

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam hal ini, penyusun telah mengkaji beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian. Kajian tersebut bertujuan untuk mengetahui perkembangan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, memahami metode yang digunakan, serta mengidentifikasi perbedaan dan pengembangan yang ditawarkan dalam penelitian ini.

Penelitian oleh Cahyono dan Silaban (2024) yang berjudul *"Monitoring Realtime Suhu dan Tekanan Transformator Traksi dengan ESP32 dan Ubidots"* memantau suhu belitan, suhu oli, dan tekanan gas N₂ pada transformator traksi menggunakan ESP32 yang terintegrasi dengan platform Ubidots, dilengkapi modul *Relay* yang memicu alarm saat kondisi kritis serta notifikasi SMS kepada teknisi lapangan. Hasil pengujian menunjukkan akurasi yang baik dengan rata-rata nilai kesalahan pengukuran suhu belitan 0,93%, suhu oli 0,64%, dan tekanan gas 4,53%. Hasil pengujian menunjukkan akurasi yang baik dengan rata-rata nilai error suhu belitan 0,93%, suhu oli 0,64%, dan tekanan gas N₂ 4,53% [6]. Namun, penelitian tersebut menggunakan platform Ubidots sebagai media monitoring, sedangkan media penyimpanan data historis secara mandiri belum dibahas secara khusus, sehingga menjadi peluang pengembangan yang dapat diisi pada penelitian ini melalui integrasi *website* dan *Google Spreadsheet*.

Selanjutnya, penelitian oleh tim peneliti JSSR (2024) yang berjudul *"Rancang Bangun Sistem Pemantauan Suhu Kowi pada Peleburan Emas Berbasis IoT Menggunakan ESP32 dan Blynk"* menggunakan sensor termokopel tipe K yang dikuatkan dengan modul MAX6675 dan dibaca oleh ESP32 melalui protokol SPI, kemudian data suhu ditampilkan pada aplikasi Blynk secara *real-time*. menggunakan sensor termokopel tipe K yang dikuatkan dengan modul MAX6675 dan dibaca oleh ESP32 melalui protokol SPI, dengan data suhu ditampilkan pada aplikasi Blynk secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan konektivitas Wi-Fi ESP32 berjalan stabil serta pembacaan sensor merespons linier terhadap kenaikan

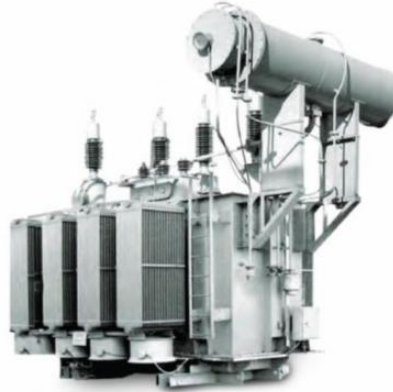
suhu, sehingga membuktikan bahwa sensor termokopel tipe K cocok digunakan untuk kebutuhan monitoring suhu karena mampu memberikan hasil pembacaan yang akurat dan responsif secara *real-time*. Namun, penelitian tersebut hanya memantau parameter suhu tanpa parameter tekanan, dan diterapkan pada objek peleburan logam, bukan pada transformator.

Penelitian lain oleh tim peneliti Jurnal Teknologi Terapan dan Sains 4.0 (2025) yang berjudul "*Monitoring Suhu Overheat pada Transformator 1 Fasa Berbasis ESP32 Menggunakan Google Spreadsheet*" menggunakan sensor DS18B20 yang dibaca oleh ESP32 dan dikirimkan ke *Google Spreadsheet* sebagai media penyimpanan dan monitoring data, dilengkapi *buzzer* dan *Relay* yang aktif otomatis saat suhu melebihi ambang batas 50°C. Hasil penelitian menunjukkan sistem mampu mendeteksi suhu berlebih secara akurat dan memberikan notifikasi *real-time* melalui *Spreadsheet*. Namun, sensor DS18B20 yang digunakan memiliki rentang pengukuran suhu yang relatif minim, yaitu -55°C hingga 125°C, sehingga kurang optimal untuk mendeteksi kondisi suhu ekstrem dibandingkan sensor termokopel tipe K yang memiliki rentang pengukuran jauh lebih luas[4]. Selain itu, penelitian tersebut juga belum mencakup parameter tekanan internal tangki serta belum memanfaatkan *website* sebagai media monitoring visual bagi pengguna.

