

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan zaman yang diiringi kemajuan teknologi telah meningkatkan kebutuhan energi listrik pada berbagai sektor. Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama karena hampir seluruh peralatan memerlukan energi listrik untuk beroperasi, baik pada sektor rumah tangga, gedung perkantoran, institusi pendidikan, maupun industri yang menggunakan mesin-mesin dengan tingkat konsumsi energi listrik yang tinggi. Di Indonesia, kebutuhan energi listrik disediakan oleh Badan Usaha Milik Negara (BUMN), yaitu Perusahaan Listrik Negara (PLN), yang setiap pelanggannya dikenai biaya sesuai dengan jumlah energi listrik yang digunakan. Besarnya konsumsi energi listrik dihitung berdasarkan hasil perkalian daya terhadap waktu dengan satuan kilowatt-hour (kWh) yang ditunjukkan oleh kWh meter [1].

Saat ini, PLN menerapkan dua sistem pencatatan konsumsi energi listrik, yaitu meter listrik digital (prabayar) dan meter listrik konvensional (pascabayar). Meter listrik digital bekerja menggunakan sensor daya yang terintegrasi dengan sistem elektronik untuk menghitung pemakaian energi listrik. Pada sistem ini, pelanggan membeli energi listrik terlebih dahulu dalam bentuk token yang akan berkurang sesuai dengan jumlah energi yang digunakan [2]. Sementara itu, meter listrik konvensional memanfaatkan prinsip kemagnetan melalui piringan yang berputar untuk menunjukkan besarnya energi listrik yang dikonsumsi. Pelanggan menggunakan energi listrik terlebih dahulu, kemudian pemakaian energi dicatat secara berkala oleh petugas pencatat meter sebagai dasar perhitungan tagihan listrik setiap bulan.

Meskipun sistem pencatatan energi listrik telah berkembang, informasi yang diperoleh pengguna masih terbatas pada besarnya energi listrik yang telah digunakan. Peningkatan kebutuhan energi listrik juga belum sepenuhnya diikuti dengan meningkatnya kesadaran masyarakat dalam menggunakan energi secara efisien sehingga pemborosan energi listrik masih sering terjadi. Salah satu penyebabnya adalah keterbatasan informasi mengenai kondisi penggunaan energi listrik secara aktual. Pengguna umumnya belum memperoleh informasi mengenai parameter kelistrikan, seperti tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, faktor daya, maupun estimasi biaya listrik secara *real time*. Akibatnya, pengguna mengalami kesulitan dalam mengevaluasi pola penggunaan energi sehingga upaya penghematan listrik belum dapat dilakukan secara optimal.

Pada sektor industri, pengelolaan penggunaan energi listrik menjadi lebih kompleks karena melibatkan berbagai jenis beban dengan karakteristik yang berbeda. Salah satu faktor yang memengaruhi efisiensi penggunaan energi listrik adalah faktor daya (*power factor*).

Faktor daya yang rendah menyebabkan arus yang mengalir menjadi lebih besar untuk menghasilkan daya aktif yang sama akibat adanya daya reaktif yang ditimbulkan oleh beban induktif maupun beban elektronik. Kondisi tersebut meningkatkan rugi-rugi daya dan biaya penggunaan energi listrik.

Oleh karena itu, pengelolaan beban pada instalasi listrik perlu dilakukan secara lebih baik melalui pemantauan parameter kelistrikan secara menyeluruh. Selain itu, pengguna juga memerlukan sistem yang mampu memantau kondisi penggunaan energi listrik tanpa harus berada secara langsung di lokasi instalasi.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan solusi terhadap kebutuhan tersebut. IoT merupakan konsep yang memungkinkan berbagai perangkat saling terhubung melalui jaringan internet sehingga dapat bertukar data serta melakukan proses monitoring dan pengendalian dari jarak jauh [3]. Perkembangan teknologi ini juga mendorong berkembangnya sistem monitoring penggunaan energi listrik berbasis IoT, yaitu sistem yang memanfaatkan sensor digital, mikrokontroler, komunikasi internet, dan aplikasi berbasis *cloud* untuk menyajikan informasi parameter kelistrikan secara *real time*. Berbeda dengan sistem monitoring konvensional yang mengharuskan pengguna berada di lokasi pengukuran, sistem monitoring memungkinkan data penggunaan energi listrik diakses kapan saja dan dari mana saja melalui komputer maupun telepon pintar. Selain meningkatkan kemudahan akses terhadap informasi, sistem ini juga mendukung pengendalian beban listrik secara jarak jauh sehingga proses pengelolaan energi menjadi lebih praktis, fleksibel, dan efisien.

