

BAB II

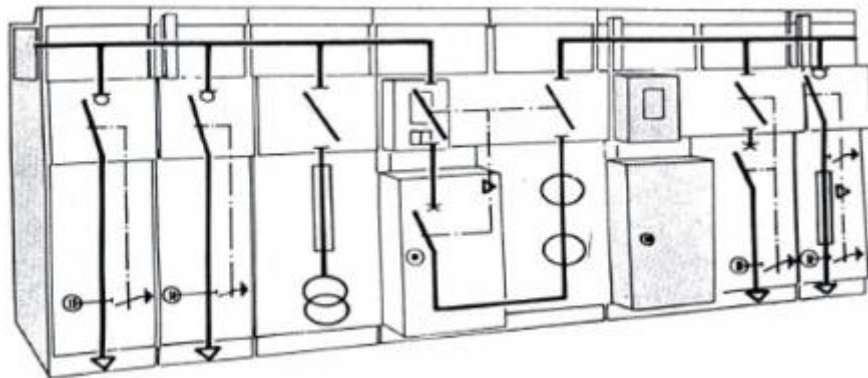
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Konsep Dasar Kubikel 20 kV

Kubikel merupakan seperangkat peralatan listrik tegangan menengah yang berfungsi sebagai penghubung, pemutus, pembagi, sekaligus pengendali tenaga listrik. Perangkat ini biasanya dipasang pada gardu induk, gardu distribusi, maupun gardu hubung. Kubikel pada dasarnya adalah rakitan dari satu atau lebih gawai *switching* yang diselengkapi lemari pelat logam, dan di dalamnya dilengkapi dengan sirkit kontrol, sirkit bantu, instrumen ukur, serta sirkit proteksi. (Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2000)

Peran kubikel sangat krusial dalam menyalurkan energi listrik dari gardu induk menuju konsumen melalui jaringan distribusi tegangan menengah. Apabila kinerjanya tidak optimal, maka dapat menimbulkan gangguan pada pasokan listrik yang berdampak pada penurunan efisiensi serta keandalan sistem distribusi tenaga listrik. (Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2000)

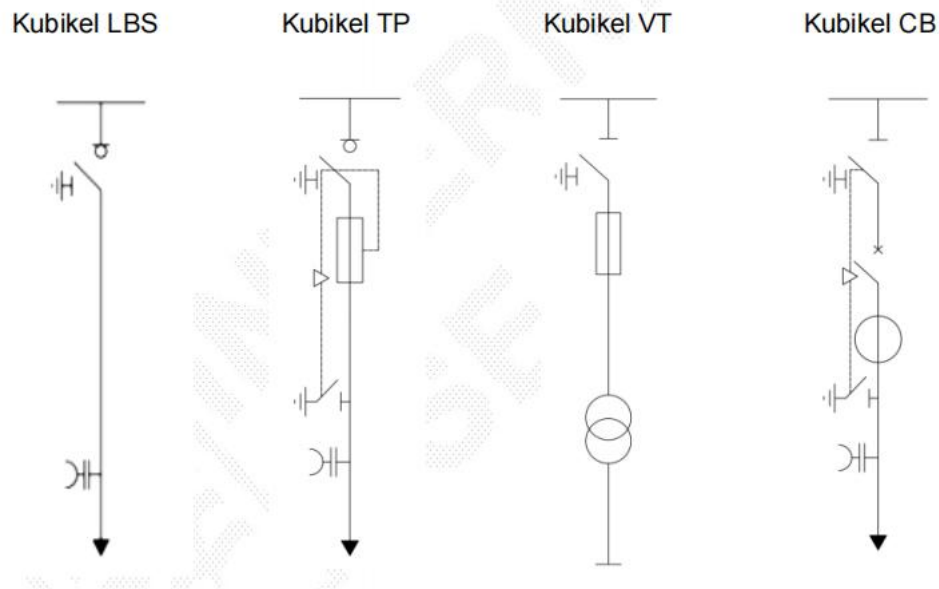


Gambar 2. 1 Kubikel distribusi 20 KV

Berdasarkan fungsi dan nama peralatan yang terpasang, kubikel dibedakan menjadi beberapa jenis:

- Kubikel Pemutus Tenaga (PMT-CB)
- Kubikel PMS (Pemisah)
- Kubikel *LBS* (*Load Break Switch*)

- Kubikel *CB Out Metering* (PMT CB)
- Kubikel TP (*Transformator Protection*)
- Kubikel PT (*Potensial Transformer*)



Gambar 2. 2 Jenis-jenis Kubikel

Komponen utama kubikel :

- Terminal penghubung yaitu tempat menghubungkan kabel incoming dan outgoing ke kubikel serta ke busbar, *PT* (transformator tegangan), dan *CT* (transformator arus) untuk pengukuran dan proteksi.
- Busbar (*rell busbar*) yaitu rel penghantar listrik 20 kV yang biasanya terbuat dari tembaga atau aluminium, berfungsi sebagai penghubung antar bagian kubikel.
- Pemutus sirkuit (*circuit breaker*) berfungsi memutus aliran listrik secara otomatis saat terjadi gangguan, biasanya menggunakan *vacuum circuit breaker* (VCB) untuk tegangan 20 kV.
- Load Break Switch* (LBS) yaitu saklar pemutus beban untuk menghubungkan atau memutus sirkuit saat kondisi berbeban normal, dilengkapi alat peredam busur api.
- Pemisah hubung tanah (PMS) berfungsi untuk mengamankan kubikel pada saat tidak bertegangan dengan menghubungkan terminal kabel ke tanah (*grounding*), biasanya ada sistem *interlock* dengan pintu kubikel.
- Fuse holder* dan *fuse* berfungsi sebagai proteksi tambahan.

- g) Mekanik kubikel berfungsi untuk menggerakkan dan membuka/menutup kontak pemutus dan saklar.
- h) *Heater* (pemanas) berfungsi untuk menjaga kelembaban ruang terminal kabel, mengurangi gangguan *corona*.
- i) Lampu indikator berfungsi untuk menunjukkan status operasi kubikel.
- j) Enclosure yaitu kotak pelindung dari bahan baja galvanis.

(PUIL)(Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2000)

Secara umum, kubikel 20 kV terdiri dari kompartemen atas untuk busbar dan kompartemen bawah untuk terminasi kabel dan peralatan penghubung lainnya. Pada terminasi kabel pada kubikel 20 kV merupakan bagian dari terminal penghubung yang terletak di bagian bawah kubikel, tempat kabel *incoming* dan *outgoing* dihubungkan ke busbar melalui terminal khusus.

2.1.2 Dampak Kelembapan terhadap Keandalan Kubikel

Kelembapan yang tinggi di dalam kubikel 20 kV dapat menurunkan kekuatan isolasi udara dan permukaan bahan isolasi, sehingga meningkatkan risiko terjadinya fenomena korona, partial discharge, flashover, korosi, serta percepatan penuaan termal komponen. Kondisi ini menjadi lebih kritis ketika heater kubikel tidak beroperasi saat suplai PLN padam, karena uap air dapat mengalami kondensasi pada dinding logam, permukaan isolator, dan terminasi kabel, lalu memicu gangguan saat tegangan kembali diberikan.

2.1.2.1 Corona

Korona adalah pelepasan muatan listrik yang terjadi akibat ionisasi udara di sekitar konduktor bertegangan tinggi tanpa terjadi hubung singkat penuh. Pada kubikel 20 kV, korona dapat muncul ketika medan listrik cukup tinggi dan diperparah oleh kondisi kelembapan yang tinggi. Buku Pengembangan Rancang Bangun Pendeteksi Gejala Korona pada Kubikel TM 20 kV menjelaskan bahwa ionisasi udara dipengaruhi oleh besar tegangan dan kondisi lingkungan sekitar elektroda.(Hidayat et al., 2022a)

Kelembapan tinggi menyebabkan meningkatnya konduktivitas udara dan mempercepat proses ionisasi, sehingga memperbesar kemungkinan timbulnya korona. Jika terjadi terus-menerus, korona dapat menyebabkan degradasi permukaan isolasi dan menjadi tahap awal sebelum munculnya partial discharge yang lebih serius.(Hidayat et al., 2022a)

2.1.2.2 *Partial Discharge*

Partial discharge (PD) adalah pelepasan muatan lokal yang hanya menjembatani sebagian sistem isolasi, misalnya pada rongga udara void, permukaan lembab, atau daerah cacat dalam material isolasi padat dan gas. Dalam penelitian mengenai pengaruh partial discharge pada kubikel incoming 20 kV, disebutkan bahwa PD dapat disebabkan oleh kerusakan isolasi, kontaminasi, serta faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan.(Amalia Putya Adirawati, n.d.). Nilai pengukuran *PD* pada busbar dan PMT menunjukkan level signifikan yang mengindikasikan potensi degradasi isolasi.

Kelembapan tinggi di dalam kubikel dapat membentuk lapisan film konduktif tipis pada permukaan isolator atau memperbesar kandungan uap air di sela udara, sehingga menurunkan tegangan *inceptions Partial Discharge* dan mempercepat proses penuaan isolasi melalui mekanisme erosi, karbonisasi, dan *treeing*. Kelembapan tinggi dapat menciptakan lapisan konduktif tipis pada permukaan isolator (*surface discharge*), memperbesar kemungkinan terbentuknya *void* dan jalur pelepasan muatan. Jika tidak dikendalikan, *Partial Discharge* dapat berkembang menjadi kerusakan permanen pada sistem isolasi.

