

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)



Gambar 2.1 Panel Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi cahaya matahari sebagai sumber utama untuk menghasilkan energi listrik melalui panel surya (*photovoltaic*)[5]. Panel surya bekerja dengan mengubah energi foton dari sinar matahari menjadi energi listrik dalam bentuk arus searah (*Direct Current* atau DC) melalui efek fotovoltai[5]. Energi listrik yang dihasilkan dapat langsung digunakan untuk menyuplai beban apabila tersedia kebutuhan daya secara langsung, maupun disimpan terlebih dahulu ke dalam baterai sebagai media penyimpanan energi agar dapat dimanfaatkan pada waktu yang berbeda.

Seiring dengan perkembangan teknologi energi terbarukan, sistem PLTS semakin banyak diterapkan pada berbagai sektor, seperti instalasi rumah tangga, sistem monitoring jarak jauh, lampu penerangan jalan, stasiun pemancar sinyal, hingga daerah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional[5]. Penggunaan PLTS pada berbagai aplikasi tersebut didukung oleh keunggulannya sebagai sumber energi yang ramah lingkungan, memanfaatkan sumber energi terbarukan, serta mampu beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan listrik utama[5].

Pada sistem PLTS, baterai memiliki peran penting sebagai media penyimpanan energi agar suplai daya tetap tersedia ketika intensitas cahaya matahari menurun, seperti saat cuaca mendung maupun pada malam hari. Energi yang dihasilkan panel surya pada siang hari akan disimpan ke dalam baterai dan kemudian digunakan kembali ketika panel surya tidak mampu menghasilkan energi yang mencukupi. Oleh karena itu, performa baterai menjadi salah satu faktor yang sangat menentukan keandalan sistem PLTS dalam menyediakan pasokan energi secara berkelanjutan[6].

Mengingat pentingnya peran baterai dalam sistem PLTS, kondisi kesehatan baterai perlu dipantau secara berkala untuk memastikan kapasitas penyimpanan energi tetap berada pada kondisi yang baik. Penurunan performa baterai yang tidak terdeteksi dapat menyebabkan berkurangnya kemampuan penyimpanan energi, sehingga memengaruhi kontinuitas pasokan listrik pada sistem PLTS[7]. Oleh karena itu, proses monitoring kondisi baterai menjadi salah satu aspek penting dalam menjaga keandalan dan umur operasional sistem penyimpanan energi pada PLTS.

2.2 Solar Charge Controller (SCC)



Gambar 2. 2 *Solar Charge Controller*

Solar Charge Controller (SCC) merupakan perangkat yang digunakan untuk mengatur proses pengisian energi dari panel surya ke baterai pada sistem PLTS[8]. SCC berfungsi mengendalikan tegangan dan arus pengisian agar sesuai dengan karakteristik baterai sehingga proses *charging* berlangsung secara aman dan optimal. Penggunaan SCC bertujuan untuk melindungi baterai dari kondisi *overcharge* maupun *overdischarge* yang dapat mempercepat degradasi baterai serta

menurunkan umur pakainya. Selain itu, SCC juga berperan dalam menjaga kestabilan proses pengisian sehingga efisiensi penyimpanan energi dan keandalan sistem PLTS dapat dipertahankan[8].

Secara umum, SCC dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)[8]. SCC tipe PWM bekerja dengan menghubungkan panel surya secara langsung ke baterai melalui proses pengaturan lebar pulsa (*pulse width modulation*), sehingga memiliki konstruksi yang lebih sederhana dan biaya yang relatif rendah. Sementara itu, SCC tipe MPPT mampu menyesuaikan titik daya maksimum (*Maximum Power Point*) dari panel surya sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara lebih optimal. Oleh karena itu, SCC tipe MPPT umumnya memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan SCC tipe PWM, terutama pada kondisi intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah[9].