Berbagai penelitian mengenai sistem monitoring energi listrik berbasis IoT telah dilakukan dengan memanfaatkan sensor, mikrokontroler, dan platform komunikasi yang berbeda. Prayitno [1] menggunakan sensor ZMPT101B untuk mengukur tegangan dan sensor ACS712 untuk mengukur arus. Data hasil pengukuran diproses menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP8266, kemudian dikirimkan ke platform ThingSpeak melalui jaringan internet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menampilkan informasi tegangan, arus, dan daya listrik secara *real time* dalam bentuk grafik. Namun, sistem tersebut masih terbatas pada pemantauan parameter dasar dan belum dilengkapi dengan perhitungan daya reaktif, daya semu, energi listrik, estimasi biaya listrik, maupun fungsi pengendalian beban.

Penelitian yang dilakukan oleh Ardiansyah [4] menggunakan sensor ZMPT101B dan ACS712 dengan mikrokontroler ATmega328 sebagai pengolah data, sedangkan NodeMCU digunakan sebagai perangkat komunikasi menuju server ThingSpeak.

Hasil pengujian menunjukkan nilai *error* pengukuran tegangan sebesar 0,3% dan arus sebesar 0,28%, dengan waktu tunda pengiriman data sekitar ± 12 detik. Meskipun mampu melakukan monitoring secara daring, sistem tersebut masih menggunakan dua mikrokontroler dan belum mendukung pengukuran parameter kelistrikan yang lebih lengkap maupun penerapan pada sistem tiga fasa.

Selanjutnya, Pratika [5] menggunakan sensor ACS712 dan ZMPT101B dengan mikrokontroler ESP32 DevKit V1. Data hasil pengukuran dikirimkan ke Firebase Realtime Database sehingga pengguna dapat memantau arus, tegangan, dan daya melalui perangkat Android. Sistem tersebut juga telah dilengkapi dengan fungsi pengendalian perangkat elektronik menggunakan relay. Akan tetapi, sistem yang dikembangkan masih berfokus pada pengukuran parameter dasar dan belum menyediakan perhitungan daya reaktif, daya semu, energi listrik, estimasi biaya listrik, maupun monitoring pada sistem tenaga listrik tiga fasa.

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa penerapan teknologi IoT telah mempermudah proses monitoring penggunaan energi listrik serta meningkatkan kemudahan pengendalian perangkat dari jarak jauh. Meskipun demikian, masih terdapat beberapa keterbatasan. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengukuran tegangan, arus, dan daya aktif, serta belum mengintegrasikan perhitungan daya reaktif, daya semu, faktor daya, konsumsi energi listrik, dan estimasi biaya listrik dalam satu sistem. Selain itu, penggunaan sensor tegangan dan sensor arus secara terpisah menyebabkan kompleksitas perangkat keras menjadi lebih tinggi. Penerapan sistem monitoring pada jaringan listrik tiga fasa juga masih terbatas, padahal sistem tersebut banyak digunakan pada sektor industri dan gedung komersial yang memerlukan informasi parameter kelistrikan secara lebih lengkap.

Selain kelengkapan parameter kelistrikan, keandalan sistem monitoring berbasis IoT juga dipengaruhi oleh kinerja komunikasi data antara aplikasi dan perangkat keras. Pada sistem yang dilengkapi dengan fitur pengendalian beban listrik, waktu yang dibutuhkan sejak perintah diberikan melalui aplikasi hingga relay berhasil dieksekusi menjadi salah satu indikator penting dalam menilai performa sistem. Waktu respons tersebut dipengaruhi oleh kualitas jaringan internet yang digunakan, seperti latensi, kestabilan koneksi, dan karakteristik media transmisi. Namun, aspek ini masih jarang dievaluasi pada penelitian-penelitian sebelumnya. Oleh karena itu, pengujian waktu respons pengendalian relay melalui aplikasi Blynk pada kondisi jaringan yang berbeda perlu dilakukan untuk mengetahui keandalan sistem dalam mendukung proses monitoring dan pengendalian secara *real time*.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu sistem monitoring yang mampu mengintegrasikan pengukuran berbagai parameter kelistrikan dalam satu perangkat dengan rancangan yang lebih sederhana serta mendukung monitoring dan pengendalian secara *real time*.

