

## BAB II LANDASAN TEORI

### 2.1 Tinjauan Pustaka

Transformator merupakan salah satu perangkat penting dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi menyalurkan energi dari satu tingkat tegangan ke tingkat tegangan lain. Keandalan transformator sangat bergantung pada kondisi isolasi minyak yang ada di dalamnya. Apabila minyak transformator terkontaminasi oleh uap air, maka kemampuan isolasinya akan menurun drastis, sehingga berisiko menimbulkan gangguan dan kerusakan[3]. Transformator harus dipelihara dengan menggunakan sistem dan peralatan yang benar, baik, dan tepat. Untuk itu tenaga operasi pemeliharaan harus mengetahui bagian-bagian transformator dan bagian-bagian mana saja yang perlu diawasi melebihi bagian lainnya [4]. Transformator tenaga merupakan bagian terpenting dalam sistem energi listrik dari sistem penyaluran menuju sistem distribusi. Di dalam transformator terdapat bagian penting yaitu *dehydrating breather* [2]. *Dehydrating breather* adalah tabung berisikan *silica gel* yang berfungsi sebagai alat pernafasan transformator tenaga. *Silica gel* di dalam *dehydrating breather* berfungsi sebagai penyerap kelembaban udara yang masuk ke dalam transformator, kelembaban ini dapat menyebabkan turunnya nilai isolasi pada oli yang terdapat di dalam transformator[2]. pemeliharaan *dehydrating breather* dengan cara mengganti *silica gel* yang sudah jenuh dengan *silica gel* yang baru pada periode tertentu. *Silica gel* pernafasan di dalam *dehydrating breather* berfungsi sebagai penyerap kelembaban udara yang masuk ke dalam transformator, kelembaban ini dapat menyebabkan turunnya nilai isolasi pada oli yang di dalam transformator tenaga[2]. *Silica gel* yang digunakan pada *breather* memiliki keterbatasan daya serap. Seiring waktu, butiran *silica gel* akan jenuh akibat menyerap uap air dan mengalami perubahan warna. Permasalahan yang muncul di lapangan adalah proses regenerasi *silica gel* pada *dehydrating breather* masih dilakukan secara manual [4]. *Silica gel* merupakan material desikan yang digunakan dalam *dehydrating breather* untuk menyerap kandungan uap air dari udara yang masuk ke transformator. *Silica gel* memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi karena memiliki struktur pori-pori yang luas. Pada

kondisi kering, *silica gel* indikator umumnya berwarna biru tua, sedangkan ketika telah jenuh oleh uap air warnanya berubah menjadi merah muda atau putih. Perubahan warna tersebut digunakan sebagai indikator visual tingkat kejenuhan *silica gel*. Ketika *silica gel* telah jenuh, kemampuan adsorpsinya akan menurun sehingga diperlukan proses regenerasi atau penggantian untuk mengembalikan fungsinya sebagai penyerap kelembapan[3]. Regenerasi *silica gel* merupakan proses pengembalian kemampuan adsorpsi *silica gel* yang telah jenuh dengan cara memanaskannya pada suhu tertentu sehingga kandungan air yang terserap dapat diuapkan kembali.

Pada sistem konvensional, regenerasi dilakukan secara manual dengan melepas *silica gel* dari *breather* dan memanaskannya menggunakan oven tanpa adanya monitoring. Metode ini membutuhkan waktu dan tenaga yang cukup besar. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa proses regenerasi dapat dilakukan secara otomatis menggunakan sensor warna, sensor suhu dan kelembapan, mikrokontroler, serta *heater* yang dikendalikan secara elektronik. Sistem regenerasi otomatis mampu meningkatkan efisiensi regenerasi manual tanpa adanya monitoring serta mengurangi kerusakan *silica* akibat tidak terukurnya pemanasan.

*Internet of Things* (IoT) merupakan konsep yang memungkinkan berbagai perangkat elektronik saling terhubung melalui jaringan internet untuk melakukan pertukaran data secara otomatis. Teknologi IoT banyak diterapkan dalam sistem monitoring dan kontrol karena memungkinkan pengguna memperoleh informasi secara *real-time* dari lokasi yang berbeda. Dengan adanya IoT, proses pemantauan kondisi peralatan dapat dilakukan secara lebih efektif dan efisien tanpa memerlukan kehadiran pemantauan secara langsung. ESP32 merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan dalam aplikasi IoT karena telah dilengkapi dengan modul Wi-Fi dan *Bluetooth* terintegrasi. ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan data yang tinggi, konsumsi daya yang relatif rendah, serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi untuk sensor dan aktuator.

Dalam sistem regenerasi otomatis *silica gel*, ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendali yang menerima data dari sensor warna dan sensor kelembapan,

kemudian mengolah data tersebut untuk mengendalikan *heater* serta mengirimkan informasi ke *platform* monitoring berbasis internet[5]. Sensor warna TCS3200 merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi perubahan warna pada *silica gel*. Sensor ini bekerja dengan membaca intensitas warna merah (*Red*), hijau (*Green*), dan biru (*Blue*) yang dipantulkan oleh objek. Dalam sistem regenerasi *silica gel*, sensor TCS3200 digunakan untuk menentukan kondisi *silica gel* apakah masih dalam keadaan baik atau sudah jenuh. Nilai RGB hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan nilai referensi yang telah dikalibrasi sebelumnya sehingga sistem dapat mengambil keputusan secara otomatis terkait proses regenerasi[2].

Blynk merupakan *platform* IoT yang memungkinkan pengguna melakukan monitoring dan pengendalian perangkat elektronik melalui *smartphone* atau web *dashboard*. Platform ini menyediakan tampilan data secara *real-time*, penyimpanan data historis, serta fitur notifikasi yang memudahkan pengguna dalam memantau kondisi sistem dari jarak jauh. Pada penelitian regenerasi *silica gel* otomatis, Blynk digunakan untuk menampilkan data suhu, kelembapan, status *silica gel*, dan status *heater* yang dikirimkan oleh ESP32 melalui jaringan internet[4].

## 2.2 Dasar Teori

Dasar teori ini memuat uraian teori-teori yang berkaitan dan mendukung topik Tugas Akhir yang dibahas.

### 2.2.1 Transformator



Gambar 2.1 Transformator

Pada Gambar 2.1 merupakan Transformator. Transformator merupakan

peralatan statis untuk memindahkan energi listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya dengan mengubah tegangan tanpa merubah frekuensi. Transformator disebut peralatan statis karena tidak ada bagian yang bergerak atau berputar, tidak seperti motor atau generator. Pengubahan tegangan dilakukan dengan memanfaatkan prinsip induktansi elektromagnetik pada lilitan. Fenomena induktansi elektromagnetik yang terjadi dalam satu waktu pada transformator adalah induktansi sendiri pada masing masing lilitan diikuti oleh induktansi bersama yang terjadi antar lilitan.

Transformator tenaga tersusun atas beberapa bagian utama, yaitu inti besi, kumparan primer dan sekunder, minyak isolasi, sistem pendingin, bushing, tap changer, serta tangki utama. Selain itu, transformator juga dilengkapi peralatan pendukung seperti conservator tank, Buchholz relay, dan *dehydrating breather*.

Secara umum, transformator terdiri dari dua kumparan atau lebih yang dililitkan pada inti besi. Ketika kumparan primer diberi tegangan AC, maka akan timbul fluks magnet pada inti besi yang kemudian menginduksi tegangan pada kumparan sekunder.

Rumus dasar transformator:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Keterangan:

- $V_1$  = Tegangan primer
- $V_2$  = Tegangan sekunder
- $N_1$  = Jumlah lilitan primer
- $N_2$  = Jumlah lilitan sekunder

### 2.2.2 Dehydrating *Breather* pada Transformator



Gambar 2.2 Dehydrating Breather

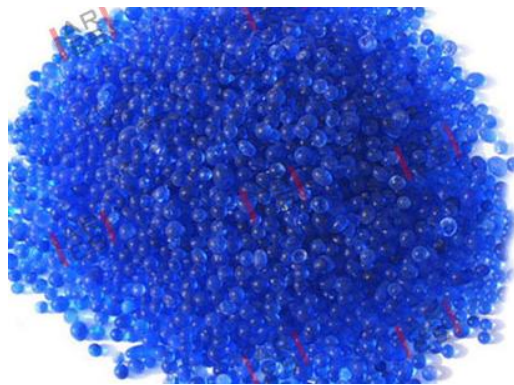
*Dehydrating Breather* merupakan salah satu komponen penting pada transformator daya yang berfungsi sebagai sistem penyaring udara sebelum masuk ke dalam tangki transformator. Transformator yang menggunakan konservator akan mengalami perubahan volume minyak isolasi akibat perubahan suhu selama proses operasi. Ketika suhu transformator meningkat, minyak isolasi akan memuai sehingga udara di dalam konservator terdorong keluar. Sebaliknya, ketika suhu menurun, volume minyak menyusut dan udara dari luar akan masuk kembali ke dalam konservator. Proses keluar-masuknya udara ini dikenal sebagai *breathing process* atau proses pernapasan transformator.

