

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Pengujian dan Analisa alat

Bab ini membahas tahap pengujian dan analisa terhadap sistem alat pembersih panel surya otomatis berbasis ESP32 yang telah dirancang dan direalisasikan pada bab sebelumnya. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen dan sistem yang telah dibuat dapat bekerja secara optimal sesuai dengan fungsi dan tujuan perancangan. Selain itu, melalui pengujian ini juga dapat diketahui sejauh mana efektivitas alat dalam merespon kondisi lingkungan berdasarkan parameter debu (PM2.5), serta kemampuannya dalam menjalankan proses pembersihan secara otomatis.

Pengujian dilakukan terhadap masing-masing bagian penting sistem, meliputi sensor debu GP2Y1010AU0F, modul RTC, aktuator (motor wiper dan pompa air), serta integrasi sistem secara menyeluruh yang mencakup proses pembacaan data, pengambilan keputusan, dan pengiriman data ke platform ThingSpeak. Hasil dari setiap pengujian dianalisis untuk menilai tingkat keberhasilan sistem, efektivitas pembersihan, serta keterPenggunaan alat dalam kondisi nyata di lapangan.

5.1.1 Pengujian blok Sensor Debu GP2Y1010AU0F

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat sensitivitas dan keakuratan sensor GP2Y1010AU0F dalam mendeteksi konsentrasi debu halus (PM2.5) pada kondisi lingkungan yang berbeda, baik dalam keadaan bersih maupun kotor. Selain itu, pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa sensor dapat digunakan sebagai acuan utama dalam pengambilan keputusan otomatis pada sistem pembersih panel surya.

Parameter utama yang diuji dalam pengujian ini meliputi nilai konsentrasi

1. PM2.5 yang terbaca oleh sensor dalam satuan mikrogram per meter kubik ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2. kestabilan pembacaan saat kondisi debu bersih
3. perbedaan nilai antara kondisi lingkungan bersih dan kotor sebagai indikator sensitivitas sensor terhadap partikel debu.

5.1.1.1 Prosedur Pengujian Sensor Debu GP2Y1010AU0F

Pengujian dilakukan di tiga kondisi lingkungan berbeda. Lingkungan pertama adalah ruangan tertutup tanpa aktivitas manusia maupun sumber debu, yang digunakan untuk menguji kestabilan sensor dalam kondisi bersih. Lingkungan kedua adalah ruangan tertutup yang sama, namun diberi paparan asap dari hasil pembakaran kertas, untuk menguji reaksi sensor terhadap partikel halus yang lebih ringan. Lingkungan ketiga adalah area terbuka di luar ruangan, di mana sensor dipaparkan secara tidak langsung terhadap asap pembakaran sampah dari jarak sekitar satu meter, dengan aliran angin yang membawa asap menuju sensor. Ketiga jenis lingkungan ini dipilih untuk mewakili tingkat kekotoran ringan, sedang, dan tinggi yang mungkin ditemui dalam instalasi panel surya.

Sensor GP2Y1010AU0F dihubungkan ke mikrokontroler ESP32 dan diletakkan pada posisi tetap. Sistem dinyalakan, dan pembacaan awal dilakukan pada kondisi lingkungan bersih selama satu menit untuk memperoleh nilai acuan. Setelah itu, sensor dipaparkan pada sumber asap. Pada pengujian pertama, asap rokok diarahkan langsung ke lubang sensor dari jarak sekitar lima hingga sepuluh sentimeter. Pada pengujian kedua, selembar kertas dibakar dan asapnya diarahkan ke sensor dari jarak sekitar tiga puluh sentimeter di dalam ruangan. Pada pengujian ketiga, sensor diletakkan di luar ruangan dan diarahkan ke aliran asap dari pembakaran sampah. Setiap paparan dilakukan selama beberapa detik hingga nilai PM2.5 terbaca secara stabil. Nilai-nilai yang diperoleh kemudian dicatat melalui serial monitor dan dibandingkan untuk dianalisis lebih lanjut.

5.1.1.2 Hasil Pengujian Sensor Debu GP2Y1010AU0F

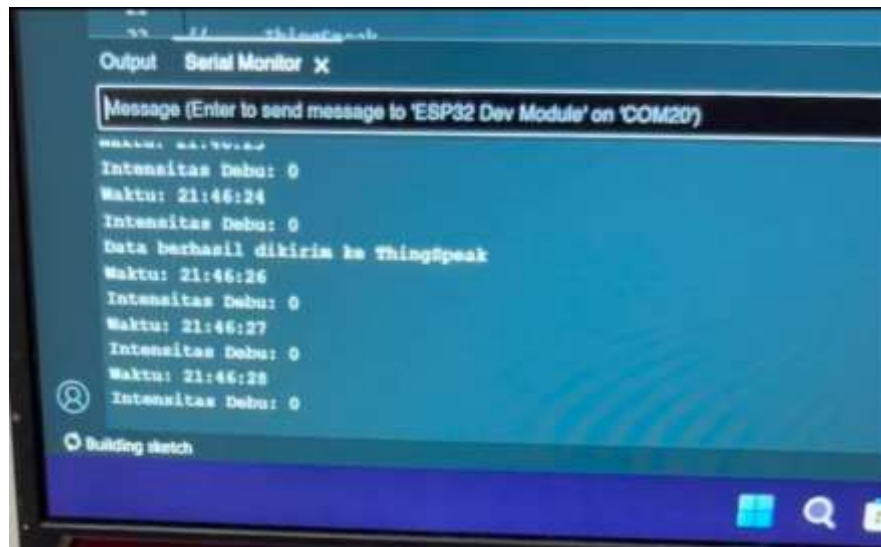
Tabel 5.1 menyajikan hasil pembacaan sensor debu GP2Y1010AU0F pada tiga kondisi lingkungan yang berbeda, yang dilakukan pada tanggal 29 Mei 2025, 8 Juni 2025, dan 12 Juni 2025. Hasil pengujian dilihat pada table 5.1