Selain mengatur proses *charging*, beberapa SCC juga dilengkapi dengan fitur pemantauan kondisi baterai, seperti penampilan nilai *State of Charge* (SOC). Pada umumnya, estimasi SOC pada SCC dilakukan berdasarkan hubungan antara tegangan baterai dengan karakteristik pengisian (*Open Circuit Voltage* atau OCV), atau dikombinasikan dengan metode *Coulomb Counting* pada perangkat yang memiliki fitur pemantauan lebih lengkap. Pendekatan tersebut memungkinkan pengguna memperoleh estimasi kondisi pengisian baterai secara praktis selama sistem beroperasi.

Namun demikian, nilai tegangan baterai selama proses *charging* maupun *discharging* dipengaruhi oleh arus pengisian, arus beban, serta efek polarisasi baterai, sehingga tegangan terminal yang terukur dapat berbeda dengan tegangan rangkaian terbuka (*Open Circuit Voltage*). Akibatnya, estimasi SOC berbasis tegangan pada kondisi baterai yang sedang beroperasi dapat mengalami penyimpangan dibandingkan kondisi energi aktual yang tersimpan di dalam baterai[10].

Selain itu, estimasi SOC yang ditampilkan SCC umumnya menunjukkan tingkat pengisian baterai berdasarkan hasil estimasi tegangan atau kombinasi beberapa parameter, sehingga belum secara langsung menggambarkan kapasitas energi aktual yang masih dapat disimpan maupun dikeluarkan oleh baterai, terutama ketika baterai telah mengalami degradasi. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan *Watt-Hour Counting* untuk mengevaluasi kondisi baterai berdasarkan energi aktual selama proses *charging* dan *discharging*.

Penjelasan mengenai metode *Watt-Hour Counting* dibahas lebih lanjut pada subbab berikutnya.

2.3 Baterai Lead-acid



Gambar 2. 3 Baterai Lead-acid

Baterai *lead-acid* merupakan perangkat elektrokimia yang berfungsi menyimpan energi dalam bentuk energi kimia dan mengubahnya kembali menjadi energi listrik ketika dibutuhkan. Pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), baterai bekerja secara siklik melalui dua proses utama, yaitu proses pengisian (*charging*) dan proses pengosongan (*discharging*) [11]. Selama proses *charging*, energi listrik yang dihasilkan panel surya disimpan dalam bentuk reaksi kimia di dalam baterai, sedangkan pada proses *discharging* energi tersebut dikembalikan menjadi energi listrik untuk menyuplai beban. Oleh karena itu, baterai menjadi komponen yang sangat menentukan kontinuitas pasokan energi pada sistem PLTS [5].

Dalam proses operasionalnya, tegangan baterai merupakan salah satu parameter penting yang digunakan sebagai acuan dalam sistem pengendalian proses *charging* maupun *discharging*. Pengawasan terhadap tegangan dilakukan untuk mencegah terjadinya kondisi *overcharge* maupun *deep discharge* yang dapat mempercepat degradasi baterai dan menurunkan umur pakainya [11]. Selain sebagai parameter proteksi, tegangan baterai juga banyak digunakan sebagai indikator awal dalam memperkirakan kondisi baterai karena proses pengukurannya relatif sederhana dan mudah diterapkan pada berbagai sistem monitoring [11].

Pada baterai *lead-acid* 12 V, terdapat dua batas tegangan utama yang umum digunakan sebagai acuan operasional. Tegangan penuh (*full charge*) berada pada kisaran 14,2–14,7 V, sedangkan batas pengosongan

(*cut-off voltage*) berada pada sekitar 10,5 V. Batas tegangan tersebut digunakan untuk menjaga baterai tetap bekerja pada rentang operasi yang aman. Tegangan pengisian yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya *gassing*, yaitu pembentukan gas hidrogen dan oksigen akibat elektrolisis yang berlebihan, sedangkan tegangan yang terlalu rendah dapat menyebabkan terjadinya sulfasi pada pelat baterai sehingga kapasitas penyimpanan energi akan menurun secara permanen [11][12].

