

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pemanfaatan senyawa *Volatile Organic Compounds* (VOC) sebagai indikator kondisi fisiologis tanaman telah banyak dikembangkan dalam bidang pertanian presisi. Salah satu penelitian yang dilakukan oleh Antonio Berna menunjukkan bahwa sistem *electronic nose* (e-nose) yang menggunakan array sensor gas mampu mendeteksi perubahan aroma yang dihasilkan tanaman akibat serangan hama atau penyakit. Penelitian tersebut menggunakan beberapa sensor gas berbasis metal oxide untuk mengenali pola VOC yang dihasilkan tanaman, kemudian data dianalisis menggunakan metode klasifikasi pola. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan profil VOC dapat digunakan sebagai indikator awal kondisi stres tanaman sebelum gejala visual muncul (Berna, 2010).

Penelitian lain yang dilakukan oleh Davide Spinelle mengkaji penggunaan sensor gas berbasis metal oxide untuk mendeteksi senyawa volatil di udara secara real-time. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sensor VOC modern memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan konsentrasi senyawa volatil dalam skala *parts per billion* (ppb). Sensor jenis ini banyak digunakan dalam sistem monitoring lingkungan dan kualitas udara karena memiliki ukuran kecil, konsumsi daya rendah, serta mudah diintegrasikan dengan sistem mikrokontroler (Spinelle et al., 2015).

Penggunaan teknologi *electronic nose* untuk mendeteksi kondisi tanaman juga diteliti oleh Arianna Wilson dan Maurizio Baietto. Dalam penelitian tersebut, sistem *e-nose* digunakan untuk menganalisis aroma yang dilepaskan oleh tanaman yang mengalami infeksi patogen. Sistem ini memanfaatkan beberapa sensor gas yang bekerja secara simultan untuk mengenali pola aroma spesifik yang dihasilkan tanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi *e-nose* mampu mengklasifikasikan kondisi tanaman sehat dan tanaman yang terinfeksi penyakit dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi (Wilson & Baietto, 2009).

Selain penggunaan sensor gas untuk analisis VOC, integrasi teknologi sensor dengan sistem *Internet of Things* (IoT) juga telah dikembangkan dalam bidang

pertanian cerdas. Penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Jawad menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT dapat digunakan untuk mengumpulkan data lingkungan pertanian secara real-time melalui jaringan internet. Sistem ini terdiri dari sensor lingkungan, mikrokontroler, serta modul komunikasi nirkabel yang mengirimkan data ke server atau platform cloud untuk dianalisis lebih lanjut. Implementasi teknologi IoT ini memungkinkan proses pemantauan kondisi tanaman dilakukan secara jarak jauh dan berkelanjutan (Jawad et al., 2017).

Penelitian terbaru mengenai penggunaan sensor VOC dalam pemantauan tanaman juga dilakukan oleh Ilja Rüffer yang mengembangkan sensor gas digital untuk pengukuran *Total Volatile Organic Compounds* (TVOC). Sensor tersebut mampu mendeteksi perubahan konsentrasi VOC dengan stabil dan dapat diintegrasikan langsung dengan mikrokontroler melalui komunikasi digital seperti I²C. Dengan kemampuan tersebut, sensor VOC dapat digunakan sebagai komponen utama dalam sistem monitoring kondisi tanaman berbasis *Internet of Things* (IoT) (Rüffer et al., 2018).

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemantauan VOC menggunakan sensor gas dan sistem IoT merupakan pendekatan yang relevan dan potensial untuk diterapkan sebagai metode deteksi dini kondisi stres atau serangan hama pada tanaman. Oleh karena itu, proyek akhir ini dikembangkan dengan mengacu pada penelitian sebelumnya dengan fokus pada perancangan prototipe monitoring VOC berbasis IoT yang sederhana dan aplikatif.