Udara atmosfer secara alami mengandung uap air, debu, dan partikel lain yang dapat menurunkan kualitas minyak isolasi apabila masuk ke dalam tangki transformator. Kandungan air yang bercampur dengan minyak isolasi dapat menyebabkan penurunan kekuatan dielektrik minyak, mempercepat proses oksidasi, meningkatkan pembentukan lumpur (*sludge*), serta mempercepat penuaan kertas isolasi pada lilitan transformator. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem yang mampu menyaring udara sebelum masuk ke dalam transformator, yaitu *Dehydrating Breather*.

*Silica gel* yang digunakan pada *dehydrating breather* umumnya merupakan *silica gel* indikator yang memiliki kemampuan berubah warna sesuai tingkat kejenuhannya. Dalam kondisi kering, *silica gel* berwarna biru (atau oranye pada jenis yang lebih ramah lingkungan). Setelah menyerap uap air dalam jumlah tertentu, warna *silica gel* akan berubah menjadi merah muda (pink) atau hijau,

tergantung jenis indikator yang digunakan. Perubahan warna ini menjadi indikator visual bahwa kemampuan adsorpsi *silica gel* telah menurun dan perlu dilakukan regenerasi atau penggantian agar fungsi *dehydrating breather* tetap optimal. Pada praktik di lapangan, pemeriksaan kondisi *silica gel* masih banyak dilakukan secara manual melalui inspeksi visual oleh petugas pemeliharaan. Metode ini memiliki beberapa kelemahan, antara lain membutuhkan inspeksi berkala, bergantung pada ketelitian operator, serta berpotensi menyebabkan keterlambatan dalam mengetahui kondisi *silica gel* yang telah jenuh. Jika *silica gel* yang jenuh tidak segera diregenerasi atau diganti, udara lembap dapat langsung masuk ke dalam tangki transformator sehingga meningkatkan kadar air pada minyak isolasi. Kondisi tersebut dapat mengurangi kemampuan isolasi minyak, meningkatkan risiko terjadinya pelepasan muatan sebagian (*partical discharge*), bahkan berpotensi menyebabkan gangguan atau kerusakan pada transformator.

### 2.2.3 Silica gel



Gambar 2. 3 *Silica gel*

Gambar 2.2 merupakan gambar *silica gel*. *Silica gel* merupakan material berpori yang tersusun dari silikon dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) dan memiliki kemampuan tinggi dalam menyerap uap air melalui proses adsorpsi. Material ini banyak digunakan sebagai desikan pada berbagai peralatan industri, termasuk transformator daya, karena mampu menjaga kelembapan udara tetap rendah. Pada transformator, *silica gel* ditempatkan di dalam *dehydrating breather* untuk menyerap uap air dari udara yang masuk ke tangki konservator sehingga kualitas minyak isolasi tetap terjaga[3]. *Silica gel* yang digunakan pada *breather* transformator umumnya merupakan *silica gel* indikator, yaitu *silica gel* yang mengalami perubahan warna sesuai tingkat

kejenuhannya. Dalam kondisi kering, *silica gel* berwarna biru, sedangkan setelah menyerap uap air akan berubah menjadi merah muda dan ungu. Perubahan warna tersebut menjadi indikator bahwa kemampuan adsorpsi *silica gel* telah menurun sehingga perlu dilakukan regenerasi atau penggantian. Jika *silica gel* yang jenuh tidak segera ditangani, uap air dapat masuk ke dalam transformator dan menyebabkan penurunan kekuatan dielektrik minyak isolasi serta mempercepat proses penuaan isolasi transformator. Pada umumnya, kondisi *silica gel* masih diperiksa secara visual oleh petugas pemeliharaan. Metode ini dinilai kurang efektif karena bergantung pada jadwal inspeksi dan ketelitian operator. Oleh karena itu, penelitian terbaru mengembangkan sistem monitoring otomatis menggunakan sensor warna yang mampu mendeteksi perubahan warna *silica gel* secara *real-time*. *Silica gel* yang telah jenuh masih dapat digunakan kembali melalui proses regenerasi, yaitu dengan memanaskannya pada suhu sekitar 100–150°C hingga kandungan air yang terserap menguap[6]. Setelah proses regenerasi selesai, warna *silica gel* akan kembali seperti semula dan kemampuan menyerap kelembapan dapat dipulihkan.

Pada penelitian ini, perubahan warna *silica gel* dideteksi menggunakan sensor TCS3200. Sensor TCS3200 memiliki susunan fotodioda yang digunakan untuk mendeteksi komponen warna *Red* (R), *Green* (G), dan *Blue* (B). Sensor menghasilkan sinyal keluaran berupa frekuensi yang kemudian dibaca dan diolah oleh ESP32. Nilai hasil pembacaan tersebut digunakan sebagai parameter untuk membedakan kondisi *silica gel* berdasarkan karakteristik warna yang telah diperoleh melalui proses kalibrasi. Dengan demikian, TCS3200 tidak hanya digunakan untuk mengetahui warna secara visual, tetapi digunakan sebagai sensor yang memberikan data kuantitatif kepada ESP32 untuk menentukan kondisi *silica gel* secara otomatis.

Proses penentuan nilai acuan dilakukan dengan menggunakan dua kondisi *silica gel*, yaitu *silica gel* berwarna ungu sebagai kondisi basah atau jenuh dan *silica gel* berwarna biru sebagai kondisi kering. Sensor TCS3200 diarahkan pada permukaan *silica gel* untuk memperoleh pembacaan tiga kanal warna, yaitu R, G, dan B. Pengujian dilakukan sebanyak 10 kali untuk masing-masing kondisi agar

diperoleh beberapa data pembacaan yang dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik sensor pada kondisi basah dan kering. Dari pengujian didapat nilai maksimum dan minum dari masing – masing RGB *silica gel* ungu dan biru. Hasil pembacaan TCS3200 pada sistem dapat menghasilkan nilai pada rentang ratusan hingga ribuan. Nilai tersebut merupakan hasil pembacaan sinyal keluaran sensor yang telah diproses oleh ESP32 dan bukan secara langsung merupakan nilai RGB standar 8-bit 0–255.

Untuk menyajikan hasil pembacaan dalam bentuk nilai RGB 8-bit, nilai keluaran sensor dapat dinormalisasi ke dalam rentang 0–255. Proses normalisasi dilakukan dengan menentukan nilai minimum dan maksimum hasil pembacaan dari proses kalibrasi. Secara umum, apabila hubungan antara nilai pembacaan sensor dan intensitas warna bersifat berbanding lurus, rumus normalisasi dapat dituliskan sebagai:

$$C_{8bit} = 255 \frac{C_{raw} - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (2.1)[7]$$

Proses konversi dilakukan secara terpisah untuk masing-masing kanal warna, sehingga diperoleh nilai:

$$R_{8bit} = 255 \frac{R_{raw} - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} \quad (2.2)[7]$$

$$G_{8bit} = 255 \frac{G_{raw} - G_{min}}{G_{max} - G_{min}}$$

$$B_{8bit} = 255 \frac{B_{raw} - B_{min}}{B_{max} - B_{min}}$$

Nilai  $R_{8bit}$ ,  $G_{8bit}$ , dan  $B_{8bit}$  tersebut kemudian dapat digunakan sebagai representasi warna dalam format RGB 8-bit. Nilai minimum dan maksimum pada persamaan harus diperoleh dari hasil kalibrasi sensor yang digunakan pada penelitian, sehingga tidak dapat ditentukan secara sembarang. Hal ini penting karena hasil pembacaan TCS3200 dapat dipengaruhi oleh kondisi pencahayaan, jarak sensor terhadap objek, posisi *silica gel*, serta karakteristik sensor.

Setelah nilai hasil pembacaan diperoleh, masing-masing kanal R, G, dan B dibandingkan dengan batas nilai hasil kalibrasi untuk menentukan kondisi *silica gel*. Berdasarkan hasil kalibrasi pada penelitian ini, kondisi ungu (basah) ditentukan apabila nilai R berada pada rentang 75–125, nilai G berada pada rentang 90–125, dan nilai B berada pada rentang 60–90. Sementara itu, kondisi biru (kering) ditentukan apabila nilai R berada pada rentang 130–200, nilai G berada pada rentang 130–200, dan nilai B berada pada rentang 80–120. Apabila hasil pembacaan tidak memenuhi salah satu dari rentang klasifikasi tersebut, sistem memberikan status “Tidak Terdeteksi”.

#### 2.2.4 Regenerasi *Silica gel*

Regenerasi *silica gel* merupakan proses pemulihan kembali kemampuan adsorpsi *silica gel* yang telah jenuh oleh uap air melalui proses pemanasan. Pada transformator daya, *silica gel* digunakan sebagai media pengering pada *dehydrating breather* untuk menyerap kelembapan udara yang masuk ke dalam tangki konservator. Udara yang masuk ke dalam transformator berpotensi membawa uap air, sedangkan keberadaan air dalam minyak transformator dapat menurunkan kekuatan dielektrik, mempercepat degradasi isolasi, dan menurunkan keandalan operasi transformator. Oleh karena itu, kondisi *silica gel* harus selalu dijaga agar tetap mampu menyerap uap air secara optimal. Ketika *silica gel* telah jenuh, kemampuannya dalam mengadsorpsi air akan menurun sehingga diperlukan proses regenerasi agar media tersebut dapat digunakan kembali[4].