Meskipun demikian, tegangan baterai tidak selalu mampu merepresentasikan kondisi aktual baterai secara menyeluruh. Selama proses *charging*, tegangan terminal cenderung meningkat akibat pengaruh arus pengisian dan efek polarisasi, sehingga nilainya berbeda dengan tegangan rangkaian terbuka (*Open Circuit Voltage* atau OCV) [13]. Setelah sumber pengisian dilepas, tegangan baterai akan mengalami proses relaksasi hingga mencapai kondisi kesetimbangan seiring hilangnya efek polarisasi dan redistribusi ion di dalam elektrolit baterai [13]. Kondisi tersebut menyebabkan nilai tegangan yang terukur pada saat baterai beroperasi belum tentu menggambarkan kapasitas energi aktual yang masih dapat disimpan maupun dikeluarkan oleh baterai [14].

Oleh karena itu, penggunaan tegangan sebagai satu-satunya parameter dalam mengevaluasi kondisi baterai memiliki keterbatasan, terutama pada baterai yang telah mengalami degradasi. Pada kondisi tertentu, tegangan baterai masih dapat berada pada kisaran normal meskipun kapasitas energi yang tersedia telah mengalami penurunan [14]. Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan pendekatan lain yang mampu mengevaluasi kondisi baterai berdasarkan energi aktual yang tersimpan dan digunakan selama proses *charging* maupun *discharging*. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah metode *Watt-Hour Counting*, yang akan dibahas pada subbab berikutnya.

2.4 State of Charge (SOC)

State of Charge (SOC) merupakan parameter yang menunjukkan tingkat kapasitas energi yang masih tersedia pada baterai dibandingkan dengan kapasitas total baterai pada suatu kondisi tertentu. Nilai SOC digunakan untuk menggambarkan kondisi pengisian baterai, dimana nilai 100% menunjukkan baterai berada pada kondisi penuh (*fully charged*), sedangkan nilai 0% menunjukkan baterai telah mencapai batas pengosongan (*fully discharged*). Informasi mengenai nilai SOC sangat penting karena dapat digunakan sebagai indikator sisa energi yang masih

tersedia sehingga pengguna dapat mengetahui kemampuan baterai dalam menyuplai beban pada suatu waktu tertentu.

Secara umum, estimasi nilai SOC dapat dilakukan menggunakan beberapa pendekatan, seperti pengukuran tegangan rangkaian terbuka (*Open Circuit Voltage* atau OCV), *Coulomb Counting*, maupun metode berbasis model baterai[15][16]. Setiap metode memiliki karakteristik, kelebihan, dan keterbatasan yang berbeda sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Metode berbasis tegangan relatif sederhana untuk diterapkan, namun hasil estimasinya dapat dipengaruhi oleh kondisi operasi baterai, seperti adanya beban maupun proses *charging*, sehingga tegangan yang terukur tidak selalu merepresentasikan kapasitas energi aktual baterai.

Secara matematis, nilai SOC dapat dinyatakan menggunakan persamaan[17].

$$SOC = \frac{Wh_{in}}{Wh_{actual}} \times 100\%$$

Keterangan:

Wh_{in} : energi masuk pada baterai

Wh_{actual} : kapasitas nominal baterai

State of Charge (SOC) didefinisikan sebagai perbandingan energi yang masih tersisa terhadap energi total baterai[17]. Pada proses *discharging*, energi yang tersisa diperoleh dari selisih antara energi aktual baterai dengan energi yang telah dikeluarkan selama proses pelepasan energi, sehingga:

$$Wh_{remaining} = Wh_{actual} - Wh_{out}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan energi tersisa tersebut ke dalam persamaan definisi SOC, diperoleh:

$$SOC_{discharge} = \frac{(Wh_{actual} - Wh_{out})}{Wh_{actual}} \times 100\%$$

Pada penelitian ini, perhitungan SOC dilakukan menggunakan pendekatan *Watt-Hour Counting* berdasarkan akumulasi energi selama proses *charging* dan *discharging*. Pendekatan ini dipilih karena mampu memanfaatkan data hasil pengukuran tegangan dan arus yang diperoleh dari sensor INA219 untuk menghitung perubahan energi baterai secara kontinu. Dengan demikian, estimasi SOC pada penelitian ini didasarkan pada perubahan energi yang masuk dan keluar dari baterai selama proses pengujian, sehingga mampu merepresentasikan kondisi pengisian baterai berdasarkan kapasitas energi aktual.

