

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berikut tinjauan Pustaka yang telah dilakukan oleh penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka

No	Peneliti	Judul	Keterangan
1.	E. Jama'at (2025)	Rancang Bangun Perangkat Pendukung Pemantauan Sambaran Petir Berbasis IoT pada Lightning Counter di PT. PLN (Persero) GI Purwokerto	• Penelitian ini merancang perangkat pemantauan sambaran petir berbasis IoT untuk <i>lightning counter</i> di gardu induk PLN Purwokerto. • Sistem ini menggunakan teknologi IoT untuk mencatat kejadian sambaran petir secara real time, namun tidak berfokus pada metode deteksi non-invasif menggunakan CT Clamp atau sistem proteksi berlapis seperti pada penelitian saat ini. • Penelitian ini lebih menekankan pada integrasi dengan infrastruktur PLN dan pencatatan data kejadian sambaran tanpa detail teknis tentang proteksi perangkat keras dari lonjakan tegangan.

No	Peneliti	Judul	Keterangan
			• Penelitian saat ini memperluas pendekatan dengan menggunakan sensor CT Clamp non-invasif untuk deteksi arus pada kabel grounding dan mengintegrasikan sistem proteksi berlapis (TVS Diode, dioda zener, resistor wirewound) serta platform Blynk.
2.	Arthur F Andrade, Giovanny M B Galdino, Ronimack T Souza, Newton S S M Fonseca, Antonio F Leite Neto, Edson G Costa, Eden L Carvalho Junior (2025)	<i>Autonomous Lightning Strike Detection and Counting System Using Rogowski Coil Current Measurement</i>	• Penelitian ini mengembangkan sistem otonom untuk mendeteksi dan menghitung sambaran petir pada saluran transmisi menggunakan Rogowski coil untuk pengukuran arus non-invasif. • Sistem ini mencakup integrator aktif, mikrokontroler untuk pengolahan data, dan penyimpanan lokal, dengan pengujian laboratorium menggunakan generator arus impuls. • Meskipun mirip dalam penggunaan sensor arus non-invasif, penelitian ini tidak

No	Peneliti	Judul	Keterangan
			mengintegrasikan teknologi IoT untuk pemantauan jarak jauh atau sistem proteksi berlapis. • Penelitian saat ini memperluas konsep ini dengan menggunakan CT Clamp berbasis IoT pada ESP32, platform Blynk untuk pemantauan real time, dan proteksi berlapis (TVS Diode, resistor wirewound, dioda zener), serta pengujian simulasi beban di laboratorium.
3.	Said, A. H. M., & Rahman, R. (2022)	<i>Prototype of Lightning Detection System Based on IoT Using Current Transformer Sensor</i>	• Mengembangkan prototipe sistem deteksi sambaran petir berbasis IoT dengan sensor Current Transformer (CT) untuk mendeteksi arus pada kabel grounding. • Penelitian ini fokus pada deteksi dasar dan pengiriman data ke platform IoT, namun kurang menekankan pada optimalisasi sistem proteksi dan integrasi notifikasi real time.

No	Peneliti	Judul	Keterangan
			• Penelitian saat ini memperkuat sistem dengan proteksi berlapis (TVS Diode, dioda zener, dll.) dan menggunakan Platform Blynk untuk pemantauan jarak jauh yang lebih interaktif.
4.	Yue Li, Xiaomeng He, Xiaobing Xiao, Yongxiang Cai, Huapeng Li (2023)	<i>Design of lightning monitoring and fault identification algorithm for overhead distribution lines based on Internet of Things</i>	• Penelitian ini merancang algoritma pemantauan petir dan identifikasi kesalahan pada saluran distribusi overhead berbasis IoT, dengan fokus pada analisis spektrum energi wavelet untuk mendeteksi karakteristik sambaran petir dan transmisi data real time. • Sistem ini memanfaatkan IoT untuk pengumpulan data dan analisis status operasional, mendukung pemeliharaan berbasis kondisi. • Namun, penelitian ini tidak menekankan pada sensor arus non-invasif seperti CT Clamp atau sistem proteksi perangkat

No	Peneliti	Judul	Keterangan
			keras terhadap lonjakan tegangan. • Penelitian saat ini melengkapi pendekatan ini dengan integrasi sensor CT Clamp non-invasif, mikrokontroler ESP32, dan proteksi berlapis (TVS Diode, resistor wirewound, dioda zener), serta pengujian simulasi beban untuk deteksi lonjakan arus, sambil menggunakan Blynk untuk pemantauan jarak jauh yang interaktif.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Fenomena Sambaran Petir

Sambaran petir merupakan fenomena pelepasan muatan elektrostatik berskala besar yang terjadi di alam. Peristiwa ini melepaskan energi yang luar biasa besar dalam waktu yang sangat singkat, sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan serius pada infrastruktur, terutama pada sistem kelistrikan dan peralatan elektronik. Secara kelistrikan, sambaran petir dapat dideskripsikan sebagai sebuah pulsa (impuls) arus searah beramplitudo sangat tinggi. Arus puncak dari sebuah sambaran petir dapat dengan mudah melebihi 10 kiloampere (kA). Ketika arus impulsif yang masif ini disalurkan melalui sistem proteksi menuju konduktor pembumian (grounding), akan timbul fluktuasi arus dan lonjakan tegangan (voltage spike) yang sangat tinggi dan tiba-tiba. Tegangan sesaat ini bahkan mampu mencapai puluhan ribu volt, yang menjadi ancaman utama bagi komponen elektronik sensitif yang terhubung ke jaringan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik petir

yaitu arus impulsif yang ekstrem, durasi yang sangat singkat (transien), dan tegangan lonjakan yang destruktif menjadi landasan fundamental dalam merancang alat pemantauan yang andal serta sistem proteksi yang efektif [4].

