

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Pengertian Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen penting dalam berbagai perangkat elektronik, sistem energi terbarukan, dan kendaraan listrik. Dengan meningkatnya ketergantungan pada sumber energi yang portabel dan terbarukan, pemantauan performa baterai menjadi hal yang sangat krusial. Salah satu parameter utama yang menentukan kualitas dan umur pakai baterai adalah kapasitas *real*, yakni jumlah energi listrik yang benar-benar dapat dilepas oleh baterai dalam kondisi nyata. Kapasitas ini sering berbeda dengan kapasitas nominal yang tertera pada spesifikasi pabrik karena faktor usia baterai, suhu, pola penggunaan, dan karakteristik kimia internal.

Proses pengujian kapasitas baterai secara tradisional biasanya dilakukan secara manual dengan mengisi (*charge*) dan mengosongkan (*discharge*) baterai menggunakan alat ukur sederhana atau beban resistif tetap. Metode ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain:

1. **Waktu pengujian yang lama**, karena proses *charge* dan *discharge* harus diawasi terus-menerus.
2. **Risiko kesalahan manusia**, seperti salah pengaturan arus atau tegangan, yang dapat merusak baterai atau menghasilkan data yang tidak akurat.
3. **Kesulitan dalam pencatatan data**, karena seringkali proses monitoring dilakukan secara manual, sehingga analisis performa baterai menjadi kurang efektif.

Seiring berkembangnya teknologi elektronika daya dan mikrokontroler, proses pengujian baterai dapat diotomatisasi. Modul DC-DC *Step-Down* dan *Step-Up* memungkinkan pengaturan arus dan tegangan secara presisi, sehingga baterai dapat diisi dan dikosongkan sesuai kurva yang aman dan optimal. Sementara itu, ESP32-S3 menyediakan kemampuan kontrol digital dan *monitoring real-time*, termasuk pencatatan data arus, tegangan, dan kapasitas baterai. Dengan bantuan modul relay, proses *charge* dan *discharge* dapat diatur secara otomatis, mengurangi intervensi manusia sekaligus meningkatkan keselamatan dan efisiensi pengujian.

Pengembangan alat pengujian otomatis ini memiliki relevansi tinggi bagi berbagai bidang. Dalam industri kendaraan listrik, mengetahui kapasitas real baterai membantu produsen dan pengguna menentukan estimasi jarak tempuh dan umur baterai. Dalam penelitian energi terbarukan, pengujian kapasitas baterai sangat penting untuk desain sistem penyimpanan energi (*energy storage system*) yang handal. Selain itu, alat ini juga dapat menjadi sarana edukasi di laboratorium teknik elektro atau teknik energi, karena memperlihatkan prinsip kerja *charge-discharge* baterai secara praktis. **Zhang, Y., et al. (2023)**

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan sistem pengujian baterai berbasis mikrokontroler, tetapi jarang yang mengintegrasikan modul *DC-DC Step-Up*, dan *Step-Down* daya tinggi, ESP32-S3, dan relay untuk membentuk sistem *charge/discharge* otomatis yang dapat bekerja pada berbagai jenis baterai dengan arus dan tegangan yang dapat diatur. Hal ini membuka peluang bagi penelitian ini untuk menghadirkan solusi pengujian baterai yang lebih akurat, cepat, aman, dan serbaguna. **Topan, P. A., & Fardila, D. (2024)**

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan alat pengujian kapasitas *real* baterai dengan metode *charge* dan *discharge* otomatis menggunakan DC-DC *Step-Up* 600W, *Step-Down* 300W, ESP32-S3, dan modul relay 3.3V 2 *channel*, sehingga proses pengujian menjadi lebih efisien dan dapat memberikan data yang akurat untuk evaluasi performa baterai.

Baterai dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama:

1. **Baterai Primer**

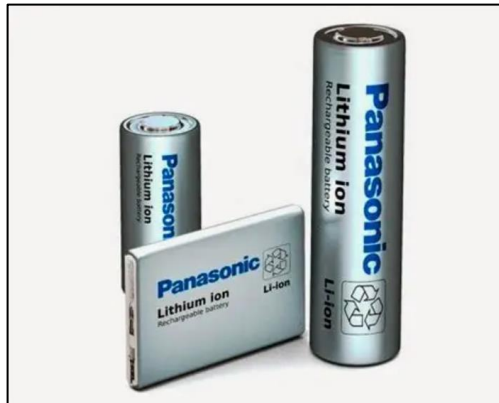
- a. Baterai sekali pakai, tidak dapat diisi ulang.
- b. Contoh: baterai *alkaline*, *zinc-carbon*.

2. **Baterai Sekunder**

- a. Baterai isi ulang (*rechargeable*) yang dapat diisi berulang kali.
- b. Contoh: *Lithium-ion (Li-ion)*, *Lithium Polymer (Li-Po)*, *Nickel Metal Hydride (Ni-MH)*.

