

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Penelitian [2] membahas pengembangan sistem monitoring dan pengendalian lampu penerangan jalan menggunakan *smartphone Android* dan jaringan internet. Alat-alat yang digunakan termasuk Arduino, *Ethernet Shield*, sensor arus ACS712, sensor tegangan ZMPT101B, dan *Relay DC 5V*. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk mengontrol lampu dan memantau kondisinya secara *real-time* melalui aplikasi *Android* yang dibuat menggunakan *App Inventor*. Data yang diperoleh dari sensor arus dan tegangan akan dikirimkan ke mikrokontroler Arduino, yang kemudian mengolah informasi tersebut untuk mengendalikan lampu penerangan jalan. Pengujian menunjukkan tingkat akurasi pengukuran arus 100% dan tegangan 95.23%. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem pintar untuk pengelolaan lampu penerangan jalan yang efisien melalui *Platform Android* dan jaringan internet, serta meningkatkan efektivitas dalam monitoring kondisi lampu untuk memastikan operasional yang optimal

Penelitian [4] membahas mengenai penggunaan sensor *Passive Infrared Receiver* (PIR) untuk monitoring pada alat penerangan jalan umum berbasis *Node-red*. Sistem terdiri dari sensor PIR yang mendeteksi gerakan manusia, terhubung ke *NodeMCU ESP32* untuk pengolahan data, dan aplikasi *Node-red* sebagai antarmuka pengguna. Alat ini memungkinkan pengguna untuk mengontrol dan memantau kondisi penerangan jalan umum secara *real-time* melalui internet. Sensor PIR dapat mendeteksi objek dalam jarak 1-8 meter, baik dalam kondisi terang maupun gelap. Uji coba menunjukkan sensor PZEM-004T meningkatkan nilai arus seiring beban yang diberikan. Sistem ini membantu mengoptimalkan penggunaan energi listrik dan memudahkan pemantauan serta pengendalian penerangan jalan umum secara efisien.

Penelitian [12] mengusung rancangan monitoring arus dan tegangan pada lampu penerangan jalan umum berbasis IoT menggunakan *NodeMCU* via aplikasi *Blynk*. Penelitian ini menggunakan *NodeMCU*, lampu bohlam, dan sensor PZEM-

004T untuk monitoring arus dan tegangan pada lampu penerangan jalan umum berbasis IoT. *NodeMCU* berperan sebagai mikrokontroler yang mengirim data arus dan tegangan yang dibaca oleh sensor PZEM-004T, dengan aplikasi *Blynk* digunakan sebagai media monitor untuk teknisi listrik melakukan monitoring secara jarak jauh melalui *smartphone*. Alat ini memudahkan pemantauan dan pengendalian kinerja lampu penerangan jalan umum dengan efisien, meningkatkan keamanan dan kenyamanan pengguna jalan terutama pada malam hari. Penelitian ini berhasil merancang *prototype* monitoring arus dan tegangan pada lampu penerangan jalan umum menggunakan sensor PZEM berbasis *NodeMCU* via aplikasi *Blynk*. Alat ini dapat melakukan monitoring arus dan tegangan pada lampu penerangan jalan umum baik dalam keadaan normal maupun saat lampu mati. Teknisi listrik dapat dengan mudah memantau dan mengontrol kinerja lampu penerangan jalan umum secara jarak jauh melalui *smartphone*. Data arus dan tegangan yang terbaca oleh sensor PZEM-004T dikirim ke *NodeMCU* dan ditampilkan di aplikasi *Blynk*, memudahkan dalam pemantauan dan pemeliharaan lampu penerangan jalan umum, serta meningkatkan efisiensi dan keamanan pengguna jalan terutama pada malam hari.

Penelitian [7] membahas tentang pengembangan sistem lampu penerangan jalan umum yang menggunakan solar panel sebagai sumber energi dan berbasis *Android*. Penelitian ini menggunakan solar panel sebagai sumber energi, kontroler mikro Arduino untuk mengatur lampu, sensor cahaya untuk deteksi cahaya, dan modul GSM untuk komunikasi data. Solar panel menghasilkan energi dari sinar matahari, kontroler Arduino mengatur waktu operasi lampu berdasarkan sensor cahaya, sensor cahaya mendeteksi tingkat cahaya, dan modul GSM memungkinkan pengguna mengontrol lampu via ponsel. Sistem ini menciptakan lampu jalan efisien, ramah lingkungan, dan mudah diakses melalui *Android*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pemantauan lampu penerangan jalan umum berbasis IoT memiliki tingkat akurasi sebesar 96,7%. Sistem ini mampu menampilkan parameter tegangan dan arus dan tegangan lampu dalam bentuk grafik dan indikator, memungkinkan pemantauan kondisi lampu penerangan jalan umum secara efektif. Selain itu, sistem ini juga memiliki kemampuan untuk mendeteksi kerusakan lampu penerangan jalan umum dari jarak jauh, memungkinkan tindakan

perbaikan yang cepat dan tepat waktu. Pengembangan sistem ke depan perlu mempertimbangkan penambahan kemampuan terkait intensitas pencahayaan, konsumsi daya listrik, unjuk kerja perangkat, kendali jarak jauh, dan pencatatan data lingkungan untuk meningkatkan efisiensi energi dan fungsionalitas sistem secara keseluruhan.

Penelitian [13] fokus pada pemantauan lampu otomatis, mendeteksi kerusakan, dan memberi pemberitahuan kepada petugas melalui *TelegramBot* jika ada lampu yang tidak normal. Tujuannya untuk efisiensi dalam monitoring kondisi lampu penerangan jalan umum, menghemat waktu dan biaya perawatan serta pengawasan. Alat yang digunakan termasuk *NodeMCU* Lolin V3, sensor arus dan tegangan PZEM-004T, serta sensor LDR, dengan *NodeMCU* berfungsi sebagai mikrokontroler pengatur sistem pada sensor LDR. Sensor arus dan tegangan PZEM-004T memantau tegangan, arus, dan daya secara *real-time*, sementara sensor LDR mendeteksi cahaya untuk mengontrol lampu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring dan alat pendeteksi kerusakan lampu penerangan jalan umum berbasis *Internet of Things* (IoT) telah berhasil diimplementasikan, secara otomatis memantau kondisi lampu, mendeteksi kerusakan, dan memberi pemberitahuan kepada petugas melalui *TelegramBot* jika ada lampu yang tidak berfungsi. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi, mengurangi waktu dan biaya perawatan, serta meningkatkan kualitas pelayanan terkait penerangan jalan umum. Penelitian ini juga membuka peluang untuk pengembangan lebih lanjut dalam teknologi monitoring berbasis IoT. Tabel 2.1 menjelaskan perbandingan antara penelitian sebelumnya dengan penelitian ini.

