

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan hasil pengujian serta pembahasan terhadap sistem yang telah dirancang dan direalisasikan. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam menjalankan fungsi monitoring dan kontrol pada proses pengendalian *exhaust fan* otomatis.

4.1 Tujuan Pengambilan Data

Pengambilan data pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan memvalidasi kinerja Sistem Pengendalian Exhaust Fan Otomatis untuk Meningkatkan Kualitas Udara Berbasis Sensor MQ-135 yang telah dirancang pada BAB III, baik dari sisi perangkat keras, perangkat lunak, maupun integrasi sistem secara nyata di lapangan.

Pengujian dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dan sensitivitas sensor MQ-135 dalam mendeteksi perubahan konsentrasi gas polutan, sehingga dapat diketahui konsistensi dan responsivitas sensor terhadap perubahan kondisi udara. Selain itu, pengambilan data juga bertujuan mengetahui tingkat akurasi sensor DHT22 dalam membaca suhu dan kelembaban, dengan membandingkannya terhadap alat ukur pembanding yang terstandarisasi, guna menilai kelayakan sensor tersebut sebagai parameter pendukung sistem.

Pengujian ini dilakukan di tempat steril pada Box kaca ukuran 60cm x 50cm x 60 cm untuk mengetahui kesesuaian tampilan LCD 16x2 dalam menyajikan data PPM, suhu, dan kelembaban secara real-time agar informasi yang diterima pengguna akurat dan mudah dibaca, serta untuk mengetahui waktu respon sistem dalam mengambil keputusan dan menjalankan tindakan otomatis—mulai dari saat PPM melampaui ambang batas 100 PPM hingga relay (*exhaust fan*) dan buzzer bekerja sesuai logika kendali pada ESP32.

Penelitian ini juga bertujuan mengetahui kehandalan notifikasi berbasis Blynk, mencakup kemampuan ESP32 mengirim pesan peringatan otomatis saat

kualitas udara melebihi ambang batas, serta ketergantungannya terhadap koneksi WiFi. Selanjutnya, pengambilan data dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem secara terintegrasi pada berbagai skenario kondisi udara—baik normal maupun tercemar—guna memastikan seluruh komponen bekerja sinergis sesuai tujuan perancangan, sekaligus mengetahui kestabilan kinerja alat saat dioperasikan secara terus-menerus dalam rentang waktu tertentu tanpa mengalami gangguan atau kesalahan fungsi.

Dengan tercapainya tujuan-tujuan pengambilan data tersebut, hasil pengujian yang diperoleh diharapkan dapat memberikan gambaran yang objektif dan terukur mengenai kelayakan serta efektivitas sistem yang telah dirancang, sekaligus menjadi dasar dalam memberikan saran perbaikan dan pengembangan sistem pada penelitian selanjutnya.

4.2 Komponen Utama Pengambilan Data

Komponen Utama yang digunakan dalam proses pengambilan data terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak yang saling terintegrasi untuk membentuk sistem monitoring di dalam ruangan yakni:

1. ESP32

Berfungsi sebagai mikrokontroler utama yang mengendalikan seluruh proses pada sistem. ESP32 tidak hanya membaca data mentah dari sensor, tetapi juga mengonversinya menjadi nilai yang dapat dibaca, menjalankan logika pengambilan keputusan berdasarkan ambang batas yang ditentukan, serta mencatat waktu respon setiap proses yang terjadi, sehingga data waktu (timestamp) dari setiap kejadian dalam pengujian juga dapat diperoleh melalui komponen ini.

2. Sensor MQ-135

Sensor MQ-135 menjadi sumber data utama karena bertugas mendeteksi konsentrasi gas polutan di udara dan mengonversinya ke dalam nilai PPM. Data PPM inilah yang akan menjadi parameter inti dalam pengambilan keputusan sistem, sekaligus data utama yang dianalisis untuk mengetahui sensitivitas dan akurasi sensor terhadap perubahan kualitas udara.

3. Sensor DHT22

Sensor DHT22 berperan dalam pengambilan data pendukung berupa suhu dan kelembaban ruangan. Meskipun bukan parameter utama pengambilan keputusan, data ini penting untuk mengetahui kondisi lingkungan secara menyeluruh serta menganalisis kemungkinan korelasi antara suhu/kelembaban dengan fluktuasi nilai PPM didalam ruangan.