Secara umum, *silica gel* bekerja berdasarkan prinsip adsorpsi, yaitu penyerapan molekul air pada permukaan dan pori-pori material *silica gel*. Material ini memiliki struktur berpori dengan luas permukaan yang besar, sehingga mampu mengikat uap air dari udara di sekitarnya. Namun, setelah digunakan dalam waktu tertentu, pori-pori *silica gel* akan terisi oleh molekul air hingga mencapai kondisi jenuh. Pada *silica gel* indikator, kejenuhan ini ditandai oleh perubahan warna, misalnya dari biru menjadi merah muda atau dari oranye menjadi hijau, tergantung jenis indikator yang digunakan. Perubahan warna ini sangat penting dalam sistem otomatis karena dapat dijadikan parameter untuk mendeteksi kondisi *silica gel* secara elektronik menggunakan sensor warna[8].

Regenerasi *silica gel* dilakukan dengan memberikan panas pada media yang telah jenuh agar molekul air yang teradsorpsi dapat terlepas kembali dari pori-pori *silica gel*. Ketika suhu meningkat, energi kinetik molekul air juga meningkat sehingga ikatan fisik antara molekul air dan permukaan *silica gel* menjadi lemah. Akibatnya, air yang semula terikat akan terdesorpsi dan menguap ke lingkungan. Setelah kandungan air di dalam *silica gel* berkurang, pori-pori material akan kembali terbuka dan *silica gel* dapat digunakan kembali untuk menyerap kelembapan udara. Dengan demikian, regenerasi merupakan proses desorpsi termal yang bertujuan mengembalikan kondisi *silica gel* mendekati keadaan awal.

Pada metode konvensional, regenerasi *silica gel* biasanya dilakukan secara manual. Operator harus memeriksa perubahan warna *silica gel* secara visual, melepas *silica gel* dari *breather*, kemudian mengeringkannya menggunakan oven atau pemanas eksternal. Cara ini cukup sederhana, tetapi memiliki beberapa kekurangan, yaitu membutuhkan waktu, tenaga kerja, dan ketelitian operator. Selain itu, apabila operator terlambat mengetahui bahwa *silica gel* telah jenuh, maka udara lembap dapat terlanjur masuk ke dalam transformator dan menurunkan kualitas minyak isolasi.

#### 2.2.5 Sistem ON/OFF dan Otomatisasi

Sistem ON/OFF merupakan metode pengendalian sederhana yang bekerja dengan dua kondisi keluaran, yaitu menyala (ON) dan mati (OFF). Prinsip kerjanya adalah membandingkan data dari sensor dengan nilai batas (*set point*) yang telah ditentukan. Jika kondisi terpenuhi, aktuator akan diaktifkan, sedangkan jika kondisi penghentian tercapai maka aktuator dimatikan. Metode ini banyak digunakan pada sistem pemanas, pendingin, dan perangkat otomatis karena mudah diterapkan serta cukup efektif untuk proses yang tidak memerlukan pengaturan daya bertingkat.

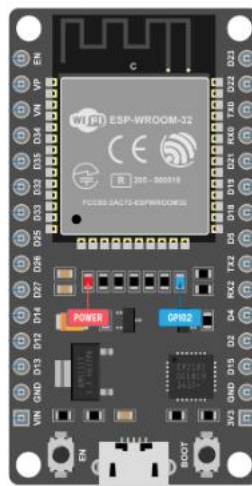
Pada penelitian ini, sistem ON/OFF digunakan untuk mengendalikan proses regenerasi *silica gel* pada dehydrating *breather* transformator. *Silica gel* yang jenuh ditandai oleh perubahan warna, sehingga kondisi tersebut dideteksi menggunakan sensor warna TCS3200. Ketika sensor mendeteksi *silica gel* dalam kondisi jenuh, ESP32 akan mengaktifkan relay sehingga *heater* menyala untuk memanaskan *silica gel*. Proses pemanasan ini bertujuan menguapkan kandungan air yang terserap

agar *silica gel* dapat digunakan kembali.

Selama proses regenerasi berlangsung, suhu dipantau oleh sensor *thermocouple*. Sensor ini berfungsi untuk memastikan suhu pemanasan berada pada batas yang aman dan sesuai kebutuhan regenerasi. Jika suhu telah mencapai nilai set point atau warna *silica gel* telah kembali menunjukkan kondisi kering, maka ESP32 akan mematikan relay sehingga *heater* berhenti bekerja. Dengan demikian, sistem ON/OFF pada penelitian ini bekerja secara otomatis berdasarkan kondisi warna *silica gel* dan suhu regenerasi.

Penerapan sistem otomatis ON/OFF pada penelitian ini memiliki beberapa keunggulan, yaitu sederhana, mudah diimplementasikan, dan mampu mengurangi ketergantungan pada pemeriksaan visual manual. Selain itu, penggunaan TCS3200 dan *Thermocouple* secara bersamaan membuat proses regenerasi lebih terkontrol, karena keputusan menyalakan *heater* didasarkan pada kejenuhan *silica gel*, sedangkan keputusan memamatkannya mempertimbangkan suhu pemanasan. Dengan sistem ini, proses regenerasi *silica gel* dapat berlangsung lebih efektif, efisien, dan mendukung pemeliharaan transformator secara otomatis.

#### 2.2.6 ESP32

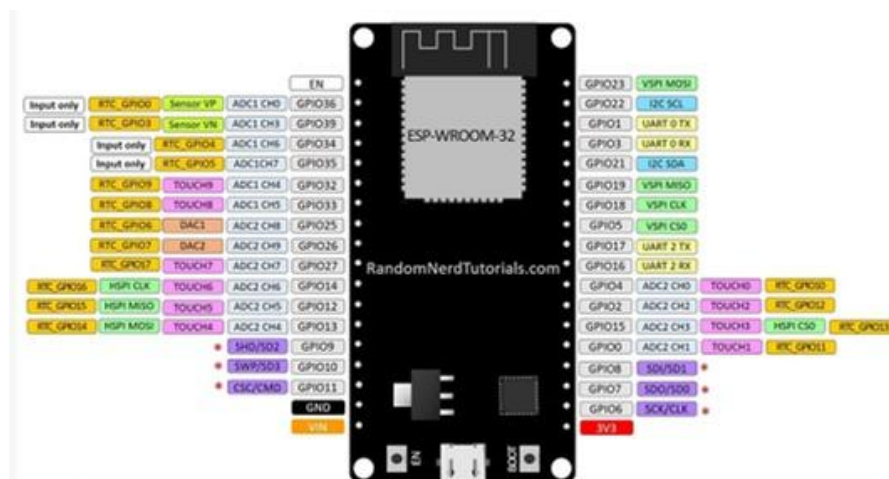


Gambar 2.4 ESP32

Gamabar 2.3 merupakan gambaer ESP32. ESP32 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan oleh *Espressif Systems* dan banyak digunakan

pada sistem embedded serta *Internet of Things* (IoT). ESP32 memiliki keunggulan berupa Wi-Fi dan *Bluetooth* terintegrasi, kecepatan pemrosesan yang tinggi, konsumsi daya relatif rendah, serta jumlah pin input/output yang cukup banyak untuk menghubungkan berbagai sensor dan aktuator. Dengan kemampuan tersebut, ESP32 sangat sesuai digunakan pada sistem otomatis yang membutuhkan pembacaan sensor, pengolahan data, pengendalian aktuator, dan pengiriman data monitoring secara *real-time* melalui internet.

Pada penelitian ini, ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali sistem regenerasi otomatis *silica gel*. Mikrokontroler ini menerima data dari sensor warna TCS3200 untuk mendeteksi perubahan warna *silica gel* dan dari sensor suhu *Thermocouple* untuk memantau suhu selama proses regenerasi. Data tersebut kemudian diolah oleh ESP32 untuk menentukan kondisi kerja sistem, yaitu kapan relay harus diaktifkan untuk menyalakan *heater* dan kapan *heater* harus dimatikan kembali. Selain itu, ESP32 juga mengirimkan data suhu, status *silica gel*, dan status *heater* ke aplikasi Blynk sehingga proses monitoring dapat dilakukan dari jarak jauh.

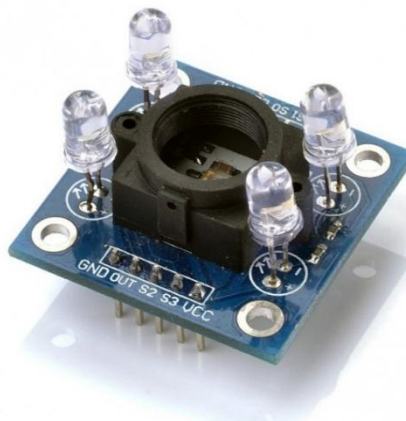


Gambar 2.5 Pinout ESP32[9]

Gambar 2.4 merupakan pinout ESP32. Penggunaan ESP32 pada penelitian ini dipilih karena kemampuannya mendukung otomatisasi dan monitoring IoT dalam satu perangkat. Dengan koneksi Wi-Fi bawaan, ESP32 dapat menghubungkan alat ke *platform* monitoring tanpa memerlukan modul tambahan. Hal ini membuat sistem lebih ringkas, efisien, dan mudah diintegrasikan dengan

sensor maupun aktuator lain. Pada sistem regenerasi *silica gel*, ESP32 tidak hanya berfungsi sebagai pembaca data sensor, tetapi juga sebagai pengambil keputusan berdasarkan logika ON/OFF otomatis. Ketika *silica gel* terdeteksi jenuh, ESP32 mengaktifkan *heater* melalui relay, dan ketika suhu telah mencapai batas regenerasi atau *silica gel* kembali kering, ESP32 mematikan *heater* secara otomatis. Dengan demikian, ESP32 menjadi komponen utama yang menentukan kinerja keseluruhan alat.