Tabel 2. 1 Penelitian Sebelumnya

Parameter	[2]	[4]	[12]	[7]	[13]	Terbaru
Mikrokontroler	ATmega328	ESP32	ESP8266	ESP8266-01	ESP8266	ESP32
Sensor Arus	ACS712	PZEM-004T	PZEM-004T	ACS712	PZEM-004T	PZEM-004T
Sensor Tegangan	ZMPT101B	PZEM-004T	PZEM-004T	ZMPT101B	PZEM-004T	PZEM-004T
Sensor Daya	-	-	-	-	-	PZEM-004T
Komunikasi	<i>Ethernet Shield R3</i>	<i>WiFi</i>	<i>WiFi</i>	GSM	<i>WiFi</i>	LoRaWAN
Platform	<i>ThingSpeak</i>	<i>Node-red</i>	<i>Blynk</i>	<i>ThingSpeak</i>	<i>Telegram Bot</i>	<i>Console Telkom IoT</i>

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 Penerangan Jalan Umum (PJU)

Penerangan jalan umum merupakan salah satu aspek yang termasuk dalam ranah tugas pemerintahan bidang perhubungan. Ini merujuk pada upaya penyediaan perlengkapan jalan di daerah, yang melibatkan pengaturan dan pemasangan sistem penerangan untuk memberikan keamanan serta kenyamanan bagi pengguna jalan di wilayah tersebut [2]. Adapun fungsi dari penerangan jalan guna memberikan kenyamanan, keamanan, dan keselamatan lalu lintas para pengguna jalan, serta menambah nilai estetika atau keindahan lingkungan jalan. Penerangan jalan tidak hanya bertujuan untuk memastikan visibilitas yang memadai bagi pengemudi, pejalan kaki, dan pengguna jalan lainnya pada malam hari, tetapi juga menjadi faktor penting dalam menciptakan lingkungan yang aman dan menarik secara visual. Dengan demikian, pengaturan penerangan jalan yang efektif dapat berkontribusi secara positif terhadap pengalaman berlalu lintas dan keindahan perkotaan atau daerah setempat [14]. Kualitas pencahayaan lampu jalan yang baik merupakan aspek yang sangat krusial untuk diperhatikan. Kekurangan kualitas cahaya yang dihasilkan oleh lampu penerangan jalan dapat menimbulkan berbagai kerugian bagi masyarakat, seperti tingginya tingkat kriminalitas dan risiko kecelakaan pada malam hari. Untuk memaksimalkan efektivitas pencahayaan yang sudah ada, diperlukan pemeliharaan dan perawatan lampu jalan yang baik guna menjaga kualitasnya. Upaya ini tidak hanya dapat meningkatkan tingkat keamanan di lingkungan tersebut tetapi juga memastikan bahwa fungsi utama penerangan jalan sebagai penyedia kenyamanan dan keselamatan dapat terwujud secara optimal. Oleh karena itu, investasi dalam pemeliharaan rutin dan perawatan lampu jalan menjadi suatu keharusan untuk memastikan lingkungan yang aman dan nyaman bagi seluruh penggunanya [15].

Komponen Penerangan Jalan Umum (PJU) meliputi lampu dan armatur, tiang, serta Perangkat Hubung Bagi (PHB). Lampu merupakan komponen utama dalam sistem PJU, sementara armatur berperan penting sebagai pendukung yang mengarahkan cahaya sesuai dengan jenisnya. Di dalam armatur, terdapat peralatan seperti *ballast*, *ignitor*, dan kapasitor yang memungkinkan lampu beroperasi pada tegangan 220 volt. Tiang penyangga digunakan untuk menopang armatur lampu

agar sinarnya dapat mencakup area yang lebih luas di permukaan jalan, dengan fondasi yang kokoh untuk menghadapi cuaca buruk seperti angin kencang atau gempa bumi ringan. Selain itu, Perangkat Hubung Bagi (PHB) merupakan sebuah perangkat listrik yang memiliki fungsi pengukuran, pengendalian, penyambungan, pelindung, dan pembagian tenaga listrik dari sumbernya. PHB sangat penting dalam instalasi listrik untuk melindungi dari risiko konsleting (hubung-pendek listrik) dan memutus aliran listrik ke beban[16].

2.2.2 Sensor Arus, Tegangan, dan Daya

Sensor arus merupakan perangkat yang digunakan untuk mendeteksi arus listrik dalam sebuah kabel. Sensor ini menghasilkan sinyal yang sebanding dengan nilai arus yang terdeteksi. Sinyal tersebut dapat berupa tegangan analog atau tegangan digital. Sinyal yang dihasilkan dapat digunakan sebagai alat ukur arus. Selain itu, data arus tersebut bisa disimpan di penyimpanan seperti *server* untuk analisis lebih lanjut atau untuk keperluan kontrol [17].

Sensor memainkan peran penting dalam sistem kendali motor, digunakan untuk mendeteksi berbagai parameter seperti arus, posisi, kecepatan, dan arah gerakan motor. Dengan kemajuan teknologi terbaru, sensor kini lebih akurat, handal, dan terjangkau. Banyak sensor modern yang mengintegrasikan rangkaian sensor dan sinyal dalam satu IC. Dalam sistem kendali motor, sensor memberikan umpan balik penting yang digunakan dalam kontrol *loop* dan meningkatkan keandalan dengan mendeteksi kondisi kesalahan yang dapat merusak motor. Tiga jenis sensor arus yang umum digunakan dalam aplikasi kendali motor yaitu resistor *shunt*, sensor *Hall Effect*, dan transformator arus. Resistor *shunt* populer karena akurasi pengukurannya pada nilai arus rendah. Sensor *Hall Effect* banyak digunakan karena kemampuannya memberikan pengukuran non-intrusif dan sering tersedia dalam paket IC kecil yang menggabungkan sirkuit sensor dan sinyal. Sementara itu, transformator arus juga merupakan teknologi sensor yang banyak digunakan, terutama untuk pengukuran arus AC [18].

Sensor tegangan merupakan sebuah alat yang digunakan untuk memantau, mengukur, dan menentukan pasokan tegangan, baik itu tegangan AC maupun DC. Sensor ini menerima input berupa tegangan dan menghasilkan *output* yang dapat

berupa sakelar, sinyal tegangan analog, sinyal arus, sinyal suara, dan lainnya. Beberapa sensor tegangan menghasilkan bentuk gelombang sinusoidal atau pulsa, sedangkan yang lain dapat menghasilkan *output* dalam bentuk *Amplitude Modulation* (AM), *Pulse Width Modulation* (PWM) atau *Frequency Modulation* (FM). Pengukuran oleh sensor ini sering kali bergantung pada penggunaan pembagi tegangan [19].

Sensor tegangan bekerja dengan cara menghubungkan sensor secara paralel di titik-titik dalam sirkuit tempat tegangan perlu diukur. Karena sensor tegangan memiliki resistansi yang sangat tinggi dibandingkan dengan resistansi sirkuit, sensor ini hanya menarik arus yang sangat kecil, yang meminimalkan gangguan pada tegangan yang diukur. Voltmeter digital modern menggunakan konverter analog ke digital untuk mengubah sinyal tegangan menjadi nilai digital yang akurat dan ditampilkan di layar. Sebaliknya, sensor arus dihubungkan secara seri dengan sirkuit, sehingga arus mengalir langsung melalui amperemeter. Amperemeter dirancang dengan resistansi yang sangat rendah untuk menghindari gangguan pada arus yang diukur. Amperemeter digital modern menggunakan resistor *shunt* dan rangkaian internal untuk mengukur arus dan mengubahnya menjadi nilai yang dapat dibaca pada layarnya. Dengan cara ini, sensor arus dapat memberikan pengukuran arus yang akurat tanpa mempengaruhi kinerja sirkuit yang sedang diuji [20].