4. LCD 16x2

Digunakan sebagai sarana pengamatan dan pencatatan data secara langsung selama pengujian berlangsung, di mana nilai PPM, suhu, dan kelembaban dibaca secara real-time untuk kemudian dicatat ke dalam tabel hasil pengujian pada setiap skenario.

5. Blynk IoT

Berfungsi sebagai dashboard pemantauan jarak jauh sekaligus sarana pengambilan data terkait kehandalan sistem monitoring berbasis internet. Melalui aplikasi Blynk yang terhubung dengan ESP32 menggunakan virtual pin, data yang dapat diperoleh meliputi kesesuaian nilai PPM, suhu, dan kelembaban yang ditampilkan pada dashboard dengan nilai aktual dari sensor, delay atau waktu tunda sinkronisasi data antara pembacaan sensor dan tampilan di aplikasi, serta kestabilan koneksi antara ESP32 dengan server Blynk selama proses pengujian berlangsung.

4.3 Hasil Perancangan Implementasi Sistem

Implementasi merupakan proses realisasi dari seluruh rancangan yang telah dibuat pada **Bab III** menjadi sebuah sistem yang dapat beroperasi secara nyata. Pada tahap ini dilakukan perakitan perangkat keras (*hardware*), pemasangan media filtrasi, serta pengunggahan program ke mikrokontroler ESP32 sehingga seluruh komponen dapat bekerja secara terintegrasi.

Perangkat keras yang direalisasikan meliputi ESP32 DevKit V1 sebagai pusat pengendali, sensor DHT22 sebagai pengukur suhu dan kelembaban, Serta sensor MQ-135 sebagai pendeteksi sirkulasi udara, Kipas DC 12V dan Kipas AC 220V

sebagai *exhaust fan* DC, serta LCD 16×2 I2C sebagai media penampil informasi sistem.

Setelah seluruh komponen dirakit dan dihubungkan sesuai *wiring* yang telah dirancang, dilakukan integrasi perangkat lunak untuk mengatur proses pembacaan sensor, pengolahan data, pengambilan keputusan berdasarkan nilai ambang batas, serta pengendalian kecepatan *exhaust fan* menggunakan metode PWM (*Pulse Width Modulation*). Sistem dirancang agar dapat bekerja secara otomatis dalam memantau kondisi kualitas udara dan menyesuaikan proses filtrasi sesuai dengan kondisi lingkungan yang terdeteksi.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat berfungsi dengan baik dan saling terintegrasi dalam satu sistem. Alat yang telah direalisasikan selanjutnya diuji untuk mengetahui kinerja masing-masing komponen serta efektivitas sistem dalam sirkulasi udara di dalam ruangan.

4.3.1 Hasil Pembuatan Sistem Mekanik

Tahap pembuatan mekanik dilakukan untuk merealisasikan desain fisik yang telah dirancang pada sebelumnya di Bab III. Proses ini meliputi pembuatan rangka, pemasangan *casing*, serta penempatan komponen utama agar sistem dapat beroperasi dengan baik dan mudah dalam proses perawatan.

Rangka dan *casing* dirancang untuk menampung seluruh komponen elektronik maupun media filtrasi dalam satu kesatuan sistem. Tata letak komponen disusun berdasarkan arah aliran udara sehingga udara dikeluarkan melalui *exhaust fan* tidak berlawanan. Selain fungsi kerja sistem, desain mekanik juga mempertimbangkan aspek keamanan, kemudahan perawatan, dan efisiensi penggunaan ruang.

Hasil pembuatan mekanik alat ditunjukkan melalui tampilan fisik alat dari berbagai sisi serta dimensi keseluruhan sistem berikut.



Gambar 4. 1 Tampak Depan Alat



Gambar 4. 2 Tampak Atas Alat



Gambar 4. 3 Tampak Samping Alat

4.3.2 Hasil Implementasi Program

Tahap implementasi program dilakukan dengan mengunggah kode program ke mikrokontroler ESP32 untuk menjalankan fungsi *monitoring* dan pengendalian sistem secara otomatis. Program yang dibuat bertugas membaca data dari seluruh sensor, mengolah data berdasarkan nilai ambang batas yang telah ditentukan.

