi 98,28%. Sementara itu, pada kondisi tanpa kipas, nilai rata-rata sebesar 30,28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ diperoleh, dengan error absolut rata-rata 0,28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, akurasi 99,07% dan presisi 93,89%. Ini menunjukkan bahwa keberadaan kipas berperan penting dalam mendistribusikan partikel debu secara merata, sehingga sensor bekerja lebih stabil.

4.3.3 Pengaruh distribusi debu

Distribusi data hasil pengukuran memiliki peran penting dalam mengevaluasi kinerja sensor. Data yang terdistribusi merata dan tidak menunjukkan penyimpangan ekstrem menandakan bahwa sensor bekerja secara stabil dan mampu mendeteksi konsentrasi partikel PM2.5 dengan konsisten. Sebaliknya, apabila distribusi data terlalu menyebar dengan deviasi yang tinggi, hal ini menunjukkan adanya ketidakpastian dalam pengukuran yang dapat menurunkan tingkat keandalan sensor.

Dalam penelitian ini, distribusi data sensor GP2Y1010AU0F menunjukkan sebaran yang relatif sempit di sekitar nilai rata-rata. Hal ini terlihat dari deviasi standar yang kecil, yang menandakan bahwa sebagian besar hasil pengukuran tidak jauh berbeda satu sama lain. Distribusi yang terkonsentrasi di sekitar nilai rata-rata memperlihatkan bahwa sensor memiliki presisi yang baik, meskipun akurasinya terhadap alat referensi standar masih memerlukan penyesuaian.

Pengaruh distribusi data juga dapat dilihat dalam konteks analisis tren kualitas udara. Apabila distribusi hasil pengukuran sensor konsisten, maka data yang diperoleh dapat digunakan untuk menggambarkan pola perubahan konsentrasi PM2.5 dari waktu ke waktu dengan lebih meyakinkan. Dengan demikian, meskipun terdapat perbedaan nilai absolut dibandingkan alat standar, distribusi data yang baik memungkinkan sensor ini digunakan untuk penelitian berbasis perbandingan tren atau pemantauan relatif dalam kondisi terkontrol.

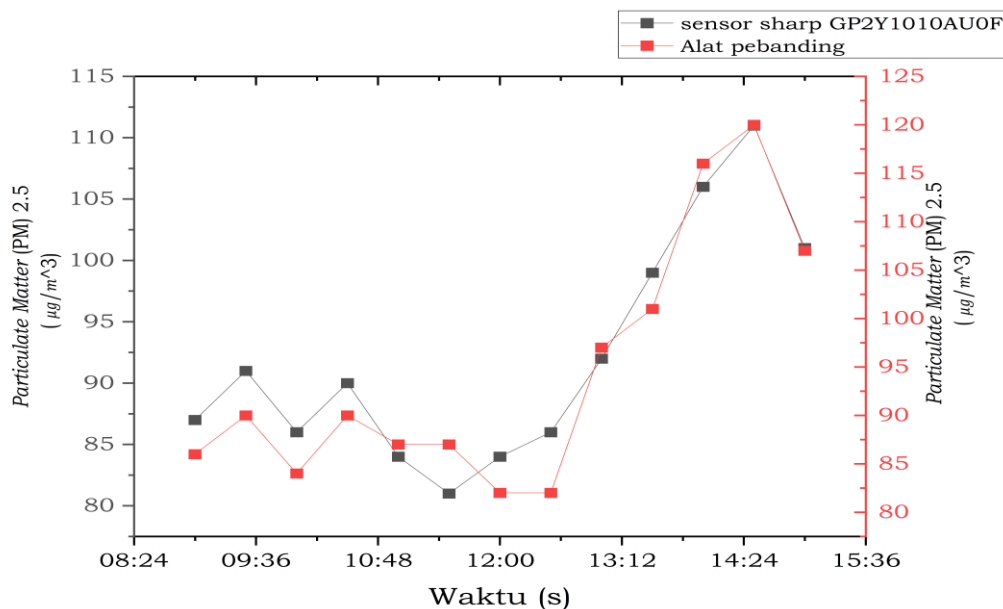
4.3.4 Pengujian menggunakan debu

Pengujian sensor dilakukan di dalam ruang uji dengan ukuran (100×100×100) cm yang dirancang sebagai lingkungan terkontrol. Media uji yang digunakan berupa debu, yang berfungsi sebagai sumber partikel PM2.5. Debu tersebut dimasukkan ke dalam ruangan secara bertahap, kemudian disebarkan secara merata dengan bantuan kipas angin kecil yang diarahkan ke beberapa sisi ruangan. Tujuan penggunaan kipas adalah untuk memastikan distribusi partikel debu berlangsung homogen sehingga konsentrasi debu di seluruh ruangan relatif seragam.