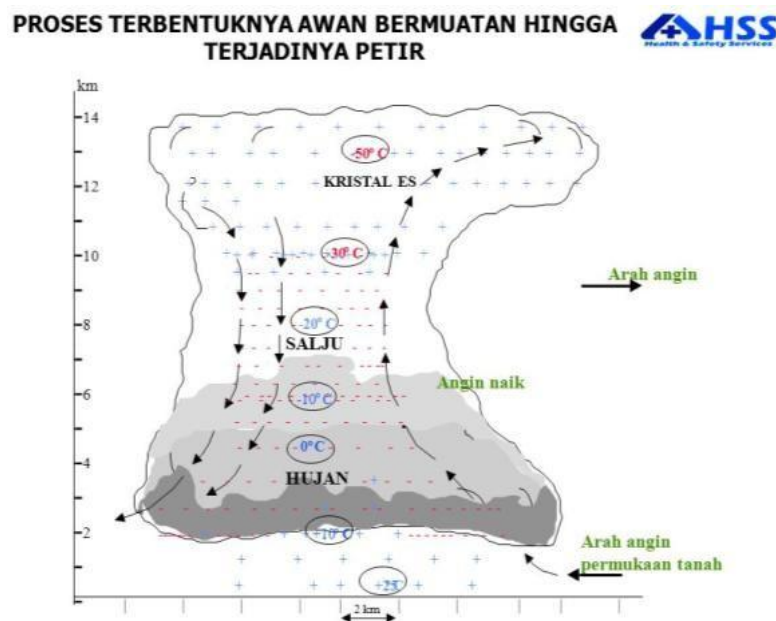
2.2.1.1 Proses Terjadinya Petir

Para ilmuwan masih terus meneliti detail mekanisme pengisian listrik dalam badai petir, meskipun terdapat konsensus luas mengenai prinsip-prinsip dasar proses elektrifikasi tersebut. Zona pengisian muatan utama biasanya terletak di pusat badai, tepatnya pada wilayah di mana arus udara vertikal naik dengan kecepatan tinggi, pada rentang suhu antara -15 hingga -25 derajat Celsius. Arus udara yang kuat ini mengangkut tetesan air awan superdingin serta kristal es berukuran sangat kecil ke ketinggian yang lebih tinggi. Sementara itu, partikel graupel yaitu hujan es lunak yang memiliki ukuran jauh lebih besar dan kepadatan lebih tinggi cenderung jatuh ke bawah atau terperangkap sementara dalam aliran udara naik tersebut, menciptakan kondisi ideal untuk pemisahan muatan listrik [6].

A. Pembentukan Awan Petir

Setiap awan yang mengandung muatan listrik terstruktur dalam lapisan atmosfer cenderung membentuk gumpalan-gumpalan padat. Proses ini dapat terjadi apabila komponen-komponen esensial yang diperlukan hadir di lokasi pembentukan awan tersebut. Faktor utama meliputi pergerakan angin vertikal ke atas yang kuat, keberadaan partikel higroskopis sebagai inti kondensasi, serta tingkat kelembaban udara yang tinggi, yang semuanya berperan sebagai pendukung utama dalam pembentukan awan. Sebagai contoh, seperti yang digambarkan pada skema Gambar 2.1, awan Cumulonimbus merupakan jenis awan vertikal yang menjulang tinggi hingga mencapai ketinggian antara 2.000 hingga 16.000 meter, dengan struktur yang sangat padat dan berisi elemen-elemen seperti badai petir, kilat, hujan deras, serta kondisi cuaca yang dingin. Nama Cumulonimbus sendiri berasal dari bahasa Latin, di mana "cumulus" berarti tumpukan atau kumpulan, dan "nimbus" berarti hujan atau awan hujan. Awan ini terbentuk akibat ketidakstabilan atmosfer yang

signifikan, dan dapat muncul secara tunggal maupun berkelompok. Pertumbuhannya lebih dominan secara vertikal daripada horizontal, sehingga sering kali berbentuk seperti jamur raksasa yang menjulang ke angkasa. Di pusat awan ini, petir yang terjadi dapat memicu curah hujan intensif dan angin kencang, meskipun fenomena petir tersebut biasanya berlangsung singkat dan menghilang setelah sekitar 20 menit [6].



Gambar 2. 1 Pembentukan awan Petir

Pada Gambar 2.1 Fenomena kilat atau petir, yang juga dikenal sebagai sambaran petir, terjadi melalui proses yang melibatkan interaksi muatan listrik antara awan dan permukaan bumi. Proses ini dimulai ketika bagian bawah awan badai, seperti awan Cumulonimbus, mengumpulkan muatan negatif yang signifikan akibat mekanisme elektrifikasi seperti tabrakan antara kristal es dan partikel graupel di dalam awan. Muatan negatif ini kemudian menginduksi muatan positif pada permukaan tanah tepat di bawah awan, karena prinsip induksi elektrostatik di mana muatan yang berlawanan saling tarik-menarik. Akibatnya, terbentuklah medan listrik yang kuat antara bagian bawah awan (negatif) dan permukaan bumi (positif), menciptakan perbedaan potensial yang semakin meningkat

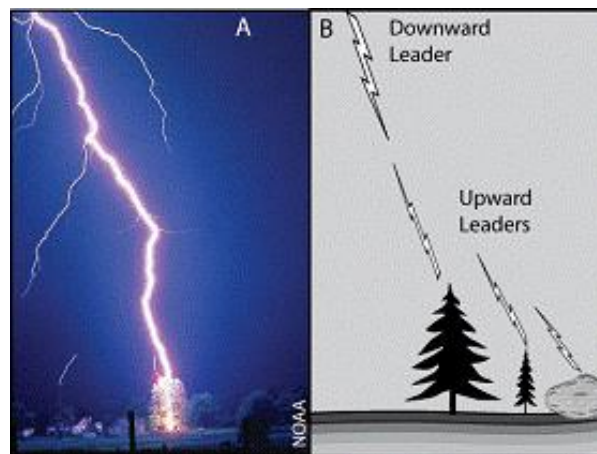
seiring dengan akumulasi muatan di awan. Semakin besar muatan yang terkumpul di awan, semakin intens pula kekuatan medan listrik yang dihasilkan. Apabila kekuatan medan listrik ini melampaui batas kekuatan dielektrik udara yaitu kemampuan udara untuk menahan medan listrik tanpa breakdown, yang biasanya sekitar 3 juta volt per meter di udara kering maka akan terjadi pelepasan muatan listrik secara tiba-tiba dalam bentuk sambaran petir. Proses ini sesuai dengan hukum-hukum dasar kelistrikan, seperti Hukum Coulomb yang menggambarkan gaya antar muatan dan prinsip breakdown dielektrik, di mana energi listrik yang terakumulasi dilepaskan untuk menyeimbangkan muatan antara awan dan tanah, sering kali disertai suara guntur akibat pemuaian udara yang cepat [6].

Menurut para ilmuwan, fenomena petir terjadi akibat perpindahan muatan negatif berupa elektron menuju muatan positif berupa proton, yang pada akhirnya memicu lontaran muatan listrik secara mendadak. Proses ini melibatkan tahapan-tahapan tertentu, di antaranya pemampatan muatan listrik yang menggumpal pada bagian atas awan (bermuatan negatif), bagian tengah awan yang bermuatan positif, serta bagian dasar awan yang bermuatan negatif. Ketika semua muatan ini terkumpul dan berinteraksi, maka terjadilah lontaran muatan antara elektron dan proton, yang menjadi penyebab utama sambaran petir.