Hasil pengujian dengan metode *Transient Earth Voltage (TEV)* pada kubikel incoming 20 kV sebagaimana dibahas dalam penelitian "*Pengaruh Partial Discharge pada Kubikel Incoming 20 kV*" menunjukkan bahwa komponen busbar dan PMT yang terindikasi PD dengan level di atas batas aman PLN berpotensi mengalami kerusakan isolasi dan gangguan sistem jika tidak segera ditangani, di mana salah satu faktor pemicunya adalah kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan yang tidak terkontrol. (Hidayat et al., 2022b) (Amalia Putya Adirawati, n.d.)

Selain itu, berdasarkan buku “*Pendeteksi Corona Discharge*”, fenomena pelepasan muatan parsial dan corona sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, khususnya suhu dan kelembapan yang tinggi, karena kelembapan dapat menurunkan resistansi permukaan isolator dan mempermudah terjadinya ionisasi udara di sekitar konduktor. Oleh karena itu, pengendalian suhu dan kelembapan dalam kubikel menjadi faktor penting dalam menjaga keandalan sistem dan mencegah berkembangnya aktivitas *Partial Discharge* pada peralatan tegangan menengah.(Hidayat et al., 2022b)

2.1.2.3 *Flash Over*

Flashover adalah loncatan api listrik yang menjembatani sepenuhnya sela isolasi antara dua konduktor atau antara konduktor dan tanah, biasanya didahului oleh aktivitas korona dan *partial discharge* pada permukaan atau rongga isolasi. Kelembapan udara memiliki pengaruh signifikan terhadap tegangan tembus (*flashover voltage*) pada permukaan isolator. Berdasarkan penelitian “*Effect of Humidity on Flashover Voltage of Outdoor Insulators*”, peningkatan kelembapan relatif menyebabkan penurunan nilai tegangan *flashover*. Hal ini terjadi karena uap air yang mengendap pada permukaan isolator membentuk lapisan konduktif tipis yang meningkatkan arus bocor (*leakage current*). Arus bocor yang terus meningkat akan mempercepat terbentuknya jalur karbonisasi (*tracking*) yang akhirnya dapat memicu terjadinya *flash over*.(Christiono et al., 2025)(Hidayat et al., 2022a) (Christiono et al., 2024)

2.1.2.4 *Korosi*

Kelembapan yang tinggi juga berkontribusi terhadap proses korosi pada komponen logam di dalam kubikel, seperti busbar, terminal, dan koneksi penghantar. Uap air yang mengembun dapat membentuk lapisan elektrolit tipis yang mempercepat reaksi oksidasi. Korosi ini menyebabkan peningkatan tahanan kontak (*contact resistance*), yang pada akhirnya menimbulkan rugi daya dan penurunan kualitas sambungan listrik. Selain berdampak mekanis, korosi juga berpotensi mempercepat timbulnya *hotspot* yang dapat memicu *overheating* pada sistem.

2.1.2.5 Overheating

Kelembapan tinggi yang tidak terkendali dapat berkontribusi pada overheating secara tidak langsung melalui dua mekanisme utama, yaitu degradasi isolasi dan peningkatan tahanan kontak. Isolasi yang mengalami penuaan karena partial discharge dan korona pada kondisi lembab cenderung memiliki rugi dielektrik dan arus bocor yang lebih besar, sehingga menghasilkan pelepasan panas tambahan di sekitar komponen bertegangan dan mempercepat penurunan kualitas isolasi. Selain itu, korosi pada terminal dan sambungan akibat kelembapan menyebabkan kenaikan tahanan kontak yang memicu pemanasan lokal saat arus beban mengalir, sehingga mempercepat siklus penuaan termal dan berpotensi menimbulkan kegagalan isolasi lebih lanjut.

Sejalan dengan hal tersebut, penelitian yang dilakukan oleh Samsurizal, Christiono, dan K.T. Mauriraya dalam jurnal “*Effect of Temperature on the Dielectric Properties of Silicone Rubber Polymer Insulator Filled with Coal Fly Ash*” menunjukkan bahwa kenaikan temperatur memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik dielektrik bahan isolator silikon *rubber* berbasis *filler* abu terbang batubara. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu cenderung menurunkan kekuatan tegangan tembus (*dielectric breakdown strength*), serta memengaruhi nilai resistansi isolasi dan kapasitansi material .

Secara umum, semakin tinggi temperatur, semakin berkurang margin keselamatan dielektrik yang dapat diberikan oleh bahan isolasi. Namun demikian, komposisi *filler coal fly ash* dalam persentase tertentu masih mampu membantu mempertahankan kestabilan karakteristik dielektrik material pada variasi suhu tertentu, sehingga berpotensi meningkatkan performa isolator dalam kondisi operasional yang mengalami fluktuasi temperatur.(Christiono et al., 2025)

Pengoperasian *heater* kubikel tanpa kontrol akan menyebabkan pemanasan terus-menerus di dalam ruang kubikel, bahkan ketika kelembapan relatif sudah turun dan tidak lagi membutuhkan pengeringan. Dalam kondisi tersebut, panas yang dihasilkan heater tidak lagi berfungsi sebagai pengendali kondensasi, tetapi justru menjadi faktor tambahan yang memperparah risiko *overheating* pada komponen

internal. Peningkatan suhu yang berlebihan dapat mempercepat penuaan termal isolasi, menurunkan *margin* keselamatan dielektrik, serta meningkatkan rugi-rugi dielektrik dan arus bocor pada material isolasi, sebagaimana ditunjukkan oleh pengujian sifat dielektrik *silikon rubber* pada temperatur tinggi.

Selain itu, suhu yang terus-menerus tinggi akan memperbesar efek kombinasi antara temperatur dan kelembapan terhadap degradasi isolasi, sehingga mempercepat kemungkinan munculnya *partial discharge* dan gangguan isolasi lainnya di dalam kubikel. (Hidayat et al., 2022b)

Masalah utama bukan hanya kelembapan ketika kubikel sedang bertegangan saja, melainkan juga ketika pasokan listriknya padam. Saat padam, suhu di dalam kubikel akan mengikuti suhu lingkungan dimana uap air dari udara luar bisa terkondensasi di dalam kubikel, dinding logam, dan terminasi. Karena *heater* tidak bekerja, tidak ada proses pengeringan atau pengendalian kelembapan. Akibatnya, terjadi akumulasi kelembapan selama kondisi padam tanpa heater. Selama kondisi padam ini bisa terbentuk lapisan lembab, tetesan air, atau film tipis konduktif pada permukaan isolasi.

Risiko gangguan muncul sesaat setelah listrik kembali menyala, dalam kondisi ini sangat mudah terjadi *partial discharge*, *tracking*, bahkan *flashover*, karena kelembapan sudah “menunggu” saat tiba-tiba menerima tegangan tinggi. Inilah alasan krusial mengapa heater tidak boleh hanya bergantung pada JTR, tapi butuh sistem *hybrid* (panel surya dengan penyimpanan Aki). Dengan pendeteksi suhu dan kelembapan secara *real-time* dengan sistem *monitoring* berbasis sensor dan teknologi *IoT* memungkinkan kondisi lingkungan kubikel dipantau secara kontinu, sehingga potensi gangguan akibat korona, *partial discharge*, maupun *flashover* dapat diantisipasi lebih dini.

2.1.3 Fungsi *heater* pada kubikel

Heater merupakan perangkat penting yang digunakan untuk memanaskan ruang terminal kabel agar kelembabannya terjaga. keadaan ini diharapkan dapat mengurangi efek korona pada terminal kubikel tersebut, sehingga mampu menjaga tingkat isolasi tetap baik dan mencegah timbulnya fenomena corona dan gangguan listrik lainnya.

Setiap kubikel harus dilengkapi perangkat pencegah kondensasi berupa thermostat dan pemanas (*heater*) sesuai SPLN D3.020-1:2019, yang mensyaratkan *heater* memiliki karakteristik suplai daya 230V AC dan daya nominal sebesar 100W. Produsen wajib merekomendasikan setelan *thermostat* pada lokasi pemasangan PHB agar sistem pemanas bekerja optimal, serta dapat menggunakan *humidstat* jika sistem *thermostat* kurang efektif untuk menangkal kondensasi. Sirkuit pemanas harus dilengkapi pengaman berupa MCB. (PT PLN (Persero), 2019)



Gambar 2. 3 *Heater* pada Kubikel

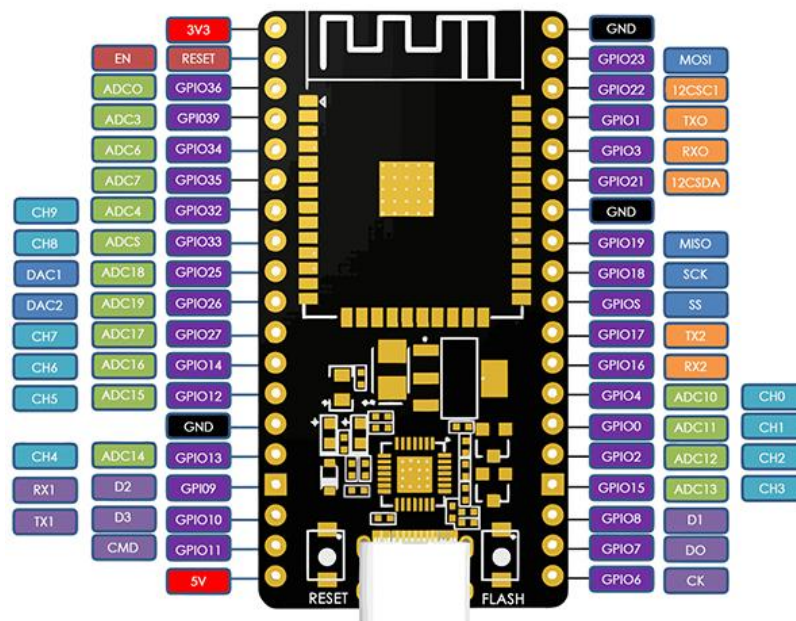
Keunggulan utama pada rancang bangun ini adalah penggunaan sistem *heater hybrid*, yaitu *heater* tetap dapat beroperasi meskipun suplai listrik utama dari jaringan PLN (JTR) mengalami pemadaman. Dengan adanya sumber daya listrik cadangan seperti panel surya dengan sistem penyimpanan energi, *heater* tetap menjaga kondisi internal kubikel tetap kering selama periode padam. Hal ini penting karena risiko gangguan isolasi sering kali muncul sesaat setelah sistem kembali diberi tegangan dalam kondisi permukaan yang lembab.