Data suhu dan kelembaban diperoleh dari sensor DHT22, data kualitas udara diperoleh dari sensor MQ-135. Selain menjalankan fungsi kontrol, program juga menampilkan hasil pembacaan sensor dan status kerja sistem pada LCD 16×2 sehingga pengguna dapat memantau kondisi alat secara langsung. Hasil implementasi menunjukkan bahwa program dapat berjalan dengan baik dan seluruh fungsi sistem dapat dioperasikan sesuai dengan logika yang telah dirancang.

4.4 Data Pengujian

Pada subbab ini akan dipaparkan seluruh data hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap Sistem Pengendalian Exhaust Fan Otomatis Berbasis Sensor MQ-135 yang telah dirancang dan diimplementasikan pada bab sebelumnya. Pengujian dilakukan untuk memperoleh data empiris terkait kinerja masing-masing komponen baik dalam kondisi udara bersih maupun dalam kondisi udara yang telah terpapar oleh sumber gas tertentu, sehingga dapat diketahui sejauh mana sistem mampu merespons perubahan kualitas udara secara nyata. Data yang diambil meliputi nilai tegangan pada setiap komponen utama, serta respons sistem terhadap berbagai jenis sumber gas yang diujikan, yang akan dijabarkan secara rinci pada subbab-subbab berikut.

4.4.1 Data Nilai Tegangan pada komponen

Pengujian nilai tegangan dilakukan untuk mengetahui besaran tegangan kerja pada setiap komponen utama sistem, baik pada kondisi udara bersih (tanpa paparan gas) maupun pada kondisi udara yang telah terpapar gas, guna memastikan bahwa setiap komponen bekerja sesuai dengan spesifikasi yang seharusnya dan merespons perubahan kondisi udara dengan baik. Pengukuran tegangan dilakukan menggunakan multimeter pada titik pengukuran masing-masing komponen, yang meliputi sensor DHT22, sensor MQ-135, modul relay, dua unit kipas DC, serta dua unit kipas AC.

Pada kondisi udara bersih, pengukuran dilakukan saat tidak ada sumber gas yang diberikan ke sensor, sehingga nilai tegangan yang terukur merepresentasikan kondisi siaga (standby) sistem sebelum aktuator diaktifkan. Sebaliknya, pada kondisi udara terpapar, pengukuran dilakukan saat sensor MQ-135 mendeteksi adanya gas yang melebihi ambang batas yang telah ditentukan, sehingga sistem secara otomatis mengaktifkan relay yang kemudian menyalakan kipas DC dan kipas AC sebagai aktuator exhaust fan. Hasil pengukuran tegangan pada kedua kondisi tersebut disajikan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Nilai Tegangan Pada Komponen dan Kipas

Objek Ukur	DHT22	MQ-135	Relay	Kipas DC#1	Kipas DC#2	Kipas AC #1	Kipas AC #2
Kondisi Udara Bersih	4,8 mV	1,41 V	4,97 V	0 V	0 V	0 V	0 V
Kondisi Udara Terpapar	5,90 V	4,92 V	11,76 V	11,78	11,72	219,2 V	219,2 V

4.4.2 Pengujian Exhaust Fan

Tabel 4. 2 Nilai Kecepatan Angin Masing-Masing Kipas

Kipas AC #1	Kipas AC #2	Kipas DC #1	Kipas DC #2
6,0 m/s	5,78 m/s	2,8 m/s	2,82 m/s

Setelah masing-masing nilai tekanan pada kipas sudah didapat masing-masing dijumlahkan untuk mendapatkan nilai rata-rata nya.

$$6,0 + 5,78 + 2,8 + 2,82 = \frac{174}{4}$$

$$\text{Rata-rata (v)} = 4,35$$

$$Q = v \times A$$

$$Q = 4,35 \times 0,0144$$

$$Q = 0,062 \text{ M3S} \times 3600$$

$$Q = 225,5 \text{ m}^3/\text{jam}$$

4.5 Pengujian Sensor

Pengujian sensor merupakan tahapan penting untuk memastikan bahwa seluruh komponen sensor yang digunakan dalam sistem mampu bekerja sesuai dengan spesifikasi dan fungsinya masing-masing. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi, konsistensi, dan respons sensor terhadap perubahan kondisi lingkungan, sehingga data yang dihasilkan dapat dijadikan acuan dalam proses pengambilan keputusan oleh sistem kendali otomatis. Pada penelitian ini, terdapat dua jenis sensor utama yang diuji, yaitu sensor MQ-135 yang berfungsi mendeteksi konsentrasi gas pencemar di udara, dan sensor DHT22 yang berfungsi membaca nilai suhu dan kelembaban ruangan. Kedua sensor tersebut bekerja secara terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 dan platform Blynk IoT untuk memberikan informasi kualitas udara secara real-time kepada pengguna. Pengujian dilakukan secara bertahap, dimulai dari pengujian sensor MQ-135 pada berbagai kondisi udara, kemudian dilanjutkan dengan pengujian sensor DHT22.