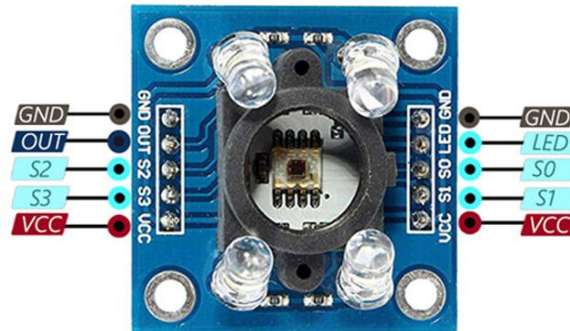
### 2.2.7 Sensor Warna TCS3200



Gambar 2.6 Sensor Warna TCS3200

Gambar 2.5 merupakan sensor warna TCS3200 . Sensor warna TCS3200 merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi warna suatu objek berdasarkan intensitas cahaya merah (*Red*), hijau (*Green*), dan biru (*Blue*) atau RGB. Sensor ini bekerja dengan mengubah intensitas cahaya yang dipantulkan oleh objek menjadi sinyal frekuensi yang kemudian diproses oleh mikrokontroler. TCS3200 memiliki array fotodiode yang dilengkapi filter warna merah, hijau, biru, dan tanpa filter, sehingga mampu membedakan warna objek berdasarkan komposisi cahaya yang diterima. Nilai keluaran sensor berupa frekuensi ini selanjutnya diolah untuk menentukan karakteristik warna dari objek yang diamati [4]. Pada penelitian ini, sensor TCS3200 digunakan untuk mendeteksi perubahan warna *silica gel* pada *dehydrating breather* transformator. *Silica gel* indikator akan mengalami perubahan warna ketika menyerap kelembapan udara, sehingga perubahan tersebut dapat digunakan sebagai penanda kondisi *silica gel*, apakah masih kering atau sudah jenuh. Sensor TCS3200 membaca warna *silica gel* secara langsung,

kemudian data hasil pembacaan dikirim ke ESP32 untuk diproses. Jika warna *silica gel* menunjukkan kondisi jenuh, maka sistem akan mengaktifkan proses regenerasi secara otomatis dengan menyalakan *heater* melalui relay.



Gambar 2.7 Pinout TCS3200

Pada Gambar 2.6 merupakan Pinout TCS3200. Sensor TCS3200 memiliki beberapa pin utama, yaitu VCC dan GND sebagai catu daya, OUT sebagai keluaran sinyal frekuensi yang dibaca oleh ESP32, S2 dan S3 untuk memilih filter warna yang akan dideteksi, serta S0 dan S1 untuk mengatur skala frekuensi keluaran sensor. Selain itu, pin LED digunakan untuk mengatur LED sebagai sumber pencahayaan pada objek yang dideteksi. Pada sistem ini, keluaran TCS3200 digunakan untuk mendeteksi perubahan warna *silica gel* sebagai indikator kondisi basah (ungu) dan kering (biru).

Tabel 2.1 Konfigurasi Pin Sensor Warna TCS3200

| No. | Pin | Fungsi                   |
|-----|-----|--------------------------|
| 1   | GND | Ground                   |
| 2   | OUT | Output                   |
| 3   | S2  | Pemilih filter warna     |
| 4   | S3  | Pemilih filter warna     |
| 5   | VCC | Catu daya                |
| 6   | LED | Pengendali LED           |
| 7   | S0  | Pengatur skala frekuensi |

|   |    |                          |
|---|----|--------------------------|
| 8 | S1 | Pengatur skala frekuensi |
|---|----|--------------------------|

Tabel 2.2 Spesifikasi Sensor TCS3200[10]

| No  | Parameter           | Nilai                                               |
|-----|---------------------|-----------------------------------------------------|
| 1.  | Nama Modul          | TCS3200 Color Sensor                                |
| 2.  | IC sensor           | TCS3200                                             |
| 3.  | Tegangan Operasi    | 2,7 – 5,5 V DC                                      |
| 4.  | Tegangan kerja umum | 5 V DC                                              |
| 5.  | Arus Oprasi         | Maksimum 20 mA                                      |
| 6.  | Jenis Sensor        | Sensor warna RGB                                    |
| 7.  | Metode deteksi      | Fotodioda dengan filter Red, Green, Blue, dan Clear |
| 8.  | Jumlah fotodioda    | 64 fotodioda (16 merah, 16 hijau, 16 biru, 16 clear |
| 9.  | Keluaran sensor     | Frekuensi digital (Square Wave)                     |
| 10. | Frekuensi output    | 2%, 20%, dan 100% (dapat dipilih)                   |
| 11. | Komunikasi          | Output frekuensi digital                            |
| 12. | Pin kontrol         | S0, S1, S2, S3, OUT, OE                             |
| 13. | Suhu operasi        | -40°C hingga +85°C                                  |
| 14. | Dimensi modul       | $\pm 31 \times 25$ mm                               |

### 2.2.8 Thermocouple



Gambar 2.8 Thermocouple type k

Gambar 2.6 merupakan *thermocouple type k*. *Thermocouple type K* adalah sensor suhu yang bekerja berdasarkan efek Seebeck, yaitu munculnya tegangan listrik kecil akibat perbedaan suhu antara dua logam berbeda yang disambungkan. *Thernocouple type - k* menggunakan kombinasi logam Chromel (Ni-Cr) sebagai kutub positif dan Alumel (Ni-Al) sebagai kutub negatif. Sensor ini banyak

digunakan pada aplikasi industri karena memiliki rentang pengukuran yang luas, respon yang cepat, serta ketahanan terhadap suhu tinggi.

*Thermocouple Type K* merupakan salah satu sensor suhu yang paling banyak digunakan pada aplikasi industri karena memiliki rentang pengukuran yang sangat luas, yaitu sekitar  $-40^{\circ}\text{C}$  hingga  $350^{\circ}\text{C}$ [11], serta memiliki ketahanan yang baik terhadap suhu tinggi, getaran, dan lingkungan yang keras. Sensor ini juga memiliki waktu respons yang cepat sehingga mampu mendeteksi perubahan suhu secara real-time. Oleh karena itu, *Thermocouple Type K* banyak diaplikasikan pada sistem kontrol temperatur seperti oven industri, tungku pembakaran, boiler, sistem pemanas, hingga proses regenerasi *silica gel* pada dehydrating *breather* transformator.

Tabel 2.3 Spesifikasi *Thermocouple type k* [11]

| No  | Parameter               | Nilai                                               |
|-----|-------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1.  | Nama Sensor             | <i>Thermocouple Type K</i>                          |
| 2.  | Nomor Produk            | 803910 1211                                         |
| 3.  | Jenis Sensor            | Sensor suhu berbasis thermocouple                   |
| 4.  | Elemen Pengukuran       | <i>Thermocouple Type K</i> (NiCr–Ni/Chromel–Alumel) |
| 5.  | Prinsip Kerja           | Efek Seebeck (Thermovoltage)                        |
| 6.  | Rentang Pengukuran Suhu | $-40^{\circ}\text{C}$ hingga $+350^{\circ}\text{C}$ |
| 7.  | Rentang Suhu Kabel      | $-50^{\circ}\text{C}$ hingga $+350^{\circ}\text{C}$ |
| 8.  | Akurasi                 | $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ (DIN IEC 60584 Class 1)   |
| 9.  | Sinyal Keluaran         | <i>Thermovoltage</i> (tegangan termoelektrik)       |
| 10. | Titik Pengukuran        | <i>Welding point</i> (tidak diisolasi)              |
| 11. | Material Isolasi Kabel  | Glass Fibre                                         |
| 12. | Material Selubung Kabel | Glass Fibre                                         |
| 13. | Diameter Selubung       | 2,0 mm $\pm$ 0,2 mm                                 |
| 14. | Luas Penampang Kabel    | 0,2 mm <sup>2</sup>                                 |
| 15. | Resistansi Kabel        | 2 $\Omega$ /m                                       |
| 16. | Gaya Tarik Minimum      | $\geq 30$ N                                         |
| 17. | Kelas Proteksi          | IP20                                                |
| 18. | Standar                 | DIN IEC 60584 Class 1                               |
| 19. | Standar EMC             | DIN EN 61326-1:2013                                 |

| No  | Parameter              | Nilai                                         |
|-----|------------------------|-----------------------------------------------|
| 20. | Standar Lingkungan     | DIN EN IEC 63000:2019-05                      |
| 21. | Sertifikasi            | RoHS 2011/65/EU, EMC 2014/30/EU               |
| 22. | Panjang Kabel Tersedia | 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 10 m, 15 m, dan 20 m |

### 2.2.9 Modul MAX6675



Gambar 2.9 Modul MAX6675

Gambar 2.8 merupakan gambar modul MAX6675. Modul MAX6675 merupakan modul konverter suhu yang digunakan sebagai antarmuka antara *thermocouple type - k* dan mikrokontroler ESP32. Modul ini berfungsi mengubah sinyal tegangan kecil dari *thermocouple* menjadi data suhu digital yang dapat dibaca oleh ESP32 melalui komunikasi SPI (Serial Peripheral Interface). MAX6675 memiliki rentang pengukuran suhu sekitar 0–1024°C dengan resolusi 0,25°C, sehingga sesuai digunakan untuk memantau suhu tinggi pada proses regenerasi *silica gel*.