2.5 State of Health (SOH)

State of Health (SOH) merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan tingkat kesehatan baterai berdasarkan kemampuan baterai dalam menyimpan dan mengeluarkan energi dibandingkan dengan kondisi awal ketika baterai masih baru[15]]. Nilai SOH menggambarkan tingkat degradasi baterai yang terjadi selama masa penggunaan akibat proses *charging*, *discharging*, penuaan material, maupun faktor operasional lainnya[18]. Semakin tinggi nilai SOH, maka semakin besar kemampuan baterai dalam mempertahankan kapasitas penyimpanan energinya.

Berbeda dengan *State of Charge* (SOC) yang menunjukkan kondisi pengisian baterai pada suatu waktu tertentu, nilai SOH bersifat lebih permanen dan berubah secara bertahap seiring bertambahnya usia serta jumlah siklus penggunaan baterai. Oleh karena itu, SOH digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi penurunan performa baterai selama masa operasinya[18]. Penurunan nilai SOH menunjukkan bahwa kapasitas aktual baterai semakin berkurang dibandingkan kapasitas nominalnya ketika masih baru[15].

Secara umum, estimasi SOH dapat dilakukan menggunakan beberapa pendekatan, seperti pengukuran resistansi internal, analisis karakteristik tegangan, maupun evaluasi kapasitas baterai[19]. Masing-masing pendekatan memiliki kelebihan dan keterbatasan sesuai dengan tujuan pengukurannya. Pada penelitian ini, evaluasi SOH dilakukan berdasarkan kapasitas energi aktual yang mampu disimpan dan dikeluarkan oleh baterai menggunakan metode *Watt-Hour Counting*. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada evaluasi kemampuan baterai dalam menyimpan energi aktual, sehingga penurunan kapasitas baterai dapat direpresentasikan secara langsung melalui perubahan kapasitas yang diperoleh selama proses *charging* dan *discharging*.

Nilai SOH dihitung berdasarkan persamaan [15].

$$SOH = \frac{C_{actual}}{C_{nominal}} \times 100\%$$

Keterangan:

C_{actual} : kapasitas aktual baterai

C_{rated} : kapasitas nominal baterai

Hubungan antara SOC dan SOH sangat erat dalam proses evaluasi kondisi baterai. SOC menunjukkan besarnya energi yang masih tersedia

pada suatu waktu, sedangkan SOH menunjukkan kemampuan baterai dalam menyimpan energi dibandingkan kapasitas awalnya. Pada baterai yang masih memiliki nilai SOH tinggi, perubahan nilai SOC umumnya sebanding dengan energi yang digunakan oleh beban. Sebaliknya, pada baterai yang telah mengalami degradasi, kapasitas energi aktual akan berkurang sehingga energi yang dapat disimpan maupun dikeluarkan menjadi lebih kecil meskipun nilai tegangan baterai masih berada pada kisaran normal. Oleh karena itu, penggunaan parameter SOC dan SOH secara bersamaan dapat memberikan gambaran kondisi baterai yang lebih komprehensif dibandingkan hanya menggunakan salah satu parameter saja.

2.6 Metode Watt-Hour Counting

Metode *Watt-Hour Counting* merupakan pendekatan kuantitatif yang digunakan untuk menghitung energi listrik yang masuk maupun keluar dari baterai berdasarkan hasil perkalian antara tegangan, arus, dan waktu pengukuran[20]. Berbeda dengan metode yang hanya memanfaatkan parameter tegangan, *Watt-Hour Counting* mengevaluasi perubahan energi baterai selama proses *charging* maupun *discharging*, sehingga dapat memberikan gambaran mengenai kapasitas energi aktual baterai selama beroperasi.