Sensor daya mengukur arus atau tegangan dan menyampaikan *output* mengenai parameter yang dipantau ke sistem kontrol. Sensor arus dapat mengukur arus AC dan DC, digunakan untuk memantau penggunaan daya dan memberikan diagnostik untuk peralatan listrik. Sensor tegangan, yang berlaku pada sirkuit nominal 120 volt, 240 volt, dan 480 volt, menyediakan *output* analog terisolasi sepenuhnya yang sebanding dengan tegangan yang diukur, baik dalam kondisi sinusoidal maupun non sinusoidal (dengan frekuensi yang bervariasi) [21].

2.2.3 Long Range (LoRa)

Long Range (LoRa) merupakan teknologi nirkabel yang digunakan untuk membentuk link komunikasi jarak jauh. Berbeda dengan teknologi nirkabel lama yang masih mengandalkan modulasi *Frequency Shift Keying* (FSK) sebagai lapisan fisik karena efisien dalam mencapai daya rendah, LoRa menggunakan modulasi

chirp spread spectrum (CSS). Modulasi ini mempertahankan karakteristik *Low Power* seperti FSK, tetapi secara signifikan meningkatkan jangkauan komunikasi [22]. Jaringan *Long Range* (LoRa) mendukung pengembangan *Internet of Things* (IoT) dengan konsumsi daya rendah dan memiliki cakupan komunikasi yang sangat luas, mencapai hingga 15 km, tergantung pada kepadatan *end device* di area tersebut. Pengiriman data pada LoRa dimulai dari *end device* yang mengirimkan data melalui *gateway*, kemudian diteruskan ke *server* [23]. Protokol teknologi nirkabel berdaya rendah seperti *Long Range* (LoRa) beroperasi pada spektrum radio dengan pita frekuensi 433 MHz, 868 MHz, atau 915 MHz. Dengan memanfaatkan pita-pita frekuensi ini, LoRa memungkinkan komunikasi jarak jauh yang efisien dalam hal daya, menjadikannya pilihan yang optimal untuk aplikasi IoT, sensor jarak jauh, dan sistem monitoring yang memerlukan konektivitas tanpa kabel dengan konsumsi daya minimal. Pemilihan pita frekuensi yang beragam memberikan fleksibilitas dalam penyesuaian dengan kebutuhan lingkungan dan perangkat yang berbeda [24]. Parameter LoRa yaitu:

a. *Bandwidth*

Bandwidth merupakan media transmisi yang menentukan jumlah informasi yang dapat ditransfer per satuan waktu, sering diukur dalam bit per detik (bps). *Bandwidth* yang lebih besar memungkinkan transfer data yang lebih cepat, seperti video dan foto. Dalam jaringan komunikasi, konsep dasar *bandwidth* untuk pengukuran jaringan, dan teknologi serta jarak media mempengaruhi kecepatannya. Dalam layanan *hosting*, *bandwidth* mengacu pada jumlah data terbesar yang dapat ditransfer selama prosedur akses data di *server hosting*. *Website* dengan banyak *bandwidth* akan memiliki kecepatan *loading* yang lebih tinggi. Fungsi utama *bandwidth* meliputi media pengiriman data, di mana *bandwidth* berfungsi sebagai media pertukaran data dan informasi. *Bandwidth* juga membagi kecepatan transfer data di antara semua pengguna untuk mencegah perebutan *bandwidth*, serta mengatur jumlah data yang ditransfer untuk menjaga stabilitas jaringan. *Bandwidth* terbagi menjadi dua jenis yaitu *bandwidth* analog yang diukur dalam Hertz (Hz) dan menentukan jumlah data yang dapat dialirkan pada suatu waktu, serta *bandwidth* digital yang diukur dalam bit per detik (bps) dan menentukan jumlah data yang dapat dikirimkan

tanpa gangguan. Untuk mengoptimalkan penggunaan *bandwidth*, beberapa langkah yang dapat diambil antara lain menerapkan *Quality of Service (QoS)* untuk memprioritaskan trafik tertentu, menghentikan aktivitas online yang tidak berguna, menerapkan penggunaan *Cloud* untuk mengurangi beban pada jaringan, dan melakukan *update backup* di luar jam kerja untuk mencegah gangguan trafik [25].

b. *Spreading Factor*

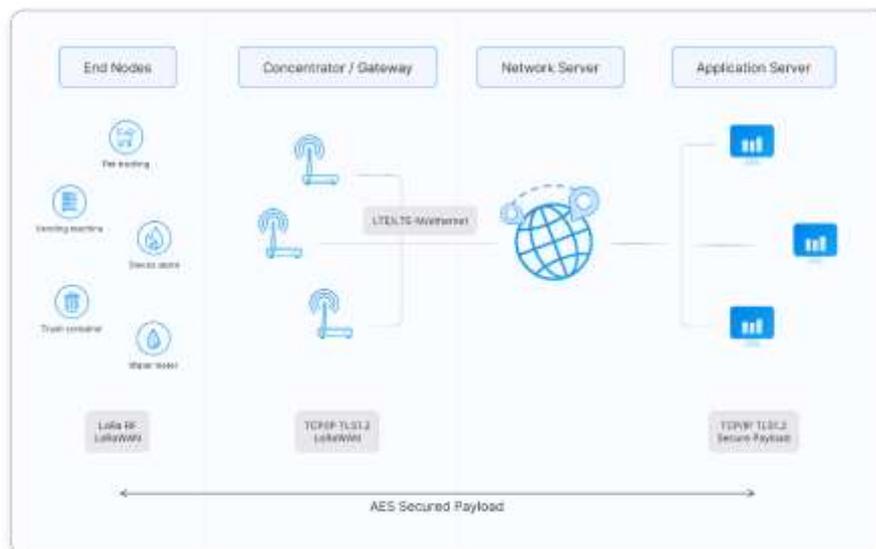
Spreading Factor (faktor penyebaran) menunjukkan jumlah *chip* yang digunakan untuk merepresentasikan satu simbol. Nilai SF dapat berkisar antara 6 hingga 12, dengan nilai SF yang lebih besar menyebabkan peningkatan *noise* [26]. Semakin banyak *chip* yang digunakan, semakin besar *processing gain* dari sistem *receiver*, yang memungkinkan *receiver* menerima sinyal data dengan SNR negatif. Semakin besar nilai SF, semakin besar pula *processing gain* nya. Satu simbol dapat merepresentasikan SF *bits* [27]. Dalam teknologi LoRa, SF didasarkan pada *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, di mana *chirps* membawa data. SF mengontrol laju *chirp* dan kecepatan transmisi data. SF yang lebih rendah menghasilkan *chirp* lebih cepat dan laju transmisi data yang lebih tinggi, sementara SF yang lebih tinggi mengurangi laju transmisi data namun meningkatkan jangkauan dan *processing gain*. Perubahan SF memungkinkan jaringan untuk menyesuaikan laju data dengan mengorbankan jangkauan, serta mengontrol kepadatan jaringan. SF juga mempengaruhi laju data, jangkauan, waktu pengiriman, sensitivitas penerima, dan masa pakai baterai. SF yang lebih tinggi memberikan sensitivitas penerima yang lebih baik untuk menangani sinyal lemah, tetapi memerlukan waktu pengiriman lebih lama dan mengurangi masa pakai baterai perangkat [28].

c. *Coding Rate*

Proses penyisipan bit data dalam modulasi LoRa dimulai dari data awal berukuran 4 bit. Data ini kemudian diperluas menjadi 5, 6, 7, atau 8 bit setiap karakter atau simbol. Penggunaan *Coding Rate* yang lebih tinggi membantu meningkatkan keandalan transmisi. Mekanisme koreksi kesalahan maju (*forward error correction*) diterapkan untuk mengurangi persentase *packet loss*. Dengan demikian, integritas data lebih terjaga selama proses komunikasi [29].