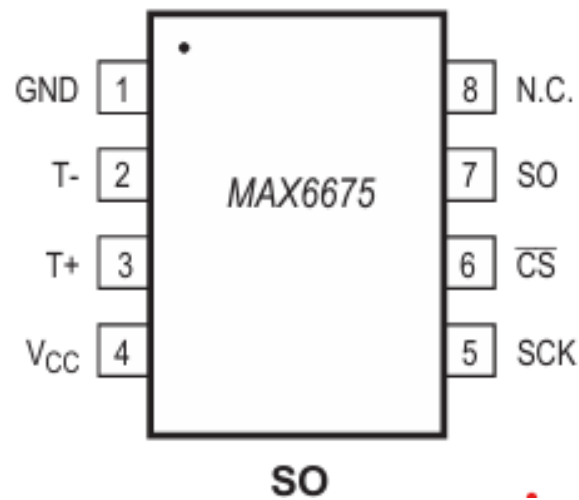
Pada sistem yang dirancang, *thermocouple type -* mendeteksi suhu di dalam ruang regenerasi, kemudian sinyal tersebut dibaca oleh MAX6675 dan dikirimkan ke ESP32. Data suhu digunakan sebagai parameter untuk mengendalikan *heater*

melalui SCR Dimmer dan relay. Selain itu, nilai suhu dikirimkan ke aplikasi Blynk sehingga proses regenerasi *silica gel* dapat dipantau secara *real-time*. Dengan demikian, MAX6675 berperan penting dalam memastikan suhu proses regenerasi dapat dipantau dan dikendalikan sesuai batas yang telah ditentukan.

Tabel 2.4 Spesifikasi Modul MAX6675[12]

| No. | Parameter                        | Spesifikasi                              |
|-----|----------------------------------|------------------------------------------|
| 1   | Jenis sensor                     | Konverter Thermocouple Tipe K ke digital |
| 2   | Jenis thermocouple               | Type K                                   |
| 3   | Resolusi                         | 0,25 °C                                  |
| 4   | Rentang pembacaan thermocouple   | 0 °C sampai +1023,75 °C                  |
| 5   | Rentang maksimum yang dinyatakan | Hingga +1024 °C                          |
| 6   | Resolusi data                    | 12-bit                                   |
| 7   | Antarmuka komunikasi             | SPI-compatible, read-only                |
| 8   | Tegangan suplai                  | 3,0–5,5 V                                |
| 9   | Arus suplai                      | 0,7–1,5 mA                               |
| 10  | Waktu konversi                   | 0,17–0,22 s                              |
| 11  | Kompensasi                       | Cold-Junction Compensation               |
| 12  | Deteksi thermocouple             | Open Thermocouple Detection              |
| 13  | Rentang suhu operasi IC          | –20 °C sampai +85 °C                     |
| 14  | Jumlah pin                       | 8 pin SO                                 |
| 15  | Impedansi input thermocouple     | 60 kΩ                                    |

Setelah menjelaskan spesifikasi Modul MAX6675 pada tabel sebelumnya, selanjutnya perlu dipahami pinout Modul MAX6675.



Gambar 2.10 Pinout Modul MAX6675

Gambar 2.9 merupakan pinout modul MAX6675 yang memperlihatkan tata letak fisik dan posisi setiap pin pada modul. Langkah berikutnya adalah menguraikan tabel pinout secara rinci. Tabel ini memuat informasi mengenai fungsi setiap pin, seperti GND, T<sup>-</sup>, T<sup>+</sup>, VCC, SCK, CS, SO, dan N.C., sehingga memudahkan dalam mengidentifikasi dan menghubungkan setiap pin sesuai kebutuhan sistem. Dengan adanya tabel pinout, pemahaman terhadap konfigurasi pin MAX6675 menjadi lebih sistematis dan terstruktur. Tabel pinout MAX6675 dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Konfigurasi Pinout Modul MAX6675[12]

| No. Pin | Nama Pin       | Fungsi                                                                                                                 |
|---------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | GND            | Ground atau referensi negatif rangkaian.                                                                               |
| 2       | T <sup>-</sup> | Input negatif thermocouple Type K (Alumel). Datasheet menyatakan pin ini perlu dihubungkan ke ground secara eksternal. |
| 3       | T <sup>+</sup> | Input positif thermocouple Type K (Chromel).                                                                           |
| 4       | VCC            | Tegangan suplai positif MAX6675, dengan kapasitor bypass 0,1 $\mu$ F ke GND.                                           |

| No. Pin | Nama Pin | Fungsi                                                            |
|---------|----------|-------------------------------------------------------------------|
| 5       | SCK      | Input Serial Clock untuk komunikasi dengan mikrokontroler.        |
| 6       | CS       | Chip Select; dibuat LOW untuk mengaktifkan antarmuka serial.      |
| 7       | SO       | Serial Data Output untuk mengirimkan data suhu ke mikrokontroler. |
| 8       | N.C.     | <i>No Connection</i> , tidak digunakan dan tidak dihubungkan.     |

Pada penelitian ini, modul MAX6675 digunakan sebagai pengolah sinyal dari sensor suhu *thermocouple type-k* untuk mengukur suhu selama proses regenerasi silica gel secara *real-time*. Sinyal yang dihasilkan oleh thermocouple type-k kemudian diproses oleh MAX6675 melalui proses konversi digital dengan resolusi 12-bit dan resolusi pengukuran sebesar 0,25°C, kemudian data suhu dikirimkan ke ESP32 melalui antarmuka komunikasi yang kompatibel dengan SPI[12]. Selain itu, nilai suhu yang diperoleh digunakan oleh ESP32 sebagai salah satu parameter dalam proses pengendalian regenerasi, serta ditampilkan pada LCD dan dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi ke Blynk dan Google *Spreadsheet* untuk monitoring secara *real-time*. Pengukuran suhu digunakan untuk memantau kondisi selama proses pemanasan sehingga sistem dapat mengendalikan *heater* sesuai kondisi yang telah ditentukan dan membantu menjaga proses regenerasi silica gel tetap terkontrol. MAX6675 juga dilengkapi dengan fitur *cold-junction compensation* dan *open thermocouple detection* yang mendukung proses pengukuran suhu menggunakan Thermocouple Type K[12].

### 2.2.10 Relay



Gambar 2.11 Relay

Gambar 2.10 merupakan Modul relay. Modul relay 1 channel 5V merupakan modul saklar elektronik yang digunakan untuk mengendalikan satu beban listrik menggunakan sinyal kontrol dari mikrokontroler. Modul ini bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik, yaitu ketika pin input relay menerima sinyal kontrol, kumparan (*coil*) relay akan menghasilkan medan magnet yang menggerakkan kontak saklar. Relay tipe Form C (SPDT) memiliki tiga terminal kontak, yaitu *Common* (COM), *Normally Open* (NO), dan *Normally Closed* (NC), sehingga dapat digunakan untuk menghubungkan atau memutuskan beban sesuai dengan kondisi sinyal kendali[13]. Modul relay juga dilengkapi dengan rangkaian penggerak (*driver*) yang membantu proses pengendalian relay menggunakan rangkaian elektronik bertegangan rendah. Berdasarkan datasheet, relay seri SRD memiliki kapasitas kontak hingga 10 A dengan beberapa variasi tegangan dan jenis beban.

Tabel 2.6 Spesifikasi Modul Relay[13]

| No. | Parameter             | Spesifikasi           |
|-----|-----------------------|-----------------------|
| 1   | Model                 | SRD-05VDC-SL-C        |
| 2   | Jenis relay           | Electromagnetic Relay |
| 3   | Tegangan koil nominal | 5 VDC                 |
| 4   | Arus koil nominal     | 71,4 mA               |

| No. | Parameter                        | Spesifikasi                       |
|-----|----------------------------------|-----------------------------------|
| 5   | Resistansi koil                  | $70\ \Omega \pm 10\%$             |
| 6   | Konsumsi daya koil               | $\pm 0,36\ \text{W}$              |
| 7   | Sensitivitas koil                | High Sensitivity                  |
| 8   | Bentuk kontak                    | Form C (SPDT)                     |
| 9   | Kapasitas kontak resistif        | 10 A, 250 VAC / 10 A, 30 VDC      |
| 10  | Tegangan maksimum yang diizinkan | 250 VAC / 110 VDC                 |
| 11  | Material kontak                  | AgCdO                             |
| 12  | Resistansi kontak                | 100 m $\Omega$ maksimum           |
| 13  | Waktu operasi                    | 10 ms maksimum                    |
| 14  | Waktu pelepasan                  | 5 ms maksimum                     |
| 15  | Kekuatan isolasi koil-kontak     | 1500 VAC, 50/60 Hz selama 1 menit |
| 16  | Resistansi isolasi               | 100 M $\Omega$ minimum (500 VDC)  |
| 17  | Suhu lingkungan operasi          | -40 °C sampai +85 °C              |
| 18  | Kelembapan operasi               | 45–85% RH                         |
| 19  | Umur mekanis                     | $10^7$ operasi minimum            |
| 20  | Umur listrik                     | $10^5$ operasi minimum            |
| 21  | Berat                            | $\pm 10$ gram                     |

Setelah menjelaskan spesifikasi Modul Relay pada tabel 2.6, selanjutnya perlu dipahami pinout Modul Relay pada gambar 2.11.