Tabel 5. 1 Hasil Pembacaan Sensor

No	Tanggal	Nilai PM2.5 (Lingkungan Bersih) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Nilai PM2.5 (Lingkungan Kotor) $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Keterangan
1	29/05/2025	0,00	1952.24	Sensor bereaksi kuat dan sangat dekat dengan terhadap asap rokok
2	08/06/2025	0,00	68.70	Lingkungan tertutup dengan debu Pembakaran kertas
3	12/06/2025	0,00	190,50	Lingkungan luar dengan debu pembakaran Sampah



Gambar 5. 1 Kondisi Sensor debu saat kondisi bersih



Gambar 5. 2 Pembacaan Serial Monitor saat sensor debu bersih



Gambar 5. 3 Kondisi sensor debu saat Kotor & Pembacaan Serial Monitor

5.1.2 Pengujian Blok RTC

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa modul RTC (Real Time Clock) DS3231 dapat berfungsi dengan baik dalam memberikan waktu aktual yang akurat dan stabil. Modul ini menjadi komponen penting dalam sistem karena berperan sebagai penentu waktu pengecekan pembersihan, khususnya pada pukul 04.00 dan 19.00 WIB,

sehingga sangat diperlukan kestabilan pembacaan waktu dalam jangka panjang.

5.1.2.1 Prosedur pengujian modul RTC

Pengujian dimulai dengan menyusun rangkaian modul RTC DS3231 yang dihubungkan ke mikrokontroler ESP32 menggunakan jalur komunikasi I2C, yaitu melalui pin SDA dan SCL. Setelah sistem terpasang, alat dinyalakan dan dilakukan sinkronisasi waktu RTC dengan waktu server NTP melalui koneksi WiFi, agar waktu awal RTC sesuai dengan waktu real-time yang akurat (GMT+7).

Setelah sinkronisasi berhasil, koneksi internet dan pembacaan waktu dari RTC mulai dimonitor secara lokal melalui serial monitor pada Arduino IDE. Pembacaan waktu dilakukan secara berkala setiap beberapa detik dan, seperti jam pada komputer yang telah tersinkronisasi dengan waktu server. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah modul RTC mampu mempertahankan ketepatan waktunya.

Selanjutnya, sistem diuji untuk mengetahui apakah pembacaan waktu dari RTC dapat digunakan sebagai pemicu logika pembersihan otomatis. Dalam hal ini, sistem diprogram untuk memicu pembersihan pada pukul 04.00 dan 19.00 WIB. Untuk menguji hal tersebut, pembacaan waktu dimonitor secara langsung menjelang dan saat memasuki waktu tersebut, dan diperhatikan apakah aktuator (motor dan pompa) aktif secara otomatis sesuai waktu yang telah ditentukan.

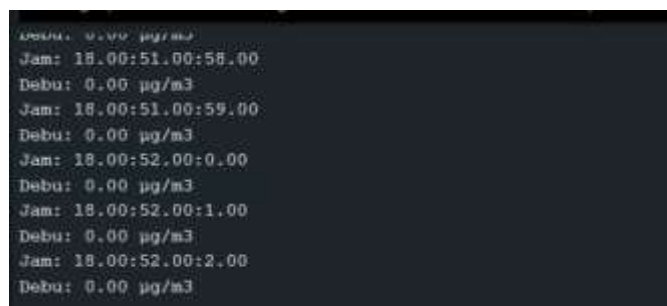
Seluruh data waktu yang terbaca dari RTC, beserta waktu referensinya dan status aktivasi sistem, dicatat untuk dianalisis lebih lanjut. Prosedur ini diulang pada beberapa titik waktu untuk mengamati konsistensi dan ketepatan fungsi penjadwalan otomatis berbasis waktu.