Pada kondisi normal, *heater* bekerja berdasarkan pembacaan sensor suhu dan kelembapan yang diproses oleh sistem kontrol berbasis mikrokontroler. Ketika kelembapan melebihi ambang batas yang ditentukan, heater akan aktif untuk menurunkan kelembapan melalui peningkatan suhu kubikel.

2.1.4 ESP Wroom 32

ESP WROOM 32 atau sering dikenal dan disebut dengan ESP32 merupakan modul mikrokontroler 32-bit berbasis prosesor *dual-core* Xtensa LX6 yang dirancang oleh *Espressif Systems*. Mikrokontroler ini memiliki kemampuan komputasi yang tinggi dengan frekuensi hingga 240 MHz, serta dilengkapi dengan fitur komunikasi nirkabel terintegrasi seperti *WiFi* 802.11 b/g/n dan *Bluetooth/BLE*.

Selain itu, ESP32 memiliki kapasitas memori yang lebih besar dibandingkan mikrokontroler generasi sebelumnya, serta mendukung berbagai jenis *input-output* digital maupun analog. Pada varian ESP-WROOM-32, tersedia hingga 16 pin *ADC (Analog Digital Converter)* yang memungkinkan perangkat ini memproses banyak sinyal analog secara bersamaan. (Picking, 2017; Rinaldi & Jatmiko, 2025)



Gambar 2. 4 ESP WROOM 32

ESP32 mendukung berbagai sensor analog maupun digital. Pada jurnal yang digunakan sebagai referensi, integrasi dilakukan melalui pin GPIO dan ADC, di mana *output* sensor dihubungkan langsung ke pin analog ESP32 untuk diproses sebagai data digital.(Picking, 2017)

Salah satu keunggulan ESP32 adalah kemampuan komunikasi *IoT* yang sangat baik. ESP32 dapat mengirim data sensor ke server *IoT* melalui protokol *HTTP*, *MQTT*, atau *WebSocket*. Dalam penelitian yang dianalisis, ESP32 berfungsi sebagai *node IoT* yang mengirimkan data secara *real-time* melalui internet.

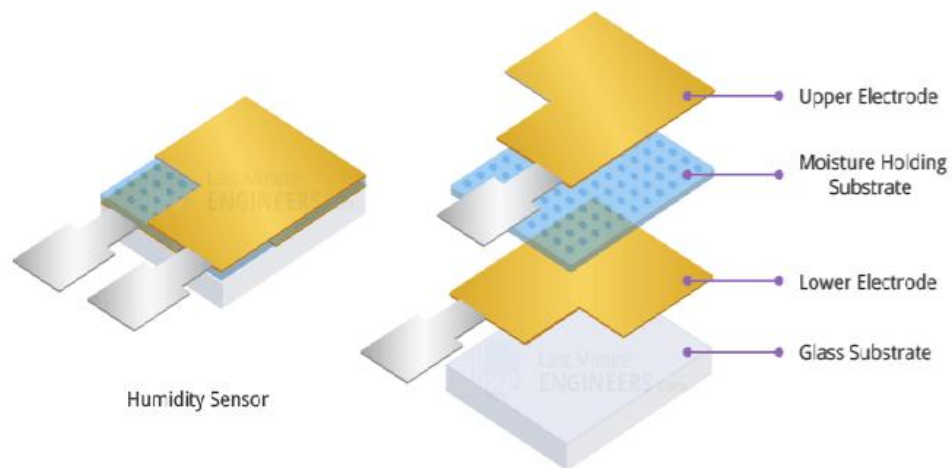
2.1.5 Sensor Kelembaban dan Suhu

Sensor DHT22 adalah suatu sensor yang digunakan untuk mengukur temperatur dan kelembaban udara. Dalam penelitian Liu (2022), sistem *Smart Greenhouse* dirancang menggunakan *NodeMCU* sebagai mikrokontroler utama dan DHT22 sebagai sensor suhu dan kelembapan. DHT22 dipilih karena memiliki akurasi yang lebih baik dibandingkan sensor sejenis (misalnya DHT11), dengan rentang tegangan kerja 3–5V dan arus kerja maksimum 2,5 mA. Pada Gambar 2 dapat dilihat bentuk sensor DHT22, sensor ini memiliki keunggulan rentang pengukuran lebih luas (0–100 % RH, -40 sampai 80 °C) dengan akurasi lebih tinggi (± 0.5 °C suhu, ± 2 –3 % RH kelembapan). (Y. Liu, 2022)



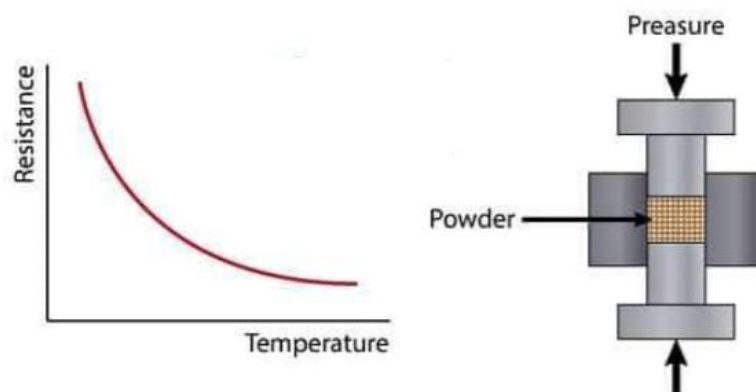
Gambar 2. 5 Sensor kelembaban dan suhu DHT22

Sensor DHT22 bekerja berdasarkan dua elemen utama, yaitu sensor kelembapan kapasitif dan sensor suhu berbasis thermistor *NTC*. Pada elemen kelembapan, lapisan polimer higroskopis menyerap uap air sehingga mengubah konstanta dielektrik material dan menghasilkan perubahan kapasitansi antara dua elektroda, yang kemudian dikonversi menjadi nilai kelembapan relatif oleh pemroses internal sensor.



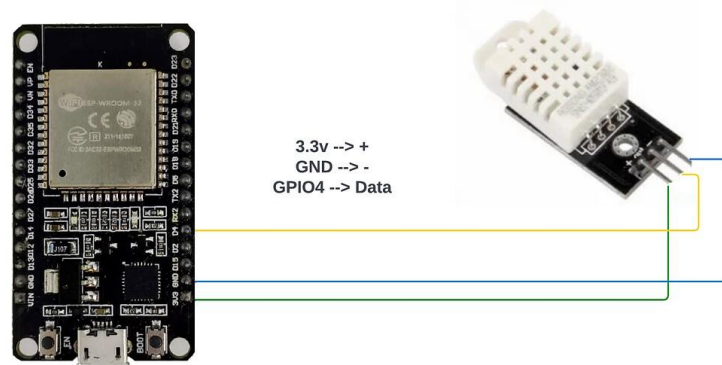
Gambar 2. 6 Prinsip kerja sensor dalam membaca kelembaban dari dalam DHT22

Sementara itu, pengukuran suhu dilakukan menggunakan *NTC* thermistor yang resistansinya menurun ketika suhu meningkat, dan perubahan resistansi ini didigitalkan melalui internal. Seluruh hasil pengukuran dari kedua elemen tersebut diproses oleh mikrokontroler internal yang melakukan kalibrasi, linearisasi, serta pengolahan sinyal sebelum menghasilkan data digital 40-bit yang siap dikirimkan ke mikrokontroler eksternal. (T. Liu, n.d.data sheet)



Gambar 2. 7 Prinsip kerja sensor dalam membaca suhu dari dalam DHT22

Data dari sensor diproses oleh ESP32 WROOM dan ditampilkan secara *real-time* pada *web*. Jika kelembapan melebihi ambang batas (misalnya $>80\%$), maka sistem akan mengaktifkan heater secara otomatis untuk menjaga kondisi kubikel tetap kering.