Secara umum, metode estimasi kondisi baterai dapat dilakukan menggunakan beberapa pendekatan, seperti *Open Circuit Voltage (OCV)*, *Coulomb Counting*, maupun metode berbasis model baterai[14]. Metode OCV mengestimasi kondisi baterai berdasarkan hubungan antara tegangan rangkaian terbuka dengan kapasitas baterai, sehingga pengukuran perlu dilakukan pada kondisi tanpa beban dan setelah baterai mencapai keadaan relaksasi agar nilai tegangan yang diperoleh lebih stabil[20]. Oleh karena itu, metode OCV kurang sesuai untuk digunakan pada sistem yang melakukan pemantauan secara kontinu ketika baterai sedang beroperasi.

Pada penelitian ini, metode *Watt-Hour Counting* dipilih karena mampu mengevaluasi kondisi baterai berdasarkan kapasitas energi aktual yang dapat disimpan maupun dikeluarkan oleh baterai selama proses operasional. Pendekatan ini tidak hanya memanfaatkan informasi tegangan, tetapi juga memperhitungkan arus dan durasi penggunaan energi, sehingga perubahan kapasitas baterai akibat degradasi dapat direpresentasikan melalui energi yang benar-benar tersimpan maupun dilepaskan selama proses *charging* dan *discharging*. Dengan demikian,

parameter *State of Charge* (SOC), *State of Health* (SOH), dan efisiensi baterai dapat dihitung berdasarkan perubahan energi yang terjadi pada baterai.

Secara matematis, energi listrik selama proses *charging* maupun *discharging* dapat dinyatakan sebagai [21].

$$\Delta E = P \cdot \Delta t$$

ΔE : energi listrik (Wh),

P : daya listrik (W),

Δt : selang waktu pengukuran.

Berdasarkan persamaan tersebut, energi baterai diperoleh melalui integrasi daya terhadap waktu. Pada implementasinya, sistem menghitung energi pada setiap interval pengukuran (*wh_delta*), kemudian mengakumulasikan seluruh hasil perhitungan hingga diperoleh energi total selama proses *charging* maupun *discharging*. Pendekatan ini memungkinkan perubahan kapasitas energi baterai diamati secara langsung berdasarkan energi yang benar-benar masuk dan keluar selama proses pengujian.

Metode *Watt-Hour Counting* memiliki kelebihan karena mampu merepresentasikan kapasitas energi aktual baterai sehingga penurunan performa baterai dapat diamati melalui perubahan energi yang tersimpan maupun dilepaskan selama proses operasional [22][23]. Namun demikian, metode ini juga memiliki keterbatasan. Akurasi hasil perhitungan dipengaruhi oleh ketelitian sensor dan proses akumulasi data secara terus-menerus, sehingga kesalahan pengukuran dapat terakumulasi seiring bertambahnya waktu pengamatan. Selain itu, evaluasi kapasitas energi aktual menggunakan metode ini memerlukan data hasil satu siklus *charging-discharging* sehingga informasi mengenai kapasitas baterai baru dapat diperoleh setelah satu siklus pengujian selesai. Kondisi tersebut menjadi salah satu keterbatasan yang akan dibahas lebih lanjut pada hasil implementasi penelitian.

2.7 Efisiensi Energi Baterai

Efisiensi energi baterai (*Battery Energy Efficiency*) merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan kemampuan baterai dalam menyimpan dan mengembalikan energi selama satu siklus *charging* dan *discharging*. Nilai efisiensi menggambarkan seberapa besar energi yang dapat dimanfaatkan kembali dibandingkan dengan energi yang diberikan

pada saat proses pengisian. Semakin tinggi nilai efisiensi, maka semakin kecil energi yang hilang selama proses konversi dan penyimpanan energi di dalam baterai[24].