4.5.1 Pengujian Sensor MQ-135

Pengujian sensor MQ-135 bertujuan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam mendeteksi perubahan kualitas udara selama proses pemurnian udara berlangsung. Sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi keberadaan gas-gas pencemar seperti karbon dioksida (CO_2), amonia (NH_3), benzena (C_6H_6), asap kertas, dan senyawa organik volatil (VOC) yang dapat memengaruhi kualitas udara di dalam ruangan.

Sebelum pengujian dilakukan, sensor MQ-135 akan melalui proses pemanasan (*warm-up*) selama 60 detik untuk memastikan elemen sensornya mencapai kondisi kerja yang stabil. Setelah proses *warm-up* selesai, sistem mulai melakukan pembacaan data secara berkala setiap 2 menit. Lalu data yang sudah didapat akan dicatat dan dibuat grafik untuk penurunannya

A. Pengujian Pada Kondisi Udara Normal

Pada pengujian pertama, sensor MQ-135 ditempatkan pada kondisi *prototipe* ruangan dengan ukuran 40cm x 25cm x 40cm tanpa adanya sumber

polutan tambahan. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi gas berada pada rentang 27–50 ppm selama pengujian berlangsung. Pada menit ke-0, sensor membaca nilai sebesar 47 ppm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kualitas udara berada pada kondisi baik dan relatif stabil.

Selama pengujian berlangsung, nilai pembacaan sensor hanya mengalami fluktuasi kecil yang disebabkan oleh perubahan sirkulasi udara, serta karakteristik sensitivitas sensor. Pada akhir pengujian, nilai konsentrasi gas berada pada kisaran 36–49 ppm. Perubahan yang relatif kecil menunjukkan bahwa tidak terdapat sumber pencemar yang signifikan selama proses pengujian berlangsung.

Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa sensor MQ-135 mampu memberikan pembacaan yang stabil pada kondisi udara normal dan dapat digunakan sebagai nilai referensi dasar (*baseline*) untuk pengujian berikutnya.

Tabel 4. 3 Nilai PPM pada Kondisi Udara Normal

Waktu (Menit)	Nilai PPM
0	49
2	49
4	48
6	48
8	46
10	42
12	47
14	43
16	42
18	40
20	42
22	45
24	43

Waktu (Menit)	Nilai PPM
26	43
28	46
30	43
32	42
34	42
36	42
38	46
40	44
42	42
44	41
46	39
48	44
50	42
52	39
54	40
56	38
58	36
60	37

$$\eta = \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{49 - 37}{49} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{12}{49} \times 100\%$$

$$\eta = 24,4\%$$

$$CADR = \eta \times Q$$

Untuk mencari nilai Q = nilai efisiensi x luas ruangan keseluruhan

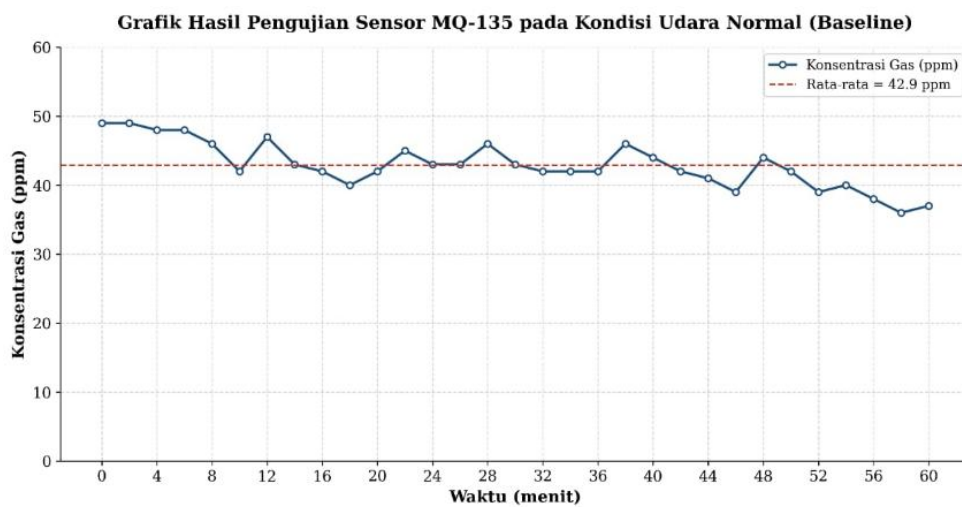
$$CADR = 0,244 \times 225,5 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$CADR = 55,02 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$ACH = \frac{CADR}{Volume}$$