Tabel 2. 1 Perbandingan Variabel Penelitian

No	Peneliti	Metode (Sensor & Karakteristik)	Hasil Penelitian
1	(Spinelle et al., 2015)	Menggunakan kombinasi sensor gas yaitu MICS-4514 (MOX), TGS-5042 (electrochemical CO), serta S-100H dan Gascard NG (NDIR CO ₂). Sensor bekerja secara spesifik terhadap gas tertentu dan memerlukan proses kalibrasi berbasis regresi dan machine learning.	Akurasi sensor meningkat setelah kalibrasi, namun performa sensor masih dipengaruhi oleh suhu, kelembaban, dan memerlukan sistem tambahan untuk menjaga kestabilan data.

No	Peneliti	Metode (Sensor & Karakteristik)	Hasil Penelitian
2	Wilson & Baietto (2009)	Menggunakan sensor array yang terdiri dari metal-oxide sensors, conductive polymer, electrochemical, optical, dan surface acoustic wave sensors dalam sistem electronic nose (e-nose) untuk mendeteksi pola VOC.	Sistem mampu mengidentifikasi dan mengklasifikasikan senyawa VOC berdasarkan pola aroma, namun membutuhkan banyak sensor dan pengolahan data yang kompleks.
3	Jawad et al. (2017)	Menggunakan sensor lingkungan seperti temperature sensor, humidity sensor, dan soil moisture sensor dalam sistem Wireless Sensor Network (WSN) berbasis IoT. Fokus pada integrasi sistem monitoring dan efisiensi energi.	Sistem mampu melakukan monitoring kondisi lingkungan secara real-time, namun tidak membahas deteksi VOC secara spesifik.
4	Mulyanti et al. (2021)	Menggunakan Electronic Nose 118 dengan 8 sensor gas TGS (TGS 813, 822, 826, 832, 2600, 2603, 2612, 2620) untuk mendeteksi VOC pada tanaman (akar, batang, daun) menggunakan metode Linear Discriminant Analysis (LDA).	Sistem mampu membedakan tingkat serangan penyakit tanaman berdasarkan pola VOC, namun akurasi pada daun relatif rendah dan sistem membutuhkan banyak sensor serta analisis data lanjutan.
5	Rüffer et al. (2018)	Menggunakan sensor SGP30 berbasis MOX digital multi-pixel (SnO_2) yang telah terintegrasi dengan pemrosesan sinyal dan kalibrasi internal serta menghasilkan output digital (TVOC dan eCO_2).	Sensor mampu mendeteksi VOC secara real-time dengan sistem yang stabil, sederhana, dan mudah diintegrasikan dalam perangkat IoT tanpa memerlukan banyak sensor tambahan.

Berdasarkan Tabel 2.1, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa deteksi VOC umumnya dilakukan menggunakan beberapa sensor gas secara bersamaan, baik dalam bentuk sensor cluster maupun *electronic nose (e-nose)*. Pendekatan ini mampu menghasilkan pola respon yang kompleks, namun memiliki kelemahan

berupa sistem yang lebih rumit, kebutuhan kalibrasi tambahan, serta memerlukan pengolahan data lanjutan.

Penelitian Spinelle et al. (2017) menekankan pentingnya kalibrasi dalam meningkatkan akurasi sensor, sedangkan penelitian Mulyanti et al. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan banyak sensor masih memiliki keterbatasan, terutama pada deteksi VOC pada daun. Di sisi lain, penelitian Jawad et al. (2017) menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT sangat efektif untuk pengambilan data secara real-time.