Dari beberapa kajian tersebut, penyusun menyimpulkan bahwa pemantauan kondisi transformator secara *real-time* merupakan langkah penting dalam menjaga keandalan operasi dan mencegah terjadinya gangguan yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa parameter suhu dan tekanan memiliki peran penting sebagai indikator kondisi transformator. Namun, penelitian yang telah dilakukan masih memiliki keterbatasan, baik dari sisi parameter yang dipantau maupun kompleksitas sistem yang digunakan. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan “Simulasi Sistem Monitoring Suhu dan Tekanan Internal Pada Transformator Daya Berbasis ESP32 Menggunakan *Website*” dengan pemantauan secara *real-time*. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu mendeteksi indikasi kebocoran dan kondisi abnormal transformator lebih awal sehingga dapat meminimalkan risiko kerusakan yang lebih serius.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Transformator Daya



Gambar 2.1 Transformator Daya

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan teknologi, kebutuhan akan energi listrik juga berkembang. Energi listrik dihasilkan oleh pembangkit listrik yang menggunakan berbagai sumber energi seperti panas, air, dan angin. Salah satu komponen penting dalam penyaluran energi listrik adalah transformator daya, yang berfungsi mengirim daya dari generator ke gardu induk melalui saluran transmisi [7]. Transformator daya adalah perangkat listrik penting yang dirancang untuk mentransfer energi listrik antar sirkuit tanpa mengubah frekuensi[2]. Transformator bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dan sangat penting dalam menyalurkan daya dari generator ke sistem transmisi dan distribusi primer. Transformator daya bertugas menyesuaikan tingkat tegangan dalam jaringan listrik dengan menaikkan atau menurunkan tegangan untuk mendukung transmisi jarak jauh yang efisien dan distribusi jaringan yang andal. Perangkat statis ini tidak memiliki bagian yang bergerak atau berputar, beroperasi secara efektif dalam sistem arus bolak-balik (AC) dan berfungsi sebagai komponen inti di gardu induk, halaman sakelar, dan infrastruktur listrik skala utilitas .

Transformator daya membutuhkan pengamanan dan pengaturan proteksi yang stabil agar dapat mencegah dari gangguan-gangguan yang terjadi pada transformator daya[2]. Gangguan-gangguan pada transformator daya dalam suatu operasi dikelompokkan menjadi dua yaitu, gangguan internal dan gangguan eksternal. Ruang lingkup gangguan eksternal berada di luar trafo daya, sedangkan

gangguan internal terjadi pada trafo itu sendiri. Jika trafo daya mengalami gangguan, maka trafo tersebut harus segera di matikan agar kerusakan dapat diminimalisir. Biaya yang terkait dengan perbaikan transformator yang rusak mungkin sangat tinggi.

2.2.2 Minyak Transformator

Untuk menjaga kontinuitas operasi transformator, maka transformator dilengkapi dengan minyak transformator. Minyak transformator yang digunakan dalam transformator memiliki beberapa tugas utama yaitu sebagai media isolator, media pendingin, media atau alat untuk memadamkan busur api, dan sebagai perlindungan terhadap korosi dan oksidasi[8]. Minyak transformator mengisolasi elektroda bertegangan antara belitan kumparan *high voltage* dan *low voltage* serta mendinginkan transformator[7]. Minyak isolator dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu minyak mineral dan minyak sintetik. Minyak mineral berbahan dasar minyak bumi yang diproses dengan cara destilasi dan beberapa proses lagi agar minyak dapat memenuhi syarat sebagai minyak transformator. Sedangkan minyak sintetik diolah dengan proses kimia supaya mendapatkan karakteristik yang lebih baik.

Untuk syarat yang harus dipenuhi oleh minyak transformator yaitu memiliki kekuatan isolasi tinggi, dapat menyalurkan panas dengan baik, dan memiliki tingkat viskositas yang rendah agar kemampuan pendinginan dapat lebih baik[8]. Dengan viskositas yang rendah, minyak dapat bersirkulasi secara lancar melalui arus konveksi termal untuk membawa panas dari kumparan menuju radiator eksternal. Selain itu, minyak juga harus memiliki nilai tegangan tembus (*breakdown voltage*) yang tinggi dan terbebas dari uap air maupun partikel kontaminan yang dapat memicu hubung singkat. Adapun, pemilihan jenis minyak ini dapat didasarkan pada keadaan lingkungan dimana transformator tersebut digunakan. Dalam buku pedoman penerapan spesifikasi dan pemeliharaan minyak isolasi, SPLN 49-1 disebutkan minyak isolator transformator perlu memenuhi beberapa spesifikasi tertentu agar proses isolasi dari minyak trafo dapat berjalan optimal yang dijelaskan pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Standar Spesifikasi Minyak Transformator

No	Parameter	Batasan
1.	Tegangan Tembus	50 kV/2,5 mm untuk tegangan >170kV
		40 kV/2,5 mm untuk tegangan 70 kV – 170 kV
		30 kV/2,5 mm untuk tegangan < 70 kV
2.	Kadar Air	<20 mg/l untuk > 170 kV
		< 30 mg/l untuk < 170 kV
3.	Faktor kebocoran dielektrik	< 0,2- 2,0
4.	Tahanan Jenis	1 G Ω m
5.	Angka kenetralan	< 0,5 mg KOH/gr
6.	Sedimen	Tidak Terukur
7.	Titik nyala	Penurunan Maksimum 15°C
8.	Tegangan permukaan	>0,015 N/m