2.2.4 Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)

Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) merupakan teknologi Jaringan Luas Berdaya Rendah (LPWAN) yang menggunakan modulasi LoRa. Teknologi ini memungkinkan banyak perangkat untuk berkomunikasi secara nirkabel dalam jarak jauh. Biasanya, jangkauan komunikasi LoRaWAN yaitu 5-15 km, tergantung pada kondisi propagasi. Teknologi ini cocok digunakan dalam jaringan IoT, di mana perangkat perlu berkomunikasi jarang. Perangkat IoT tersebut hanya memerlukan muatan pendek untuk mengirimkan informasi dari sensor [8]. Gambar 2.1 terdapat gambar dari arsitektur yang dimiliki oleh LoRaWAN.



Gambar 2. 1 Arsitektur LoRaWAN

Pada Gambar 2.1 menjelaskan LoRaWAN menggunakan topologi "*star to star*," yang memungkinkan perangkat beroperasi dengan baterai dalam jangka waktu yang lebih lama daripada topologi *mesh network* umumnya. Dalam arsitektur LoRaWAN, perangkat tidak terikat dengan *gateway* tertentu, begitupun dengan sebaliknya, data dari perangkat akan diterima oleh beberapa *gateway* dalam jangkauan jaringan LoRa. Setiap *gateway* akan meneruskan paket yang diterima dari perangkat ke *network server* di *cloud* melalui berbagai jenis *backhaul*, seperti *ethernet*, *WiFi*, satelit, atau seluler. Pemrosesan dilakukan di *level network server*, yang mengatur jaringan, menyaring paket yang diterima, melakukan pemeriksaan keamanan, menjadwalkan *Acknowledgments (ACK)*, dan mengatur *Adaptive Data Rate (ADR)*. Saat perangkat bergerak, tidak ada kebutuhan untuk *handover* antar

gateway, yang merupakan fitur utama untuk mendukung aplikasi LoRaWAN seperti pelacakan aset, yang merupakan salah satu fokus utama IoT LoRaWAN. Protokol *gateway* dan *server* didasarkan pada standar alamat IP, dan setiap koneksi memiliki alamat IP yang unik. Komunikasi *endpoint* bersifat dua arah dengan kecepatan rata-rata antara 0.3 hingga 50 kbps. Kecepatan data perangkat atau *end-device* disesuaikan secara adaptif untuk meningkatkan efisiensi jaringan [31].

2.2.5 Lampu Bohlam

Lampu pijar atau lampu bohlam bekerja dengan cara mengalirkan arus listrik melalui filamen yang kemudian memanas dan menghasilkan cahaya. Kaca yang membungkus filamen yang panas mencegah kontak langsung dengan udara, sehingga filamen dapat bertahan lebih lama karena terhindar dari oksidasi [32]. Lampu pijar menghasilkan cahaya dengan cara memanaskan kawat filamen menggunakan arus listrik hingga suhu yang tinggi. Suhu ini menyebabkan filamen memancarkan radiasi dalam spektrum cahaya tampak. Bagian-bagian lampu bohlam terdiri dari beberapa elemen penting. Pertama, filamen, yang merupakan kawat tungsten (*wolfram*), mengubah energi listrik menjadi radiasi cahaya tampak. Semakin tinggi suhu filamen, semakin banyak energi yang diubah menjadi cahaya, sehingga efisiensi lampu juga meningkat. Bohlam, yaitu selubung kaca yang menutup filamen, tersedia dalam berbagai bentuk dan warna. Bentuk bola diberi notasi A, bentuk jamur diberi notasi E, sedangkan bentuk lilin dan lustre dapat memiliki bohlam dengan warna bening, susu, buram, atau warna-warna seperti merah, hijau, biru, dan kuning. Gas pengisi, seperti nitrogen dan argon, digunakan untuk mengurangi atau mencegah penguapan filamen. Terakhir, kaki lampu tersedia dalam dua jenis: kaki lampu berulir yang diidentifikasi dengan huruf E (*Edison*) dan kaki lampu *bayonet* yang diidentifikasi dengan huruf B (*Bayonet*) [33].

Kelebihan lampu bohlam terletak pada fakta bahwa lampu ini adalah salah satu jenis pertama yang ditemukan oleh Thomas Alva Edison, menjadikannya salah satu yang paling dikenal di masyarakat. Selain itu, harga lampu bohlam di pasaran jauh lebih murah dibandingkan dengan jenis lampu lainnya. Namun, lampu bohlam memiliki kekurangan, seperti efisiensi energi yang rendah karena konsumsi

listriknnya yang tinggi dan panas yang dihasilkan cukup besar. Dalam beberapa kasus, panas yang dihasilkan oleh lampu bohlam digunakan sebagai pemanas ruangan, misalnya untuk kandang hewan. Selain itu, kaca lampu bohlam yang mudah pecah bisa melukai orang di sekitarnya [32].

2.2.6 Modul Long Range (LoRA)

Modul *Long Range* (LoRa) merupakan perangkat berukuran kecil yang dibuat untuk mentransmisikan data melalui jaringan nirkabel LoRaWAN pada frekuensi antara 864-915 MHz, tergantung pada wilayah penggunaannya [34]. Modul LoRa memiliki ukuran kecil, konsumsi daya rendah, dan sensitivitas tinggi, mendorong perkembangan teknologi ini dengan jarak komunikasi hingga 15 km dan masa pakai baterai hingga 5 tahun. LoRa mendukung pemrosesan informasi multi-saluran dengan kapasitas besar, memungkinkan *gateway* menangani hingga 5 juta transmisi per hari. Selain itu, LoRa memungkinkan pengukuran jarak dan penentuan posisi dengan akurasi hingga 5 meter. Modulasi LoRa memberikan keamanan tinggi dan pemasangannya mudah dengan biaya rendah. Namun, kekurangannya meliputi potensi interferensi spektrum, kebutuhan infrastruktur baru, dan ketergantungan pada teknologi inti dari Semtech [35].

2.2.7 Mikrokontroler

Mikrokontroler merupakan sebuah *chip* berupa *Integrated Circuit* (IC) yang mampu menerima sinyal input, memprosesnya, dan menghasilkan sinyal *output* sesuai dengan program yang dimasukkan ke dalamnya. Sinyal input pada mikrokontroler berasal dari sensor yang mengumpulkan informasi dari lingkungan. Sinyal *output* diarahkan ke aktuator yang memberikan efek pada lingkungan. Secara sederhana, mikrokontroler dapat dianggap sebagai otak dari suatu perangkat atau produk yang berinteraksi dengan sekitarnya. Mikrokontroler berfungsi sebagai komputer dalam satu *chip* yang mengintegrasikan mikroprosesor, memori, jalur input/output (I/O), dan perangkat tambahan lainnya [36].