$$ACH = \frac{55,02}{40}$$

$$ACH = 1,37$$



Gambar 4. 4 Grafik Pada Kondisi Udara Normal

B. Data Menggunakan Polutan Aerosol naptha

Pengujian polutan kedua dilakukan menggunakan sumber polutan dengan konsentrasi yang lebih tinggi sehingga menghasilkan nilai pembacaan awal yang jauh lebih besar dibandingkan pengujian sebelumnya. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada menit ke-0 sensor membaca nilai sebesar 1000 ppm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi polutan yang terdapat di udara berada pada tingkat yang cukup tinggi.

Setelah sistem diaktifkan, terjadi penurunan konsentrasi gas secara bertahap. Pada menit ke-20, nilai konsentrasi gas turun menjadi 512 ppm. Selanjutnya pada menit ke-40, nilai konsentrasi gas berkurang hingga mencapai 292 ppm. Penurunan konsentrasi gas terus berlanjut hingga mencapai kisaran 109 ppm pada menit ke-60.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat diketahui bahwa sistem mampu menurunkan konsentrasi polutan lebih dari 89,1% dari kondisi awal. Hal ini menunjukkan bahwa sistem filtrasi dan sirkulasi udara yang digunakan bekerja dengan baik dalam mengurangi konsentrasi gas pencemar di dalam ruangan.

Tabel 4. 4 Nilai Menggunakan Aerosol Naftha

Waktu (Menit)	Nilai PPM
0	1000
2	961
4	891
6	792
8	720
10	653
12	616
14	584
16	570
18	526
20	512
22	487
24	466
26	453
28	437
30	419
32	392
34	366
36	342
38	310
40	292

Waktu (Menit)	Nilai PPM
42	269
44	254
46	230
48	212
50	194
52	183
54	166
56	144
58	132
60	109

$$\eta = \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{1000 - 109}{1000} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{891}{1000} \times 100\%$$

$$\eta = 89,1\%$$

$$CADR = \eta \times Q$$

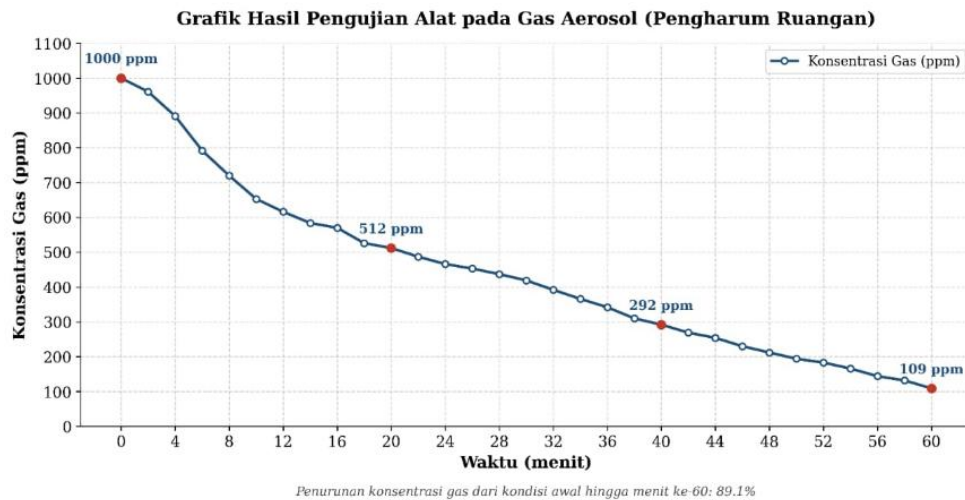
$$CADR = 0,891 \times 225,5 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$CADR = 200,92 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$ACH = \frac{CADR}{Volume}$$

$$ACH = \frac{200,92}{40}$$

$$ACH = 5,0$$



Gambar 4. 5 Grafik Menggunakan Aerosol naptha

C. Pengujian Menggunakan Polutan Konsentrasi Tinggi

Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan polutan konsentrasi tinggi (asap pembakaran kertas) sebagai sumber polutan. Asap pembakaran dipilih karena mengandung senyawa VOC yang dapat dideteksi oleh sensor MQ-135.