5.1.2.2 Hasil Pengujian Modul RTC

Pengujian terhadap modul RTC dilakukan untuk mengamati ketepatan pembacaan waktu dan kemampuannya dalam memicu proses pembersihan otomatis pada pukul 04.00 dan 19.00 WIB sesuai logika program. Selama pengujian, waktu yang terbaca dari RTC diamati dan dibandingkan dengan waktu pemacu yang telah diprogram. Selain itu, diamati pula status sistem apakah telah aktif atau belum pada waktu-waktu tersebut, Hasil pengujian dilihat pada table 5.2

Tabel 5. 2 Pengujian Modul RTC

No	Tanggal	Waktu Teraca	Status Pemicu (04.00/19.00) WIB
1	29/05/2025	03:59:59	Belum Aktif
2	29/05/2025	04:00:00	Aktif - Pembersihan dimulai
2	13/06/2025	03:55:50	Belum Aktif
3	13/06/2025	04:05:33	Aktif - Pembersihan dimulai
4	13/06/2025	18:52:02	Belum Aktif
5	13/06/2025	19.00.32	Aktif - Pembersihan dimulai



```

jam: 18.00:51.00:58.00
Debu: 0.00 µg/m3
jam: 18.00:51.00:59.00
Debu: 0.00 µg/m3
jam: 18.00:52.00:0.00
Debu: 0.00 µg/m3
jam: 18.00:52.00:1.00
Debu: 0.00 µg/m3
jam: 18.00:52.00:2.00
Debu: 0.00 µg/m3

```

Gambar 5. 4 Pembacaan waktu RTC sebelum penjadwalan di Serial Monitor

```

Debu: 0.00 µg/m3
Jam: 19.00:0.00:32.00
Debu: 0.00 µg/m3
Jam: 19.00:0.00:33.00
Debu: 0.00 µg/m3
Jam: 19.00:0.00:34.00
Debu: 0.00 µg/m3
Jam: 19.00:0.00:35.00
Debu: 0.00 µg/m3
Jam: 19.00:0.00:36.00
Debu: 0.00 µg/m3

```

Gambar 5. 5 Pembacaan waktu RTC Sesudah penjadwalan di Serial Monitor

5.1.3 Pengujian Sistem Aktuator (Motor DC dan Pompa)

Pengujian sistem aktuator ini bertujuan untuk mengetahui apakah motor DC dan pompa air dapat beroperasi sesuai dengan logika kontrol yang telah ditentukan dalam program. Sistem aktuator merupakan komponen utama dalam proses pembersihan panel surya otomatis. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa pergerakan motor dan aliran pompa dapat berjalan dengan lancar saat sistem mendeteksi kondisi lingkungan yang memenuhi kriteria pembersihan.

5.1.3.1 Prosedur Pengujian Aktuator

Pengujian dilakukan dengan cara mengaktifkan sistem secara penuh dan memantau respon motor DC dan pompa air saat alat menerima sinyal pemicu dari logika sistem. Sistem pemicu terdiri dari dua kondisi: (1) nilai PM2.5 melebihi ambang batas 55 µg/m³, dan (2) waktu pembersihan telah mencapai jadwal yang ditentukan, yaitu pukul 04.00 atau 19.00 WIB.

Untuk memantau pergerakan motor DC, digunakan dua limit switch pada setiap ujung lintasan untuk mendeteksi posisi wiper. Motor DC bergerak maju hingga menyentuh limit switch pertama, kemudian berbalik arah hingga menyentuh limit switch kedua, setelah itu sistem berhenti otomatis.

Selama pengujian, sistem juga dihubungkan ke platform *ThingSpeak* untuk merekam data status aktuator dan jumlah aktivasi yang

terjadi. Selain itu, aktivitas motor dan pompa juga diamati secara visual serta dicatat waktu durasi kerjanya.

5.1.3.2 Hasil Pengujian Aktuator

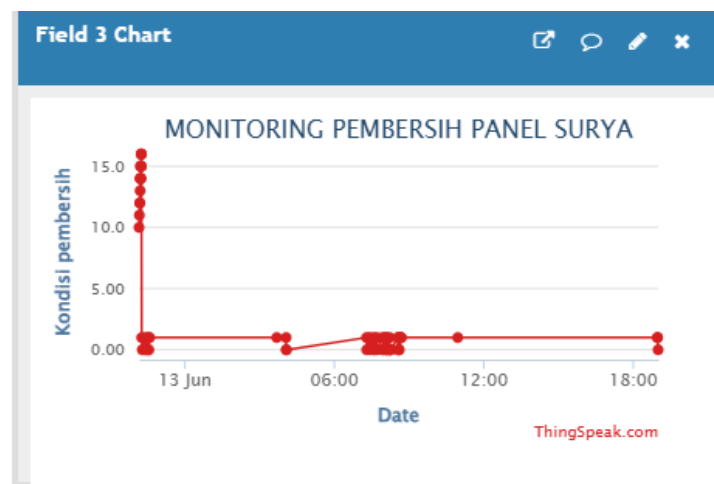
Tabel berikut menunjukkan hasil pembacaan sistem aktuator, yaitu motor DC dan pompa air, yang telah dijelaskan pada pengujian sebelumnya. Pengujian dilakukan dengan memantau status aktuator saat sistem menerima pemicu dari dua parameter utama, yaitu nilai PM2.5 dan penjadwalan waktu dari modul RTC. Status kerja dari masing-masing aktuator dicatat dan ditampilkan dalam bentuk logika digital, di mana angka 1 menunjukkan bahwa aktuator dalam kondisi aktif atau menyala, sedangkan angka 0 menunjukkan bahwa aktuator dalam kondisi tidak aktif atau mati. Hasil pengujian dilihat pada table 5.3