Gambar 2. 8 wiring ESP32 - DHT22

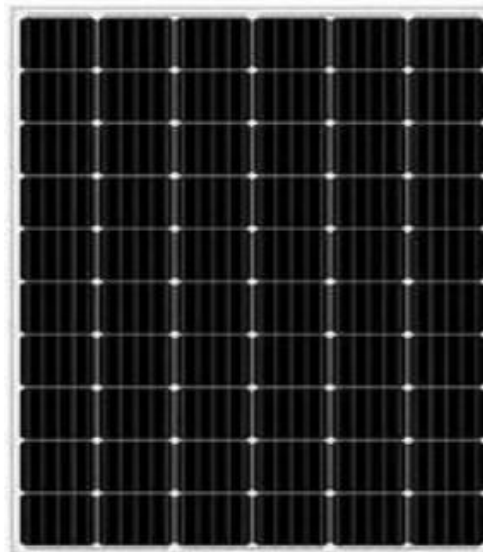
2.1.6 Energi hybrid (PLN – panel surya)

Energi *hybrid* merupakan sistem energi yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi yang berbeda untuk menghasilkan listrik secara lebih efisien, handal, dan berkelanjutan. Sistem ini biasanya menggabungkan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya (PLTS) dengan sumber energi konvensional seperti generator berbahan bakar fosil (genset), atau menggunakan beberapa sumber energi terbarukan secara bersamaan. Tujuan utama dari sistem energi *hybrid* adalah untuk menutupi kelemahan masing-masing sumber energi, sehingga menghasilkan pasokan listrik yang kontinyu dan dapat diandalkan.

a. Sumber Listrik PLN

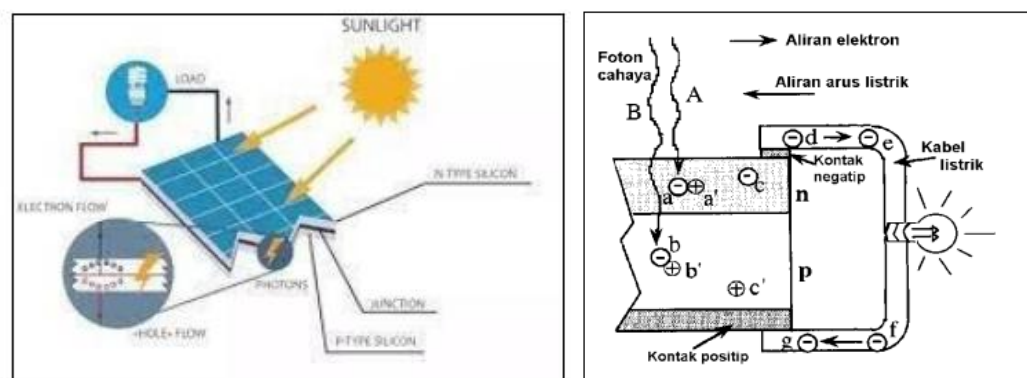
Listrik PLN (Perusahaan Listrik Negara) berfungsi sebagai salah satu sumber energi utama atau cadangan yang diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya dan pembangkit lain. Listrik PLN dalam sistem *hybrid* daya berfungsi sebagai sumber utama, penyeimbang, dan pengaman pasokan listrik, sehingga sistem *hybrid* dapat beroperasi lebih efisien, andal, dan ramah lingkungan.

b. Panel Surya (*Solar Cell*) /PLTS



Gambar 2. 9 Panel Surya Jenis Monokristalin

Panel surya merupakan alat untuk mengkonversi tenaga matahari menjadi energi listrik. *Photovoltaic* (PV) adalah teknologi yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung. *PV* biasanya dikemas dalam sebuah unit yang disebut modul. Dalam sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang bisa disusun secara seri maupun paralel. Sejumlah modul umumnya terdiri dari 36 sel surya atau 33 sel dan 72 sel. Modul-modul ini kemudian dirangkai menjadi Panel Surya dan jika Panel Surya ini dihubungkan secara baris dan kolom disebut dengan *array*. (Samsulrizal et al., 2021)



Gambar 2. 10 Prinsip Kerja Panel Surya Proses Pembangkitan Arus Listrik Pada Sel Surya

Sel surya bekerja dengan mengubah energi cahaya matahari menjadi listrik arus searah (*DC*) melalui efek fotovoltaiik. Beberapa sel dirangkai membentuk modul surya

untuk menghasilkan tegangan dan arus yang lebih besar. Agar *output* optimal, modul diarahkan ke matahari sehingga intensitas cahaya maksimal. Energi listrik yang dihasilkan kemudian disalurkan dan disimpan dalam baterai untuk digunakan oleh beban listrik.

Sistem *hybrid* antara listrik PLN dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan solusi inovatif untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik, terutama pada aplikasi kritis seperti *heater* kubikel di gardu distribusi. Dalam sistem ini, listrik PLN berfungsi sebagai sumber utama yang menyuplai kebutuhan listrik harian secara langsung. Sementara itu, PLTS berperan sebagai sumber cadangan yang akan aktif ketika terjadi gangguan atau pemadaman pada jaringan Listrik PLN, atau saat beban listrik melebihi kapasitas suplai dari PLN.

Pada siang hari, panel surya menghasilkan energi listrik yang digunakan untuk mengisi baterai cadangan. Energi yang tersimpan di baterai ini akan digunakan sebagai *backup* ketika listrik PLN tidak tersedia, misalnya saat terjadi pemadaman atau terjadi gangguan. sehingga kondisi lingkungan di dalam kubikel tetap terjaga optimal meskipun terjadi pemadaman listrik utama.

2.1.7 Solar Charge Control

Solar charge controller adalah perangkat penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang berfungsi mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai dari modul surya. *Solar charge controller* menjaga baterai agar tidak mengalami *overcharge* maupun *overdischarge*, sekaligus mengoptimalkan efisiensi sistem dengan memastikan panel surya beroperasi pada titik daya maksimum dalam berbagai kondisi cuaca dan beban. (Katche et al., 2023)

Metode paling umum yang digunakan dalam *solar charge controller* adalah *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*. MPPT secara aktif menyesuaikan titik kerja (*operating point*) panel surya agar selalu berada di titik daya maksimum (*maximum power point/MPP*) pada kurva karakteristik daya terhadap tegangan (P-V), yang akan berubah-ubah seiring variasi radiasi matahari dan suhu. Saat panel surya beroperasi pada MPP,

efisiensi konversi energi menjadi optimal sehingga energi yang bisa disimpan ke baterai menjadi maksimal. (Katche et al., 2023)



Gambar 2. 11 *Solar Charge Control MPPT*

Tegangan di mana modul PV dapat menghasilkan daya maksimum disebut titik daya maksimum (atau tegangan daya puncak). Daya maksimum bervariasi dengan radiasi matahari, suhu lingkungan, dan suhu sel surya. Modul *PV* menghasilkan daya dengan tegangan daya maksimum sekitar 17 V bila diukur pada suhu sel 25°C, dapat turun hingga sekitar 15 V pada hari yang diukur pada suhu sel 25°C, dapat turun hingga sekitar 15 V pada cuaca terik dan juga dapat naik hingga 18 V pada hari yang sangat dingin. (Wahidin et al., 2022)

2.1.8 Accumulator

Baterai merupakan perangkat penyimpanan energi listrik yang bekerja berdasarkan proses elektrokimia, yaitu konversi energi kimia menjadi energi listrik (saat pengosongan/*discharge*) dan sebaliknya (saat pengisian/*recharge*). Proses ini melibatkan reaksi kimia pada elektroda yang terjadi ketika arus listrik dialirkan ke sel baterai dengan polaritas berlawanan. (Wahidin et al., 2022)

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baterai berfungsi menyimpan energi listrik yang dihasilkan panel surya dalam bentuk arus searah (DC). Energi yang tersimpan digunakan sebagai cadangan daya (*backup*) ketika panel surya tidak menghasilkan energi, misalnya pada malam hari atau saat cuaca buruk.

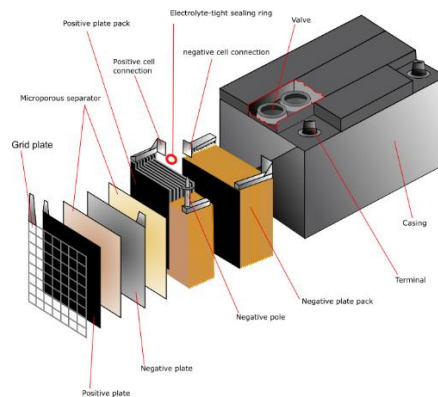
Kapasitas baterai dinyatakan dalam satuan *ampere-hour (Ah)*, yaitu arus maksimum yang dapat dikeluarkan selama satu jam. Agar umur pakai (*lifetime*) tetap panjang, proses pengosongan tidak boleh mencapai batas maksimum, yang dikenal

sebagai *Depth of Discharge (DOD)* dan biasanya dibatasi sekitar 80%. (Samsulrizal et al., 2021)

Berbagai jenis baterai diproduksi dengan karakteristik performa yang disesuaikan dengan kebutuhan aplikasinya. Pada sistem PLTS, jenis *lead-acid* paling umum digunakan karena tersedia dalam berbagai kapasitas, berbiaya rendah, dan memiliki karakteristik yang sesuai untuk penyimpanan energi surya. Untuk kondisi lingkungan ekstrem seperti suhu rendah, baterai *nickel-cadmium* (Ni-Cd) dapat digunakan meskipun harganya lebih tinggi (Dunlop, 1997). (Samsulrizal et al., 2021)

Secara umum, baterai dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu *primary* dan *secondary*. *Primary battery* bersifat sekali pakai dan tidak dapat diisi ulang sehingga tidak digunakan pada PLTS. Sebaliknya, *secondary battery* bersifat *rechargeable*, dapat menyimpan serta melepaskan energi secara berulang dengan efisiensi tinggi, sehingga menjadi pilihan utama dalam sistem PLTS. (Wahidin et al., 2022)