B. Downward leader

Proses ionisasi yang terjadi dalam awan petir menciptakan medan listrik yang sangat kuat antara awan dan permukaan bumi. Ketika intensitas medan listrik ini mencapai titik kritis yang disebut breakdown voltage, yaitu sekitar 100 juta volt, kondisi ini memicu terjadinya pelepasan elektron secara masif dari awan petir menuju bumi dalam fenomena yang dikenal sebagai Downward Leader. Pelepasan muatan elektron ini tidak terjadi secara sekaligus, melainkan tampak sebagai lidah-lidah petir bercahaya yang bergerak turun secara bertahap dari awan

menuju permukaan bumi. Pergerakan lidah petir ini berlangsung dengan kecepatan yang sangat tinggi, berkisar antara 100 hingga 800 kilometer per detik, menciptakan jalur konduktif yang nantinya akan dilalui oleh arus petir utama. Proses ini merupakan tahap awal dari pembentukan sambaran petir yang kita lihat, dimana Downward Leader berfungsi sebagai 'penjelajah' yang membuka jalur bagi aliran listrik yang lebih besar untuk mengikuti. Bentuk downward leader ditampilkan pada Gambar 2.2

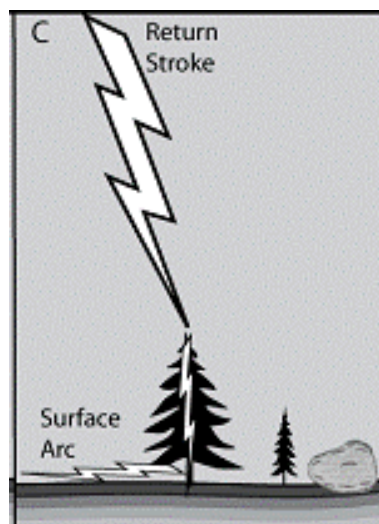


Gambar 2. 2 Downward Leader

C. Upward leader

Proses pembentukan sambaran petir merupakan fenomena kompleks yang melibatkan interaksi antara muatan listrik di atmosfer dan permukaan bumi. Ketika downward leader terbentuk dan bergerak dengan kecepatan tinggi menuju permukaan bumi, pergerakan ini menciptakan peningkatan signifikan pada medan listrik di antara ujung lidah petir tersebut dengan permukaan bumi. Intensifikasi medan listrik ini kemudian memicu pembentukan upward leader, yaitu muatan listrik yang bergerak ke atas dari titik-titik tertinggi di permukaan bumi seperti puncak gedung, menara, atau pohon tinggi. Kedua leader ini terus bergerak saling mendekat hingga akhirnya bertemu pada suatu titik ketinggian tertentu yang disebut striking point. Pada Gambar 2.3 Upward Leader Pertemuan antara downward leader dan upward leader ini menandai terbentuknya kanal ionisasi yang

lengkap antara awan petir dan permukaan bumi. Kanal ionisasi inilah yang berfungsi sebagai jalur konduktif dengan konduktivitas tinggi, memungkinkan arus petir yang sesungguhnya mengalir dari awan menuju bumi melalui saluran udara yang telah terionisasi tersebut [6].

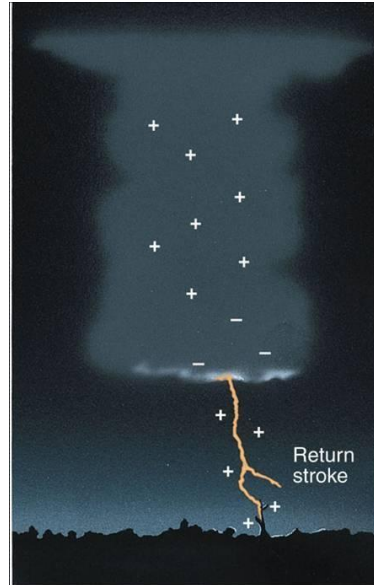


Gambar 2. 3 Upward Leader

D. Return stroke

Return stroke atau sambaran balik merupakan fase krusial dalam fenomena petir yang menandai aliran arus listrik yang sesungguhnya. Pada tahap ini, arus petir mengalir dalam arah yang berlawanan dari proses pembentukan awal, yaitu dari permukaan bumi menuju ke awan petir melalui kanal ionisasi yang telah terbentuk sebelumnya. Karakteristik utama dari return stroke adalah kecepatannya yang luar biasa tinggi, berkisar antara 20.000 hingga 110.000 kilometer per detik. Kecepatan yang sangat tinggi ini dimungkinkan karena arus listrik memanfaatkan kanal udara yang sudah mengalami ionisasi dan memiliki tingkat konduktivitas yang sangat tinggi. Perbedaan kecepatan yang signifikan antara return stroke dengan step leader yang terbentuk sebelumnya menunjukkan efisiensi jalur konduksi yang telah tercipta, dimana hambatan listrik pada kanal ionisasi menjadi sangat minimal sehingga

memungkinkan aliran arus listrik dengan intensitas dan kecepatan maksimal dari bumi kembali ke awan petir [6].



Gambar 2. 4 Return Stroke

Pada Gambar 2.4 Return Stroke Fenomena ledakan petir yang sering terdengar pada musim hujan dapat dijelaskan melalui perubahan kondisi atmosfer yang mempengaruhi proses ionisasi udara. Pada musim hujan, kandungan air yang tinggi di udara menyebabkan terjadinya penurunan daya ionisasi atmosfer. Kondisi ini menciptakan lingkungan yang lebih konduktif bagi aliran muatan listrik, dimana muatan-muatan elektron yang memiliki polaritas berbeda menjadi lebih mudah untuk mengalir dan berpindah. Kemudahan aliran ini terjadi karena adanya beda potensial yang signifikan antara muatan negatif (elektron) dan muatan positif (proton) yang berusaha mencapai kondisi kesetimbangan listrik. Ketika proses pelepasan muatan ini berlangsung dengan intensitas yang tinggi akibat kondisi atmosfer yang mendukung, maka terbentuklah ledakan suara yang karakteristik dari petir, yang merupakan manifestasi dari upaya alam untuk mencapai keseimbangan elektris antara muatan-muatan yang berbeda polaritas tersebut.