Tabel 5. 3Pengujian Aktuator

Tanggal	Jam	Status Motor	Status Pompa	Kondisi
13/6/2025	04.00	1	1	Penjadwalan memenuhi
10/6/2025	14.21	1	1	PM2.5 Memenuhi
13/6/2025	03.00	0	0	Tidak memenuhi Parameter PM2.5 dan Penjadwalan



Gambar 5. 6 Tampilan Serial Monitor pertanda aktuator Hidup



Gambar 5. 7 Tampilan Indikasi hidup Mati sistem aktuator di ThingSpeak

5.1.4 Pengujian Koneksi dan kirim Data ke ThingSpeak

Pada tahap ini dilakukan pengujian koneksi sistem ke platform cloud ThingSpeak, yang berfungsi sebagai media pencatatan dan pemantauan data secara real-time. ESP32 bertugas mengirimkan data yang diperoleh dari sensor dan sistem internal ke ThingSpeak melalui koneksi WiFi. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa seluruh data dapat terkirim dengan benar, serta dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik yang informatif.

5.1.4.1 Prosedur Pengujian ThingSpeak

Pengujian dimulai dengan menyalakan sistem utama yang terdiri dari ESP32, sensor PM2.5 GP2Y1010AU0F, modul RTC DS3231, dan sistem aktuator (motor dan pompa). Setelah sistem aktif, ESP32 secara otomatis mencoba terhubung ke jaringan WiFi sesuai SSID dan password

yang telah ditanamkan dalam program. Koneksi internet diperlukan untuk mengaktifkan layanan ThingSpeak sebagai platform pemantauan data secara real-time.

Setelah koneksi WiFi berhasil, dilakukan pembacaan nilai PM2.5 dan waktu saat itu melalui RTC. Jika sistem mendeteksi bahwa nilai PM2.5 melebihi ambang batas $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ atau waktu sudah mencapai jadwal pembersihan otomatis (pukul 04.00 dan 19.00 WIB), maka sistem akan mengaktifkan proses pembersihan. Bersamaan dengan itu, data aktivitas dikirim ke ThingSpeak melalui koneksi internet.

Data yang dikirim mencakup waktu pemicu pembersihan (Field 1), nilai PM2.5 yang terbaca (Field 2), status aktuator (Field 3: 1 untuk aktif, 0 untuk mati), dan jumlah aktivasi pembersihan yang telah dilakukan (Field 4). Seluruh data ini dikirim melalui protokol HTTP POST menggunakan API key dari ThingSpeak.

Selama pengujian, beberapa kondisi pengiriman diuji, yaitu:

1. Kondisi ketika PM2.5 memenuhi
2. Kondisi saat waktu terjadwal.
3. Kondisi ketika keduanya tidak memenuhi.

5.1.4.2 Hasil Pengujian *ThingSpeak*

Hasil pengujian sistem pengiriman data ke ThingSpeak disajikan dalam tabel yang memuat tiga komponen utama, yaitu status koneksi WiFi, keberhasilan pengiriman data ke platform ThingSpeak, dan kondisi pemicu pembersihan (berdasarkan nilai PM2.5 atau waktu terjadwal, Hasil pengujian dilihat pada table 5.4

Tabel 5. 4Hasil Pengujian ThingSpeak

Tanggal	Jam	Koneksi Wifi	Kolom ThingSpeak	Keterangan pemicu
29/06/2025	16.11	Terhubung	Muncul di semua Field	PM2.5 memenuhi

12/06/2025	23.00	Terhubung	Tidak muncul	Masih dibawah Standar PM2.5 dan penjadwalan
13/06/2025	19.00	Terhubung	Muncul di semua Field	Memenuhi penjadwalan



Gambar 5. 8 Visual grafik pembacaan di ThingSpeak

5.1.5 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan untuk memastikan bahwa alat pembersih panel surya otomatis berbasis ESP32 bekerja secara terpadu dan responsif sesuai dengan logika perancangan yang telah ditentukan. Tujuan utama dari pengujian ini meliputi:

1. Menguji efektivitas sistem dalam memicu proses pembersihan berdasarkan nilai PM2.5 yang dibaca secara periodik,
2. Memastikan bahwa sensor debu GP2Y1010AU0F dan modul RTC DS3231 berfungsi dan saling terintegrasi dengan baik,
3. Menguji kinerja aktuator pompa air dan motor wiper dalam merespons perintah pembersihan secara otomatis,
4. Memverifikasi bahwa sistem data logger cloud ThingSpeak dapat mencatat dan mengirim data secara real-time dan konsisten.