Dalam penelitian ini, baterai berfungsi sebagai penyimpan energi listrik secara kimiawi pada siang hari dan sumber daya cadangan ketika sumber Listrik utama (PLN) padam, sehingga kontinuitas suplai listrik untuk heater kubikel tetap terjaga



Gambar 2. 12 Accumulator

2.1.9 Inverter

Inverter adalah suatu rangkaian penyaklaran elektronik yang dapat merubah tegangan searah (*DC*) menjadi tegangan bolak balik (*AC*). *Output* suatu inverter dapat berupa tegangan AC dengan bentuk gelombang sinus (*sine wave*), gelombang kotak

(*square wave*) dan sinus modifikasi (*sine wave modified*). Sumber tegangan input inverter dapat menggunakan baterai, tenaga surya, atau sumber tegangan DC yang lain. Inverter dalam proses konversi tegangan *DC* menjadi tegangan *AC* membutuhkan suatu penaik tegangan berupa *step up transformer*. (Khatima, 2020)



Gambar 2. 13 Inverter

Berdasarkan karakteristik dan kebutuhan performa sistem, inverter dalam Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) umumnya dibedakan menjadi dua tipe, yaitu *stand-alone (off-grid)* dan *grid-connected*. Pada sistem *stand-alone*, inverter berfungsi mengubah energi listrik arus searah (DC) dari baterai atau panel surya menjadi arus bolak-balik (AC) yang konstan untuk menyuplai beban lokal secara mandiri. Inverter jenis ini tidak memerlukan sinkronisasi dengan jaringan PLN dan dapat tetap beroperasi saat jaringan utama padam. (Samsulrizal et al., 2021)

Sementara itu, *inverter grid-connected* dirancang untuk bekerja secara paralel dengan jaringan PLN, dengan fungsi utama menyalurkan energi listrik ke jaringan. Inverter tipe ini harus menghasilkan tegangan dan frekuensi yang sama persis dengan jaringan, sehingga tidak dapat beroperasi saat terjadi pemadaman karena adanya sistem proteksi *anti-islanding*. (Samsulrizal et al., 2021)

Dalam penelitian ini, sistem yang dirancang bertujuan untuk menyediakan suplai cadangan bagi heater kubikel agar tetap berfungsi ketika sumber utama PLN padam. Oleh karena itu, jenis inverter yang digunakan adalah inverter *stand-alone (off-grid)*, karena mampu menghasilkan tegangan AC secara mandiri dari energi yang tersimpan pada

baterai PLTS. Dengan pemilihan ini, sistem *hybrid* dapat tetap menjaga kontinuitas suplai listrik untuk *heater* dan mencegah peningkatan kelembapan pada kubikel 20 kV. (Samsulrizal et al., 2021)

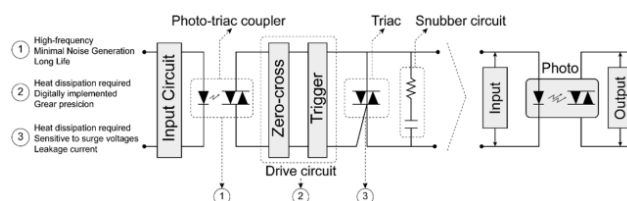
2.1.10 Autoswitch berbasis Solid State Relay (SSR)



Gambar 2. 14 Solid State Relay

Automatic Switch atau sering disebut juga *Automatic Transfer Switch (ATS)* merupakan sistem yang berfungsi untuk memindahkan sumber daya listrik secara otomatis dari sumber utama ke sumber cadangan ketika terjadi gangguan atau pemadaman. Dengan adanya sistem ini, beban penting dapat tetap teraliri listrik tanpa harus melakukan perpindahan manual.

Pada umumnya, *ATS* menggunakan kontaktor mekanik untuk melakukan perpindahan. Namun, dalam tugas akhir ini digunakan *Solid State Relay (SSR)* sebagai *autoswitch* karena lebih cepat, tidak menimbulkan percikan (*sparkless*), dan memiliki umur pakai lebih panjang dibandingkan kontaktor mekanik. SSR bekerja dengan komponen semikonduktor sehingga dapat melakukan *switching* dengan lebih senyap dan andal.



Gambar 2. 15 Solid State Relay (SSR)

Solid-State Relay (SSR) merupakan perangkat saklar elektronik yang menggunakan komponen semikonduktor seperti *TRIAC*, *MOSFET*, atau *IGBT*, serta *optocoupler* sebagai media isolasi untuk mengendalikan beban AC maupun DC tanpa kontak mekanis. Tidak seperti kontaktor elektromekanis, SSR bekerja tanpa percikan (*sparkless switching*) dan memiliki kecepatan *switching* yang tinggi karena tidak terdapat elemen bergerak di dalamnya.

SSR dibagi menjadi dua tipe utama berdasarkan jenis bebannya, yaitu *SSR AC* dan *SSR DC*. *SSR AC* umumnya menggunakan *TRIAC* dan sering didesain sebagai zero-cross SSR, yaitu melakukan penyalan tepat pada titik nol gelombang sinus sehingga mengurangi gangguan harmonisa dan lonjakan arus. Karakteristik ini membuat *SSR AC* sangat cocok digunakan untuk beban resistif, seperti *heater* (Medina et al., 2024). *SSR DC* biasanya memanfaatkan *MOSFET* atau *IGBT* untuk menangani *switching* pada beban DC berdaya tinggi.

Pada *SSR* terdapat *Optocoupler* atau optoisolator yang merupakan komponen elektronika yang mentransfer sinyal listrik melalui media cahaya, bukan melalui sambungan listrik langsung. Di dalamnya terdapat *LED* sebagai pemancar cahaya dan photodetector (*phototransistor*, *photodiode*, *phototriac*) sebagai penerima. Ketika *LED* menyala, cahaya mengenai *photodetector* dan mengubahnya menjadi sinyal listrik pada sisi output. (Medina et al., 2024)

Komponen ini berfungsi memberikan isolasi galvanik antara rangkaian kontrol tegangan rendah (Arduino 5V) dan rangkaian daya tinggi (220VAC), sehingga melindungi sistem dari lonjakan arus, noise, atau gangguan listrik.

Pada *SSR*, *optocoupler* memicu *TRIAC* dengan cara mengaktifkan *phototriac* internal, terutama tipe zero-cross yang memastikan *switching* terjadi di titik nol gelombang AC. Hal ini menghasilkan *switching* yang halus, cepat, dan tanpa percikan

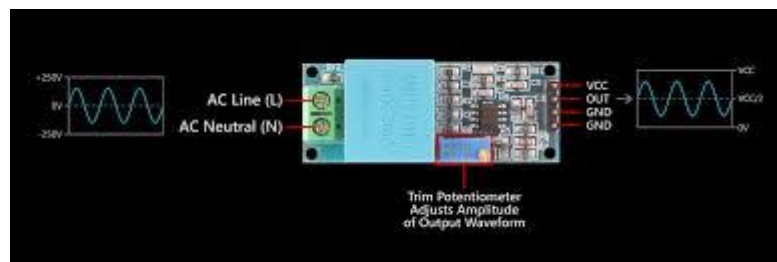
Dengan mekanisme ini, *ATS* mampu menjaga kontinuitas suplai listrik sehingga dalam tugas akhir ini, *ATS* difungsikan untuk memindahkan suplai *heater* dari sumber utama (PLN) ke sumber cadangan (PLTS) apabila terjadi pemadaman listrik. Dengan

adanya *ATS*, heater tetap dapat beroperasi menjaga kelembapan kubikel meskipun sumber utama mengalami gangguan.

2.1.11 Sensor Tegangan

Sensor ZMPT101B merupakan modul pengukuran tegangan *AC* yang menggunakan transformator tegangan mini untuk menurunkan tegangan jaringan menjadi sinyal rendah yang aman untuk mikrokontroler. Transformator ini bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik: perubahan tegangan *AC* pada kumparan primer akan menghasilkan tegangan proporsional pada kumparan sekunder, sekaligus menyediakan isolasi galvanik yang penting bagi keselamatan sistem (Li et al., 2019; Al-Mutairi, 2021).

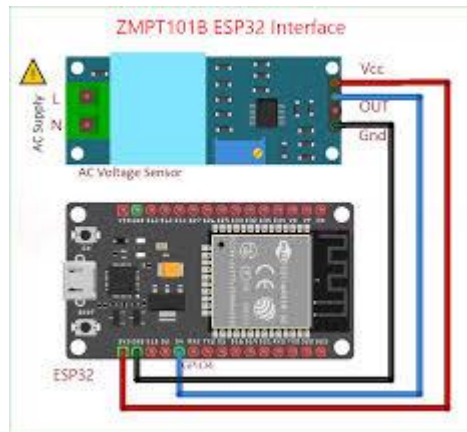
Pada modul ZMPT101B, sinyal sekunder yang kecil diperkuat menggunakan op-amp LM358 sehingga amplitudonya berada dalam rentang *ADC* mikrokontroler. Potensiometer bawaan berfungsi mengatur sensitivitas penguatan agar bentuk gelombang tetap stabil dan tidak melebihi batas *ADC*. Mikrokontroler kemudian melakukan proses sampling sinyal sinus tersebut untuk menghitung nilai RMS menggunakan metode digital. Nilai *RMS* yang diperoleh dari *ADC* dikalibrasi menggunakan faktor koreksi yang dihitung berdasarkan perbandingan dengan pengukuran multimeter (Kumar & Sahu, 2020). Proses ini memastikan akurasi sensor meskipun terdapat variasi komponen atau noise pada jaringan (Bayindir et al., 2016).