Secara umum, efisiensi baterai dapat dievaluasi menggunakan beberapa parameter, yaitu *Coulombic Efficiency*, *Voltage Efficiency*, dan *Energy Efficiency*[24]. *Coulombic Efficiency* menunjukkan perbandingan jumlah muatan listrik (*Ampere-hour*) yang berhasil dikeluarkan terhadap muatan yang masuk selama satu siklus. *Voltage Efficiency* menunjukkan perbandingan antara tegangan rata-rata saat proses *discharging* terhadap tegangan rata-rata saat *charging*. Sementara itu, *Energy Efficiency* atau *Round-Trip Energy Efficiency* menunjukkan perbandingan antara energi yang berhasil dikeluarkan baterai terhadap energi yang masuk selama satu siklus *charging* dan *discharging*.

Pada penelitian ini, parameter efisiensi yang digunakan adalah *Energy Efficiency* karena seluruh proses evaluasi kondisi baterai didasarkan pada perubahan energi yang dihitung menggunakan metode *Watt-Hour Counting*. Dengan menggunakan pendekatan tersebut, nilai efisiensi dapat menggambarkan kemampuan baterai dalam menyimpan dan mengembalikan energi aktual selama proses operasional. Oleh karena itu, parameter ini dinilai lebih sesuai dengan tujuan penelitian dibandingkan parameter efisiensi yang hanya didasarkan pada muatan listrik maupun tegangan.

Efisiensi energi baterai dihitung menggunakan persamaan [25].

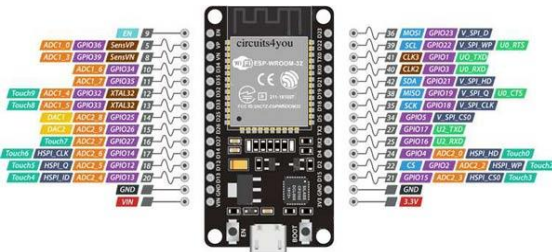
$$\eta = \frac{Wh_{out}}{Wh_{in}} \times 100\%$$

Keterangan:

- η : efisiensi baterai (%),
- E^{dis} : energi keluar baterai (Wh),
- E^{ch} : energi masuk baterai (Wh).

Nilai efisiensi yang diperoleh menunjukkan besarnya energi yang berhasil dimanfaatkan kembali setelah melalui satu siklus *charging* dan *discharging*. Semakin tinggi nilai efisiensi, maka semakin kecil rugi-rugi energi yang terjadi selama proses penyimpanan energi. Sebaliknya, penurunan nilai efisiensi dapat mengindikasikan adanya peningkatan rugi-rugi energi yang berkaitan dengan proses degradasi baterai maupun faktor operasional lainnya.

2.8 ESP32



Gambar 2. 4 ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis *System-on-Chip* (SoC) yang dikembangkan untuk mendukung berbagai aplikasi sistem tertanam (*embedded system*) dan *Internet of Things* (IoT). Mikrokontroler ini telah dilengkapi dengan modul Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, sehingga mampu melakukan komunikasi data secara nirkabel tanpa memerlukan perangkat komunikasi tambahan[26]. Dengan kemampuan tersebut, ESP32 banyak digunakan pada sistem monitoring maupun sistem kendali jarak jauh yang memerlukan proses akuisisi serta pengiriman data secara *real-time*.

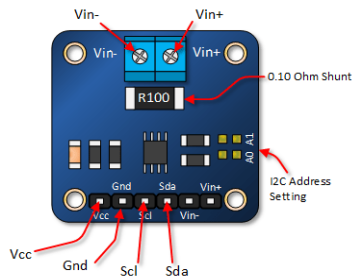
Pada penelitian ini, ESP32 berperan sebagai unit pemroses utama yang menerima data hasil pengukuran dari sensor INA219, kemudian melakukan proses akuisisi data secara berkala sebelum mengirimkannya ke server melalui jaringan Wi-Fi[26]. Data yang dikirim meliputi parameter tegangan, arus, daya, serta energi hasil perhitungan yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses evaluasi kondisi baterai.