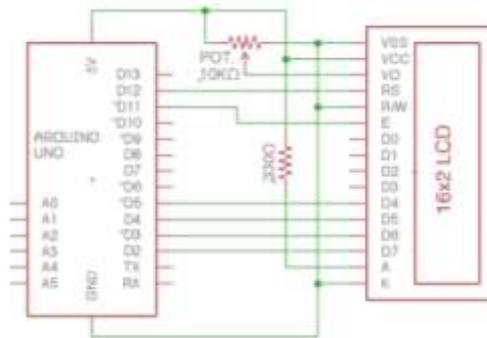
Berdasarkan arsitekturnya, mikrokontroler dibagi menjadi dua jenis yaitu *Complex Instruction Set Computer* (CISC) dan *Reduced Instruction Set Computer* (RISC). Mikrokontroler dengan arsitektur CISC memiliki sejumlah instruksi yang kompleks dan lengkap. Sebaliknya, mikrokontroler dengan arsitektur RISC

memiliki jumlah instruksi yang terbatas dan lebih sedikit. Arsitektur RISC cenderung memiliki lebih banyak register dibandingkan dengan CISC. Selain itu, pada arsitektur RISC, sebagian besar instruksi dieksekusi hanya dalam satu siklus *clock* dan menggunakan mode *addressing memory* yang sederhana [37].

Mikroprosesor dan mikrokontroler memiliki perbedaan signifikan dalam desain dan fungsionalitasnya. Mikroprosesor biasanya memiliki memori dan input/output (I/O) yang terhubung secara eksternal, sehingga sirkuitnya lebih besar dan tidak cocok untuk sistem kompak. Biayanya juga cenderung tinggi dan tidak ideal untuk perangkat dengan daya tersimpan karena konsumsi daya totalnya tinggi akibat komponen eksternal. Mikroprosesor tidak memiliki mode hemat daya dan umumnya digunakan dalam komputer pribadi. Selain itu, mikroprosesor menggunakan bus eksternal dan arsitektur *Von Neumann*, serta memiliki jumlah register yang lebih sedikit dan kecepatan operasi yang sangat tinggi. Sebaliknya, mikrokontroler memiliki memori dan I/O yang terintegrasi dalam satu *chip*, membuat sirkuitnya lebih kecil dan cocok untuk sistem kompak. Biayanya lebih rendah dan cocok untuk perangkat yang mengandalkan daya tersimpan karena konsumsi daya totalnya rendah. Mikrokontroler dilengkapi dengan mode hemat daya, sering digunakan dalam sistem tertanam, dan memiliki bus pengontrol internal serta arsitektur *Harvard*. Mikrokontroler juga memiliki jumlah register yang lebih banyak, proses instruksi yang lebih sederhana dan murah, serta dapat berjalan hingga 200MHz atau lebih [38].

2.2.8 *Liquid Crystal Display (LCD 16x2)*

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan perangkat tampilan yang semakin populer digunakan saat ini. Perangkat tampilan LCD secara bertahap menggantikan peran dari penampil *Cathode Ray Tube (CRT)* yang telah digunakan selama puluhan tahun sebagai penampil gambar atau teks, baik dalam format monokrom (hitam dan putih) maupun berwarna. Keunggulan teknologi LCD lebih menonjol jika dibandingkan dengan teknologi CRT, karena secara dasar, CRT merupakan tabung triode yang telah digunakan sebelum ditemukannya transistor [39]. Bentuk fisik dari *Liquid Crystal Display (LCD 16x2)* dapat dilihat pada Gambar 2.6, menampilkan susunan pin dari LCD 16x2.



Gambar 2. 2 Rangkaian *Liquid Crystal Display* (LCD)

Gambar 2.2 LCD menggunakan *silicon* atau *gallium* dalam bentuk cair sebagai substansi pencerahnya. Pada layar LCD, matriks disusun dalam dua dimensi piksel yang terbagi dalam baris dan kolom. Oleh karena itu, setiap pertemuan baris dan kolom berfungsi sebagai LED dengan bidang latar (*backplane*), yang merupakan lempengan kaca bagian belakang dengan sisi dalam yang dilapisi oleh elektroda transparan. Dalam kondisi normal, cairan yang digunakan memiliki warna cerah. Namun, pada area tertentu cairan akan mengubah warnanya menjadi hitam ketika tegangan diterapkan antara bidang latar dan pola elektroda di sisi dalam lempengan kaca bagian depan [39].

2.2.9 Sensor Cahaya

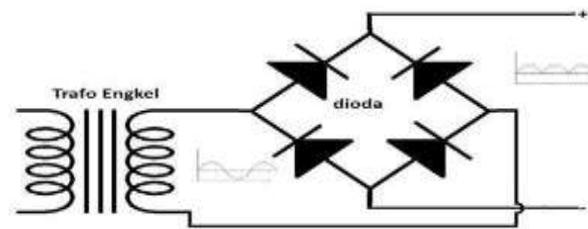
Sensor cahaya merupakan sebuah komponen elektronika yang berfungsi mengonversi besaran optik (cahaya) menjadi besaran elektrik [41]. Penggunaan sensor cahaya dalam berbagai aplikasi menawarkan sejumlah keuntungan yang signifikan. Pertama, sensor ini meningkatkan kenyamanan dan kemudahan dengan mengotomatisasi lampu dan pengaturan kecerahan layar ponsel pintar, sehingga mengurangi kebutuhan untuk penyesuaian manual. Selain itu, dalam kamera digital, sensor ini dapat meningkatkan kualitas gambar, terutama dalam kondisi pencahayaan rendah, menghasilkan gambar yang lebih jernih. Selain itu, sensor cahaya juga mendukung efisiensi energi dengan mengatur pencahayaan secara otomatis sesuai kebutuhan, sehingga mengurangi konsumsi energi pada sistem lampu dan layar ponsel pintar. Secara keseluruhan, sensor cahaya berperan penting dalam meningkatkan kualitas pengalaman pengguna dan efisiensi sistem [42].

Sensor cahaya bekerja dengan mengonversi energi dari foton menjadi elektron. Idealnya, setiap foton dapat menghasilkan satu elektron, dan sensor ini

akan mengalami perubahan nilai hambatannya berdasarkan tingkat kecerahan cahaya yang diterimanya. Prinsip kerja sensor cahaya melibatkan arus dan hambatan listrik yaitu ketika cahaya mengenai sensor, hambatan tersebut akan berubah, mempengaruhi aliran arus listrik. Sensor cahaya dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan prinsip kerjanya. Sensor pasif menerima cahaya dan menyesuaikan resistensinya, yang mempengaruhi aliran arus listrik untuk menghidupkan atau mematikan lampu atau alarm. Sistem ini sangat berguna dalam aplikasi otomatisasi dan pengendalian cahaya, seperti dalam pengaturan penerangan otomatis atau sistem keamanan berbasis cahaya [43].