Gambar 2.12 Pinout Modul Relay

Gambar 2.11 merupakan pinout modul relay 1 channel SRD-05VDC-SL-C yang memperlihatkan tata letak fisik dan posisi setiap pin pada modul. Modul ini memiliki enam pin yang terbagi menjadi dua bagian, yaitu terminal kontak relay dan terminal kontrol. Terminal kontak relay terdiri dari NC (*Normally Closed*), C/COM (*Common*), dan NO (*Normally Open*), sedangkan terminal kontrol terdiri dari GND, 5V VCC, dan Signal. Langkah berikutnya adalah menguraikan fungsi setiap pin secara rinci agar memudahkan proses identifikasi dan pemasangan modul relay pada sistem. Dengan adanya tabel pinout, konfigurasi dan hubungan setiap pin dengan ESP32 dapat dipahami secara lebih sistematis dan terstruktur. Tabel pinout modul relay dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Pinout Modul Relay

| Pin | Nama                 | Fungsi                                                                         |
|-----|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | NC (Normally Closed) | Kontak yang terhubung dengan COM ketika relay dalam kondisi tidak aktif.       |
| 2   | C / COM (Common)     | Terminal utama atau terminal bersama yang menjadi penghubung antara NC dan NO. |
| 3   | NO (Normally Open)   | Kontak yang terhubung dengan COM ketika relay dalam kondisi aktif.             |
| 4   | GND                  | Ground atau negatif catu daya modul relay.                                     |
| 5   | 5V VCC               | Tegangan suplai untuk mengaktifkan rangkaian relay, yaitu 5 VDC.               |
| 6   | Signal               | Pin input sinyal kendali dari mikrokontroler,                                  |

| Pin | Nama | Fungsi        |
|-----|------|---------------|
|     |      | sepertiESP32. |

Pada sistem regenerasi otomatis *silica gel*, modul relay 1 channel digunakan sebagai penghubung antara ESP32 DevKit V1 dengan *heater* . Ketika sensor TCS3200 mendeteksi kondisi *silica gel* dalam keadaan basah atau jenuh, ESP32 akan memberikan sinyal kontrol kepada relay untuk mengaktifkan *heater* selama kondisi suhu masih berada dalam batas yang telah ditentukan. Ketika *silica gel* telah mencapai kondisi kering atau suhu mencapai batas keamanan sistem, ESP32 akan memberikan perintah untuk menonaktifkan relay sehingga aliran listrik menuju *heater* terputus. Dengan demikian, modul relay berperan sebagai saklar yang memungkinkan ESP32 mengendalikan beban *heater* yang memiliki daya lebih besar menggunakan sinyal kontrol dari sistem kendali. Karakteristik relay yang digunakan meliputi waktu operasi maksimum 10 ms, waktu pelepasan maksimum 5 ms, resistansi kontak maksimum 100 m $\Omega$ , serta rentang suhu operasi  $-40^{\circ}\text{C}$  hingga  $+85^{\circ}\text{C}$ [13].

#### 2.2.11 Heater



Gambar 2.13 Heater

Gambar 2.12 adalah *Heater* . *Heater* merupakan komponen pemanas yang

berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi panas melalui elemen resistif. Saat arus listrik mengalir pada elemen pemanas, hambatan listrik akan menghasilkan panas sesuai prinsip efek Joule. Dalam sistem elektronika dan otomasi, *heater* banyak digunakan untuk proses pengeringan, pemanasan, maupun menjaga suhu pada nilai tertentu. Besarnya panas yang dihasilkan *heater* dipengaruhi oleh tegangan sumber, nilai hambatan elemen, serta lama waktu pemanasan.

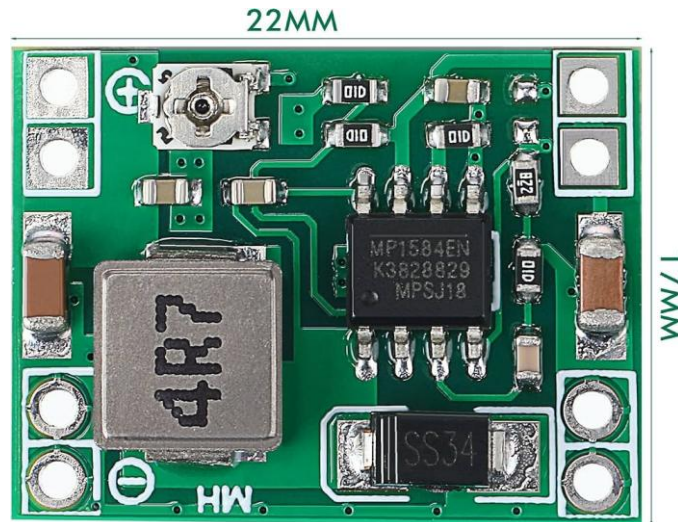
Tabel 2.8 Spesifikasi *Heater*

| No. | Parameter            | Spesifikasi                                                                               |
|-----|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Jenis                | <i>Heater</i> celup ( <i>immersion heater</i> )                                           |
| 2   | Fungsi               | Menghasilkan panas untuk proses regenerasi <i>silica gel</i>                              |
| 3   | Elemen pemanas       | Kawat/elemen pemanas berbentuk spiral                                                     |
| 4   | Material elemen      | Logam tahan panas                                                                         |
| 5   | Bentuk               | Spiral                                                                                    |
| 6   | Jumlah lilitan       | $\pm 4$ lilitan                                                                           |
| 7   | Tegangan kerja       | 220 VAC                                                                                   |
| 8   | Daya                 | 350 W                                                                                     |
| 9   | Arus kerja           | $\pm 3,44$ A                                                                              |
| 10  | Sistem pengoperasian | Dikendalikan melalui relay dan AC dimmer                                                  |
| 11  | Media pemanasan      | Udara di dalam ruang regenerasi                                                           |
| 12  | Aplikasi             | Proses regenerasi <i>silica gel</i> pada sistem <i>dehydrating breather</i> transformator |

Pada sistem regenerasi otomatis *silica gel*, *heater* digunakan untuk memanaskan *silica gel* yang telah jenuh agar kandungan uap air yang terserap dapat menguap kembali. Proses pemanasan ini bertujuan mengembalikan kemampuan adsorpsi *silica gel* sehingga dapat digunakan kembali pada *dehydrating breather* transformator. Pengoperasian *heater* dikendalikan oleh relay dan ESP32

berdasarkan data suhu dari sensor *Thermocouple*, sehingga proses regenerasi dapat berlangsung secara otomatis, stabil, dan aman sesuai suhu yang telah ditentukan.

#### 2.2.12 Modul *Step Down* MP1584



Gambar 2.14 Modul *Step Down* MP1584

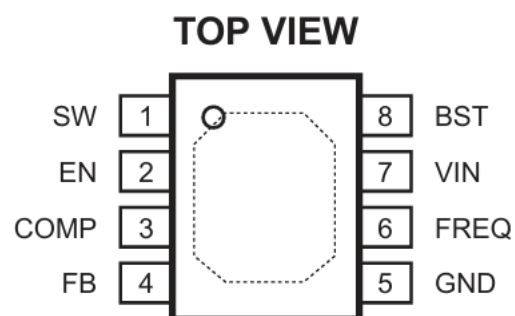
Gambar 2.13 merupakan modul *step down* MP1584. Modul MP1584 merupakan rangkaian *step-down converter* yang digunakan untuk menurunkan tegangan DC dari nilai yang lebih tinggi menjadi tegangan DC yang lebih rendah. IC MP1584 bekerja sebagai regulator switching dengan frekuensi switching hingga 1,5 MHz dan mampu memberikan arus keluaran hingga 3 A. IC ini memiliki rentang tegangan masukan yang cukup luas, yaitu 4,5–28 V, sehingga dapat digunakan pada berbagai sistem catu daya DC. MP1584 juga memiliki fitur *soft-start*, pembatas arus, *thermal shutdown*, dan mode *pulse skipping* untuk meningkatkan efisiensi pada kondisi beban ringan[14].

Tabel 2.9 Tabel Spesifikasi Modul Step Down MP1584[14]

| No. | Parameter       | Spesifikasi                   |
|-----|-----------------|-------------------------------|
| 1   | Jenis           | Step-Down Switching Regulator |
| 2   | IC              | MP1584                        |
| 3   | Tegangan input  | 4,5–28 VDC                    |
| 4   | Tegangan output | 0,8–25 VDC                    |
| 5   | Arus output     | Hingga 3 A                    |

| No. | Parameter                           | Spesifikasi                 |
|-----|-------------------------------------|-----------------------------|
| 6   | Frekuensi switching                 | 100 kHz–1,5 MHz             |
| 7   | Tegangan referensi feedback         | 0,8 V                       |
| 8   | Batas arus ( <i>current limit</i> ) | 4,0–4,7 A                   |
| 9   | <i>Thermal shutdown</i>             | 150°C                       |
| 10  | Suhu operasi junction               | –20°C hingga +125°C         |
| 11  | Suhu lingkungan komponen            | –20°C hingga +85°C          |
| 12  | Jenis kemasan IC                    | SOIC8E                      |
| 13  | Fungsi utama                        | Menurunkan tegangan DC      |
| 14  | Sistem kontrol                      | <i>Current-mode control</i> |

Setelah menjelaskan spesifikasi Modul Relay pada tabel 2.9, selanjutnya perlu dipahami pinout Modul Relay pada gambar 2.14.