Sebelum asap pembakaran terdeteksi nilai pembacaan sensor berada pada kondisi normal, yaitu sekitar 58 ppm. Setelah polutan asap terdeteksi, nilai sensor meningkat secara signifikan. Pada menit ke-2, konsentrasi gas meningkat menjadi 646 ppm. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa sensor MQ-135 mampu mendeteksi keberadaan senyawa volatil yang terkandung dalam polutan.

Setelah sistem diaktifkan, konsentrasi gas mengalami penurunan secara bertahap. Selanjutnya nilai konsentrasi gas mendekati kondisi normal pada menit ke-60 dengan rentang pembacaan sekitar 121 ppm.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempercepat proses pengurangan senyawa volatil di udara sehingga kualitas udara kembali mendekati kondisi normal dalam waktu kurang dari satu jam.

Tabel 4. 5 Nilai PPM Menggunakan Asap Kertas

Waktu (Menit)	Nilai PPM
0	87

Waktu (Menit)	Nilai PPM
2	646
4	651
6	645
8	632
10	624
12	611
14	594
16	583
18	571
20	559
22	541
24	527
26	511
28	498
30	479
32	452
34	431
36	414
38	391
40	375
42	347
44	319
46	283
48	256
50	230
52	211
54	184
56	167
58	143

Waktu (Menit)	Nilai PPM
60	121

$$\eta = \frac{C_{awal} - C_{akhir}}{C_{awal}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{651 - 121}{651} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{530}{651} \times 100\%$$

$$\eta = 81,4\%$$

$$CADR = \eta \times Q$$

$$CADR = 0,814 \times 225,5 \text{ m}^3/\text{jam}$$

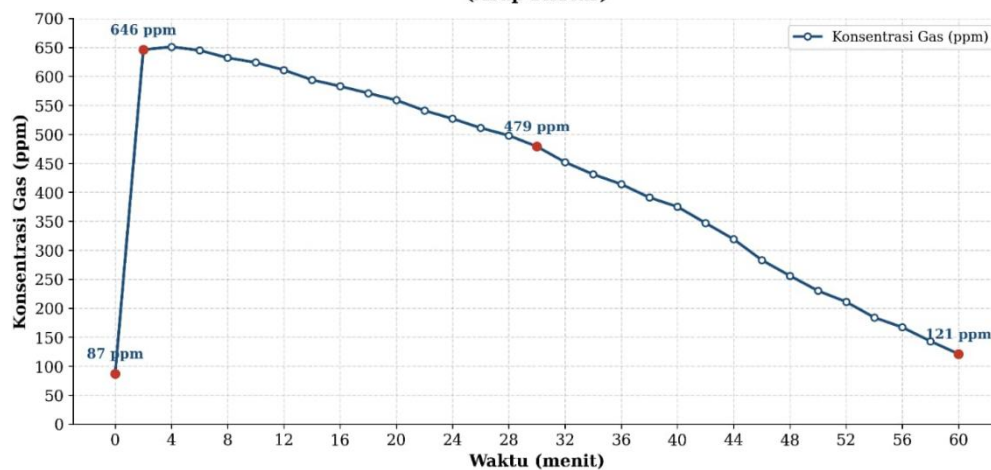
$$CADR = 183,55 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$ACH = \frac{CADR}{Volume}$$

$$ACH = \frac{183,55}{40}$$

$$ACH = 4,58$$

Grafik Hasil Pengujian Alat pada Polutan Konsentrasi Tinggi
(Asap Kertas)