2.2.1.2 Jenis-jenis Sambaran Petir

Dengan menggolongkan berdasarkan interaksi antar ion yang saling bermuatan maka dapat didapatkan jenis-jenis petir sebagai berikut:

a. Awan ke awan

Dapat terjadi bila adanya interaksi antara awan yang masing-masing bermuatan berbeda yaitu muatan positif dan negatif maka terjadilah petir antar awan ataupun lebih.

b. Terdapat di dalam awan itu sendiri

Fenomena petir terjadi ketika di dalam suatu awan terbentuk tiga lapisan ruang bermuatan. Lapisan pertama didominasi oleh ion-ion bermuatan negatif, sedangkan lapisan kedua berisi ion-ion bermuatan positif. Pada lapisan ketiga terdapat campuran kedua muatan, baik positif maupun negatif. Ketika ketiga lapisan tersebut saling bertumbukan, terjadilah pelepasan energi dalam bentuk percikan listrik atau kilat. Namun, tidak semua percikan dapat terlihat oleh mata manusia, terutama jika jumlah muatan yang bertabrakan relatif kecil sehingga intensitas cahayanya tidak cukup kuat untuk tampak jelas [6].

c. Awan ke bumi

Petir yang terjadi antara awan dan permukaan bumi merupakan jenis petir yang dapat diamati langsung dengan mata telanjang. Jenis petir ini sering menimbulkan dampak merugikan, baik terhadap manusia maupun peralatan elektronik. Mekanisme terjadinya pada dasarnya sama dengan jenis petir lain, yaitu akibat interaksi ion-ion bermuatan listrik yang tidak seimbang. Beberapa ahli meteorologi berpendapat bahwa awan badai, khususnya pada fenomena tornado, banyak mengandung muatan ion positif. Kondisi ini berkaitan dengan faktor geografis, di mana wilayah dengan ketinggian lebih tinggi cenderung lebih sering tersambar petir, baik yang bermuatan positif maupun negatif, karena muatan listrik dari awan lebih mudah menjangkau permukaan bumi [6].

2.2.1.3 Parameter Petir

Untuk mendapatkan hasil pengamanan pentahanan yang baik maka diperlukan penguraian masing-masing parameter sambaran petir yang secara matematis dan kelistrikan. Pada tabel 2.2 akan menampilkan parameter sambaran terhadap akibat obyek sambaran.

Tabel 2. 2 Parameter Petir

Parameter Petir		Tingkat proteksi		
		I	II	III-IV
Nilai arus puncak	I (kA)	200	150	100
Muatan total	Q total(C)	300	225	150
Muatan impuls	Qimpuls(C)	100	75	50
Energy spesifik	W/R (kJ/Ω)	10000	5600	2500
Kecuraman rata-rata	Di/dt30/90% (kA/μs)	200	150	100

1. Arus Petir Maksimum

Arus Petir maksimum (I_m) menentukan tinggi tegangan jatuh (U_m) pada tahanan pentanahan obyek yang disambar,

$$U_m = I_m \times R \text{ (Volt)} \quad (2.1)$$

Dimana:

I_m = Arus petir puncak atau maksimum;

R = Tahanan tanah

Akibat dari parameter ini menimbulkan tegangan jatuh dan perbedaan tegangannya dapat merusak perangkat. Arus puncak tersebut dapat juga digunakan untuk menentukan tingkat proteksi yang akan digunakan.

2. Muatan Petir Atau Muatan Total (Q)

Muatan (Q) menentukan jumlah Energi (W) yang terwujud pada titik sambaran dan setiap tempat dalam busur listrik yang menembus isolasi. Sesuai dengan persamaan :

$$Q = \int i \cdot dt \quad (2.2)$$

$$W = Q \cdot V_{a,k}$$

Dimana;

I = Arus petir

$V_{a,k}$ = Tegangan jatuh anoda katoda,

Pengaruh Q dapat melelehkan logam dan dapat menimbulkan bunga api. Energi yang terjadi pada kaki busur listrik titik sambaran petir berbanding lurus antara muatan petir (Q) dan tegangan jatuh (V). Parameter ini berguna untuk menentukan dimensi penangkal petir.

3. Energi Spesifikasi Arus Petir Atau Kuadrat Impulse Dari Arus (E).

Energi (E) menentukan pemanasan serta gaya impulse sesuai dengan persamaan :

$$E = \int i^2 dt \quad (2.3)$$

Dimana;

i = Arus petir

E = Energi yang timbul

dt = waktu

Pengaruh parameter ini adalah dapat mengakibatkan efek mekanik pada sambaran dan menimbulkan kenaikan temperatur yang mengakibatkan pemanasan. Parameter ini digunakan untuk menentukan dimensi penangkal petir.

4. Kecuraman Maksimum Dari Arus Petir.

Petir juga menimbulkan tegangan induksi (U) sesuai persamaan :

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (2.4)$$

Dimana:

L = Induktansi metal/kabel (henry)

di/dt = laju kenaikan arus terhadap waktu/kecuraman Arus Petir.

Pengaruh Parameter ini adalah dapat menyebabkan adanya tegangan drop induktif pada konduktor yang dilalui arus (bersifat induktif) serta adanya tegangan induktif pada rangkaian loop karena koupling magnetik.

Parameter ini digunakan berkaitan dengan penentuan dimensi konduktor Pengaman Petir.

2.2.2 Karakteristik Arus Sambaran Petir pada Sistem Grounding

Sistem grounding dalam proteksi sambaran petir berfungsi sebagai jalur utama untuk mengalirkan arus lonjakan petir ke tanah secara aman, mencegah penumpukan tegangan yang dapat merusak peralatan atau struktur. Karakteristik arus sambaran petir pada sistem grounding dipengaruhi oleh fenomena alam tropis di Indonesia, di mana kondisi iklim seperti kelembaban tinggi, angin naik kuat, dan aerosol dari hutan tropis serta garam laut mempercepat pembentukan awan cumulonimbus (CB) yang menghasilkan sambaran dengan intensitas lebih tinggi dibandingkan wilayah subtropis. Secara umum, arus sambaran petir bersifat impulsif dengan gelombang 8/20 μs (waktu naik 8 μs dan waktu turun 20 μs), di mana puncak arus (peak current) dapat mencapai rentang 0,5 hingga 200 kA, dengan durasi total impuls sekitar 100 μs hingga beberapa milidetik. Parameter ini mencakup tidak hanya amplitudo arus, tetapi juga steepness (kecepatan naik arus, dihitung sebagai di/dt), muatan total ($Q = \int i dt$, dalam A·s), dan energi impuls, yang semuanya memengaruhi desain grounding untuk menyerap energi tanpa kegagalan isolasi atau pemanasan berlebih.