Salah satu sensor yang dapat memenuhi kebutuhan tersebut adalah PZEM-004T karena mampu mengukur tegangan, arus, daya aktif, daya semu, faktor daya, frekuensi, dan energi listrik dalam satu modul terintegrasi. Penggunaan sensor ini dapat menyederhanakan perancangan perangkat keras dibandingkan penggunaan sensor tegangan dan sensor arus secara terpisah. Selain itu, mikrokontroler ESP32 DevKit V1 dipilih karena telah dilengkapi modul Wi-Fi terintegrasi sehingga mampu melakukan pemrosesan data sekaligus komunikasi melalui internet tanpa memerlukan perangkat tambahan. Hal tersebut menjadikan rancangan sistem lebih sederhana dan sesuai untuk implementasi sistem monitoring berbasis IoT.

Oleh karena itu, pada penelitian ini dirancang dan diimplementasikan sistem monitoring penggunaan energi listrik tiga fasa berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 dan tiga sensor PZEM-004T. Sistem yang dikembangkan mampu memantau tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, faktor daya, konsumsi energi listrik, serta estimasi biaya listrik secara *real time* melalui LCD dan aplikasi Blynk. Selain itu, sistem juga dilengkapi fasilitas pengendalian beban menggunakan relay melalui jaringan internet.

Dengan demikian, sistem yang dirancang diharapkan mampu menyediakan informasi penggunaan energi listrik secara lengkap, akurat, dan mudah diakses sehingga dapat membantu pengguna memantau konsumsi energi listrik, mengoptimalkan penggunaan daya, serta mendukung pengelolaan energi listrik yang lebih efisien melalui proses monitoring dan pengendalian secara *real time*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring energi listrik tiga fasa berbasis IoT yang mampu menampilkan parameter kelistrikan secara *real time* melalui LCD dan aplikasi Blynk?
2. Bagaimana kinerja sistem yang dirancang dalam memenuhi spesifikasi sistem yang diinginkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring energi listrik tiga fasa berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor PZEM-004T yang mampu memantau parameter kelistrikan secara *real time*. Selain itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan akurasi pengukuran, kemampuan menghitung konsumsi energi listrik dan estimasi biaya listrik, analisis ketidakseimbangan tegangan, serta waktu respons pengendalian beban melalui aplikasi Blynk pada berbagai jenis jaringan internet.

1.4 Batasan Masalah

Dari rumusan masalah di atas dapat diuraikan batasan masalah sebagai berikut.

1. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 DevKit V1 dan tiga sensor PZEM-004T untuk pengukuran parameter listrik pada sistem tiga fasa.
2. Parameter yang dimonitor meliputi tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, faktor daya, energi listrik (kWh), dan estimasi biaya listrik.
3. Monitoring dilakukan melalui LCD 16×2 dan aplikasi Blynk.
4. Pengendalian beban dilakukan menggunakan relay melalui aplikasi Blynk.
5. Pengujian sistem dilakukan pada sistem listrik tiga fasa hubungan fasa–netral menggunakan beban seimbang berupa tiga lampu LED 18 W pada masing-masing fasa serta beban tidak seimbang berupa kipas angin 20 W, *hairdryer* 400 W, dan catokan rambut 42 W yang dipasang pada fasa yang berbeda.
6. Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sensor PZEM-004T terhadap multimeter digital Fluke untuk pengukuran tegangan dan clamp meter Hioki untuk pengukuran arus.
7. Analisis ketidakseimbangan tegangan dilakukan menggunakan metode Voltage Unbalance Rate (VUR).
8. Pengujian waktu respons relay dilakukan menggunakan dua jenis koneksi internet, yaitu jaringan Wi-Fi Universitas Andalas dan jaringan tethering telepon seluler.
9. Estimasi biaya listrik dihitung menggunakan tarif dasar listrik PLN yang ditetapkan pada program mikrokontroler.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara akademis maupun praktis. Secara akademis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah pengetahuan dan menjadi referensi bagi mahasiswa dan peneliti dalam pengembangan sistem monitoring energi listrik tiga fasa berbasis IoT. Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat membantu pengguna memantau penggunaan energi listrik secara *real time*, mengetahui konsumsi energi listrik beserta estimasi biaya pemakaian listrik, serta memudahkan pengendalian beban dari jarak jauh melalui aplikasi Blynk. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung upaya penggunaan energi listrik yang lebih efisien dan meningkatkan kesadaran pengguna terhadap pentingnya penghematan energi.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini disusun dalam beberapa bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori-teori pendukung yang digunakan sebagai landasan dalam penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang meliputi diagram alir penelitian, perancangan sistem, metode pengumpulan data, metode pengujian, dan metode analisis data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil implementasi dan pengujian sistem serta pembahasan berdasarkan hasil penelitian.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