Gambar 2. 16 Sensor Tegangan AC ZMPT101B

Sensor ini dapat digunakan pada tegangan pengoperasian sampai 250 VAC dan mengeluarkan sinyal analog yang dapat dikonversikan menjadi sinyal digital oleh mikrokontroler. Sensor ini memiliki 4 pin diantaranya pin 1 dan pin 2 untuk input utama dan pin 3 dan 4 untuk output. Sensor tegangan ZMPT101B memiliki isolasi tegangan

sebesar 4000V dan bekerja optimal pada suhu 40C sampai 70C. (Pramudita & Ardiansyah, 2021)



Gambar 2. 17 *Wiring* ZMPT101B – ESP WROOM32

Sensor ini digunakan sebagai parameter input ESP 32 WROOM untuk pendeteksi tegangan dari sumber utama yang berasal dari listrik PLN (Jaringan Tegangan Rendah). Jika arduino tidak menerima sinyal dari sensor tegangan ini maka ESP 32 WROOM memberikan perintah ke *SSR* untuk bekerja sebagai sakelar dari sumber cadangan dari sumber PLTS

2.1.12 Layar LCD

Liquid Crystal Display (LCD) karakter adalah perangkat tampilan berbasis kristal cair yang digunakan untuk menampilkan karakter alfanumerik dan simbol sederhana. *LCD* karakter 16×2 mampu menampilkan maksimal 32 karakter yang tersusun dalam dua baris, masing-masing terdiri dari 16 karakter. *LCD* jenis ini banyak digunakan pada sistem *embedded* karena konsumsi daya yang rendah, kemudahan pemrograman, serta keterbacaan tampilan yang baik.



Gambar 2. 18 LCD 16×2 driven by HD44780 dengan *pinmap*

LCD yang digunakan pada rancang bangun sistem merupakan *LCD* karakter 16×2 (16 kolom × 2 baris) berbasis kontroler HD44780 yang dilengkapi dengan modul I²C (PCF8574) sebagai antarmuka komunikasi. *LCD* ini berfungsi menampilkan informasi berupa karakter alfanumerik hasil pemrosesan data oleh mikrokontroler ESP32 WROOM.

Pada rancang bangun system ini, *LCD* HD44780 dihubungkan ke ESP32 WROOM menggunakan modul I2C berbasis IC PCF8574. Modul ini memungkinkan komunikasi serial dua kawat, yaitu SDA (*data*) dan SCL (*clock*), yang berfungsi mengonversi komunikasi paralel menjadi komunikasi serial I2C sehingga mengurangi jumlah pin yang digunakan pada mikrokontroler dan hanya memerlukan dua pin I/O dari ESP 32 WROOM.(Ridho Tullah Syahputra, 2024)



Gambar 2. 19 LCD 16×2 *driven by* HD44780 dengan *I²C*

Dalam sistem ini, *LCD* berperan sebagai antarmuka manusia–mesin (*Human Machine Interface/HMI*) sederhana yang memungkinkan pengguna memantau kondisi sistem secara langsung. Informasi yang ditampilkan pada *LCD* digunakan sebagai

indikator visual untuk mendukung proses pengawasan sistem, khususnya dalam memastikan bahwa proses pengendalian kelembapan, pengoperasian *heater*, dan menampilkan *IP address* yang digunakan (*monitoring web*), serta perpindahan sumber daya melalui sistem *ATS* dan *PLTS* berlangsung sesuai dengan kondisi yang diharapkan.

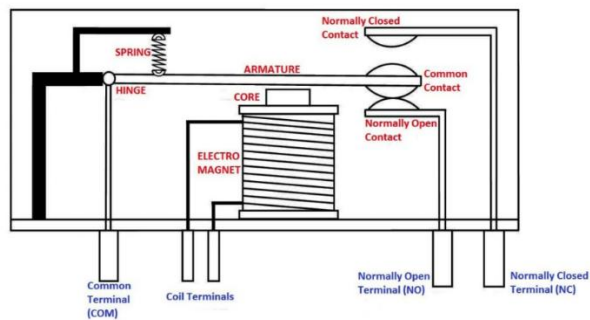
2.1.13 Relay AC Elektromekanis MK2P-I

Relay elektromekanis adalah perangkat saklar listrik yang dikendalikan secara elektromagnetik untuk melakukan proses penghubung dan pemutusan beban dalam sistem kendali. Secara umum, relay terdiri dari kumparan (*coil*) yang menghasilkan medan magnet ketika dialiri arus, *armature* yang bergerak akibat gaya elektromagnetik, serta sekumpulan kontak saklar (*contacts*) yang berpindah posisi dari *Normally Open* (*NO*) menjadi *Normally Closed* (*NC*) atau sebaliknya saat relay diaktifkan. Relay melaksanakan aksi pengalihan (*switching*) beban dengan memanfaatkan sinyal kendali berdaya rendah untuk mengendalikan arus dan tegangan yang jauh lebih besar pada rangkaian beban.(Zhao et al., 2024)



Gambar 2. 20 Relay Elektromekanik MK2P-I

Cara kerja relay diawali dengan pemberian tegangan kendali dari mikrokontroler ke kumparan relay melalui rangkaian pengendali. Saat kumparan dialiri arus, medan magnet terbentuk dan menarik *armature* sehingga kontak relay berpindah dari kondisi normal (*normally open* atau *normally closed*). Perpindahan kontak ini memungkinkan proses penghubung dan pemutusan beban dilakukan secara otomatis sesuai kondisi sistem. Ketika sinyal kendali dihentikan, medan magnet menghilang dan kontak kembali ke posisi semula melalui mekanisme pegas.(Omron, n.d.)



Gambar 2. 21 Skematik relay Elektromekanis

Dalam perancangan sistem catu daya dan ATS, Relay AC elektromekanik MK2P-I DPDT (*Double Pole Double Throw*) 220V AC tipe plug-in dengan rumah transparan dan soket terminal sekrup dipilih karena kemudahan pemasangan, perawatan, serta keandalan kontakannya. Bentuk “relay kotak” ini memungkinkan penggantian unit relay tanpa melepas kabel pada terminal, cukup dengan menarik relay dari soketnya.(Ridho Tullah Syahputra, 2024)

Selain alasan diatas penggunaan relay dalam rancang bangun sistem ini memiliki peran penting sebagai elemen switching dan juga proteksi yang memberikan isolasi, hal ini penting terutama dalam rangkaian yang memadukan sensor – ESP32 WROOM sebagai logika kontrol dengan beban daya seperti *heater* elemen, sistem ATS, atau konverter PLTS. Isolasi ini mencegah terjadinya hubungan paralel yang tidak disengaja antar sumber, yang berpotensi menimbulkan gangguan, kerusakan peralatan, atau kondisi operasi yang tidak aman. (Abdillah et al., 2022)

2.1.14 Platform Monitoring Internet of Things (Web dan Blynk)

Internet of Things atau *IoT* adalah suatu konsep yang memungkinkan objek fisik saling terhubung dan bertukar data melalui jaringan internet. Proses ini secara otomatis dapat dijalankan melalui program sehingga tidak memerlukan adanya interaksi manusia ke manusia maupun manusia ke computer *IoT* mampu meningkatkan efisiensi dan kualitas kehidupan dengan menghadirkan berbagai layanan berbasis pemantauan, kontrol, serta analisis data secara *real-time*.

Secara umum, arsitektur *IoT* terdiri atas tiga lapisan utama:

- a) *Perception Layer* (Lapisan Persepsi) berfungsi mendeteksi dan mengumpulkan data dari lingkungan menggunakan sensor. Dalam sistem ini, sensor DHT22 digunakan untuk membaca suhu dan kelembapan di dalam kubikel, dan sensor
- b) *Network Layer* (Lapisan Jaringan) bertugas mentransmisikan data dari sensor ke mikrokontroler dan jaringan internet menggunakan modul komunikasi seperti *Wi-Fi* yang terhubung dengan ESP WROOM32.
- c) *Application Layer* (Lapisan Aplikasi) berfungsi menampilkan data hasil pengukuran melalui antarmuka pengguna (*User Interface*) dalam bentuk *dashboard* berbasis *web* atau aplikasi, sehingga petugas dapat memantau kondisi secara jarak jauh.

Menurut Rahman et al. (2021) dalam jurnal *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, penerapan *IoT* dengan sensor DHT22 dan Arduino memungkinkan pemantauan suhu dan kelembapan dilakukan secara efisien dan *real-time* melalui *web interface*. Sistem ini memudahkan pengguna dalam membaca kondisi lingkungan secara langsung, sekaligus menjadi dasar dalam pengambilan keputusan preventif sebelum terjadi gangguan. (Rahman et al., 2021)

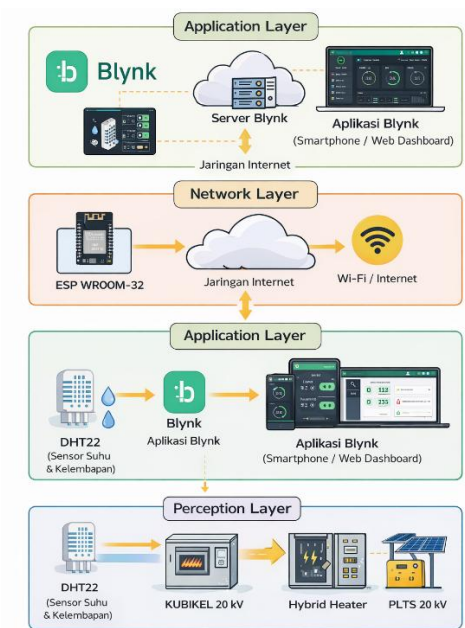
Penerapan *IoT* pada sistem distribusi tenaga listrik berperan penting dalam meningkatkan keandalan peralatan. Dengan teknologi ini, kondisi kubikel dapat dipantau secara *real-time*, sehingga potensi gangguan akibat kelembapan tinggi atau suhu ekstrem dapat segera dideteksi. Sistem monitoring berbasis *IoT* juga memungkinkan petugas melakukan tindakan preventif lebih cepat untuk menjaga kinerja dan keamanan sistem distribusi 20 kV.