2.2.3 Suhu minyak transformator

**Gambar 2.2** Suhu Minyak Transformator

Suatu Transformator sangat dekat kaitannya dengan panas, yang ditimbulkan akibat operasi Transformator itu sendiri. Akibat dari panas ini bisa menyebabkan suatu Transformator mengalami turunnya keandalan atau tingkat idealnya bahkan yang lebih parah dapat merusak transformator[1]. Operasi transformator tenaga dengan beban yang tinggi akan mengakibatkan suhu oil pada transformator meningkat[3]. Suhu minyak transformator akan naik apabila terdapat energi panas yang dibangkitkan dari inti maupun kumparan. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya perubahan pada minyak didalam transformator. Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada trafo, minyak isolasi memuai sehingga volume bertambah. Sebaliknya, ketika terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun [8].

Terdapat beberapa kasus pada transformator yang sudah lama beroperasi terjadi peningkatan suhu oil yang drastis bersamaan dengan meningkatnya arus beban pada transformator sehingga pembebanan pada transformator tenaga tersebut tidak bisa optimal dan maksimal [3] Suhu pada transformator yang sedang beroperasi dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, rugi-rugi pada trafo itu sendiri dan suhu lingkungan [8]. Kenaikan suhu pada transformator akan menyebabkan terjadinya proses hidrokarbon pada minyak, nilai tegangan tembus dan kerapatan arus konduksi merupakan beberapa indikator atau variabel yang digunakan untuk mengetahui apakah suatu minyak transformator memiliki ketahanan listrik yang sesuai dengan persyaratan yang berlaku. Parameter temperatur pada simulasi sistem ditentukan dengan mempertimbangkan tiga hal, yaitu data *nameplate* transformator, fungsi sistem proteksi temperatur pada transformator, dan keterbatasan sensor temperatur yang digunakan pada simulasi sistem. Berdasarkan *nameplate* transformator, tercantum kenaikan temperatur minyak dan kumparan sebesar 55/55/65°C. Nilai tersebut merupakan *temperature rise*, sehingga tidak dapat langsung digunakan sebagai nilai alarm atau trip.

Pada transformator aktual, pengukuran temperatur dilakukan menggunakan *temperature indication Relay*. Manual menjelaskan bahwa cairan pada bagian sensor yang dipasang pada bagian dengan temperatur minyak maksimum akan mengalami pemuaian sesuai temperatur minyak dan diteruskan ke indikator.

Manual juga menjelaskan bahwa *microswitch* digunakan sebagai kontak listrik untuk alarm, *tripping*, dan *cooler control*, serta temperatur setting dapat disesuaikan setelah pemasangan. Selain itu, titik operasi thermometer dapat diatur pada seluruh skala pengukurannya. Sensor yang digunakan pada simulasi sistem memiliki batas pengukuran sampai 85°C. Oleh karena itu, nilai temperatur maksimum yang dihitung berdasarkan nameplate, yaitu sekitar 95–105°C pada asumsi temperatur lingkungan 40°C, tidak dapat digunakan secara langsung sebagai batas pengukuran simulasi sistem. Dengan demikian, diperlukan penyesuaian parameter agar seluruh kondisi operasi dan proteksi masih dapat dideteksi oleh sensor. Pada penelitian ini digunakan tiga titik batas temperatur, yaitu 55°C, 65°C, dan 80°C.

Tabel 2.2 Parameter Suhu

Temperatur terukur	Kondisi
$T < 55^{\circ}\text{C}$	Normal
$50^{\circ}\text{C} \leq T < 65^{\circ}\text{C}$	Warning
$65^{\circ}\text{C} \leq T < 80^{\circ}\text{C}$	Alarm
$T \geq 80^{\circ}\text{C}$	Bahaya/Trip
$T > 85^{\circ}\text{C}$	Di luar rentang sensor

Penentuan batas temperatur pada simulasi sistem tidak dimaksudkan untuk menggantikan nilai setting proteksi transformator aktual. Nilai tersebut merupakan parameter rancangan yang disesuaikan dengan kemampuan sensor temperatur yang digunakan. Data nameplate transformator digunakan sebagai referensi karakteristik kenaikan temperatur, sedangkan manual transformator digunakan sebagai dasar bahwa temperatur dapat digunakan untuk fungsi cooler control, alarm, dan tripping. Karena sensor simulasi sistem memiliki batas pengukuran 85°C, maka batas operasi disesuaikan menjadi 55°C sebagai warning, 65°C sebagai alarm, dan 80°C sebagai batas bahaya/trip.