Di wilayah tropis seperti Indonesia, karakteristik arus petir menunjukkan variasi signifikan akibat ukuran awan CB yang lebih besar (tinggi hingga 14 km dan lebar >6 km) dibandingkan subtropis (lebar 2–6 km). Hal ini menghasilkan sambaran dengan gelombang ekor panjang (long tail wave), sehingga muatan total Q lebih besar sering kali melebihi nilai subtropic yang menyebabkan efek peleburan

logam lebih parah pada konduktor grounding. Misalnya, arus dengan Q tinggi dapat mencairkan pelat grounding atau busbar, terutama pada instalasi seperti tangki minyak atau gardu distribusi, di mana kasus kebakaran akibat petir dilaporkan hampir setiap tahun sejak 1995 hingga 2021 di Indonesia. Pada sistem grounding, arus lonjakan ini mengalir melalui down conductor dan kabel grounding, di mana impedansi tanah (tipikal $<5 \Omega$ untuk efisiensi) menjadi faktor krusial untuk membatasi step voltage dan touch voltage.

Berdasarkan pengukuran langsung (direct measurement) menggunakan sistem Peak Current Measurement (PCM) yang terdiri dari magnetic tape dan Lightning Event Counter (LEC) pada menara instrumented sejak 1993 di Jawa Barat (lokasi seperti Bandung, Bogor, Depok, Bekasi, dan Cirebon), data historis menunjukkan distribusi arus puncak yang lebih rendah dari pengukuran sebelumnya di Gunung Tangkuban Perahu. Dari 35 hasil pengukuran valid (dari total >80 stroke yang direkam), median arus puncak untuk probabilitas 50% adalah 16 kA, dengan rentang 0,5–200 kA tergantung tipe tape (IEC Type I atau II). Contoh pengukuran spesifik termasuk 7,8 kA pada menara Stasiun Bogor (menggunakan Audacity untuk analisis panjang sinyal terhapus akibat medan magnet) dan nilai serupa di Cirebon. Data ini selaras dengan pengukuran jaringan deteksi petir nasional (JADPEN), tanpa perbedaan statistik signifikan, dan lebih rendah dari 40 kA yang dilaporkan pada 1990-an di Tangkuban Perahu. Statistik ini menekankan pentingnya data lokal untuk desain proteksi grounding, seperti pemilihan konduktor dengan kapasitas arus minimal 100 kA dan grounding rod dengan resistansi rendah, sesuai standar IEC 62305. Penggunaan magnetic tape memungkinkan deteksi non-polaritas dan cepat, di mana medan magnet dari arus petir menghapus sinyal pra-rekam (315 Hz), dan panjang erasan sinyal dikonversi menjadi nilai arus puncak [9].

2.3 Internet of Things

Internet of Things (IoT) adalah sebuah konsep di mana perangkat fisik disematkan dengan sensor, perangkat lunak, dan teknologi lainnya agar dapat terhubung dan bertukar data melalui internet. Komunikasi antarperangkat dan ke

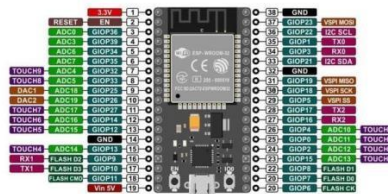
sistem pusat ini menjadi dasar bagi otomatisasi, pemantauan, dan kontrol jarak jauh, yang pada akhirnya mendorong terciptanya ekosistem cerdas seperti smart industry. Di sektor industri, pemanfaatan utama IoT adalah untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas melalui pengumpulan dan analisis data dari mesin atau lingkungan secara real time.

Dalam industri ketenagalistrikan, penerapan teknologi IoT sangat relevan untuk memantau kondisi krusial, termasuk peristiwa sambaran petir pada infrastruktur penting. Sistem pemantauan konvensional memiliki kelemahan karena keterbatasannya dalam menyediakan data secara langsung dan otomatis. Tanpa pemantauan real time, risiko kerusakan akibat sambaran petir yang tidak segera terdeteksi akan selalu ada, yang dapat menyebabkan keterlambatan dalam inspeksi dan penanganan. Implementasi IoT pada alat pemantauan sambaran petir ini bertujuan untuk mengatasi kelemahan tersebut. Dengan mengintegrasikan mikrokontroler seperti ESP32 ke dalam sistem, data dari sensor (seperti CT Clamp yang mendeteksi lonjakan arus) dapat dikirim secara langsung dan seketika ke platform digital. Dalam penelitian ini, platform yang digunakan adalah Blynk yang memungkinkan pengguna untuk memantau data, menerima notifikasi, dan mengakses riwayat kejadian dari jarak jauh melalui aplikasi di perangkat seluler atau komputer [7].

2.4 Microcontroller ESP32

ESP32 adalah platform mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems, merupakan peningkatan dari ESP8266 yang populer. Platform ini menawarkan kinerja lebih tinggi dengan tambahan fitur-fitur baru. ESP32 memiliki dua inti prosesor, satu untuk menangani aplikasi berkecepatan tinggi dan yang lainnya untuk komunikasi berdaya rendah, menjadikannya ideal untuk aplikasi IoT (Internet of Things). Dengan dukungan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth bawaan, ESP32 memungkinkan komunikasi nirkabel yang cepat dan mudah dengan perangkat lain. Berikut gambar 2.5 di bawah ini adalah gambar pin out ESP32. Selain itu, ESP32 dilengkapi dengan berbagai fitur tambahan yang mendukung berbagai kebutuhan pengembangan, termasuk:

- a. Tegangan operasi 3,3V
- b. RAM: 520KB
- c. *Memory flash*: 4MB hingga 32MB
- d. Pin masukan/keluaran digital: 34
- e. ADC (*analog-to-digital*) pin: 18
- f. DAC (*digital to analog*) pin: 2
- g. Keluaran PWM (modulasi lebar pulsa): 16
- h. Beberapa antarmuka: *I2C*, *SPI*, *UART*, dll.



Gambar 2. 5 ESP32

Pada Gambar 2.5 ESP32 adalah platform *open-source* dengan komunitas besar pengembang dan pengguna yang aktif berkontribusi pada pengembangan perangkat lunak serta pustaka untuk platform ini. Hal ini memudahkan pengembang untuk memulai dengan ESP32 dan dengan cepat membuat prototipe serta mengembangkan aplikasi IoT. Secara keseluruhan, ESP32 merupakan mikrokontroler yang kuat dan serbaguna, sangat cocok untuk aplikasi IoT dan proyek lain yang membutuhkan komunikasi nirkabel dan pemrosesan berkinerja tinggi [11].