Gambar 2 .15 Pinout Modul *Step Down* MP1584

Gambar 2.14 merupakan pinout modul MP1584 yang memperlihatkan tata letak fisik dan posisi setiap pin pada IC MP1584. Modul ini memiliki delapan pin utama, yaitu SW, EN, COMP, FB, GND, FREQ, VIN, dan BST, yang masing-masing memiliki fungsi berbeda dalam proses konversi tegangan DC[14]. Langkah berikutnya adalah menguraikan tabel pinout secara rinci. Tabel ini memuat informasi mengenai fungsi setiap pin, seperti SW sebagai titik switching, EN sebagai input untuk mengaktifkan atau menonaktifkan regulator, COMP sebagai bagian kompensasi rangkaian kendali, FB sebagai umpan balik tegangan, GND sebagai ground, FREQ untuk mengatur frekuensi switching, VIN sebagai masukan

tegangan, dan BST sebagai jalur bootstrap untuk driver MOSFET. Dengan adanya tabel pinout, pemahaman terhadap konfigurasi pin MP1584 menjadi lebih sistematis dan terstruktur. Tabel pinout MP1584 dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Tabel Pinout Modul Step Down MP1584[14]

| No.<br>Pin | Nama<br>Pin | Fungsi                                                                                                                           |
|------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1          | SW          | <i>Switch Node</i> , merupakan keluaran dari saklar MOSFET internal dan terhubung ke rangkaian induktor serta dioda Schottky.    |
| 2          | EN          | <i>Enable Input</i> , digunakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan IC.                                                        |
| 3          | COMP        | <i>Compensation</i> , digunakan untuk rangkaian kompensasi <i>control loop</i> .                                                 |
| 4          | FB          | <i>Feedback</i> , digunakan untuk mendeteksi tegangan keluaran melalui rangkaian pembagi resistor.                               |
| 5          | GND         | Ground atau referensi negatif rangkaian.                                                                                         |
| 6          | FREQ        | Digunakan untuk mengatur frekuensi switching menggunakan resistor eksternal.                                                     |
| 7          | VIN         | Pin masukan tegangan DC untuk menyuplai IC dan rangkaian internal.                                                               |
| 8          | BST         | <i>Bootstrap</i> , digunakan sebagai catu daya untuk driver MOSFET sisi tinggi dan dihubungkan dengan kapasitor terhadap pin SW. |

Pada sistem regenerasi otomatis *silica gel*, modul *step down* 5V digunakan untuk menyuplai tegangan ke beberapa komponen pendukung yang bekerja pada tegangan 5V, seperti sensor TCS3200, relay, LCD, dan perangkat lainnya. Tegangan dari *power supply* utama yang umumnya lebih tinggi, misalnya 12V, diturunkan terlebih dahulu menggunakan modul *step down* agar tidak merusak komponen yang sensitif terhadap tegangan. Dengan penggunaan modul *step down* 5V, distribusi daya pada sistem menjadi lebih efisien, stabil, dan sesuai dengan kebutuhan masing-masing komponen.

### 2.2.13 LCD I2C



Gambar 2.16 LCD I2C

LCD 20x4 adalah modul layar kristal cair yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk teks, angka, maupun simbol. Modul ini memiliki kapasitas tampilan 20 karakter pada 4 baris, sehingga mampu menampilkan data lebih banyak dibandingkan LCD 16x2. LCD 20x4 umumnya digunakan pada sistem mikrokontroler sebagai media antarmuka untuk menampilkan hasil pembacaan sensor, status alat, maupun menu pengoperasian. Modul ini dapat dihubungkan dengan mikrokontroler menggunakan mode paralel atau melalui modul I2C agar penggunaan pin menjadi lebih efisien.

Tabel 2.11 Spesifikasi LCD[15]

| No. | Parameter          | Spesifikasi         |
|-----|--------------------|---------------------|
| 1   | Model              | SBC-LCD20x4         |
| 2   | Jenis              | LCD Serial I2C 20×4 |
| 3   | Ukuran karakter    | 20 × 4 karakter     |
| 4   | Jumlah baris       | 4 baris             |
| 5   | Jumlah kolom       | 20 kolom            |
| 6   | Adapter komunikasi | PCF8574             |
| 7   | Antarmuka          | I2C                 |
| 8   | Alamat I2C         | 0x20 – 0x27         |
| 9   | Standar industri   | HD44780             |

| No. | Parameter              | Spesifikasi                |
|-----|------------------------|----------------------------|
| 10  | Warna <i>backlight</i> | Biru                       |
| 11  | Level logika           | 3,3 V dan 5 V              |
| 12  | Tegangan catu daya     | 5 V                        |
| 13  | Dimensi                | $9,8 \times 6 \times 2$ cm |
| 14  | Kebutuhan jalur I/O    | Catu daya + 2 jalur data   |

Pada sistem regenerasi otomatis *silica gel*, LCD 20x4 berfungsi untuk menampilkan informasi penting seperti nilai suhu dari *Thermocouple*, status warna *silica gel* yang dibaca sensor TCS3200, kondisi *heater*, serta proses regenerasi yang sedang berlangsung. Dengan adanya LCD, pengguna dapat memantau kondisi alat secara langsung tanpa harus menggunakan perangkat tambahan. Penggunaan LCD 20x4 juga membantu meningkatkan kemudahan pengoperasian dan pemantauan sistem karena informasi dapat ditampilkan secara jelas, ringkas, dan *real-time*.

#### 2.2.14 Modul Adaptor 12V



Gambar 2.17 Modul Adaptor 12V

Gambar 2.16 adalah Modul adaptor 12 V. Kit adaptor 12V 1A SMPS merupakan modul catu daya berbentuk *Printed Circuit Board* (PCB) yang berfungsi mengubah tegangan listrik AC 220–240 V menjadi tegangan DC 12 V dengan

kemampuan arus keluaran maksimum 1 A[16]. Modul ini dilengkapi dengan beberapa fitur pendukung, seperti LED indikator untuk menunjukkan kondisi catu daya, optocoupler (*photo coupler*) yang digunakan dalam sistem umpan balik (*feedback*) untuk membantu menjaga kestabilan tegangan keluaran, serta fuse/sekring pada sisi primer sebagai perlindungan awal terhadap kondisi hubung singkat atau beban berlebih.

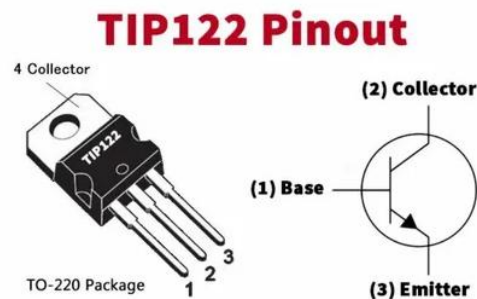
Tabel 2.12 Spesifikasi Modul Adaptor[16]

| No. | Parameter                               | Spesifikasi                                         |
|-----|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1   | Jenis                                   | SMPS / Kit adaptor 12V 1A                           |
| 2   | Bentuk                                  | Modul PCB                                           |
| 3   | Tegangan input                          | AC 220–240 V                                        |
| 4   | Frekuensi input                         | 50/60 Hz                                            |
| 5   | Tegangan output                         | 12 VDC                                              |
| 6   | Arus output maksimum                    | 1 A                                                 |
| 7   | Arus penggunaan kontinu yang disarankan | $\leq 0,7\text{--}0,8$ A                            |
| 8   | Indikator                               | LED indikator power                                 |
| 9   | Sistem feedback                         | Optocoupler ( <i>photo coupler</i> )                |
| 10  | Proteksi primer                         | Fuse/sekring                                        |
| 11  | Konektor input                          | Pad solder AC L dan N                               |
| 12  | Konektor output                         | Pad solder +12 V dan GND                            |
| 13  | Dimensi PCB                             | $53 \times 28$ mm                                   |
| 14  | Tinggi komponen                         | $\pm 14$ mm                                         |
| 15  | Aplikasi                                | Proyek elektronik, IoT, driver kecil, dan catu daya |

Pada sistem regenerasi otomatis *silica gel*, adaptor 12V 1A SMPS dapat digunakan sebagai salah satu sumber catu daya untuk komponen yang membutuhkan tegangan 12 VDC. Tegangan AC dari sumber listrik masuk melalui bagian primer modul dan kemudian dikonversi menjadi tegangan DC 12 V pada bagian sekunder. Tegangan keluaran tersebut dapat digunakan untuk menyuplai

rangkaian atau komponen pendukung sesuai kebutuhan sistem. LED indikator pada modul membantu menunjukkan bahwa adaptor memperoleh suplai listrik dan bekerja. Karena bagian primer terhubung langsung dengan tegangan AC, pemasangan adaptor harus dilakukan dengan memperhatikan keselamatan, isolasi, dan penggunaan *enclosure* atau box tertutup.mampu menyediakan daya yang cukup untuk komponen seperti relay, *heater* , maupun modul *step down* yang membutuhkan tegangan masukan lebih tinggi.