Pengujian dilakukan dalam rentang waktu tiga hari untuk menangkap variasi kondisi lingkungan. Setiap harinya, sistem dibiarkan berjalan secara otomatis tanpa intervensi manual. Mikrokontroler ESP32 secara rutin memeriksa waktu melalui RTC, dan akan melakukan pembacaan sensor PM2.5 pada pukul 04.00 dan 19.00 WIB. Jika nilai PM2.5 saat itu berada di atas ambang batas $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, maka sistem akan mengaktifkan pompa dan wiper untuk membersihkan panel.

Setelah proses pembersihan selesai, sistem mencatat kembali nilai PM2.5 dan mengunggah data aktivitas ke ThingSpeak, termasuk waktu pembersihan, status aktuator, serta jumlah siklus kerja alat. Bila nilai PM2.5 berada di bawah ambang batas, sistem tidak melakukan pembersihan dan tetap dalam kondisi siaga.

Pengujian ini bertujuan untuk melihat apakah sistem dapat berjalan otomatis sesuai kondisi debu, serta seberapa andal integrasi antar komponen dalam menjalankan fungsinya secara bersamaan dan berulang.

5.1.5.1 Prosedur Pengujian Keseluruhan Sistem

Prosedur pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sistem dapat bekerja secara otomatis dalam merespons kondisi lingkungan sesuai logika yang telah diprogram. Pengujian dimulai dengan memastikan semua komponen seperti ESP32, sensor GP2Y1010AU0F, modul RTC, motor wiper, dan pompa air telah terpasang dengan benar dan diberi catu daya melalui adaptor 12V. Setelah sistem dinyalakan, ESP32 secara otomatis menghubungkan diri ke jaringan WiFi dan melakukan sinkronisasi waktu dari server NTP ke RTC.

Sensor GP2Y1010AU0F mulai membaca tegangan dari partikel debu menggunakan prinsip deteksi cahaya pantul, lalu mengubahnya menjadi nilai konsentrasi PM2.5 dalam satuan $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berdasarkan rumus referensi dari datasheet. Nilai ini akan dikirimkan ke platform ThingSpeak setiap 15 detik bersama status aktuator dan waktu pengambilan data.

Sistem dirancang untuk memicu proses pembersihan secara otomatis apabila dua kondisi terpenuhi, yaitu saat nilai PM2.5 melebihi ambang batas $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sesuai PP No. 22 Tahun 2021, atau saat waktu menunjukkan pukul 04.00 atau 19.00 WIB sesuai jadwal pembersihan rutin. Jika salah satu kondisi terpenuhi, maka ESP32 akan mengaktifkan motor wiper untuk bergerak maju dan mundur, serta mengaktifkan pompa air untuk menyemprotkan air ke panel surya.

Selama proses berlangsung, dua limit switch dipantau untuk menentukan batas gerak wiper, dan sistem akan berhenti secara otomatis setelah keduanya terdeteksi. Setelah pembersihan selesai, sistem mengirimkan data ke ThingSpeak yang mencakup nilai PM2.5, waktu pembersihan, status wiper, serta jumlah siklus pembersihan.

Pengujian dilakukan secara berulang dengan memvariasikan kondisi lingkungan, termasuk mensimulasikan sumber debu seperti asap rokok atau pembakaran, untuk memastikan bahwa logika trigger bekerja secara konsisten dan sistem dapat diandalkan dalam situasi lapangan

5.1.5.2 Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem

1) Pembersihan berdasarkan PM2.5

Waktu (Tanggal dan Jam)	ID Entri	Jam Pembersihan	Nilai debu PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Status Aktuator (1/0)	Jumlah Aktivasi (Counter++)
2025-06-25T06:31:57+07:00	1131	6	349.6242	1	1
2025-06-25T06:32:13+07:00	1132		504.833	1	
2025-06-25T06:32:28+07:00	1133		504.833	1	
2025-06-25T06:32:44+07:00	1134		504.833	1	
2025-06-25T06:32:59+07:00	1135		504.833	1	
2025-06-25T06:33:15+07:00	1136		504.833	1	
2025-06-25T06:33:31+07:00	1137		504.833	1	
2025-06-25T06:33:46+07:00	1138		504.833	1	
2025-06-25T06:34:02+07:00	1139		504.833	1	
2025-06-25T06:34:17+07:00	1140		504.833	1	
2025-06-25T06:34:33+07:00	1141		504.833	1	
2025-06-25T06:34:48+07:00	1142		504.833	1	

2025-06-25T06:35:04+07:00	1143		504.833	1	
2025-06-25T06:35:24+07:00	1144		504.833	0	
2025-06-25T06:35:39+07:00	1145		0	0	
2025-06-25T06:41:06+07:00	1166	6	561.4044	1	2
2025-06-25T06:41:21+07:00	1167		561.8879	1	
2025-06-25T06:41:37+07:00	1168		561.8879	1	
2025-06-25T06:41:53+07:00	1169		561.8879	1	
2025-06-25T06:42:08+07:00	1170		561.8879	1	
2025-06-25T06:42:24+07:00	1171		561.8879	1	
2025-06-25T06:42:39+07:00	1172		561.8879	1	
2025-06-25T06:42:55+07:00	1173		561.8879	1	
2025-06-25T06:43:11+07:00	1174		561.8879	1	
2025-06-25T06:43:26+07:00	1175		0	0	