Pada arsitektur *IoT*, lapisan aplikasi berperan penting dalam menampilkan data hasil pengukuran sensor kepada pengguna. Pada rancang bangun sistem ini, lapisan aplikasi diimplementasikan menggunakan *web* dan platform *Blynk* sebagai media *monitoring* sistem

Dalam rancang bangun sistem ini, penerapan *IoT* difokuskan pada pemantauan suhu dan kelembapan kubikel PT PLN 20 kV yang terintegrasi dengan sistem *heater hybrid*. Data suhu dan kelembapan dikirimkan ke *web server* dan ditampilkan melalui

antarmuka pengguna yang mudah dipahami, sehingga petugas dapat mengontrol kondisi kubikel secara efektif.

Pada arsitektur *IoT*, lapisan aplikasi berperan penting dalam menampilkan data hasil pengukuran sensor kepada pengguna. Pada rancang bangun sistem ini, lapisan aplikasi diimplementasikan menggunakan platform “*Blynk*” sebagai media monitoring sistem.



Gambar 2. 22 Arsitektur *Internet of Things* pada Rancang Bangun Sistem Monitoring Kubikel

Blynk merupakan platform *Internet of Things (IoT)* yang berfungsi sebagai antarmuka aplikasi (*application layer*) untuk melakukan pemantauan dan pengendalian sistem secara jarak jauh melalui jaringan internet. Pada sistem ini, Blynk digunakan sebagai media monitoring untuk menampilkan data suhu dan kelembapan kubikel yang diperoleh dari sensor DHT22 serta status kerja *heater hybrid* secara *real-time*. Data hasil pembacaan sensor diproses oleh mikrokontroler ESP WROOM-32 dan dikirimkan ke *server* Blynk melalui koneksi *Wi-Fi*. Selanjutnya, data tersebut ditampilkan pada aplikasi Blynk dalam bentuk nilai numerik dan indikator status, sehingga petugas dapat memantau kondisi kubikel tanpa harus berada di lokasi secara langsung.

Penggunaan Blynk sebagai *platform monitoring* mendukung penerapan *IoT* pada sistem distribusi tenaga listrik karena memungkinkan deteksi dini terhadap kondisi suhu dan kelembapan yang berpotensi menimbulkan gangguan pada peralatan kubikel 20 kV. Dengan pemantauan *real-time* ini, tindakan preventif dapat dilakukan lebih cepat guna menjaga keandalan dan keamanan operasi sistem.

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Menurut Muhammad Ariandi dan Yoza Risti Oktaria (2023), dalam jurnal *Media Informatika Budidarma* berjudul “*Prototipe Sistem Monitoring dan Kendali Suhu Box Kubikel 20 kV Berbasis Long Range (LoRa)*”, penelitian ini bertujuan untuk mengatasi permasalahan gangguan pada box kubikel 20 kV yang disebabkan oleh fenomena korona akibat perubahan suhu dan kondensasi. Gangguan ini dapat menyebabkan busur api (*arc flash*) antara isolator dan bagian bertegangan, yang berpotensi merusak peralatan dan menurunkan keandalan sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian tersebut merancang sistem monitoring dan kendali suhu berbasis mikrokontroler ESP32 yang dilengkapi dengan sensor DHT22 untuk mengukur suhu, sensor SCT013 untuk mengukur arus pada heater dan *exhaust fan*, serta menggunakan komunikasi *Long Range (LoRa)* untuk pengiriman data jarak jauh. Sistem ini bekerja secara otomatis, di mana apabila suhu di dalam *box* kubikel melebihi 40°C, maka *exhaust fan* akan menyala untuk menurunkan suhu, sedangkan jika suhu turun di bawah 40°C, *heater* akan aktif untuk menjaga kondisi tetap kering. Sistem *monitoring* berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sensor DHT22 berhasil mengendalikan suhu dan kelembapan kubikel secara otomatis. Ketika suhu melebihi batas, *exhaust fan* aktif untuk menurunkan suhu, sedangkan heater menyala saat suhu terlalu rendah. Komunikasi data dilakukan melalui *LoRa*, memungkinkan pemantauan jarak jauh secara *real-time* melalui aplikasi. (Muhamad Ariandi & Yoza Risti Oktaria, 2023)

Hasil penelitian menunjukkan sistem bekerja efektif menjaga kondisi kubikel tetap kering dan aman dari risiko korona. Penelitian ini menjadi dasar pengembangan pada tugas akhir ini, di mana sistem serupa dikembangkan menggunakan Arduino Uno, sensor DHT22, dan *Solid State Relay (SSR)* dengan sumber daya *hybrid* PLN–PLTS untuk meningkatkan keandalan operasi kubikel saat terjadi pemadaman listrik

2. Menurut Widodo, S., dan Prasetyo, Y. (2022) dalam jurnal berjudul “*Sistem Monitoring Temperatur dan Humidity pada Ruang Terminasi Kubikel 20 kV Gardu Bandara Soetta*”, penelitian ini merancang sistem pemantauan suhu dan kelembapan berbasis mikrokontroler Arduino Uno menggunakan sensor DHT11 sebagai detektor utama. Data hasil pengukuran ditampilkan secara *real-time* melalui *LCD* dan dikirim ke komputer menggunakan komunikasi serial, sehingga petugas dapat memantau kondisi terminasi kubikel tanpa perlu melakukan pengecekan langsung.

Sistem ini mampu memberikan informasi cepat terhadap perubahan kondisi lingkungan di dalam ruang terminasi kubikel yang berpotensi menyebabkan kondensasi atau penurunan daya isolasi. Berdasarkan hasil pengujian, sensor DHT11 memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk pemantauan lingkungan dengan respon waktu yang cepat. (Sulistiyono, 2024)

Penelitian ini menjadi acuan dalam pengembangan sistem pada tugas akhir ini, di mana sistem *monitoring* diperluas dengan sumber daya *hybrid* PLN–PLTS dan kendali otomatis heater menggunakan *Solid State Relay (SSR)* untuk menjaga kelembapan kubikel tetap stabil meskipun terjadi pemadaman listrik.

3. . Menurut Finka Amalia Putya Adirawati dan Samsurizal (2023) dalam jurnal “*Pengaruh Partial Discharge pada Kubikel Incoming 20 kV dengan Metode TEV*”, penelitian ini membahas pentingnya deteksi dini terhadap kerusakan isolasi pada kubikel tegangan menengah menggunakan metode *Transient Earth Voltage (TEV)*. *Partial discharge (PD)* merupakan gejala awal kegagalan isolasi yang dapat menyebabkan gangguan serius seperti loncatan listrik (*flashover*) dan kebakaran pada sistem tenaga listrik.

Metode *TEV* digunakan untuk mendeteksi aktivitas *PD* secara non-intrusif melalui pengukuran sinyal elektromagnetik pada permukaan kubikel. Berdasarkan hasil pengujian, nilai *PD* tertinggi ditemukan pada busbar sebesar 31 dB dan PMT 20 kV sebesar 34 dB, menunjukkan adanya indikasi kerusakan isolasi yang perlu mendapatkan perhatian. Faktor-faktor seperti kelembapan tinggi, kontaminasi, dan peningkatan suhu diketahui mempercepat terjadinya degradasi isolasi pada kubikel. (Amalia Putya Adirawati, n.d.)

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengendalian suhu dan kelembapan di dalam kubikel sangat penting untuk mencegah terjadinya *partial discharge*. Hal ini sejalan dengan fokus tugas akhir ini yang mengembangkan sistem monitoring suhu dan kelembapan berbasis IoT dengan *heater hybrid* PLN–PLTS, bertujuan menjaga kestabilan lingkungan dalam kubikel agar tidak terjadi degradasi isolasi yang dapat memicu *partial discharge*.

4. Menurut Maulana Harry Sulistyo (2022) dalam tugas akhirnya yang berjudul “*Rancang Bangun Automatic Transfer Switch (ATS) serta Monitoring dan Controlling Dual Charging dengan Dua Sumber PLN dan PLTS Berbasis IoT*”, sistem ATS dirancang untuk memindahkan sumber listrik secara otomatis antara PLN dan PLTS guna menjaga kontinuitas suplai daya. Sistem ini menggunakan Arduino Uno sebagai pusat kendali, sensor tegangan (*voltage divider*) dan sensor arus ACS712 untuk mendeteksi kondisi kelistrikan, serta Wemos D1 Mini (ESP8266) sebagai modul komunikasi berbasis *IoT* yang menampilkan hasil monitoring melalui aplikasi Blynk pada *smartphone*.