2.2.10 Adaptor

Adaptor merupakan sebuah rangkaian yang berfungsi mengubah tegangan AC tinggi menjadi DC rendah. Adaptor digunakan sebagai pengganti tegangan DC seperti baterai atau aki, karena penggunaan tegangan AC lebih tahan lama dan dapat digunakan oleh siapa saja selama ada aliran listrik. Banyak perangkat seperti amplifier, radio, televisi mini, dan perangkat elektronik lainnya menggunakan adaptor sebagai catu daya. Secara umum, adaptor berfungsi mengubah tegangan AC (arus bolak-balik) tinggi menjadi tegangan DC (arus searah) rendah. Listrik yang didistribusikan oleh PLN (Perusahaan Listrik Negara) dalam bentuk arus bolak-balik atau AC, sementara sebagian besar peralatan elektronika membutuhkan arus DC dengan tegangan lebih rendah untuk operasionalnya. Oleh karena itu, diperlukan alat atau rangkaian elektronika yang dapat mengubah arus AC menjadi DC dan menyediakan tegangan tertentu sesuai kebutuhan. Rangkaian yang berfungsi mengubah arus AC menjadi DC disebut *DC power supply* atau adaptor. Penggunaan adaptor mempermudah koneksi antara sumber listrik utama dan perangkat elektronik dengan memastikan tegangan yang sesuai. Desain adaptor memungkinkan fleksibilitas dalam penggunaan berbagai perangkat dengan kebutuhan tegangan yang berbeda-beda. Selain itu, adaptor juga berperan penting dalam menjaga kestabilan aliran listrik untuk perangkat yang sensitif terhadap fluktuasi tegangan [44]. Gambar 2.3 merupakan ilustrasi dari rangkaian adaptor.



Gambar 2. 3 Rangkaian Adaptor

Gambar 2.3 adaptor dapat dirakit langsung pada peralatan elektronik atau secara terpisah. Adaptor yang dirakit terpisah biasanya bersifat universal, dengan tegangan *output* yang dapat diatur sesuai kebutuhan, seperti 3 Volt, 4,5 Volt, 6 Volt, 9 Volt, dan 12 Volt. Selain itu, ada adaptor yang hanya menyediakan tegangan tertentu dan ditujukan untuk perangkat elektronik spesifik, seperti adaptor laptop dan monitor. Adaptor berfungsi sebagai rangkaian elektronika yang mengubah arus AC menjadi arus DC. Tegangan *output* adaptor disesuaikan dengan kebutuhan perangkat yang digunakan [44].

2.2.11 Modbus *Remote Terminal Unit* (RTU)

Modbus merupakan protokol komunikasi jaringan standar internasional yang digunakan dalam industri. Sebagai protokol *open source*, Modbus dapat beroperasi di berbagai media antarmuka dan dikenal karena kesederhanaan serta efisiensinya. Protokol Modbus memiliki tiga keunggulan utama. Pertama, sebagai standar terbuka, Modbus memungkinkan pengguna untuk menggunakannya tanpa biaya lisensi dan tanpa melanggar hak kekayaan intelektual, dengan lebih dari 400 produsen dan 600 produk yang mendukungnya, termasuk banyak produk domestik. Kedua, Modbus bersifat pesan-berorientasi, mendukung berbagai antarmuka listrik seperti RS232, RS422, RS485, *Ethernet*, serta berbagai media transmisi seperti pasangan berpelindung, serat optik, dan RFID. Ini berbeda dari banyak bus lapangan lainnya karena tidak memerlukan *chip* atau perangkat keras khusus dan hanya memanfaatkan komponen standar yang tersedia secara komersial, sehingga menjamin biaya produk yang rendah. Ketiga, Modbus dikenal karena kesederhanaan dan efisiensinya, dengan format bingkai yang paling sederhana dan padat. Pengguna dan vendor dapat mengunduh berbagai program contoh, kontrol, dan alat perangkat lunak dari situs *web* Modbus-IDA dan situs pihak ketiga lainnya.

Pengalaman lapangan selama bertahun-tahun menunjukkan bahwa Modbus memiliki kemampuan komunikasi yang aman [45].

Modbus *Remote Terminal Unit* (RTU) merupakan varian dari Modbus yang digunakan untuk komunikasi serial. Modbus RTU beroperasi pada layer Data *Link* dari Model OSI, sementara untuk layer fisik menggunakan RS-485 dan RS-232 [46]. Format *frame* pada Modbus RTU meliputi *start* bit, *slave* ID, *function code*, data, *Cyclic Redundant Check* (CRC), dan *end* bit. Keunggulan Modbus RTU pada efisiensinya dalam komunikasi, memungkinkan pengiriman lebih banyak data dengan *baud rate* yang sama [47]. Modbus menggunakan teknik *master-slave* di mana hanya *master* yang dapat memulai transaksi, sementara *slave* merespons permintaan data atau tindakan yang diminta. Pesan Modbus mencakup alamat perangkat, kode fungsi, data yang dikirim, dan *field* pengecekan kesalahan [48].

2.2.12 Komunikasi Serial RS485

Komunikasi serial merupakan metode pengiriman data secara berurutan, di mana data dikirim satu per satu. Terdapat dua jenis komunikasi data serial yaitu sinkron dan asinkron. Dalam komunikasi serial sinkron, sinyal *clock* dikirim bersamaan dengan data, sedangkan dalam komunikasi serial asinkron, sinyal *clock* tidak dikirim bersamaan dengan data, melainkan dihasilkan secara terpisah di sisi pengirim (*transmitter*) dan penerima (*receiver*) [49]. RS-485 menggunakan jalur seimbang (*balanced lines*), di mana setiap sinyal memiliki dua konduktor, dengan sinyal pada konduktor kedua adalah negatif dari sinyal pada konduktor pertama. Penerima RS-485 merespons perbedaan tegangan antara kedua konduktor ini, sebuah metode yang disebut pengukuran diferensial. Sebaliknya, RS-232 menggunakan jalur tak seimbang (*unbalanced lines*) di mana setiap sinyal hanya memiliki satu konduktor dan penerima merespons perbedaan tegangan antara konduktor ini dan konduktor *ground* bersama. Keuntungan dari jalur seimbang termasuk pengurangan gangguan dari *noise* karena sinyal diferensial menciptakan dua arus kembali yang saling menghapuskan, serta ketahanan terhadap perbedaan potensial *ground* antara *node*. RS-485 dapat mentransmisikan data lebih jauh dibandingkan RS-232 karena penggunaan kabel *twisted-pair* yang murah, seperti kabel alarm dari Radio Shack, yang mengurangi gangguan elektromagnetik. Pada

RS-485, sinyal A dan B memiliki perbedaan tegangan minimum 1,5 volt untuk *output* yang valid dan 0,2 volt untuk deteksi level logika pada penerima. *Chip driver* dan *receiver* RS-485, seperti seri 75179, memungkinkan pembuatan *link full-duplex* atau *half-duplex* untuk mentransmisikan data secara bersamaan atau bergantian [50].