2.2.4 Tekanan Internal transformator

Tekanan internal transformator adalah tekanan yang berbentuk di dalam tangki transformator akibat perubahan volume minyak solusi dan gas selama transformator beroperasi. Perubahan tekanan internal normal terjadi secara bertahap. Perubahan ini terutama berkaitan dengan beban transformator dan

fluktuasi suhu lingkungan. Perubahan tekanan ini memerlukan apa yang disebut pelepasan tekanan. Apabila tekanan terus meningkat dan melebihi kemampuan tangki dalam menahannya, kondisi *overPressure* dapat menyebabkan kerusakan pada bagian tangki, sambungan, gasket, maupun komponen lainnya[6]. Kondisi tersebut juga dapat meningkatkan risiko terjadinya kebocoran minyak dan kerusakan yang lebih serius pada transformator. Ketika terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, kenaikan temperatur mengakibatkan minyak isolasi memuai sehingga volume bertambah. Sebaliknya, ketika terjadi penurunan suhu operasi, maka volume minyak akan menyusut dan volume minyak akan mengalami penurunan [8]. Perubahan volume minyak ini selaras dengan kondisi tekanan yang terdapat di dalam tangki transformator.

Apabila temperatur minyak meningkat maka tekanan di dalam tangki juga akan meningkat, begitupun sebaliknya. Selain dipengaruhi oleh perubahan temperatur, tekanan internal transformator juga dapat berubah akibat gangguan internal. Terjadinya peningkatan tekanan yang berkelanjutan dapat menyebabkan tekanan pada las, gasket, dan komponen struktural yang berpotensi menyebabkan kebocoran minyak pada transformator seiring dengan berjalannya waktu. Oleh karena itu, pemantauan tekanan internal dapat dijadikan sebagai salah satu indikator langsung keandalan transformator.

Pada penelitian ini, tekanan yang dipantau merupakan tekanan internal pada tangki transformator daya. Untuk memudahkan interpretasi kondisi tekanan oleh sistem monitoring, tekanan diklasifikasikan menjadi beberapa tingkat kondisi, yaitu aman, warning, dan danger. Batas 2 psi ditetapkan sebagai batas kondisi aman. Tekanan internal tangki yang berada pada atau di bawah 2 psi dikategorikan sebagai kondisi aman sehingga sistem tidak memberikan indikasi kondisi abnormal. Tekanan di atas 2 psi menunjukkan adanya peningkatan tekanan internal tangki dan dikategorikan sebagai kondisi warning. Pada kondisi ini, sistem memberikan peringatan agar peningkatan tekanan dapat diketahui dan dipantau lebih awal. Nilai 4 psi digunakan sebagai titik peningkatan tingkat kewaspadaan, sehingga tekanan yang mendekati nilai tersebut menunjukkan kondisi yang memerlukan perhatian lebih lanjut.

Selanjutnya, tekanan 6 psi atau lebih dikategorikan sebagai kondisi danger. Kondisi ini menunjukkan bahwa tekanan internal tangki telah mencapai tingkat yang ditetapkan sebagai batas bahaya pada sistem monitoring, sehingga diperlukan pemeriksaan dan tindakan lebih lanjut sesuai prosedur pengoperasian transformator. Dengan demikian, batas parameter tekanan internal tangki yang digunakan dalam sistem monitoring adalah 2 psi sebagai batas aman, 4 psi sebagai batas peningkatan warning, dan 6 psi sebagai batas danger. Penetapan tersebut digunakan sebagai klasifikasi kondisi pada sistem monitoring penelitian, bukan sebagai pernyataan bahwa 6 psi merupakan batas tekanan maksimum atau tekanan desain tangki transformator. Pembagian batas tersebut bertujuan memberikan peringatan secara bertahap terhadap peningkatan tekanan internal tangki, sehingga perubahan kondisi dapat diketahui sebelum mencapai kategori danger.

Tabel 2. 3 Parameter Tekanan

Tekanan terukur	Kondisi
$P < 2 \text{ Psi}$	Normal
$2 \text{ Psi} \leq P < 4 \text{ Psi}$	Warning
$4 \text{ Psi} \leq P < 6 \text{ Psi}$	Alarm
$P \geq 6 \text{ Psi}$	Bahaya/Trip

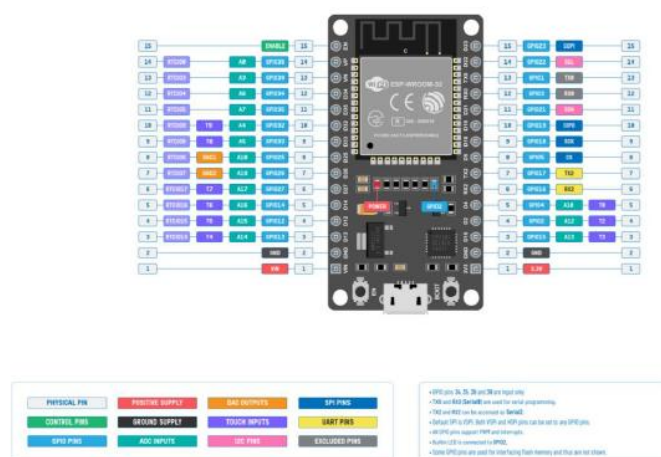
2.2.5 Mikrokontroler ESP32



Gambar 2.2 ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang dikembangkan oleh *Espressif System*, yang berfungsi untuk mengelola dan memproses semua port dan IC. Mikrokontroler ini juga dilengkapi dengan kemampuan untuk terhubung ke internet melalui