Perkembangan teknologi sensor ditunjukkan oleh penelitian Rüffer et al. (2018) melalui penggunaan sensor SGP30 yang telah terintegrasi dalam satu chip dan mampu mengukur Total VOC (TVOC) secara langsung. Dengan demikian, penggunaan SGP30 dalam penelitian ini menjadi lebih sesuai karena mampu menyederhanakan sistem tanpa mengurangi kemampuan dalam mendeteksi perubahan VOC.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Volatile Organic Compounds (VOC) pada Tanaman

Volatile Organic Compounds (VOC) merupakan senyawa organik yang memiliki tekanan uap tinggi sehingga mudah menguap pada suhu ruang. Pada tanaman, VOC dihasilkan sebagai produk sampingan maupun produk utama dari berbagai proses metabolisme, khususnya yang berlangsung di jaringan daun. Pelepasan VOC ke atmosfer terjadi melalui stomata dan kutikula daun, sehingga daun menjadi bagian utama dalam emisi senyawa volatil tanaman (Dudareva et al., 2004).

VOC memiliki peran biologis yang sangat penting, antara lain sebagai media komunikasi antar tanaman, sinyal kimia terhadap organisme lain, serta mekanisme pertahanan terhadap herbivora dan patogen. Jenis dan konsentrasi VOC yang dilepaskan oleh tanaman sangat dipengaruhi oleh kondisi fisiologis tanaman tersebut, termasuk usia tanaman, fase pertumbuhan, serta kondisi lingkungan seperti cahaya, suhu, dan kelembaban (Niinemets, 2010).

Penelitian menunjukkan bahwa tanaman sehat memiliki profil VOC yang relatif stabil, sedangkan tanaman yang mengalami stres akan menunjukkan perubahan signifikan pada konsentrasi dan komposisi VOC. Oleh karena itu,

pemantauan VOC dapat digunakan sebagai indikator non-destruktif untuk mengetahui kondisi kesehatan tanaman secara dini, bahkan sebelum gejala visual seperti layu atau perubahan warna daun muncul (Holopainen, 2004).

2.2.2 *Stres Tanaman dan Hubungannya dengan Emisi VOC*

Stres tanaman merupakan kondisi ketika tanaman mengalami gangguan fisiologis akibat faktor biotik maupun abiotik. Stres biotik meliputi serangan hama, patogen, dan mikroorganisme lain, sedangkan stres abiotik dapat berupa kekeringan, suhu ekstrem, kekurangan nutrisi, serta fluktuasi kelembaban lingkungan. Kondisi stres ini memicu respon metabolik yang menyebabkan perubahan produksi dan emisi VOC (Dudareva et al., 2004).

Menurut Dudareva et al., ketika tanaman mengalami serangan hama, terjadi kerusakan jaringan yang memicu sintesis dan pelepasan VOC tertentu sebagai sinyal peringatan. Senyawa VOC ini dapat berfungsi untuk mengusir hama secara langsung atau menarik musuh alami hama tersebut. Dengan demikian, perubahan emisi VOC merupakan bagian dari sistem pertahanan alami tanaman (Dudareva et al., 2004).

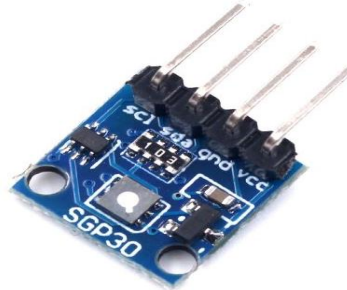
Perubahan VOC akibat stres tanaman umumnya terjadi lebih awal dibandingkan perubahan morfologis yang dapat diamati secara visual. Hal ini menjadikan VOC sebagai parameter yang sangat potensial untuk sistem deteksi dini stres tanaman dan serangan hama, khususnya dalam sistem monitoring otomatis berbasis sensor (Wilson & Baietto, 2009).

2.2.3 *SGP30*

Sensor gas merupakan komponen utama dalam sistem monitoring VOC yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur konsentrasi senyawa volatil di udara. Pada penelitian ini, sensor gas yang digunakan adalah SGP30, yaitu sensor gas digital yang dirancang khusus untuk pengukuran kualitas udara dalam ruangan dan pemantauan senyawa volatil secara umum .