2.2.13 Sinyal

Sinyal (atau *signal* dalam bahasa Inggris) berasal dari kata *sign* yang berarti tanda atau isyarat. Dalam pemrosesan sinyal, istilah sinyal merujuk pada fungsi yang membawa informasi. Meskipun sinyal merupakan fungsi yang memenuhi semua kriteria matematis sebagai sebuah fungsi, tidak semua fungsi matematis menyimpan informasi di dalamnya [51]. Sinyal dibagi menjadi dua kategori berdasarkan sifatnya. Kategori-kategori tersebut yaitu sinyal analog dan sinyal digital.

a. Sinyal Analog

Sinyal analog merupakan bentuk energi listrik, seperti tegangan, arus, atau daya elektromagnetik, yang memiliki hubungan linier antara besaran listrik dan nilai yang diwakilinya. Sinyal ini memiliki amplitudo yang dapat berubah dalam rentang kontinu, dan bersifat kontinu seiring waktu. Sinyal analog bisa berupa sinyal periodik atau non-periodik. Variabel fisik seperti tegangan, arus, frekuensi, tekanan, suara, cahaya, dan suhu diukur untuk mengamati perubahan mereka seiring waktu dan memperoleh informasi. Ketika grafik tegangan versus waktu digambarkan, akan terlihat kurva kontinu seperti gelombang sinus. Sinyal analog cenderung mengalami gangguan saat melewati media, yang dapat menyebabkan kehilangan informasi. Untuk mengatasi hal ini, sinyal analog diubah menjadi sinyal digital melalui konversi dengan proses sampling dan kuantisasi. Sebagai contoh, gelombang suara dikonversi menjadi urutan sampel melalui proses sampling.

b. Sinyal Digital

Sinyal yang amplitudonya hanya memiliki nilai terbatas disebut sinyal digital. Sinyal digital bersifat diskrit, terdiri dari nilai-nilai yang berbeda dan hanya dapat membawa data biner berupa 0 atau 1 dalam bentuk bit, dengan satu nilai pada setiap periode waktu. Biasanya, sinyal digital digambarkan sebagai

gelombang persegi atau sinyal jam, dengan nilai minimum 0 volt dan maksimum 5 volt. Sinyal digital memiliki keunggulan dalam ketahanan terhadap gangguan dibandingkan dengan sinyal analog. Proses pengiriman data digital melalui saluran analog dilakukan dengan modulasi. Modulasi amplitudo mengubah data digital menjadi sinyal analog dengan menggunakan sinyal pembawa frekuensi tunggal. Sebaliknya, *frequency shift keying* menggunakan sinyal pembawa dengan amplitudo konstan dan dua frekuensi berbeda untuk membedakan antara 1 dan 0. Penggunaan sinyal digital dalam transmisi informasi telah berkembang pesat di berbagai bidang karena aplikasi dan keunggulannya yang lebih produktif dibandingkan sinyal analog.

Sinyal analog bersifat kontinu dan bervariasi seiring waktu, biasanya ditampilkan sebagai gelombang sinus dan sulit dalam pemecahan masalahnya. Sebaliknya, sinyal digital berbentuk biner dengan dua atau lebih status dan digambarkan sebagai gelombang persegi, membuat pemecahannya lebih mudah. Sinyal analog mudah terpengaruh oleh kebisingan dan menggunakan nilai kontinu untuk mewakili data, sementara sinyal digital stabil, kurang rentan terhadap *noise*, dan menggunakan nilai diskrit. Keakuratan sinyal analog bisa terpengaruh selama transmisi, berbeda dengan sinyal digital yang tidak terpengaruh. Selain itu, sinyal analog memerlukan lebih banyak daya dibandingkan dengan sinyal digital yang lebih hemat energi. Contoh sinyal analog termasuk suhu dan tekanan, sedangkan sinyal digital sering digunakan untuk umpan balik katup dan kontrol motor. Rangkaian analog melibatkan komponen seperti resistor dan kapasitor, sementara rangkaian digital menggunakan transistor, gerbang logika, dan mikrokontroler .

2.2.14 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Received Signal Strength Indicator (RSSI) merupakan parameter untuk mengukur tingkat daya sinyal yang diterima oleh perangkat penerima dalam komunikasi nirkabel. Dalam konteks komunikasi nirkabel, penerima memerlukan kekuatan sinyal yang optimal untuk efektif memisahkan sinyal informasi dari sinyal pembawa yang termodulasi. Oleh karena itu, RSSI berperan sebagai indikator penting dalam menilai kekuatan sinyal yang diterima. Satuan pengukuran RSSI yaitu *decibel milliwatt* (dBm), dan nilainya biasanya dinyatakan dalam bentuk negatif. Semakin tinggi nilai absolut RSSI, semakin kuat kekuatan sinyal yang

diterima. Nilai RSSI mendekati nol menunjukkan bahwa sinyal yang diterima memiliki kekuatan yang optimal, sedangkan nilai yang lebih rendah menandakan kekuatan sinyal yang lebih lemah. Dengan demikian, kondisi RSSI yang baik terjadi ketika nilai RSSI mendekati nol atau memiliki nilai absolut yang tinggi, menandakan bahwa sinyal yang diterima oleh perangkat penerima memiliki kekuatan yang memadai untuk mendukung komunikasi nirkabel dengan kualitas yang baik [52]. Untuk mendapatkan nilai RSSI, dapat menggunakan rumus 2.1.

$$RSSI = P_t - P_L - 10n_p \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + x_\sigma \quad (2.1)$$

Keterangan:

$RSSI$ = *Received Signal Strength Indicator* (dBm)

P_t = Daya transmisi (dBm)

P_L = *Path loss*

n_p = *Path loss eksponen* (tergantung kondisi propagasi)

x_σ = $N(0, \sigma^2)$ (tergantung kondisi propagasi)

2.2.15 *Signal to Noise Ratio* (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan perbandingan antara daya sinyal yang diinginkan dengan daya *noise* pada suatu titik pengukuran, yang menunjukkan kualitas sinyal informasi yang diterima dalam sistem transmisi serta batas ambang sinyal analog yang masih bisa diterima. Semakin besar nilai SNR, semakin baik kualitas sinyal. SNR mengukur seberapa baik sinyal yang diinginkan dapat dibedakan dari *noise*, yang mencakup berbagai gangguan seperti *noise* termal, kuantum, elektronik, dan intermodulasi. Biasanya dinyatakan dalam desibel (dB), rasio ini dapat mempengaruhi transfer data, di mana SNR yang lebih tinggi menunjukkan kualitas sinyal yang lebih baik, sedangkan SNR yang rendah dapat menyebabkan gangguan pada transfer data seperti paket yang hilang atau retransmisi data. Untuk meningkatkan SNR, teknik seperti spektrum tersebar atau peningkatan daya *output* sinyal dapat digunakan. Di sistem tingkat tinggi, seperti teleskop radio, *noise* internal dapat diminimalkan dengan menurunkan suhu sirkuit penerima [26] [53].

2.2.16 Quality of Service (QoS)

Quality of Service (QoS) merupakan sebuah metode untuk mengukur kualitas performa jaringan. QoS juga merupakan usaha untuk mendefinisikan karakteristik serta sifat dari sebuah layanan. Dengan QoS, kita dapat mengevaluasi serangkaian atribut kinerja yang telah ditetapkan. Atribut ini mencakup berbagai aspek performa jaringan. Setiap atribut kemudian dikaitkan dengan layanan tertentu. Dengan demikian, QoS memastikan bahwa layanan memenuhi standar yang diharapkan [54]. Parameter QoS dibagi menjadi:

a. *Packet loss*

Packet loss merupakan parameter yang menggambarkan kondisi dimana sejumlah paket data hilang dalam jaringan. Kehilangan paket ini bisa terjadi akibat tabrakan (*collision*) atau kemacetan (*congestion*) di jaringan, yang mempengaruhi semua aplikasi karena retransmisi paket yang hilang dapat mengurangi efisiensi jaringan secara keseluruhan, meskipun *bandwidth* yang tersedia cukup untuk aplikasi-aplikasi tersebut. Biasanya, perangkat jaringan memiliki *buffer* untuk menampung data yang diterima. Namun, jika terjadi kemacetan yang berkepanjangan, *buffer* akan penuh dan data baru tidak akan dapat diterima [55]. Tabel 2.2 menjelaskan kategori *packet loss* dan nilai *packet loss* dapat dihitung menggunakan rumus (2.2) sebagai berikut:

$$Packet\ Loss = \frac{(Packet\ transmitted - Packet\ received)}{Packet\ transmitted} \times 100\% \quad (2.2)$$