Gambar 4. 6 Grafik Menggunakan Asap Kertas

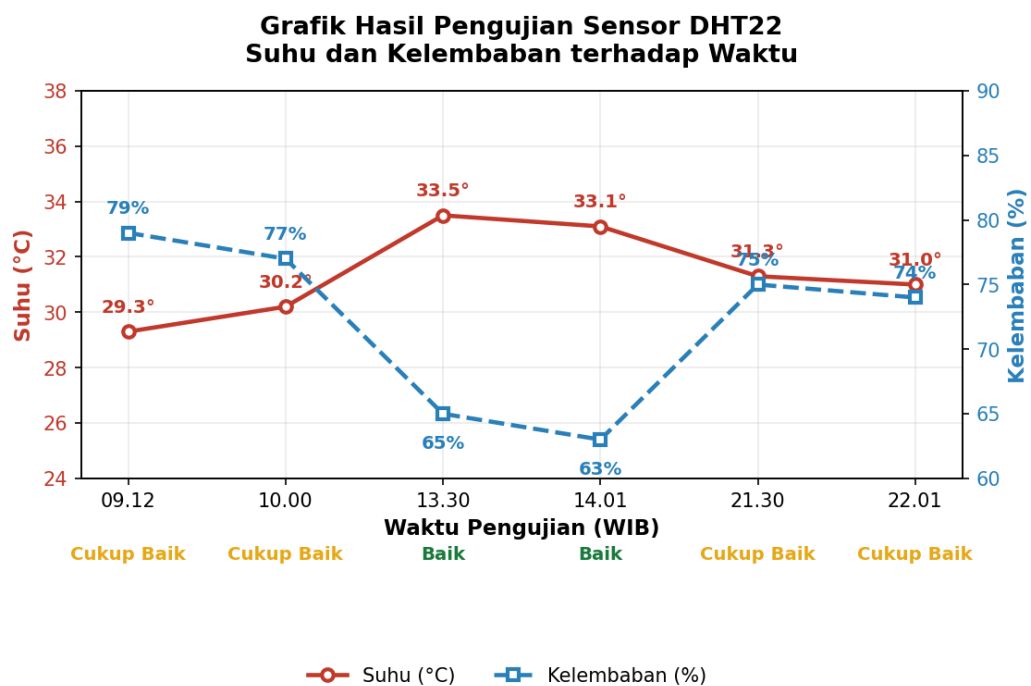
4.5.2 Pengujian Sensor DHT22

Pengujian sensor DHT22 dilakukan untuk mengetahui kemampuan sensor dalam membaca parameter suhu dan kelembaban udara secara akurat dan konsisten, sekaligus untuk mengamati pola perubahan kondisi lingkungan pada ruang uji sepanjang hari. Pengambilan data dilakukan pada enam titik waktu yang berbeda, yaitu pukul 09.12 WIB, 10.00 WIB, 13.30 WIB, 14.01 WIB, 21.30 WIB, dan 22.01 WIB, dengan hasil sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.X. Berdasarkan hasil pengujian, suhu ruangan tercatat mengalami kenaikan dari pagi hingga siang hari, yaitu dari 29,3°C pada pukul 09.12 WIB menjadi 33,5°C pada pukul 13.30 WIB, kemudian berangsur menurun pada malam hari menjadi 31,0°C pada pukul 22.01 WIB. Pola ini berbanding terbalik dengan nilai kelembaban, di mana persentase kelembaban relatif justru menurun seiring kenaikan suhu pada siang hari, dari 79% pada pagi hari menjadi 71% pada siang hari, lalu kembali meningkat pada malam hari menjadi 74-75%. Hubungan berbanding terbalik antara suhu dan kelembaban ini sejalan dengan prinsip fisis kelembaban relatif, di mana udara yang lebih hangat memiliki kapasitas menahan uap air yang lebih besar sehingga nilai kelembaban relatif terukur menjadi lebih rendah, dan sebaliknya. Pada seluruh waktu pengujian, sensor DHT22 menunjukkan kestabilan pembacaan tanpa adanya nilai anomali (error reading) maupun lonjakan data yang tidak wajar, sehingga sensor ini dinyatakan layak digunakan sebagai komponen pendukung pemantauan kondisi lingkungan pada sistem. Pemilihan tiga rentang waktu pengujian, yaitu pagi, siang, dan malam hari, dilakukan secara sengaja untuk merepresentasikan variasi kondisi lingkungan harian (diurnal) yang berbeda. Pengujian pada pagi hari (sekitar pukul 09.00-10.00 WIB) mewakili kondisi awal aktivitas dengan suhu yang relatif masih rendah dan kelembaban yang cenderung tinggi akibat sisa uap air malam sebelumnya. Pengujian pada siang hari (sekitar pukul 13.00-14.00 WIB) dipilih karena merupakan periode dengan intensitas radiasi matahari dan suhu udara tertinggi dalam satu hari, sehingga dapat menguji performa sensor pada kondisi ekstrem suhu tinggi sekaligus kelembaban rendah. Sementara itu, pengujian pada malam hari (sekitar pukul 21.00-22.00 WIB) mewakili kondisi