SGP30 merupakan sensor berbasis teknologi *metal oxide* (MOX) yang terintegrasi dengan sistem pemrosesan internal dan antarmuka komunikasi digital I²C. Sensor ini mampu mengukur dua parameter utama, yaitu *Total Volatile Organic Compounds* (TVOC) dan equivalent Carbon Dioxide (eCO₂). Nilai TVOC

yang dihasilkan oleh SGP30 dinyatakan dalam satuan *parts per billion* (ppb), sehingga sesuai untuk aplikasi monitoring VOC dengan konsentrasi rendah seperti emisi senyawa volatil dari daun tanaman (Rüffer et al., 2018).



Gambar 2. 1 Sensor SGP30

Sensor SGP30 merupakan sensor kualitas udara digital berbasis teknologi *Metal Oxide* (MOX) yang digunakan untuk menghasilkan parameter *Total Volatile Organic Compounds* (TVOC) dalam satuan *parts per billion* (ppb) dan *equivalent Carbon Dioxide* (eCO₂) dalam satuan *parts per million* (ppm). Sensor SGP30 berkomunikasi dengan mikrokontroler menggunakan antarmuka I²C (*Inter-Integrated Circuit*). SGP30 mengintegrasikan elemen sensor MOX, rangkaian pemrosesan sinyal, serta algoritma pengolahan dalam satu chip. Berdasarkan datasheet Sensirion, SGP30 memiliki dua *raw signal* digital 16-bit dan dua keluaran terproses (*processed output*), yaitu TVOC dan eCO₂.

Prinsip kerja sensor diawali ketika senyawa volatil yang terdapat di udara berinteraksi dengan permukaan elemen sensor berbasis MOX. Interaksi tersebut menyebabkan perubahan karakteristik listrik pada elemen sensor. Respons listrik yang dihasilkan kemudian diproses oleh rangkaian internal SGP30 sehingga menghasilkan *raw signal* digital 16-bit berupa sinyal hidrogen (H₂) dan etanol (EtOH). Kedua *raw signal* tersebut digunakan sebagai masukan dalam proses kalibrasi dan kompensasi *baseline* yang dilakukan oleh algoritma internal SGP30.

Hubungan antara *raw signal* dan konsentrasi gas relatif terhadap kondisi referensi dinyatakan oleh Sensirion melalui persamaan berikut:

$$C = C_{ref} \exp \left(\frac{S_{ref} - S_{out}}{512} \right) \quad 2-1$$

dengan C adalah konsentrasi gas hasil perhitungan, C_{ref} adalah konsentrasi gas pada kondisi referensi, S_{ref} adalah nilai *raw signal* pada kondisi referensi, dan S_{out} adalah nilai *raw signal* hasil pengukuran. Persamaan tersebut menunjukkan hubungan eksponensial antara perubahan *raw signal* dan konsentrasi gas relatif terhadap kondisi referensi. Persamaan ini digunakan untuk menjelaskan karakteristik hubungan antara sinyal sensor dan konsentrasi gas, bukan sebagai persamaan langsung untuk menghitung TVOC dalam satuan ppb.

Selanjutnya, *raw signal* yang dihasilkan sensor diproses menggunakan algoritma internal SGP30 untuk melakukan kalibrasi dan kompensasi *baseline*. Hasil pengolahan tersebut menghasilkan *processed output* berupa TVOC dalam satuan ppb dan eCO₂ dalam satuan ppm. Dengan demikian, proses pengolahan sinyal SGP30 hingga menghasilkan nilai TVOC.