2.5 DHT11

Sensor DHT11 merupakan modul yang menggabungkan pengukuran suhu dan kelembapan dengan output sinyal digital yang telah dikalibrasi. Sensor ini mampu memberikan pembacaan suhu dan kelembapan dengan tingkat akurasi yang baik, serta menawarkan stabilitas dan keandalan jangka panjang. DHT11 menggunakan elemen pengukur kelembapan berbasis resistif dan sensor suhu tipe

NTC, serta dilengkapi mikrokontroler 8-bit internal yang memungkinkan respon cepat dan efisiensi biaya. Modul ini tersedia dalam bentuk paket baris tunggal dengan 3 pin, sehingga mudah untuk diintegrasikan ke berbagai sistem [1].



Gambar 2. 6 DHT11

Pada Gambar 2.6 Sensor DHT11 menggunakan komunikasi serial satu kabel untuk mentransmisikan data, di mana data dikirim dalam bentuk pulsa dengan durasi tertentu. Sebelum sensor dapat mengirimkan data ke mikrokontroler seperti Arduino, diperlukan proses inisialisasi disertai dengan jeda waktu. seluruh proses komunikasi berlangsung dalam waktu sekitar 4 milidetik. antarmuka satu kabel ini memudahkan integrasi dengan sistem karena instalasinya yang sederhana. dengan ukuran yang ringkas, konsumsi daya yang rendah, dan kemampuan transmisi data hingga jarak 20 meter, sensor ini sangat cocok digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk yang membutuhkan keandalan tinggi. DHT11 dikemas dalam modul dengan 3 pin sejajar, sehingga praktis untuk dipasang, dan tersedia dalam bentuk khusus sesuai kebutuhan pengguna.

2.6 LCD (Liquid Crystal Display)

LCD (Liquid Crystal Display) merupakan jenis layar elektronik yang mengandalkan teknologi logika CMOS. Tidak seperti jenis layar lain yang menghasilkan cahaya sendiri, LCD bekerja dengan cara memanfaatkan cahaya eksternal. Pada sistem front-lit, cahaya dari lingkungan dipantulkan melalui lapisan reflektif di bagian belakang panel agar tampilan terlihat. Sementara itu, dalam sistem back-lit, cahaya berasal dari sumber di belakang seperti LED yang kemudian melewati lapisan kristal cair untuk membentuk tampilan gambar. Teknologi ini menjadikan LCD lebih hemat energi dibandingkan layar seperti OLED yang

menghasilkan cahaya sendiri. Gambar di bawah ini memperlihatkan bentuk LCD 16 x 2 dengan modul I2C [14].



Gambar 2. 7 LCD 16x2 I2C

Pada Gambar 2.7 LCD digunakan untuk menampilkan berbagai jenis informasi, seperti huruf, angka, karakter, hingga grafik, tergantung dari jenis dan konfigurasinya. Sebagai contoh, LCD berukuran 16x2 mampu menampilkan 16 karakter dalam dua baris, sedangkan LCD 20x4 dapat menampilkan hingga 20 karakter dalam empat baris. Integrasi LCD dengan mikrokontroler seperti Arduino kini semakin praktis berkat adanya modul I2C (*Inter-Integrated Circuit*), yang berfungsi untuk meminimalkan jumlah pin yang diperlukan. dengan menggunakan antarmuka I2C, hanya empat pin yang dibutuhkan untuk menghubungkan LCD ke Arduino, yaitu VCC, GND, SDA (*Serial Data*), dan SCL (*Serial Clock*).

2.7 CT Clamp

CT Clamp, atau Current Transformer Clamp, adalah sensor arus non-invasif yang bekerja berdasarkan prinsip transformator arus untuk mengukur arus listrik tanpa memutus atau mengganggu konduktor utama. Alat ini dirancang untuk melingkari kabel konduktor, seperti kabel grounding pada menara atau bangunan, dan mendeteksi arus melalui induksi elektromagnetik. Arus listrik yang mengalir pada konduktor primer (kabel yang dilingkari) menghasilkan medan magnet yang menginduksi arus pada lilitan sekunder di dalam CT Clamp, sesuai dengan rasio transformasi tertentu, misalnya 200A:5A, yang berarti arus primer 200 ampere menghasilkan arus sekunder 5 ampere. Keunggulan utama CT Clamp adalah kemampuannya untuk mengukur arus besar, seperti yang terjadi pada sambaran petir yang dapat melebihi 10 kiloampere, secara aman dan non-kontak. Hal ini

menjadikannya ideal untuk aplikasi monitoring arus pada sistem bertegangan tinggi atau berbahaya, dengan tingkat presisi dan keamanan yang tinggi [3]. Dapat dilihat Pada Gambar 2.5 CT Clamp



Gambar 2. 8 CT Clamp

2.8 TVS Diode

TVS Diode atau *Transient Voltage Suppression Diode* adalah komponen semikonduktor yang dirancang khusus untuk melindungi rangkaian elektronik dari lonjakan tegangan sesaat (*transient*) yang merusak. Peristiwa seperti sambaran petir atau switching beban induktif dapat menghasilkan lonjakan tegangan ini. Prinsip kerja TVS diode didasarkan pada kemampuannya untuk merespons dengan sangat cepat, dalam skala nanodetik, ketika tegangan pada sebuah jalur melampaui batas normalnya, yang dikenal sebagai *breakdown voltage*. Saat tegangan normal, diode ini bersifat non-konduktif dan tidak memengaruhi rangkaian. Namun, ketika lonjakan tegangan terjadi dan melampaui *breakdown voltage*, TVS diode akan seketika menjadi konduktif dengan impedansi rendah, mengalihkan arus dan energi berlebih tersebut ke jalur ground. Proses ini "menjepit" atau "memotong" (*clamping*) tegangan pada level yang aman (*clamping voltage*) sehingga komponen yang sensitif di belakangnya (*downstream*) terlindungi dari kerusakan [15]. Dapat dilihat pada Gambar 2.9 TVS Diode



Gambar 2. 9 TVS Diode

2.9 Resistor Wirewound

Resistor adalah salah satu komponen dasar dalam elektronika yang berfungsi menghambat aliran arus listrik dan menurunkan tegangan sesuai hukum Ohm ($V = I \times R$). Pada Gambar 2.10 Resistor Wirewound ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pembagi tegangan, pengatur arus, bias transistor, filter, hingga elemen proteksi terhadap arus berlebih. Resistor memiliki berbagai tipe dengan konstruksi yang berbeda, salah satunya adalah resistor wirewound [13]. Dapat dilihat pada Gambar 2.10 Resistor wirewound



Gambar 2. 10 Resistor wirewound

2.10 Kapasitor Polyester

Kapasitor polyester adalah jenis kapasitor non-polar yang menggunakan lapisan tipis film polyester sebagai dielektriknya. Dibandingkan dengan kapasitor elektrolit, kapasitor polyester umumnya memiliki nilai kapasitansi kecil hingga menengah, mulai dari puluhan pikofarad hingga beberapa mikrofard. Keunggulannya terletak pada stabilitas nilai kapasitansi, toleransi yang cukup baik, serta daya tahan terhadap suhu dan kelembapan. Karena sifat non-polarnya, kapasitor ini dapat dipasang tanpa memperhatikan arah polaritas.