Selain memiliki kemampuan komunikasi yang baik, ESP32 juga memiliki performa pemrosesan yang memadai untuk menjalankan berbagai proses komputasi secara bersamaan. Dengan dukungan prosesor berkecepatan tinggi, memori yang cukup, serta berbagai antarmuka komunikasi seperti I²C, SPI, UART, dan PWM, ESP32 mampu berkomunikasi dengan berbagai perangkat eksternal secara efisien[27]. Pada penelitian ini, antarmuka I²C digunakan untuk berkomunikasi dengan sensor INA219 sehingga proses pembacaan tegangan dan arus dapat dilakukan secara kontinu.

Kemampuan tersebut memungkinkan ESP32 melakukan proses akuisisi data, perhitungan parameter dasar seperti daya dan energi, serta pengiriman data ke server secara berkesinambungan. Selanjutnya, data

yang diterima server digunakan dalam proses perhitungan *State of Charge* (SOC), *State of Health* (SOH), dan efisiensi baterai menggunakan metode *Watt-Hour Counting*.

2.9 INA219



Gambar 2.5 INA219

INA219 merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur tegangan dan arus secara presisi melalui komunikasi *Inter-Integrated Circuit* (I²C). Sensor ini bekerja dengan mengukur tegangan jatuh (*voltage drop*) pada resistor *shunt* sehingga mampu menghitung besar arus yang mengalir dengan tingkat akurasi yang baik, terutama pada pengukuran arus searah (*Direct Current* atau DC)[27]. Selain mengukur arus, INA219 juga mampu membaca tegangan pada sisi beban sehingga memungkinkan proses pemantauan parameter listrik dilakukan secara simultan.

Pada penelitian ini, INA219 berfungsi sebagai sensor utama untuk memperoleh data tegangan dan arus baterai selama proses *charging* maupun *discharging*. Data hasil pengukuran kemudian dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi I²C untuk diproses dan diteruskan ke server sebagai dasar dalam proses perhitungan parameter kondisi baterai.

Nilai tegangan dan arus yang diperoleh dari sensor INA219 digunakan untuk menghitung daya listrik, kemudian diintegrasikan terhadap waktu menggunakan metode *Watt-Hour Counting* sehingga diperoleh energi yang masuk maupun keluar dari baterai. Oleh karena itu, ketelitian hasil pengukuran sensor INA219 menjadi salah satu faktor yang memengaruhi akurasi perhitungan energi, *State of Charge* (SOC), *State of Health* (SOH), dan efisiensi baterai pada sistem yang dikembangkan.

2.10 Sistem Database dan Monitoring

Sistem *database* merupakan media penyimpanan data yang digunakan untuk menyimpan hasil pengukuran secara terstruktur sehingga data dapat diakses kembali untuk proses monitoring maupun analisis[28]. Pada sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT), *database* berperan sebagai pusat penyimpanan data yang menerima informasi dari perangkat lapangan dan menyimpannya secara berkelanjutan. Dengan adanya penyimpanan data secara historis, informasi hasil pengukuran tidak hanya dapat dipantau secara *real-time*, tetapi juga dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan kondisi sistem dalam jangka waktu tertentu.

Pada penelitian ini, data hasil pembacaan sensor yang diperoleh melalui ESP32 dikirim ke server menggunakan protokol HTTP, kemudian disimpan ke dalam *database* secara otomatis[28]. Data yang disimpan meliputi parameter tegangan, arus, daya, energi, *State of Charge* (SOC), *State of Health* (SOH), dan efisiensi baterai. Penyimpanan data dilakukan secara berkelanjutan sehingga setiap hasil pengukuran dapat didokumentasikan sebagai data historis.

Data historis tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses analisis kondisi baterai, khususnya untuk mengevaluasi perubahan kapasitas energi selama proses *charging* maupun *discharging*. Selain itu, data yang tersimpan juga menjadi sumber informasi bagi *dashboard* monitoring untuk menampilkan parameter baterai dalam bentuk tabel maupun grafik, sehingga pengguna dapat memantau perkembangan kondisi baterai secara lebih mudah dan sistematis.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)