Pada penelitian ini, ESP32 tidak melakukan konversi manual dari tegangan atau nilai ADC menjadi nilai TVOC. ESP32 berfungsi mengirimkan perintah pengukuran kepada SGP30 dan membaca data digital hasil pemrosesan sensor melalui komunikasi I²C. Oleh karena itu, nilai TVOC yang digunakan dalam penelitian merupakan *processed output* SGP30 yang telah dihasilkan melalui pemrosesan internal sensor dan dinyatakan dalam satuan ppb. Sementara itu, persamaan hubungan *raw signal* dengan konsentrasi gas digunakan untuk menjelaskan proses karakterisasi respons sensor terhadap gas yang terdeteksi. Persamaan lengkap algoritma internal yang secara spesifik memetakan *raw signal* menjadi nilai TVOC ppb tidak dipublikasikan oleh Sensirion dalam datasheet.

Sensor SGP30 merupakan sensor gas digital berbasis Metal Oxide (MOX) yang dikembangkan oleh Sensirion untuk pengukuran kualitas udara dan Total Volatile Organic Compounds (TVOC). Sensor ini telah dilengkapi dengan pemrosesan sinyal dan algoritma kalibrasi internal sehingga mampu menghasilkan keluaran digital secara langsung tanpa memerlukan rangkaian pengkondisi sinyal tambahan.

Spesifikasi utama sensor SGP30 adalah sebagai berikut:

1. Tegangan operasi : 1,62 V – 1,98 V (IC sensor) dan 3,3 V – 5 V (modul breakout).
2. Antarmuka komunikasi : I²C (Inter-Integrated Circuit).

3. Alamat I²C : 0x58.
4. Parameter keluaran :
5. TVOC (Total Volatile Organic Compounds) : 0 – 60.000 ppb.
6. eCO₂ (Equivalent Carbon Dioxide) : 400 – 60.000 ppm.
7. Waktu pengukuran : 1 detik per sampel.
8. Konsumsi arus rata-rata : sekitar 48 mA.
9. Dimensi sensor : sekitar 2,45 mm × 2,45 mm × 0,9 mm.
10. Teknologi sensor : Multi-Pixel Metal Oxide (MOX).

Pada penelitian ini hanya parameter TVOC yang digunakan karena sesuai dengan tujuan penelitian yaitu mengukur perubahan konsentrasi senyawa VOC yang dilepaskan oleh tanaman. Nilai TVOC yang diperoleh sensor kemudian dibaca oleh ESP32 melalui komunikasi I²C dan ditampilkan dalam satuan parts per billion (ppb).

2.2.4 ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis *System on Chip* (SoC) yang dikembangkan oleh Espressif Systems dan banyak digunakan dalam aplikasi *Internet of Things* (IoT). Mikrokontroler ini telah terintegrasi dengan modul komunikasi Wi-Fi dan *Bluetooth*, sehingga sangat sesuai untuk sistem monitoring yang membutuhkan konektivitas jaringan secara real-time. Dalam penelitian ini, ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali sistem yang bertugas membaca data dari sensor gas SGP30, memproses data hasil pengukuran, serta mengirimkan data VOC ke platform IoT untuk keperluan monitoring jarak jauh.



Gambar 2. 2 ESP32

Keunggulan ESP32 dibandingkan mikrokontroler konvensional adalah kemampuannya dalam menangani komunikasi data secara simultan dengan

konsumsi daya yang relatif rendah. ESP32 juga mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti I²C, SPI, UART, dan GPIO, sehingga memudahkan integrasi dengan sensor gas, modul tampilan, serta perangkat pendukung lainnya. Dengan kemampuan pemrosesan yang cukup tinggi, ESP32 mampu menjalankan proses akuisisi data VOC secara periodik dan stabil, yang sangat dibutuhkan dalam sistem monitoring kondisi tanaman berbasis IoT.

2.2.5 Baterai LiFePO₄ (Lithium Iron Phosphate)

Baterai LiFePO₄ (Lithium Iron Phosphate) merupakan salah satu jenis baterai lithium yang memiliki keunggulan dalam hal keamanan, kestabilan tegangan, serta umur pakai yang panjang dibandingkan dengan baterai lithium-ion konvensional. Baterai ini memiliki tegangan nominal sebesar 3.2V per sel, sehingga untuk memenuhi kebutuhan sistem digunakan dua sel baterai yang disusun secara seri (2S) untuk menghasilkan tegangan sekitar 6.4V.