Pada Gambar 2.11 Kapasitor Polyester Dalam rangkaian elektronika, banyak digunakan pada aplikasi coupling, filter audio, timing, maupun sebagai komponen bypass. Karakteristik frekuensinya yang cukup baik membuat kapasitor ini cocok

digunakan pada sinyal AC maupun DC. Selain itu, kapasitor polyester memiliki tingkat kebocoran arus yang rendah serta ketahanan mekanis yang baik, sehingga lebih awet untuk penggunaan jangka Panjang [13].



Gambar 2. 11 Kapasitor Polyester

2.11 Dioda Zener

Dioda Zener adalah jenis khusus dari dioda semikonduktor yang dirancang untuk beroperasi dalam kondisi bias balik (*reverse bias*) dan mempertahankan tegangan konstan saat arus melewati ambang tertentu. Berbeda dari dioda biasa yang hanya mengalirkan arus dalam satu arah, dioda zener sengaja dimanfaatkan untuk menstabilkan tegangan pada titik tertentu saat tegangan input melebihi nilai breakdown-nya. Nilai ini dikenal sebagai tegangan zener (*zener voltage*) dan biasanya tersedia dalam berbagai jenis, seperti 5.1V, 12V, 20V, dan sebagainya, tergantung kebutuhan aplikasi.

Pada Gambar 2.12 Dioda Zener Prinsip kerjanya adalah ketika tegangan balik yang melintasi dioda ini mencapai nilai tegangan zener-nya, dioda akan menjadi konduktif dan mengalirkan arus untuk mempertahankan tegangan di antara terminalnya agar tetap konstan. Karakteristik inilah yang membuatnya sangat efektif untuk dua aplikasi utama: sebagai penstabil tegangan (*voltage regulator*) dan sebagai pelindung tegangan berlebih (*overvoltage protection*). Sebagai komponen proteksi, dioda zener dipasang secara paralel dengan komponen yang akan dilindungi. Jika tegangan pada rangkaian meningkat hingga melampaui nilai tegangan zener, dioda akan aktif dan mengalihkan kelebihan arus ke ground. Tindakan ini secara efektif "menjepit" (*clamp*) tegangan pada level yang aman

sesuai dengan nilai tegangan zener-nya, sehingga mencegah kerusakan pada komponen sensitif seperti sensor atau mikrokontroler akibat tegangan berlebih [15].



Gambar 2. 12 Dioda Zener

2.12 Rectifier diode

Rectifier diode adalah komponen semikonduktor yang peran utamanya adalah mengubah sinyal arus bolak-balik (AC) menjadi sinyal arus searah (DC). Prinsip kerja ini didasarkan pada kemampuan dioda untuk hanya mengalirkan arus dalam satu arah (arus maju) dan menghambatnya dari arah sebaliknya. Dalam aplikasi yang menangani sinyal dengan transien cepat atau frekuensi tinggi, seperti pada sistem proteksi terhadap lonjakan arus petir [10]. Dapat dilihat pada Gambar 2.13 Rectifier Diode



Gambar 2. 13 Rectifier Diode

2.13 LM311

LM311 merupakan integrated circuit (IC) comparator diferensial berkecepatan tinggi yang dikembangkan oleh Texas Instruments (sekarang juga diproduksi oleh produsen lain seperti STMicroelectronics). IC ini dirancang untuk membandingkan dua sinyal tegangan input dan menghasilkan output digital berdasarkan perbandingan tersebut. Secara prinsip, comparator adalah perangkat

yang mirip dengan operational amplifier (op-amp) tetapi dioptimalkan untuk operasi switching cepat daripada amplifikasi linier. LM311 bekerja dengan membandingkan tegangan pada input non-inverting (+) dan inverting (-): jika tegangan pada input (+) lebih tinggi dari input (-), output menjadi tinggi (high); sebaliknya, output menjadi rendah (low). Outputnya bersifat open-collector, yang memungkinkan fleksibilitas dalam interfacing dengan level logika berbeda, seperti TTL atau CMOS, dengan menambahkan resistor pull-up eksternal [22]. Dapat dilihat pada Gambar 2.14 LM311



Gambar 2. 14 LM311

2.14 Power Supply

Power supply 12V 5A merupakan sumber daya listrik yang berfungsi mengubah tegangan AC dari jaringan listrik (biasanya 220V) menjadi tegangan DC sebesar 12 volt dengan kemampuan arus maksimum 5 ampere. Tegangan 12V DC ini banyak digunakan untuk menyalakan berbagai perangkat elektronik seperti mikrokontroler, sensor, aktuator, dan modul komunikasi. Secara umum, power supply terdiri dari beberapa tahap utama, yaitu penyearah (rectifier), penyaring (filter), dan regulator. Bagian penyearah mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) menggunakan dioda bridge. Selanjutnya, rangkaian filter biasanya berupa kapasitor elektrolit berfungsi meredam riak (ripple) agar tegangan keluaran menjadi lebih stabil. Tahap terakhir adalah regulator, yang menjaga agar tegangan tetap konstan pada 12V meskipun terjadi perubahan beban atau fluktuasi pada tegangan input. Dengan arus maksimum 5A, power supply ini mampu menyediakan daya hingga 60 watt, cukup untuk mendukung sistem dengan kebutuhan arus sedang hingga tinggi, seperti rangkaian kontrol industri, sistem mikrokontroler

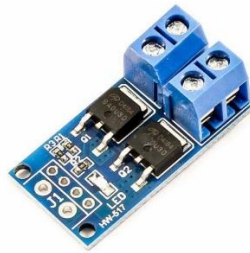
dengan beberapa sensor, atau perangkat komunikasi nirkabel [23]. Dapat dilihat pada Gambar 2.15 Power Supply