jaringan nirkabel, tanpa memerlukan papan tambahan, karena dilengkapi dengan modul Wi-Fi di dalam chip, sehingga ideal untuk mengembangkan aplikasi berbasis *Internet Of Things*. Mikrokontroler ini dirancang dengan arsitektur prosesor dual-core 32-bit Xtensa LX6 yang memungkinkan dua proses dijalankan secara bersamaan, sehingga cocok diterapkan pada sistem yang memerlukan pemrosesan data sensor dan komunikasi jaringan secara paralel.



Gambar 2.3 Pinout ESP32

Salah satu keunggulan utama ESP32 dibandingkan mikrokontroler sejenis adalah tersedianya modul Wi-Fi dan Bluetooth yang telah terintegrasi di dalam satu chip. Dengan adanya modul komunikasi bawaan tersebut, proses pengiriman data ke platform berbasis cloud dapat dilakukan tanpa memerlukan modul tambahan. Hal ini menjadikan rangkaian perangkat keras lebih sederhana dan biaya implementasi lebih rendah. Pada penelitian ini, modul ESP32 versi 30 pin digunakan sebagai pusat kendali sistem.

Modul ini dipilih karena memiliki jumlah pin input/output yang memadai untuk mengakomodasi seluruh komponen yang digunakan pada penelitian ini, serta kompatibel dengan *framework* Arduino sehingga proses pemrograman dapat dilakukan menggunakan bahasa C/C++. Protokol I2C pada modul ini juga mendukung penggunaan lebih dari satu jalur bus secara bersamaan, sehingga beberapa perangkat I2C dengan alamat yang sama dapat dioperasikan pada jalur bus yang berbeda tanpa terjadi konflik komunikasi. Adapun spesifikasi lengkap

ESP32 disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2.4 Spesifikasi ESP32

No	Parameter	Spesifikasi
1	Mikrokontroler	ESP32 Dual-Core Xtensa LX6
2	Arsitektur	32-bit
3	Frekuensi CPU	Hingga 240 MHz
4	Tegangan Operasi	3,3 V
5	SRAM	520 KB
6	Resolusi ADC	12-bit
7	Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n
8	Bluetooth	Bluetooth Classic dan BLE
9	Antarmuka Komunikasi	UART, SPI, I2C, PWM
10	Bahasa Pemrograman	C/C++

2.2.6 Sensor Termokopel Tipe K



Gambar 2.4 Sensor Termokopel Tipe K

Termokopel adalah jenis sensor suhu yang digunakan untuk mengukur suhu berdasarkan prinsip *Seebeck*. Ketika sambungan dua logam dipanaskan, timbul beda potensial atau tegangan listrik, di mana salah satu terminal dihubungkan ke benda yang diukur (*hot junction*), sedangkan terminal lainnya dipertahankan pada suhu referensi (*cold junction*)[5]. Komponen utama termokopel terdiri dari dua batang logam sebagai elemen pengukur suhu serta soket yang menghubungkan kabel termokopel menuju perangkat pembaca. Di antara berbagai jenis sensor suhu yang tersedia, sensor termokopel tipe K sering digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena tingkat akurasi yang baik, rentang suhu pengukuran yang luas, serta biaya yang relatif terjangkau. Sensor termokopel, khususnya tipe K, mampu mengukur suhu dalam rentang yang luas, yaitu mulai dari -200°C hingga 1250°C .

Termokopel umumnya terbuat dari bahan campuran platina dan rodium, namun juga dapat dibuat dari bahan lain seperti tembaga dan konstantan (campuran tembaga dengan nikel), besi, maupun material logam lainnya sesuai jenis termokopel yang digunakan.

Pada penelitian ini, dipilih termokopel tipe K jenis *head* karena memiliki bentuk konektor terminal yang tertutup rapat oleh *housing* logam, sehingga sambungan antara probe dan kabel bersifat kedap dan terlindung dari kontak langsung dengan minyak maupun kelembapan di dalam tangki. Pemilihan tipe *head* ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kebocoran pada titik pemasangan sensor akibat sambungan yang tidak rapat, sekaligus memberikan perlindungan tambahan terhadap risiko korosi maupun gangguan sinyal yang dapat terjadi apabila digunakan termokopel jenis kabel terbuka biasa.