2025-06-25T06:44:30+07:00	1179	6	560.6791	1	3
2025-06-25T06:44:46+07:00	1180		560.6791	1	
2025-06-25T06:45:01+07:00	1181		560.6791	1	
2025-06-25T06:45:17+07:00	1182		560.6791	1	
2025-06-25T06:45:32+07:00	1183		560.6791	1	
2025-06-25T06:45:48+07:00	1184		560.6791	1	
2025-06-25T06:46:03+07:00	1185		560.6791	1	
2025-06-25T06:46:19+07:00	1186		560.6791	1	
2025-06-25T06:46:34+07:00	1187		0	0	
2025-06-25T06:47:05+07:00	1189	6	560.6791	1	4
2025-06-25T06:47:21+07:00	1190		560.6791	1	
2025-06-25T06:47:37+07:00	1191		560.6791	1	
2025-06-25T06:47:52+07:00	1192		560.6791	1	
2025-06-25T06:48:08+07:00	1193		560.6791	1	
2025-06-25T06:48:23+07:00	1194		560.6791	1	

2025-06-25T06:48:39+07:00	1195		560.6791	1	
2025-06-25T06:48:55+07:00	1196		560.6791	1	
2025-06-25T06:49:10+07:00	1197		560.6791	1	
2025-06-25T06:49:26+07:00	1198		560.6791	1	
2025-06-25T06:49:42+07:00	1199		560.6791	1	
2025-06-25T06:49:57+07:00	1200		560.6791	1	
2025-06-25T06:50:13+07:00	1201		560.6791	1	
2025-06-25T06:50:28+07:00	1202		560.6791	1	
2025-06-25T06:50:44+07:00	1203		560.6791	1	
2025-06-25T06:51:00+07:00	1204		0	0	

2) Pembersihan berdasarkan penjadwalan

Waktu (Tanggal dan Jam)	ID Entri	Jam Pembersihan	Nilai debu PM2.5	Status Aktuator	Jumlah Aktivasi (Counter++)
2025-06-24T19:54:44+07:00	746	19	0	1	1
2025-06-24T19:54:59+07:00	747		0	1	
2025-06-24T19:55:14+07:00	748		0	1	
2025-06-24T19:55:30+07:00	749		0	1	
2025-06-24T19:55:45+07:00	750		0	1	
2025-06-24T19:56:01+07:00	751		0	1	
2025-06-24T19:56:16+07:00	752		0	0	

5.2 Analisa

Analisa dilakukan setelah seluruh proses perancangan dan pengujian alat selesai dilaksanakan. Tujuan dari analisa ini adalah untuk menilai sejauh mana sistem yang telah dibuat mampu bekerja sesuai dengan fungsi dan tujuan yang telah dirancang, baik secara parsial maupun menyeluruh.

5.2.1 Analisa Sensor Debu

Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan nilai PM2.5 pada dua kondisi utama, yaitu lingkungan bersih dan lingkungan kotor. Setiap pengujian dilakukan pada lokasi dan situasi yang berbeda untuk mengamati sejauh mana sensor GP2Y1010AU0F mampu mendeteksi perubahan kualitas debu secara signifikan.

Pada tanggal 29 Mei 2025, sensor ditempatkan sangat dekat dengan sumber asap rokok. Hasil pengukuran menunjukkan lonjakan drastis nilai PM2.5 dari 0,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (lingkungan bersih) menjadi 1952,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ saat terkena asap langsung. Ini menunjukkan bahwa sensor sangat sensitif terhadap partikel halus dari asap rokok, yang merupakan salah satu sumber utama PM2.5. Kenaikan yang ekstrem ini juga membuktikan bahwa posisi sensor yang terlalu dekat dengan sumber emisi akan menghasilkan nilai yang sangat tinggi, sehingga perlu penyesuaian jarak dalam penerapannya pada panel surya.

Pada pengujian kedua, tanggal 8 Juni 2025, pengukuran dilakukan di dalam ruangan tertutup yang mengandung sisa pembakaran kertas. Meskipun masih berada dalam ruangan, sensor mendeteksi peningkatan nilai PM2.5 dari 0,00 menjadi 68,70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Hal ini menandakan bahwa sensor tetap mampu membaca partikel sisa pembakaran meskipun dalam ruang terbatas, selama ada aliran partikel yang cukup pekat di debu. Nilai tersebut juga berada sedikit di atas ambang batas 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, yang berarti sistem pembersih akan aktif apabila pengukuran dilakukan dalam mode otomatis.

Pada pengujian ketiga, tanggal 12 Juni 2025, sensor diletakkan di lingkungan luar yang berdekatan dengan pembakaran sampah terbuka. Hasilnya, nilai PM2.5 melonjak hingga 190,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ini menunjukkan bahwa sensor juga dapat mendeteksi partikel debu di luar ruangan secara akurat, terutama saat terjadi aktivitas pembakaran yang menghasilkan asap pekat. Sensor tetap mampu membedakan antara debu bersih (0,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) dan kondisi kotor secara tajam, menandakan tingkat sensitivitas yang tinggi terhadap lingkungan dinamis.