Perpindahan sumber dilakukan melalui kontaktor yang dikendalikan secara otomatis berdasarkan hasil pembacaan sensor, sehingga proses *switching* berlangsung cepat dan aman tanpa intervensi manual. Pengujian menunjukkan tingkat *error* pembacaan sensor arus dan tegangan di bawah 5%, menandakan sistem layak digunakan. (Sulistyo, 2022)

Penelitian ini menjadi acuan dalam pengembangan tugas akhir ini, di mana sistem ATS diadaptasi menggunakan Solid State Relay (SSR) sebagai *switching device* yang lebih cepat dan bebas percikan (*sparkless*). Selain itu, ditambahkan sensor ZMPT101B sebagai sensor pembaca tegangan sumber utama (PLN). Apabila

sensor ini tidak mendeteksi adanya tegangan pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR), maka Arduino akan memberikan perintah kepada SSR untuk mengaktifkan suplai cadangan dari PLTS. Integrasi ini memungkinkan sistem *heater hybrid* PLN–PLTS tetap beroperasi menjaga kelembapan kubikel meskipun terjadi pemadaman Listrik.

Tabel 2. 1 Penelitian yang Relevan

No	Identitas Karya Tulis	Problem	Metode Penelitian	Pemecahan Masalah	Hasil	Research Gap
1	Muhammad Ariandi, Yoza Risti Oktaria. "Prototipe Sistem Monitoring dan Kendali Suhu Box Kubikel 20 kV Berbasis Long Range (LoRa)", Jurnal Media Informatika Budidarma, Vol. 7 No. 4, Oktober 2023	Gangguan pada box kubikel 20 kV akibat korona yang dipicu oleh perubahan suhu dan kondensasi, serta kurangnya pemantauan suhu dan kelembapan secara real-time yang dapat menurunkan keandalan dan keselamatan operasional	Penelitian deskriptif, perancangan dan pengujian prototipe monitoring dan kendali suhu berbasis sensor DHT22, sensor arus SCT013, mikrokontroler ESP32, komunikasi LoRa, dan aplikasi Blynk	Merancang alat yang dapat memantau suhu dan arus secara real-time, mengendalikan heater dan exhaust fan secara otomatis, serta memberikan notifikasi jika terjadi anomali pada heater atau exhaust fan	Prototipe berhasil memonitor dan mengendalikan suhu serta arus heater dan exhaust fan secara otomatis dan jarak jauh, dengan akurasi sensor suhu dan arus yang baik (toleransi <5%). Sistem notifikasi membantu operator mendeteksi gangguan lebih cepat, meningkatkan efisiensi dan keandalan operasi kubikel.	Sistem monitoring yang ada hanya berfungsi sebagai alat deteksi dan notifikasi, belum terintegrasi dengan sistem pengendalian heater yang dapat beroperasi otomatis dari sumber daya cadangan (PLTS) saat listrik PLN padam. Belum ada solusi untuk menjaga suhu dan kelembapan tetap stabil selama heater tidak aktif akibat gangguan listrik.
2	Bayu Sulistiono, "Sistem Monitoring Temperatur dan Humidity pada Ruang Terminasi Kubikel 20	Kelembapan dan suhu tinggi pada kubikel 20 kV dapat memicu korona, kegagalan isolasi udara, dan gangguan distribusi	Studi literatur, observasi, perancangan dan implementasi alat monitoring berbasis IoT (NodeMCU ESP8266, sensor DHT22,	Merancang alat monitoring suhu dan kelembapan berbasis sensor DHT22 dan NodeMCU, dengan tampilan data real-time di LCD dan aplikasi Blynk.	Sistem monitoring berhasil menampilkan data suhu dan kelembapan secara real-time dengan akurasi tinggi (galat rata-rata <1%). Alat dapat membantu operator mendeteksi dan menangani	Sistem pengendalian heater masih bergantung pada pasokan listrik utama (PLN). Belum ada integrasi dengan sumber energi terbarukan

	kV Gardu Bandara Soekarno-Hatta", Skripsi S1 Teknik Elektro Universitas Sangga Buana YPKP Bandung, 2024	listrik. Heater konvensional kadang justru meningkatkan kelembapan saat suhu naik, dan belum ada sistem monitoring real-time yang efisien.	LCD, aplikasi Blynk), pengujian dan analisis data akurasi sensor.	Sistem dapat mengaktifkan heater otomatis saat suhu/kelembapan melewati batas, serta memberikan alarm jika terjadi anomali.	gangguan lebih cepat, meminimalisir risiko korona dan kegagalan isolasi. Monitoring berbasis IoT meningkatkan efisiensi dan keandalan operasi kubikel, serta relevan untuk integrasi dengan sistem hybrid heater yang Anda rancang, agar heater tetap berfungsi optimal dan lingkungan kubikel terjaga meski terjadi gangguan listrik.	(PLTS) sebagai backup, sehingga saat listrik padam, heater tetap tidak berfungsi dan kelembapan berpotensi meningkat, memicu korona saat listrik kembali menyala.
3	Finka Amalia Putya Adirawati, Samsurizal. "Pengaruh Partial Discharge Pada Kubikel Incoming 20 kV dengan Metode TEV"	Partial discharge (PD) sebagai indikator awal kegagalan isolasi pada kubikel 20 kV, yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan dan gangguan sistem tenaga listrik. PD sering dipicu oleh penurunan kualitas isolasi akibat faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan, serta cacat mekanis atau kontaminasi.	Studi eksperimental: Pengukuran partial discharge pada beberapa komponen kubikel (CT, kabel, busbar, PMT 20 kV) menggunakan metode Transient Earth Voltage (TEV) dan sensor khusus. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap standar PLN.	Melakukan deteksi dini partial discharge dengan sensor TEV untuk mengetahui kondisi isolasi pada kubikel. Analisis hasil pengukuran digunakan untuk menentukan komponen yang terindikasi PD dan memberikan rekomendasi perawatan atau penggantian isolasi.	Ditemukan indikasi partial discharge pada busbar atas/bawah (31 dB) dan PMT 20 kV (34 dB), melebihi batas aman standar PLN (>29 dB). Penyebab utama PD adalah penurunan kualitas isolasi akibat suhu dan kelembapan tinggi, serta kontaminasi. Deteksi dini PD sangat penting untuk mencegah kerusakan lebih lanjut. Penanganan yang disarankan meliputi perbaikan/penggantian isolasi dan pembersihan komponen. Hasil ini menegaskan pentingnya pengendalian suhu dan kelembapan di kubikel, sehingga penggunaan heater hybrid (PLN-PLTS) yang tetap aktif saat listrik padam sangat	Jurnal ini fokus pada deteksi dan analisis partial discharge akibat kelembapan dan suhu, namun belum membahas solusi aktif pengendalian kelembapan seperti penggunaan heater hybrid dengan sumber daya cadangan (PLTS) untuk menjaga kondisi lingkungan kubikel saat listrik padam. Belum ada integrasi sistem monitoring dan pengendalian otomatis yang dapat mencegah peningkatan kelembapan selama heater mati.

					relevan untuk menjaga keandalan isolasi dan mencegah terjadinya partial discharge saat kubikel kembali dialiri listrik.	
4	Maulana Harry Sulisty, "Rancang Bangun Automatic Transfer Switch (ATS) Serta Monitoring dan Controlling Dual Charging dengan Dua Sumber PLN dan PLTS Berbasis IoT", Tugas Akhir DIII Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, 2022	Ketidakstabilan pasokan listrik dari PLN menyebabkan kebutuhan backup daya yang andal. Pengisian baterai PLTS kadang tidak optimal saat pemadaman, dan perpindahan sumber listrik secara manual berisiko downtime. Belum ada sistem monitoring dan switching otomatis yang terintegrasi dengan IoT.	Studi literatur, perancangan dan implementasi hardware (panel surya, inverter, baterai, relay, kontaktor, sensor arus/tegangan, Arduino Uno, Wemos D1 Mini), pemrograman aplikasi monitoring (Blynk), pengujian performa switching dan monitoring dual charging PLN–PLTS secara real-time.	Merancang sistem hybrid PLN–PLTS dengan Automatic Transfer Switch (ATS) berbasis Arduino dan IoT. ATS mengalihkan beban secara otomatis dari PLN ke PLTS saat terjadi gangguan, dengan monitoring arus dan tegangan melalui sensor ACS712 dan pembagi tegangan. Kontrol dan monitoring dilakukan via aplikasi Blynk, memungkinkan operator memantau dan mengendalikan sistem dari jarak jauh.	Sistem ATS berhasil melakukan switching otomatis dengan delay <1 detik, monitoring arus dan tegangan akurat (error <5%), dan pengisian baterai dari dua sumber berjalan efisien. PLTS mampu menjadi backup saat PLN padam, dan aplikasi Blynk memudahkan pemantauan status sistem. Hasil ini sangat relevan untuk rancangan heater hybrid daya, memastikan heater tetap aktif dan lingkungan kubikel terjaga meski terjadi pemadaman listrik, serta mendukung keandalan dan efisiensi operasional melalui monitoring dan switching otomatis.	Belum ada aplikasi langsung pada heater kubikel 20 kV yang kritis terhadap kelembapan dan suhu, serta belum mengintegrasikan sensor kelembapan/suhu untuk proteksi lingkungan kubikel. Sistem ATS dan PLTS yang dirancang belum secara spesifik mengatasi masalah kelembapan saat PLN padam pada aplikasi kelistrikan gardu/kubikel.