#### 2.2.15 Transistor



Gambar 2.18 Transistor

Gambar 2.17 adalah TIP122 .TIP122 merupakan transistor jenis NPN Darlington yang digunakan sebagai penguat arus dan saklar elektronik pada rangkaian kontrol. Transistor ini tersusun dari dua transistor bipolar yang dirangkai dalam konfigurasi Darlington, sehingga memiliki penguatan arus (*gain*) yang lebih besar dibanding transistor biasa. TIP122 mampu bekerja pada tegangan dan arus yang relatif tinggi, sehingga sering digunakan untuk mengendalikan beban seperti motor DC, lampu, relay, dan *heater* . Karena memiliki kemampuan *switching* yang baik, transistor ini cocok digunakan pada sistem otomatisasi yang memerlukan pengendalian beban melalui sinyal dari mikrokontroler.

Tabel 2.13 Spesifikasi Transistor TIP122

| No | Parameter                         | Nilai          |
|----|-----------------------------------|----------------|
| 1. | Tipe Transistor                   | NPN Darlington |
| 2. | Tegangan Collector-Emitter (VCEO) | 100 V          |
| 3. | Tegangan Collector-Base (VCBO)    | 100 V          |
| 4. | Tegangan Emitter-Base (VEBO)      | 5 V            |
| 5. | Arus Collector Maksimum (IC)      | 5 A            |

| No  | Parameter                  | Nilai                                               |
|-----|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| 6.  | Daya Maksimum (PD)         | 65 W                                                |
| 7.  | Penguatan Arus DC (hFE)    | $\approx 1000-2500$                                 |
| 8.  | Tegangan Saturasi VCE(sat) | Maks. 2 V @ 3 A                                     |
| 9.  | Suhu Operasi               | $-65^{\circ}\text{C}$ hingga $+150^{\circ}\text{C}$ |
| 10. | Package                    | TO-220                                              |

Pada sistem regenerasi otomatis *silica gel*, TIP122 dapat digunakan sebagai driver untuk membantu mengendalikan beban seperti relay atau *heater* yang membutuhkan arus lebih besar daripada yang dapat disuplai langsung oleh pin ESP32. Saat basis transistor menerima sinyal dari mikrokontroler, transistor akan aktif dan mengalirkan arus dari kolektor ke emitor sehingga beban dapat bekerja. Dengan penggunaan TIP122, proses pengendalian beban menjadi lebih aman dan stabil karena mikrokontroler tidak dibebani arus besar secara langsung. Oleh karena itu, transistor TIP122 berperan penting sebagai penguat arus sekaligus saklar elektronik dalam sistem regenerasi otomatis *silica gel*.

#### 2.2.16 Scr Dimmer



Gambar 2 .19 Scr Dimmer

Gambar 2.18 merupakan SCR Dimmer. SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) Dimmer merupakan modul pengatur daya listrik AC yang bekerja dengan mengendalikan besar kecilnya tegangan efektif yang diterima oleh beban, seperti elemen pemanas (*heater* ). Modul ini menggunakan prinsip pengendalian sudut

penyalan (*phase angle control*) pada gelombang AC, sehingga daya yang disalurkan ke beban dapat diatur secara bertahap. SCR Dimmer banyak digunakan pada aplikasi pengaturan kecepatan motor AC, pengaturan intensitas lampu, serta pengaturan suhu elemen pemanas karena memiliki efisiensi yang tinggi dan konstruksi yang sederhana.

Prinsip kerja SCR Dimmer dimulai ketika sumber listrik AC 220 V dialirkan ke modul. Di dalam SCR Dimmer terdapat rangkaian SCR atau TRIAC yang mengatur waktu penyalan arus pada setiap setengah siklus gelombang AC. Pengaturan waktu penyalan dilakukan melalui perubahan sudut penyalan (*firing angle*). Semakin kecil sudut penyalan, semakin besar tegangan efektif yang diterima *heater* sehingga daya pemanasan meningkat. Sebaliknya, semakin besar sudut penyalan, semakin kecil daya yang diterima *heater* sehingga suhu pemanasan menjadi lebih rendah.

Tabel 2. 14 Spesifikasi Scr Dimmer

| No | Parameter          | Nilai                           |
|----|--------------------|---------------------------------|
| 1. | Tegangan Kerja     | AC 220–250 V                    |
| 2. | Daya Maksimum      | 2000 W                          |
| 3. | Arus Maksimum      | $\pm 25$ A                      |
| 4. | Frekuensi          | 50–60 Hz                        |
| 5. | Metode Penngaturan | Phase Angle Control (SCR/Triac) |
| 6. | Pengaturan Daya    | Potensiometer                   |
| 7. | Efisiensi          | >90%                            |
| 8. | Dimensi            | 48 × 60 × 27 mm                 |

Dalam sistem regenerasi otomatis *silica gel*, SCR Dimmer bekerja bersama *Thermocouple*, sensor TCS3200, ESP32, dan relay. Ketika sensor TCS3200 mendeteksi bahwa warna *silica gel* telah berubah menjadi merah muda sebagai tanda kejenuhan, ESP32 mengaktifkan relay sehingga arus listrik mengalir menuju SCR Dimmer. Selanjutnya, SCR Dimmer mengatur besarnya daya yang diberikan ke *heater* agar suhu meningkat secara bertahap hingga mencapai suhu regenerasi yang diinginkan. Selama proses pemanasan, *Thermocouple* memonitor suhu secara terus-menerus. Jika suhu telah mencapai batas yang ditentukan atau warna *silica gel* telah kembali ke kondisi semula, ESP32 akan mematikan relay sehingga aliran

listrik ke SCR Dimmer dan *heater* terputus, serta proses regenerasi berhenti secara otomatis.

#### 2.2.17 Sistem Monitoring Suhu dan Warna

Sistem monitoring suhu dan warna merupakan suatu sistem yang digunakan untuk mengamati perubahan kondisi suatu objek berdasarkan parameter suhu dan karakteristik warna secara *real-time*. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan sensor untuk memperoleh data dari lingkungan, kemudian data tersebut diproses oleh mikrokontroler sehingga dapat ditampilkan pada media monitoring maupun digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan. Monitoring suhu bertujuan untuk mengetahui perubahan temperatur pada suatu proses, sedangkan monitoring warna digunakan untuk mendeteksi perubahan warna suatu objek yang berkaitan dengan perubahan kondisi fisik atau kimia. Penerapan sistem monitoring suhu dan warna banyak digunakan pada bidang industri, otomasi, pertanian, serta sistem pengendalian proses karena mampu meningkatkan akurasi pengamatan dan mengurangi kesalahan akibat pengamatan secara manual.

Pada penelitian ini, sistem monitoring suhu dan warna diterapkan pada proses regenerasi *silica gel* pada *dehydrating breather* transformator. Monitoring suhu dilakukan menggunakan *Thermocouple* untuk mengukur temperatur selama proses pemanasan, sedangkan monitoring warna dilakukan menggunakan sensor TCS3200 untuk mendeteksi perubahan warna *silica gel* sebagai indikator tingkat kejenuhan. Data dari kedua sensor diproses oleh ESP32 DevKit V1, kemudian ditampilkan pada LCD 20×4 dan dikirimkan ke aplikasi Blynk melalui jaringan Wi-Fi sehingga kondisi suhu, nilai warna, dan status regenerasi dapat dipantau secara *real-time*. Dengan sistem monitoring ini, proses regenerasi dapat berlangsung secara otomatis, lebih akurat, dan lebih efisien karena keputusan mengaktifkan atau menonaktifkan *heater* didasarkan pada data sensor yang diperoleh secara langsung.

#### 2.2.18 Google Spreadsheet sebagai Media Penyimpanan Data

Google Spreadsheet merupakan aplikasi pengolah data berbasis *cloud* yang dikembangkan oleh Google dan dapat diakses melalui jaringan internet. Aplikasi ini memiliki fungsi yang hampir sama dengan Microsoft Excel, namun memiliki

keunggulan berupa kemampuan penyimpanan data secara daring (*online*), kolaborasi secara real-time, serta integrasi dengan berbagai layanan berbasis Internet of Things (IoT). Google Spreadsheet mampu menerima, menyimpan, mengolah, dan menampilkan data dalam bentuk tabel maupun grafik sehingga banyak dimanfaatkan sebagai media pencatatan (*data logging*) pada sistem monitoring. Selain itu, data yang tersimpan dapat diakses kapan saja dan dari berbagai perangkat selama terhubung ke internet.

Pada penelitian ini, Google Spreadsheet digunakan sebagai media penyimpanan data hasil monitoring yang dikirim dari aplikasi Blynk secara *real-time*. Data yang diperoleh dari sensor suhu *Thermocouple* dan sensor warna TCS3200 diproses oleh ESP32 DevKit V1 dan dikirimkan ke server Blynk melalui jaringan Wi-Fi. Selanjutnya, data dari Blynk diteruskan ke Google Spreadsheet menggunakan layanan otomatisasi seperti Google Apps Script, Webhooks, atau platform integrasi seperti Make (Integromat) maupun Zapier. Data yang tersimpan meliputi waktu pencatatan (*timestamp*), nilai suhu, nilai RGB, status *heater*, serta kondisi *silica gel*. Dengan adanya penyimpanan data secara real-time, seluruh hasil monitoring dapat didokumentasikan secara otomatis sehingga memudahkan proses analisis, evaluasi performa sistem, dan pembuatan laporan penelitian.