Gambar 2. 3 Baterai LiFePO₄

Penggunaan baterai LiFePO₄ pada sistem monitoring VOC berbasis IoT memberikan keuntungan dalam hal portabilitas, karena sistem tidak lagi bergantung pada sumber listrik PLN. Hal ini memungkinkan sistem dapat diterapkan langsung di lapangan atau area pertanian yang luas.

Selain itu, baterai LiFePO₄ memiliki karakteristik tegangan yang relatif stabil selama proses discharge, sehingga sangat cocok digunakan pada sistem berbasis sensor. Kestabilan tegangan ini penting untuk menjaga akurasi pembacaan sensor gas, karena fluktuasi tegangan dapat mempengaruhi hasil pengukuran, terutama pada sensor berbasis metal oxide seperti SGP30.

2.2.6 LCD I²C 16x2

LCD I²C 16x2 merupakan modul tampilan yang digunakan untuk

menampilkan informasi hasil pengukuran secara lokal. LCD ini mampu menampilkan dua baris teks dengan masing-masing 16 karakter dan menggunakan antarmuka komunikasi I2C, sehingga hanya membutuhkan sedikit pin input/output dari mikrokontroler ESP32. Penggunaan antarmuka I²C membuat perancangan rangkaian menjadi lebih sederhana dan efisien.



Gambar 2. 4 LCD I2C 16x2

Dalam sistem monitoring VOC ini, LCD I2C 16x2 digunakan untuk menampilkan nilai *Total Volatile Organic Compounds* (TVOC) dalam satuan ppb serta status sistem secara real-time. Keberadaan LCD memungkinkan pengguna memantau kondisi sistem secara langsung tanpa harus mengakses platform IOT, sehingga meningkatkan kemudahan penggunaan dan fleksibilitas system.

2.2.7 DHT22

DHT22 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban udara secara real-time dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi. Sensor ini memiliki rentang pengukuran suhu sekitar -40°C hingga 80°C dan kelembaban 0% hingga 100% *Relative Humidity* (RH), sehingga cocok digunakan dalam sistem monitoring lingkungan. Dalam penelitian ini, DHT22 digunakan sebagai sensor pendukung untuk mengetahui kondisi lingkungan di sekitar tanaman yang diamati.



Gambar 2. 5 DHT22

Parameter suhu dan kelembaban memiliki pengaruh yang signifikan terhadap proses fisiologis tanaman, termasuk dalam produksi dan emisi senyawa *Volatile Organic Compounds* (VOC). Selain itu, sensor gas seperti SGP30 juga sensitif terhadap perubahan kondisi lingkungan, sehingga data dari DHT22 dapat digunakan sebagai referensi untuk meningkatkan akurasi analisis. Dengan menggabungkan data VOC, suhu, dan kelembaban, sistem monitoring dapat memberikan informasi yang lebih komprehensif terhadap kondisi tanaman secara real-time.

2.2.8 Modul DC-DC Buck Converter (LM2596)

Modul DC-DC buck converter merupakan rangkaian elektronika yang digunakan untuk menurunkan tegangan DC dari level yang lebih tinggi ke level yang lebih rendah secara efisien. Salah satu modul yang umum digunakan adalah LM2596, yang mampu menurunkan tegangan input hingga 40V menjadi tegangan output yang dapat diatur sesuai kebutuhan dengan efisiensi yang tinggi. Dalam penelitian ini, modul LM2596 digunakan untuk menurunkan tegangan dari baterai LiFePO4 yang disusun secara seri menjadi tegangan 5V yang stabil untuk kebutuhan sistem.