Dari ketiga pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sensor GP2Y1010AU0F menunjukkan performa yang stabil dan responsif terhadap variasi kualitas debu, baik dalam maupun luar ruangan. Sensor mampu membedakan nilai partikel halus secara konsisten dan akurat, serta layak dijadikan sebagai pemicu utama dalam sistem pembersih panel surya otomatis berbasis logika PM2.5.

5.2.2 Analisis Modul RTC

Pengujian terhadap fungsi penjadwalan waktu otomatis menggunakan modul RTC DS3231 dilakukan untuk memastikan bahwa sistem dapat secara mandiri memicu proses pembersihan pada jam-jam tertentu tanpa tergantung pada nilai PM2.5. Dalam sistem ini, waktu yang diprogram sebagai jadwal pembersihan adalah pukul 04.00 dan 19.00 WIB. Oleh karena itu, pengujian dilakukan dengan mencatat waktu yang terbaca oleh RTC dan mencocokkannya dengan status aktivasi sistem.

Berdasarkan data yang didapatkan, pada tanggal 29 Mei 2025 pukul 03:59:59, sistem belum aktif karena waktu belum mencapai ambang pemicu yang ditentukan, yaitu pukul 04.00. Satu detik kemudian, tepat pada pukul 04:00:00, sistem berhasil mengaktifkan proses pembersihan secara otomatis. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespon perubahan waktu secara tepat waktu dan real-time.

Pengujian serupa dilakukan kembali pada tanggal 13 Juni 2025. Pada pukul 03:55:50, sistem belum aktif, sesuai dengan logika pemicu yang hanya mengizinkan aktivasi saat waktu benar-benar mencapai atau melebihi pukul 04.00. Beberapa menit kemudian, pada pukul 04:05:33, sistem aktif dan pembersihan dimulai. Meskipun terjadi sedikit keterlambatan waktu dari yang dijadwalkan, hal ini masih dalam batas wajar mengingat terdapat kemungkinan delay akibat proses sistem internal seperti pembacaan sensor, eksekusi program, atau delay komunikasi serial.

Pengujian juga dilakukan untuk jadwal pembersihan sore hari. Pada pukul 18:52:02, sistem belum menunjukkan aktivitas karena waktu belum mencapai pukul 19.00. Namun, pada pukul 19:00:32, sistem berhasil mendeteksi waktu yang telah melewati ambang dan memicu pembersihan secara otomatis. Ini memperkuat kesimpulan bahwa sistem dapat membaca waktu secara tepat dan konsisten memicu pembersihan pada saat waktu sudah memasuki jadwal yang ditentukan.

Secara keseluruhan, dari enam data waktu yang dicatat, tiga di antaranya menunjukkan aktivasi sistem tepat waktu, dan tiga lainnya menunjukkan kondisi siaga saat waktu belum mencapai batas. Tidak ditemukan kesalahan dalam membaca waktu, dan tidak ada kasus sistem aktif di luar waktu yang dijadwalkan, yang berarti logika waktu bekerja sesuai harapan.

5.2.3 Analisis Sistem Aktuator (motor DC dan Pompa)

Pengujian sistem aktuator dilakukan untuk mengevaluasi respons motor DC dan pompa air terhadap dua kondisi pemicu utama dalam sistem, yaitu: (1) nilai PM2.5 melebihi ambang batas $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dan (2) waktu pembersihan otomatis yang dijadwalkan, yaitu pukul 04.00 dan 19.00 WIB. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa motor dan pompa hanya aktif ketika salah satu atau kedua kondisi tersebut terpenuhi, serta tetap tidak aktif jika tidak ada pemicu yang sah.

Dari data pengujian yang dilakukan, tercatat tiga waktu pengamatan dengan kondisi lingkungan dan waktu yang berbeda.

Pada pengujian pertama, tanggal 13 Juni 2025 pukul 04.00 WIB, sistem berhasil mengaktifkan baik motor DC maupun pompa air secara otomatis. Aktivasi ini terjadi karena waktu telah mencapai jadwal pembersihan rutin yang telah ditetapkan oleh modul RTC. Nilai PM2.5 pada saat itu tidak tercatat melebihi ambang batas, namun sistem tetap melakukan pembersihan berdasarkan logika penjadwalan. Ini membuktikan bahwa sistem berhasil menjalankan fungsinya dengan baik saat dipicu oleh waktu tanpa bergantung pada kondisi debu lingkungan.

Pengujian kedua dilakukan pada 10 Juni 2025 pukul 14.21 WIB, di mana sistem kembali mengaktifkan motor dan pompa. Aktivasi ini terjadi bukan karena waktu pembersihan, tetapi karena nilai PM2.5 yang terbaca melebihi ambang batas $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu secara adaptif merespons parameter kebersihan lingkungan dan melakukan pembersihan walaupun berada di luar waktu terjadwal. Logika kontrol berjalan sesuai dengan program, yang mengatur agar sistem tetap aktif apabila kondisi debu terlalu tinggi meskipun bukan waktu rutin.