Tabel 2.5 Spesifikasi Sensor Termokopel Tipe K

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Rentang suhu kawat termokopel	-270 hingga 1260°C
2.	Rentang suhu kabel ekstensi	0 hingga 200°C
3.	Akurasi standar	$\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ hingga $\pm 0,75\%$
4.	Akurasi limit error	$\pm 1,1^{\circ}\text{C}$ hingga $\pm 0,4^{\circ}$
5.	Batas temperatur	0 hingga +1100
6.	Ketahanan	Stabil pada suhu tinggi
7.	Material konduktor	Chromel pada kutub positif dan alumel pada kutub negatif

2.2.7 Modul MAX6675



Gambar 2.5 Modul MAX6675

Untuk memperoleh data suhu dari sensor termokopel, diperlukan sebuah penguat termokopel. Hal ini dikarenakan keluaran sinyal termokopel tipe K berupa tegangan sangat kecil (milivolt) yang tidak dapat langsung dibaca oleh mikrokontroler ESP32. Keluaran suhu dari penguat termokopel bergantung pada tegangan yang terbaca pada sambungan referensi. Tegangan pada sambungan referensi bergantung pada selisih suhu antara sambungan referensi dan sambungan termal. Oleh karena itu, suhu pada sambungan referensi perlu diketahui serta dibutuhkan modul penguat sekaligus konverter sinyal, yaitu Modul Max6675. MAX6675 merupakan IC (*integrated circuit*) yang berfungsi melakukan kompensasi suhu titik referensi (*cold-junction compensation*) serta mengubah sinyal analog dari termokopel tipe K menjadi data digital, kemudian mengeluarkan data tersebut dalam resolusi 12-bit melalui komunikasi SPI (*Serial Peripheral Interface*).

Tabel 2.6 Spesifikasi Modul MAX6675

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Rentang suhu	-20°C hingga $+85^{\circ}\text{C}$
2.	Resolusi	$0,25^{\circ}\text{C}$
3.	Akurasi	$\pm 3^{\circ}\text{C}$
4.	Tegangan operasi	$3,0 - 5,5\text{V}$
5.	Batas temperatur	1024°C
6.	Jumlah PIN	8 PIN SO
7.	Antarmuka Komunikasi	SPI (<i>Serial Pheriperal Interface</i>)

2.2.8 Sensor Tekanan



Gambar 2.6 Sensor Tekanan

Sensor Tekanan (*Pressure Sensor*) adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur tekanan fluida dengan mengubah tekanan menjadi sinyal analog yang nilai variabelnya berupa tegangan atau arus (Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro). Sensor tekanan memiliki output yang berbanding lurus dengan inputan, sehingga sensor ini merupakan salah satu jenis sensor linearitas. Secara mekanis, sensor ini bekerja berdasarkan prinsip *piezoresistive*. Saat tekanan fluida dari dalam tangki menekan membran di bagian ujung ulir sensor, deformasi yang terjadi akan memicu perubahan resistansi internal yang kemudian dikondisikan menjadi tegangan analog[9].

Pada penelitian ini digunakan Oil *Pressure Sensor* DC 5V G1/4 0–1,2 MPa dengan keluaran analog 0,5–4,5 VDC. Sensor ini dipilih karena memiliki rentang pengukuran yang sesuai untuk memantau tekanan internal tangki transformator, waktu respons yang cepat, serta memiliki material *stainless steel* yang tahan terhadap fluktuasi suhu minyak. Meskipun mudah diintegrasikan dengan ESP32 melalui pin ADC, perlu diperhatikan bahwa keluaran maksimal sensor (4,5 VDC) melebihi batas toleransi pin ADC ESP32 (3,3 VDC). Oleh karena itu, diperlukan rangkaian pembagi tegangan (*voltage divider*) untuk mengamankan mikrokontroler dan menjaga presisi pembacaan data.

Tabel 2.7 Spesifikasi Sensor Tekanan

No.	Spesifikasi	Keterangan
1.	Tegangan operasi	5 VDC
2.	Tegangan keluaran	0,5 – 4,5 VDC
3.	Arus operasi	10 mA
4.	Rentang tekanan kerja	0 – 1,2 MPa
5.	Tekanan tertinggi	2,4 <i>Mpa</i>
6.	Rentang suhu kerja	0 – 85 derajat
7.	<i>Waktu respons</i>	2,0 ms

Tabel 2.8 Pin I/O Sensor Tekanan

No.	Warna Kabel	Pin	Fungsi
1.	Merah	VCC / Vin	Catu daya sensor 5 VDC
2.	Hitam	GND	Ground/referensi tegangan sensor.
3.	Kuning	Output	Menghasilkan sinyal analog (0,5 – 4,5 VDC)

2.2.10 *Solenoid Valve*



Gambar 2.8 *Solenoid Valve*

Solenoid valve adalah katup elektromekanik yang digerakkan oleh energi listrik melalui kumparan elektromagnetik. Katup ini dapat diaktifkan menggunakan sumber arus bolak-balik (AC) maupun searah (DC). Secara struktural, *solenoid valve* terdiri dari dua bagian utama, yaitu *solenoid* (kumparan penghasil medan magnet) dan *valve* (katup mekanis pengatur aliran). Dalam pengoperasiannya, katup akan aktif bekerja apabila kumparan menerima tegangan suplai yang memicu timbulnya medan magnet untuk menarik tuas atau poros katup dari dudukannya[10].