Tabel 2. 2 Kategori *Packet loss*

Kategori <i>Packet loss</i>	<i>Packet loss</i> (%)	Indeks
Sangat Bagus	0	4
Bagus	3	3
Sedang	15	2
Jelek	25	1

Tabel 2.2 menunjukkan kategori *packet loss* berdasarkan persentase kehilangan paket dan indeks kualitasnya. *Packet loss* merujuk pada kondisi di mana paket data yang dikirim melalui jaringan tidak berhasil mencapai tujuannya. Kategori "Sangat Bagus" memiliki *packet loss* sebesar 0% dengan indeks kualitas tertinggi yaitu 4, menunjukkan bahwa tidak ada paket data yang hilang sehingga koneksi dianggap sangat andal. Kategori "Bagus" memiliki *packet loss* sebesar 3%

dengan indeks kualitas 3, dimana meskipun ada sedikit kehilangan paket data, koneksi masih dianggap baik dan cukup andal. Kategori "Sedang" memiliki *packet loss* sebesar 15% dengan indeks kualitas 2, yang menunjukkan kehilangan paket data cukup signifikan dan dapat mempengaruhi kualitas koneksi. Kategori "Jelek" memiliki *packet loss* sebesar 25% dengan indeks kualitas terendah yaitu 1, menunjukkan kehilangan paket data yang tinggi dan kualitas koneksi yang buruk serta tidak andal. Klasifikasi ini membantu dalam menilai kualitas jaringan dan menentukan langkah-langkah perbaikan yang diperlukan untuk meningkatkan kinerja jaringan.

b. *Delay*

Delay atau *latency* merupakan waktu yang diperlukan bagi data untuk bergerak dari titik asal ke titik tujuan. Waktu ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jarak dan jenis media fisik yang digunakan. Kemacetan jaringan juga dapat meningkatkan *delay*. Selain itu, durasi pemrosesan yang lama turut berkontribusi terhadap peningkatan *delay*. Semua faktor ini bersama-sama menentukan total waktu *delay* dalam sebuah jaringan [55]. Tabel 2.3 menjelaskan beberapa kategori *delay* dan nilai *delay* dapat dihitung menggunakan rumus (2.3) sebagai berikut:

$$Delay = Time\ Packet\ received - Time\ Packet\ transmitted \quad (2.3)$$

Tabel 2. 3 Kategori Delay

Kategori Delay	Delay (ms)	Indeks
Sangat bagus	150 ms	4
Bagus	150 ms s/d 300	3
Sedang	300 ms s/d 450 ms	2
Jelek	> 450 ms	1

Tabel 2.3 menunjukkan kategori *delay* berdasarkan waktu tunda (*delay*) dalam milidetik (ms) dan indeks kualitasnya. *Delay* mengacu pada waktu yang diperlukan oleh paket data untuk mencapai tujuannya dalam jaringan. Kategori "Sangat Bagus" memiliki *delay* sebesar 150 ms dengan indeks kualitas tertinggi yaitu 4, yang menunjukkan bahwa waktu tunda sangat rendah sehingga koneksi dianggap sangat cepat dan andal. Kategori "Bagus" memiliki *delay* antara 150 ms hingga 300 ms dengan indeks kualitas 3, yang menunjukkan bahwa waktu tunda masih cukup rendah dan koneksi tetap andal. Kategori "Sedang" memiliki *delay*

antara 300 ms hingga 450 ms dengan indeks kualitas 2, menunjukkan bahwa waktu tunda mulai meningkat dan dapat mempengaruhi kualitas koneksi. Kategori "Jelek" memiliki *delay* lebih dari 450 ms dengan indeks kualitas terendah yaitu 1, menunjukkan bahwa waktu tunda sangat tinggi sehingga kualitas koneksi menjadi buruk dan tidak andal. Klasifikasi ini membantu dalam menilai performa jaringan dan menentukan langkah-langkah perbaikan yang diperlukan untuk meningkatkan kualitas koneksi.

2.2.17 Pengujian *Error* dan Akurasi

Error merupakan bagian alami dalam proses pengukuran di penelitian. Kesalahan pengukuran terdefinisi sebagai perbedaan antara nilai sebenarnya dan nilai yang terukur. Dalam konteks pengujian nilai *error*, penting untuk memperhatikan bahwa kesalahan tersebut berpotensi menciptakan ketidakpastian dalam hasil pengukuran yang diperoleh [56]. Penting untuk melakukan pengujian nilai akurasi secara cermat guna menilai seberapa dekat hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya. Langkah ini krusial untuk meningkatkan kepercayaan terhadap hasil pengukuran serta mengevaluasi kinerja metode yang digunakan dalam konteks teknologi *Internet of Things* [57]. Nilai *error* dan akurasi dapat dihitung menggunakan rumus (2.4) dan (2.5) sebagai berikut:

$$Error(\%) = \left| \frac{\text{Nilai alat pembanding} - \text{Nilai sensor}}{\text{Nilai alat pembanding}} \right| \times 100 \quad (2.4)$$

$$Akurasi = 100\% \times Error \quad (2.5)$$

2.2.18 Presisi

Standar deviasi merupakan akar kuadrat dari varians yang digunakan untuk mengukur seberapa jauh data tersebar dari rata-rata atau nilai yang diharapkan. Standar deviasi atau simpangan baku dari data yang telah disusun dalam tabel frekuensi digunakan untuk menentukan distribusi data dalam suatu sampel dan melihat seberapa dekat data tersebut dengan nilai rata-rata [58]. Dalam teori probabilitas dan statistik, Relatif Standar Deviasi (RSD) yaitu nilai absolut dari koefisien variasi, sering kali diungkapkan dalam bentuk persentase. Dalam konteks kimia analitik, RSD sering digunakan untuk menggambarkan tingkat presisi suatu pengukuran. Variabel serupa yang kadang-kadang digunakan yaitu varians relatif,

yang merupakan kuadrat dari koefisien variasi. Relatif Standar Deviasi merupakan alat penting dalam mengevaluasi seberapa stabil atau konsisten pengukuran yang dilakukan dalam analisis kimia, memungkinkan peneliti untuk memahami dan mengkomunikasikan tingkat ketepatan hasil pengukuran [59]. Presisi mengukur seberapa baik hasil pengujian dapat direproduksi. Umumnya, presisi diukur sebagai standar deviasi (SD) atau koefisien variasi (CV), yang juga dikenal sebagai Relatif Standar Deviasi (RSD) [60]. Persamaan nilai SD, RSD, dan presisi dapat dilihat pada rumus (2.6), (2.7), dan (2.8) sebagai berikut:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.6)$$

$$RSD = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2.7)$$

$$\text{Presisi} = 100\% - RSD \quad (2.8)$$

Keterangan:

SD = Standar Deviasi

RSD = Relatif Standar Deviasi