Gambar 2. 6 LM2596

Penggunaan buck converter seperti LM2596 lebih efisien dibandingkan regulator linier karena memiliki tingkat kehilangan daya yang lebih rendah, sehingga sangat cocok digunakan pada sistem berbasis baterai. Selain itu, modul ini mampu menjaga kestabilan tegangan output meskipun terjadi variasi pada tegangan input, sehingga dapat meningkatkan performa sistem secara keseluruhan. Dengan adanya LM2596, sistem monitoring VOC dapat bekerja lebih stabil dan aman, terutama dalam menjaga akurasi pembacaan sensor.

2.2.9 Fan (Pembuangan Udara)

Fan atau kipas merupakan komponen elektromekanik yang digunakan untuk mengalirkan udara dari satu tempat ke tempat lain. Dalam sistem monitoring VOC, *fan* berfungsi sebagai alat bantu untuk mempercepat proses pembuangan udara di dalam ruang uji (*chamber*) setelah proses pengambilan data selesai. Penggunaan *fan* memungkinkan udara yang mengandung senyawa VOC hasil pengujian dapat segera dikeluarkan dan digantikan dengan udara segar dari lingkungan.



Gambar 2. 7 Fan Pembuangan Udara

Keberadaan *fan* sangat penting untuk mengembalikan kondisi ruang uji ke keadaan awal (*baseline*) sebelum dilakukan pengujian berikutnya. Tanpa proses pembersihan udara yang baik, sisa gas VOC dapat mempengaruhi hasil pembacaan sensor pada pengujian selanjutnya. Dengan demikian, penggunaan *fan* membantu meningkatkan akurasi dan konsistensi data dalam sistem monitoring VOC.

2.2.10 Switch

Switch atau saklar merupakan komponen listrik yang digunakan untuk menghubungkan atau memutus aliran arus listrik dalam suatu rangkaian. Dalam sistem ini, *switch* digunakan sebagai pengendali utama untuk menyalakan dan mematikan sistem secara manual. Dengan adanya *switch*, pengguna dapat mengontrol kapan sistem mulai bekerja dan kapan sistem dihentikan tanpa harus melepas sumber daya secara langsung.



Gambar 2. 8 Switch

Selain sebagai pengendali daya utama, switch juga berperan dalam meningkatkan keamanan dan efisiensi penggunaan sistem. Penggunaan saklar memungkinkan sistem dimatikan saat tidak digunakan, sehingga dapat menghemat energi baterai dan memperpanjang umur komponen. Dengan demikian, penambahan switch memberikan kemudahan dalam pengoperasian serta mendukung penggunaan sistem yang lebih praktis dan aman.

2.2.11 Relay

Relay 5 Volt merupakan komponen elektromekanik yang berfungsi sebagai saklar elektronik yang dikendalikan oleh sinyal listrik bertegangan rendah. Relay memungkinkan mikrokontroler, seperti ESP32, untuk mengendalikan perangkat yang membutuhkan arus atau tegangan lebih besar tanpa menghubungkan beban tersebut secara langsung ke pin keluaran mikrokontroler. Dengan demikian, relay berfungsi sebagai isolator antara rangkaian kontrol dan rangkaian beban sehingga meningkatkan keamanan serta keandalan sistem.



Gambar 2. 9 Relay

Pada penelitian ini, relay 5 Volt digunakan sebagai aktuator untuk mengendalikan fan pembuangan udara pada ruang uji (chamber). Setelah proses pembacaan data Volatile Organic Compounds (VOC) selesai, ESP32 akan

memberikan sinyal logika ke modul relay sehingga kontak relay berubah dari kondisi Normally Open (NO) menjadi tertutup. Kondisi ini menyebabkan fan memperoleh suplai tegangan dan mulai beroperasi untuk mengeluarkan udara yang mengandung VOC dari dalam chamber. Setelah waktu pembuangan udara selesai, ESP32 memutus sinyal kendali sehingga relay kembali ke kondisi semula dan fan berhenti beroperasi.