Pada tipe *Normally Closed* (NC), katup akan berada dalam keadaan tertutup rapat untuk menahan tekanan selama tidak ada arus listrik yang mengalir pada kumparan. Katup tersebut hanya akan terbuka dan mengizinkan aliran fluida (cairan atau gas) melewatinya ketika kumparan diberi energi listrik. Karakteristik waktu respons bukaan yang sangat cepat dan presisi menjadikan komponen ini sangat ideal diaplikasikan pada berbagai sistem otomasi kelistrikan yang membutuhkan pengaturan pelepasan secara instan. Dalam penelitian ini, *solenoid valve* bertindak sebagai aktuator keamanan utama untuk melepaskan tekanan berlebih yang terakumulasi di dalam simulasi sistem tangki. Perangkat ini diintegrasikan dengan sistem kontrol ESP32 melalui perantara modul *Relay*.

2.2.11 Pressure Gauge



Gambar 2.9 *Pressure Gauge*

Pressure Gauge merupakan alat ukur tekanan mekanis berbasis *bourdon tube* yang berfungsi sebagai indikator manual untuk menunjukkan besarnya tekanan fluida di dalam tangki. Alat ini bekerja tanpa memerlukan catu daya listrik, di mana tekanan yang masuk ke dalam tabung *bourdon* akan menyebabkan perubahan bentuk tabung yang kemudian diteruskan menjadi gerakan jarum penunjuk pada skala ukur. *Pressure Gauge* memiliki beberapa keunggulan, di antaranya pembacaan yang bersifat instan dan visual, tidak memerlukan sumber daya tambahan, konstruksi yang sederhana, serta cukup andal digunakan pada aplikasi bertekanan rendah hingga menengah.

Namun demikian, alat ini memiliki keterbatasan berupa keluaran yang hanya dapat dibaca secara manual dan tidak menghasilkan sinyal listrik, sehingga tidak dapat langsung diintegrasikan dengan sistem akuisisi data berbasis mikrokontroler. Pada penelitian ini, *Pressure Gauge* dengan rentang 0–2,5 Bar digunakan sebagai indikator manual untuk menunjukkan nilai tekanan aktual di dalam tangki secara visual, sehingga kondisi tekanan dapat diamati secara langsung tanpa bergantung pada pembacaan sensor maupun sistem monitoring elektronik.

2.2.12 Dimmer AC

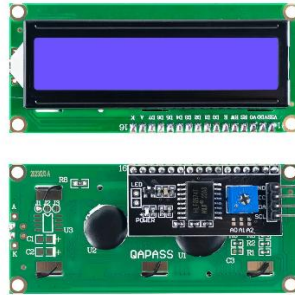


Gambar 2.10 *Dimmer AC*

Dimmer AC 220V merupakan modul elektronik yang berfungsi untuk mengatur tegangan keluaran AC menggunakan komponen semikonduktor jenis *thyristor* dua arah (*bidirectional silicon controlled rectifier*), yang bekerja pada tegangan masukan AC 220V dengan kapasitas daya maksimum hingga 2000W. Prinsip kerja modul ini adalah dengan memanfaatkan komponen *thyristor* dua arah untuk memotong sebagian gelombang sinus tegangan AC pada tiap siklusnya (*phase-cutting/phase-control*), di mana sudut penyalan komponen dapat diatur melalui potensiometer yang terpasang pada modul.

Semakin besar sudut pemotongan gelombang, semakin kecil tegangan rata-rata yang diteruskan ke beban, dan sebaliknya. Modul ini umumnya digunakan untuk aplikasi seperti kontrol suhu pemanas, kontrol kecepatan motor, hingga pengaturan kecerahan lampu. Pada penelitian ini, modul *Dimmer AC 220V* digunakan untuk mengatur daya keluaran pada *Heater* guna mensimulasikan kenaikan suhu di dalam tangki simulasi sistem secara bertahap dan terkontrol, sehingga perubahan suhu yang dihasilkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengujian sistem monitoring suhu dan tekanan.

2.2.13 LCD 12C



Gambar 2.11 LCD 12C

LCD (*Liquid Crystal Display*) 16x2 adalah modul layar kristal cair yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk teks, angka, maupun simbol. Modul ini memiliki kapasitas tampilan 16 karakter pada 2 baris, sehingga cukup untuk menampilkan data-data penting secara ringkas. LCD 16x2 umumnya digunakan pada sistem mikrokontroler sebagai media antarmuka untuk menampilkan hasil pembacaan sensor, status alat, maupun informasi kondisi sistem secara langsung.