Gambar 2. 15 Power Supply

2.15 Modul MOSFET

Modul Dual MOSFET High Switch merupakan rangkaian driver berbasis transistor efek medan (MOSFET) yang berfungsi sebagai sakelar elektronik untuk mengendalikan beban berdaya besar menggunakan sinyal pemicu bertegangan rendah. Modul ini dirancang untuk bekerja pada tegangan DC antara 5V hingga 36V dengan kemampuan arus hingga 15A dan daya maksimum sekitar 400 watt. MOSFET yang digunakan pada modul ini memiliki karakteristik impedansi input yang tinggi dan resistansi drain-source ($R_{ds(on)}$) yang rendah, sehingga dapat menghantarkan arus besar dengan kehilangan daya (heat loss) yang minimal. Modul ini biasanya terdiri dari dua kanal (dual channel), sehingga dapat mengendalikan dua beban secara terpisah, baik secara manual melalui sinyal logika dari mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32, maupun otomatis melalui rangkaian sensor. Modul MOSFET Ketika sinyal pemicu diberikan pada gate MOSFET, komponen ini beralih dari kondisi off ke on, memungkinkan arus mengalir dari drain ke source dan menyalakan beban. Karena efisiensinya yang tinggi dan waktu switching yang cepat, modul ini banyak digunakan dalam aplikasi pengendalian motor DC, pemanas, lampu LED berdaya tinggi, serta sistem otomasi yang memerlukan kontrol beban besar dengan respon cepat dan stabil [25]. Dapat dilihat pada Gambar 2.16 Modul MOSFET



Gambar 2. 16 Modul MOSFET

2.16 Jack DC Power

Jack DC Power merupakan konektor arus searah (DC) yang berfungsi sebagai penghubung antara sumber daya dan perangkat elektronik. Komponen ini umumnya digunakan untuk menyalurkan tegangan DC dari power supply ke rangkaian atau alat yang membutuhkan suplai daya stabil, seperti modul sensor, mikrokontroler, atau sistem kontrol. Jack DC tipe male memiliki dua pin utama, yaitu pin positif di bagian dalam dan pin negatif di bagian luar, dengan tanda polaritas (+) dan (–) yang jelas untuk menghindari kesalahan sambungan. Jack DC Power Jenis ini dirancang agar mudah dipasang pada kabel daya seperti RG59 atau RG6 yang membawa tegangan DC bersamaan dengan jalur lainnya. Dengan desain konektor 2-pin, jack ini memastikan kontak listrik yang kuat dan stabil, meminimalkan kemungkinan terjadinya hambatan kontak atau pelepasan saat digunakan. Spesifikasinya meliputi tipe konektor DC male 2-pin, ukuran fisik sekitar 36x135x12 mm, dan berat sekitar 16 gram. Komponen ini cocok digunakan untuk sistem dengan tegangan kerja 12V maupun 24V DC, serta mendukung arus yang cukup besar untuk berbagai aplikasi elektronika dan sistem daya menengah [26]. Dapat dilihat pada Gambar 2.17 Jack DC Power



Gambar 2. 17 Jack DC Power

2.17 Modul Step Down XL4005

Modul Step Down XL4005 adalah konverter tegangan DC-DC tipe buck yang berfungsi untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih rendah dan stabil. Modul ini menggunakan chip regulator switching XL4005 dan mampu menangani tegangan input hingga 32V dengan arus output maksimum sekitar 5A, tergantung dari pendinginan dan kondisi beban. Salah satu keunggulan modul ini adalah efisiensi konversi daya yang tinggi, yang menjadikannya cocok untuk aplikasi dengan kebutuhan daya menengah hingga tinggi [24]. Dapat dilihat pada Gambar 2.18 Modul step down XL4005



Gambar 2. 18 Modul step down XL4005

2.18 Baterai

Baterai merupakan perangkat penyimpan energi listrik yang bekerja berdasarkan reaksi elektrokimia. Energi kimia diubah menjadi energi listrik melalui proses redoks antara elektroda positif (katoda) dan elektroda negatif (anoda). Baterai umumnya terdiri dari sel elektrokimia, elektrolit, serta wadah isolasi yang menjaga kestabilan reaksi. Kapasitas baterai dinyatakan dalam satuan milianperek-hour (mAh), yang menggambarkan jumlah muatan listrik yang dapat dilepaskan selama periode tertentu. Dalam sistem elektronika, baterai berfungsi sebagai sumber daya untuk menyuplai tegangan dan arus sesuai kebutuhan rangkaian. Jenis baterai yang umum digunakan adalah baterai isi ulang (*rechargeable*), misalnya lithium-ion, karena memiliki densitas energi tinggi, umur pakai panjang, serta stabil dalam penyimpanan energi [23]. Dapat dilihat pada Gambar 2.19 Baterai 3000 mAh



Gambar 2. 19 Baterai 3000 mAh

2.19 Arduino IDE



Gambar 2. 20 Arduino IDE

Arduino IDE adalah sebuah perangkat lunak (*software*) yang digunakan untuk menulis, mengedit, dan mengunggah kode program ke papan mikrokontroler Arduino. Dalam bahasa yang lebih sederhana, Arduino IDE adalah alat yang memungkinkan pengguna untuk membuat program (disebut juga “sketsa”) dan mengirimkannya ke papan Arduino agar bisa menjalankan tugas-tugas tertentu, seperti mengontrol lampu, sensor, motor, atau perangkat elektronik lainnya [5].

Antarmuka Arduino IDE cukup mudah digunakan, bahkan untuk pemula. Pengguna dapat menulis kode dalam pemrograman C/C++, yang kemudian dikompilasi (diubah menjadi bahasa mesin) dan diunggah ke papan Arduino melalui kabel USB. Selain itu, Arduino IDE dilengkapi dengan berbagai contoh kode dan *local (library)* yang memudahkan pengguna dalam mengembangkan proyek-proyek elektronik dapat dilihat Pada Gambar 2.20 dan Gambar 2.21.



Gambar 2. 21 Tampilan Arduino IDE

2.20 Blynk

Blynk berfungsi sebagai platform Internet of Things (IoT) yang memungkinkan pengguna mengendalikan dan memantau perangkat elektronik secara jarak jauh melalui aplikasi. Platform ini memfasilitasi komunikasi antara perangkat keras seperti mikrokontroler dan antarmuka pengguna digital tanpa perlu membuat sistem kontrol dari nol. Selain itu, Blynk menyediakan berbagai fitur yang mempermudah visualisasi data sensor, pengaturan output, serta otomatisasi proses berbasis waktu atau kondisi tertentu. Blynk juga dapat digunakan untuk mengirim notifikasi, menyimpan data historis, dan mengintegrasikan perangkat dengan layanan cloud [8]. Dapat dilihat pada Gambar 2.22 Ikon Blynk



Gambar 2. 22 Ikon Blynk