setelah aktivitas harian mereda, dengan suhu yang mulai turun dan kelembaban yang kembali meningkat. Dengan mencakup ketiga rentang waktu tersebut, pengujian diharapkan dapat membuktikan bahwa sensor DHT22 mampu bekerja secara akurat dan konsisten pada berbagai kondisi lingkungan yang berbeda, tidak hanya pada satu kondisi statis saja, sehingga hasil pengujian lebih representatif terhadap kondisi operasional sistem yang sesungguhnya.

Tabel 4. 6 Nilai Suhu dan Kelembaban Pada DHT22

Jam	Suhu	Kelembaban	Kondisi
09.12 WIB	29,3°	79%	Cukup Baik
10.00 WIB	30,2°	77%	Cukup Baik
13.30 WIB	33,5°	65%	Baik
14.01 WIB	33,1°	63%	Baik
21.30 WIB	31,3°	75%	Cukup Baik
22.01 WIB	31,0°	74%	Cukup Baik



Gambar 4. 7 Grafik Pada DHT22

4.6 Analisa

Hasil pengukuran tegangan menunjukkan bahwa seluruh komponen bekerja sesuai dengan spesifikasi yang dirancang, di mana aktuator (relay, kipas DC, dan kipas AC) berada pada kondisi tidak aktif (0 V) saat udara dalam kondisi bersih, dan beralih ke tegangan kerja nominalnya ketika sensor MQ-135 mendeteksi konsentrasi gas yang melampaui ambang batas. Hal ini membuktikan bahwa logika pengendalian berbasis ambang batas yang diterapkan pada ESP32 dapat berfungsi sebagaimana yang dirancang pada **BAB III**.

Hasil kalibrasi sensor MQ-135 yang dilakukan secara empiris menghasilkan nilai referensi udara normal pada kisaran rata-rata 42,9 ppm, yang kemudian digunakan sebagai baseline dalam menentukan kondisi udara bersih maupun tercemar. Nilai ini konsisten dengan hasil pengujian pada kondisi udara normal (subbab 4.6.1), yang menunjukkan fluktuasi pembacaan dalam rentang 36–49 ppm tanpa adanya tren peningkatan signifikan, sehingga dapat disimpulkan bahwa sensor memiliki tingkat stabilitas yang baik pada kondisi tanpa paparan polutan.

Pada pengujian dengan dua jenis sumber polutan yang berbeda karakteristik, yaitu aerosol naptha (aerosol) dan asap pembakaran kertas, sistem menunjukkan kemampuan responsivitas yang baik terhadap kedua jenis gas tersebut. Pada pengujian aerosol, konsentrasi gas berhasil diturunkan dari 1000 ppm menjadi 109 ppm dalam waktu 60 menit, atau setara dengan penurunan sebesar 89,1%. Pada pengujian asap kertas, konsentrasi gas yang sempat meningkat tajam hingga 646 ppm berhasil diturunkan kembali mendekati kondisi normal, yaitu 121 ppm, dalam rentang waktu yang sama. Perbedaan pola penurunan pada kedua pengujian tersebut mengindikasikan bahwa karakteristik fisik masing-masing polutan turut memengaruhi laju penurunan konsentrasi gas; partikel aerosol naptha cenderung lebih cepat terdilusi pada fase awal, sedangkan asap pembakaran kertas menunjukkan penurunan yang lebih bertahap, kemungkinan disebabkan oleh ukuran partikel yang lebih halus dan sifatnya yang lebih persisten di udara.

Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa sistem yang dirancang mampu melakukan monitoring kualitas udara secara real-time, mengambil keputusan secara otomatis berdasarkan nilai ambang batas, serta menjalankan aktuator (*exhaust fan*) untuk menurunkan konsentrasi polutan secara efektif pada berbagai skenario kondisi udara. Konsistensi antara data tegangan komponen, hasil kalibrasi sensor, dan respons sistem terhadap dua jenis polutan yang berbeda menunjukkan bahwa integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak pada sistem ini telah berjalan sesuai dengan tujuan perancangan yang ditetapkan pada **BAB III**.