Sementara itu, pada pengujian ketiga yang dilakukan pada 13 Juni 2025 pukul 03.00 WIB, sistem tidak mengaktifkan motor maupun pompa. Hal ini dikarenakan waktu belum mencapai jadwal pembersihan pukul 04.00, dan nilai PM2.5 saat itu juga tidak melebihi ambang batas. Kondisi ini menjadi

validasi bahwa sistem tidak sembarangan mengaktifkan aktuator, dan hanya akan bekerja ketika salah satu logika pemicu benar-benar terpenuhi.

5.2.4 Analisis Sistem *ThingSpeak*

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi apakah sistem hanya mengirimkan data ke platform ThingSpeak saat proses pembersihan aktif, baik karena nilai PM2.5 melebihi ambang batas atau karena waktu telah mencapai jadwal otomatis (pukul 04.00 atau 19.00 WIB).

Pada 29 Juni 2025 pukul 16.11 WIB, sistem terhubung ke WiFi dan PM2.5 terdeteksi tinggi. Sistem aktif dan berhasil mengirim data ke seluruh field ThingSpeak. Pada 12 Juni 2025 pukul 23.00 WIB, meskipun WiFi terhubung, tidak ada data yang dikirim karena tidak ada pemicu yang terpenuhi. Sementara itu, pada 13 Juni 2025 pukul 19.00 WIB, sistem kembali aktif karena waktu sesuai jadwal, dan seluruh data berhasil dikirim.

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem bekerja secara selektif dan efisien, hanya mengirimkan data saat pembersihan benar-benar terjadi, baik berdasarkan waktu maupun kondisi lingkungan, sesuai logika program yang telah dirancang.

5.2.5 Analisis keseluruhan Sistem

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan pada berbagai waktu dan kondisi lingkungan, sistem pembersih panel surya otomatis berbasis ESP32 yang telah saya rancang menunjukkan kinerja yang sesuai dengan logika dan rancangan awal. Sistem ini mampu merespons dua pemicu utama, yakni kualitas udara yang ditunjukkan melalui konsentrasi PM2.5 serta waktu pembersihan terjadwal yang ditentukan melalui modul RTC. Saat nilai PM2.5 melebihi ambang batas $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sistem secara otomatis mengaktifkan aktuator berupa motor DC dan pompa air untuk melakukan proses pembersihan. Sebaliknya, ketika kualitas udara berada dalam kondisi bersih dan waktu belum mencapai jadwal yang telah ditentukan (yaitu pukul 04.00 atau 19.00 WIB), sistem tetap berada dalam keadaan siaga tanpa melakukan

aktivasi yang tidak diperlukan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki efisiensi kerja dan tidak beroperasi secara sembarangan.

Selama proses pengujian, alat secara konsisten mencatat dan mengirimkan data aktivitasnya ke platform ThingSpeak. Data yang berhasil terekam meliputi waktu, nilai PM2.5, status aktuator, serta jumlah aktivasi (counter) yang memberikan gambaran akurat terkait kapan dan bagaimana sistem bekerja. Pengiriman data berlangsung secara real-time dan berjalan tanpa kegagalan saat sistem aktif, yang membuktikan integrasi sistem dengan koneksi internet serta layanan cloud berjalan stabil. Dalam pengujian tambahan pada tanggal 24 Juni 2025, sistem juga menunjukkan kemampuannya dalam menjalankan pembersihan secara otomatis pada pukul 19.00 meskipun nilai PM2.5 tercatat nol. Hal ini membuktikan bahwa sistem penjadwalan melalui RTC berjalan sesuai fungsi, dan tetap dapat mengaktifkan alat berdasarkan logika waktu yang telah ditentukan meskipun tidak ada polusi yang terdeteksi oleh sensor.

Selain itu, pengujian dilakukan dalam beberapa skenario dan lokasi berbeda seperti di area perumahan terbuka, lingkungan dalam ruangan yang bersih, serta di dekat sumber debu seperti asap rokok dan pembakaran kertas. Dari seluruh pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem bekerja secara adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Selama nilai PM2.5 berada di bawah ambang batas dan bukan pada waktu terjadwal, maka sistem tetap dalam keadaan nonaktif. Namun, begitu salah satu dari dua kondisi terpenuhi, sistem aktif secara otomatis dan semua proses berjalan sesuai urutan logika yang telah diprogram.

Dengan performa yang konsisten dan keakuratan data yang terekam, maka dapat saya simpulkan bahwa sistem ini telah memenuhi keempat tujuan utama yang ditetapkan, yaitu bekerja berdasarkan parameter kebersihan lingkungan, integrasi sensor debu dan RTC sebagai penentu kondisi pembersihan, pengendalian aktuator secara otomatis, serta perekaman data secara daring melalui ThingSpeak. Sistem telah terbukti mampu bekerja secara otomatis, efisien, responsif, dan adaptif terhadap kondisi nyata

lingkungan, serta dapat dijadikan sebagai solusi awal dalam sistem pemeliharaan panel surya yang modern dan terpantau secara real-time.