Pada sistem monitoring suhu dan tekanan transformator daya ini, LCD I2C 16x2 berfungsi untuk menampilkan informasi penting secara langsung pada perangkat, seperti nilai suhu yang terbaca dari sensor termokopel tipe K, nilai tekanan internal tangki yang terbaca dari sensor tekanan, serta status kondisi sistem (aman, *warning*, atau bahaya). Dengan adanya LCD, pengguna dapat memantau kondisi alat secara langsung di lokasi tanpa harus mengakses *website* atau perangkat *smartphone* terlebih dahulu, sehingga mempermudah proses pengecekan cepat saat berada di dekat simulasi sistem, sekaligus menjadi indikator cadangan apabila koneksi internet ke *website* monitoring sedang terputus.

2.2.14 Heater



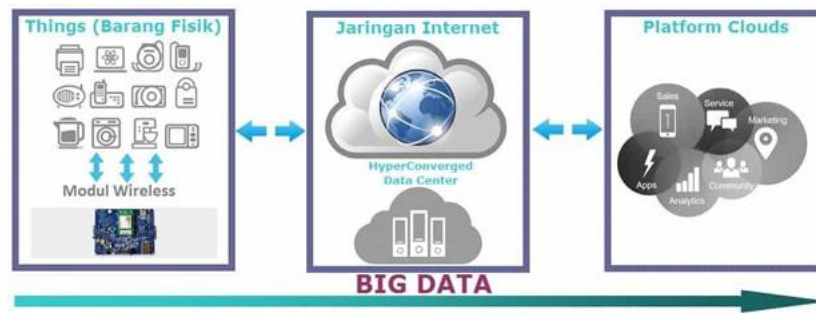
Gambar 2.12 Heater

Heater merupakan alat yang digunakan untuk memanaskan bahan biasanya cairan dengan menggunakan energi sebagai sumber pemanas. Pemanas listrik banyak dipakai dalam kehidupan sehari-hari, baik didalam rumah tangga ataupun pada peralatan dan mesin industri. Panas yang dihasilkan oleh elemen pemanas listrik bersumber dari kawat atau pita bertahanan listrik tinggi (*resistance wire*) yang dialiri arus listrik pada kedua ujungnya, kemudian dilapisi oleh isolator yang mampu meneruskan panas dengan baik sekaligus menjaga keamanan penggunaan. Panas yang dihasilkan oleh elemen pemanas listrik ini bersumber dari kawat ataupun pita bertahanan listrik tinggi (*Resistance Wire*) biasanya bahan yang digunakan adalah nikelin yang dialiri arus listrik pada kedua ujungnya dan dilapisi oleh isolator listrik yang mampu meneruskan panas dengan baik hingga aman jika digunakan.

2.2.15 Internet Of Things (IoT)

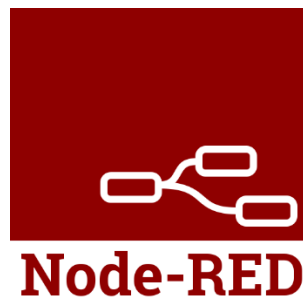
Internet of Things (IoT) merupakan sebuah konsep yang menghubungkan perangkat fisik yang dilengkapi sensor maupun aktuator ke dalam suatu jaringan internet, sehingga antarperangkat dapat saling terkoneksi satu sama lain. Dengan adanya konektivitas tersebut, setiap perangkat dapat melakukan pengumpulan data, pertukaran informasi, hingga saling mengontrol antarperangkat secara otomatis. Proses penghubungan antarperangkat maupun ke sistem pusat ini didukung oleh berbagai teknologi komunikasi nirkabel, seperti Wi-Fi, *Bluetooth*, maupun RFID. Secara prinsip, sistem IoT memanfaatkan algoritma tertentu untuk menerjemahkan perintah digital menjadi tindakan nyata pada perangkat yang terhubung. Algoritma

tersebut juga berperan dalam memungkinkan terjadinya komunikasi antarperangkat, pertukaran data, serta pelaksanaan fungsi tertentu secara otomatis tanpa memerlukan campur tangan manusia secara terus-menerus. Gambaran alur kerja sistem *Internet Of Things* secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.13 Alur Kerja *Internet Of Things*

2.2.16 Node Red



Gambar 2.14 Website Node Red

Salah satu platform yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem IoT adalah Node Red. Node Red adalah sebuah tool berbasis browser yang memungkinkan kita untuk “mengalirkan logika” antar perangkat, sensor, API, dan berbagai layanan online dengan cara menyusun blok-blok (yang disebut node) secara visual. Awalnya dikembangkan oleh tim kecil dari IBM, Node-RED kini merupakan proyek *open-source* yang didukung komunitas global dan banyak digunakan dalam berbagai proyek IoT, otomasi rumah, bahkan integrasi sistem industri. Node Red bekerja dengan konsep pemrograman berbasis *flow-based programming* yang memungkinkan pengguna mengintegrasikan berbagai perangkat IoT, layanan web, serta sistem database melalui antarmuka visual.

Node-RED menyediakan berbagai modul yang mendukung integrasi protokol komunikasi IoT seperti HTTP, MQTT, dan *WebSocket* serta menyediakan fitur dashboard yang memungkinkan visualisasi data sensor secara real-time melalui antarmuka berbasis website.