Setelah proses penyebaran, ruangan dibiarkan dalam kondisi tertutup selama 10 hingga 20 menit. Waktu tunggu ini diperlukan agar partikel debu yang terhembus dapat terdistribusi secara stabil dan tidak menimbulkan aliran udara turbulen yang berpotensi memengaruhi pembacaan sensor. Dengan kondisi ini, diharapkan partikel debu berada dalam keadaan melayang dan menyebar merata di dalam volume ruangan sehingga hasil pengukuran yang diperoleh lebih representatif.

Posisi sensor GP2Y1010AU0F dalam pengujian diletakkan di bagian tengah bawah ruangan. Penempatan sensor pada posisi tersebut bertujuan agar alat dapat menangkap konsentrasi partikel debu pada area yang tidak terlalu dekat dengan sumber masuknya debu maupun aliran kipas, sehingga meminimalkan bias pengukuran. Selain itu, posisi ini dipilih untuk merepresentasikan kondisi partikel yang berada di lapisan bawah ruangan, di mana akumulasi partikel cenderung lebih stabil setelah proses distribusi berlangsung.

Dengan pengaturan tersebut, diharapkan sensor mampu memberikan hasil pembacaan yang konsisten dan mendekati kondisi sebenarnya. Desain ruang uji yang sederhana namun terkontrol ini memungkinkan evaluasi kinerja sensor dapat dilakukan secara lebih objektif, baik dari segi akurasi maupun presisi, dengan membandingkan hasil pengukuran sensor terhadap alat monitoring kualitas udara sebagai referensi standar.



Gambar 7. Grafik perbandingan nilai referensi dan sensor

Pada gambar 13, hasil pengukuran *Particulate Matter* (PM) 2.5 yang dilakukan menggunakan sensor dan instrumen referensi, diperoleh rata-rata

pengukuran sensor sebesar $92,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dengan standar deviasi $9,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai ini dibandingkan dengan rata-rata hasil pengukuran instrumen referensi yang sebesar $94,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Selisih antara keduanya adalah $2,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, menunjukkan perbedaan yang relatif kecil. Hasil ini mengindikasikan bahwa sensor memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mengikuti nilai yang diukur oleh alat referensi.

Jika dihitung, nilai akurasi sensor mencapai 94,75%, yang berarti sensor mampu memberikan hasil pengukuran yang sangat dekat dengan nilai sebenarnya. Sementara itu, nilai presisi yang diperoleh adalah 89,91%, yang menunjukkan konsistensi sensor dalam memberikan hasil pengukuran yang relatif stabil dari waktu ke waktu. Dengan akurasi yang tinggi dan presisi yang baik, sensor ini dapat digunakan untuk pemantauan kualitas udara, meskipun tetap disarankan melakukan kalibrasi berkala agar perbedaan dengan instrumen referensi semakin kecil.

Pada pengujian menggunakan debu dengan bantuan kipas berkecepatan $0,15 \text{ m/s}$, hasil data menunjukkan bahwa konsentrasi PM meningkat cukup cepat segera setelah debu dilepaskan ke udara. Hal ini terjadi karena aliran udara dari kipas mempercepat distribusi partikel ke seluruh ruangan tertutup dan mendorongnya langsung menuju area deteksi sensor GP2Y1010AU0F. Partikel debu yang berukuran mikro, termasuk yang berdiameter $\leq 2,5 \mu\text{m}$, mudah tersuspensi dan mengikuti arus udara yang dihasilkan kipas, sehingga pembacaan sensor cepat mengalami lonjakan.

Seiring waktu, konsentrasi *Particulate Matter* (PM) terus meningkat hingga mencapai titik puncak karena suplai partikel di udara masih cukup banyak dan kipas mempertahankan partikel agar tetap melayang. Setelah itu, nilai konsentrasi mulai menurun perlahan. Penurunan ini disebabkan oleh sebagian partikel yang mulai mengalami pengendapan akibat gravitasi atau menempel pada permukaan di dalam ruangan. Namun, karena kipas tetap bekerja, penurunan konsentrasi tidak terlalu drastis, dan fluktuasi masih terjadi.

Fenomena naik-turunnya data ini juga dipengaruhi oleh sifat partikel debu itu sendiri. Partikel berukuran lebih besar dari *Particulate Matter* (PM) 2.5 akan lebih cepat mengendap, sementara partikel *Particulate Matter* (PM) 2.5 atau lebih kecil dapat bertahan lebih lama di udara. Kombinasi antara sifat partikel, arah hembusan kipas, dan turbulensi udara inilah yang menyebabkan pola konsentrasi PM pada data pengujian menunjukkan variasi dari waktu ke waktu.