Baterai sekunder lebih banyak digunakan pada kendaraan listrik, termasuk motor listrik, karena kemampuan pengisian ulang, kepadatan energi tinggi, dan umur siklus yang relatif panjang.

2.1.1 Baterai *Lithium-Ion (Li-ion)*



Gambar 2. 1 Baterai *Lithium-Ion (Li-ion)*

Baterai *lithium-ion (Li-ion)* adalah jenis baterai isi ulang (sekunder) yang menggunakan senyawa litium sebagai elektroda, memiliki kepadatan energi tinggi, ringan, dan masa pakai panjang. Baterai ini digunakan luas pada ponsel, laptop, kendaraan listrik, hingga penyimpanan energi terbarukan karena kemampuannya diisi ulang berkali-kali. Kekurangan baterai jenis ini yaitu sensitif terhadap suhu tinggi, perlu sistem proteksi untuk keamanan.

Energi skala besar, tahan lama (>20.000 siklus), aman, dan cocok untuk energi terbarukan. Kekurangan baterai jenis ini adalah kepadatan energi rendah, kompleksitas sistem yang tinggi.

2.1.2 Konfigurasi Baterai

Baterai terdiri dari satu atau lebih sel yang dihubungkan secara seri, paralel, atau kombinasi keduanya untuk mencapai tegangan dan kapasitas energi yang diinginkan. Pemahaman konfigurasi baterai penting dalam penelitian ini karena konfigurasi menentukan arus, tegangan, kapasitas total, dan distribusi beban selama proses *charge* dan *discharge*.

2.2.1 Konfigurasi Seri (*Series*)

Sel-sel Baterai yang dihubungkan dari ujung positif ke ujung negatif sel berikutnya dengan karakteristik tegangan total sama dengan jumlah tegangan tiap sel, dan kapasitas total sama dengan kapasitas salah satu sel (tidak bertambah).

Rumus:

$$V_{total} = V_1 + V_2 + \dots + V_n, \quad C_{total} = C_{sel} \quad (2.1)$$

Lalu kelebihan dari Baterai konfigurasi Seri adalah mudah meningkatkan tegangan tanpa menambah ukuran arus, dan cukup umum digunakan pada kendaraan listrik atau sistem energi tinggi, sedangkan untuk kekurangannya sendiri adalah jika salah satu sel rusak atau drop tegangan, seluruh rangkaian terpengaruh, contohnya adalah jika terdapat 4 sel *Li-ion* dengan voltase masing-masing 3.7V, maka total voltase Baterai yang terhubung adalah 14.8V.

2.2.2 Konfigurasi Paralel (*Parallel*)

Sel-sel baterai dihubungkan ujung positif ke ujung positif dan ujung negatif ke ujung negatif, dengan karakteristik tegangan total sama dengan tegangan salah satu sel, dan kapasitas total sama dengan jumlah kapasitas tiap sel. Dengan rumus sebagai berikut:

$$V_{total} = V_{sel}, \quad C_{total} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2.2)$$

Untuk kelebihan Baterai dengan konfigurasi seperti ini adalah lebih mudah untuk meningkatkan kapasitas total dan kemampuan arus tinggi, lalu jika satu sel rusak, sel lainnya masih berfungsi.

Namun untuk kekurangan dari Baterai dengan konfigurasi seperti ini ialah arus pengisian harus dibagi merata, memerlukan pengaturan dan harus terdapat proteksi arus, dengan contoh : bilamana terdapat 3 sel LiFePO_4 3.2V dengan kapasitas 10 Ah, maka totalnya akan menjadi 3.2 V dengan kapasitas 30 Ah.

2.2.3 Konfigurasi Seri-Paralel (*Series-Parallel*)

Konfigurasi seri-paralel merupakan kombinasi susunan seri dan paralel yang digunakan untuk meningkatkan tegangan dan kapasitas baterai secara bersamaan. Pada konfigurasi ini, tegangan total diperoleh dari hasil perkalian tegangan setiap sel dengan jumlah sel yang disusun seri, sedangkan kapasitas total diperoleh dari hasil perkalian kapasitas setiap sel dengan jumlah cabang yang

disusun paralel. Secara matematis, hubungan tersebut dinyatakan dengan rumus:

$$V_{total} = V_{sel} \times n_{seri}, \quad C_{total} = C_{sel} \times n_{paralel} \quad (2.3)$$

Konfigurasi seri-paralel memiliki kelebihan karena memungkinkan perancangan sistem baterai yang mampu menghasilkan energi tinggi sekaligus menyediakan arus besar. Oleh karena itu, konfigurasi ini banyak digunakan pada kendaraan listrik, UPS, dan sistem penyimpanan energi skala industri. Namun, penerapannya juga memiliki kekurangan, yaitu meningkatnya kompleksitas dalam pengaturan arus, penyeimbangan sel, serta sistem proteksi yang diperlukan.

Sebagai contoh, 12 sel baterai Li-ion dengan spesifikasi 3,7V dan 2,5Ah dapat disusun dalam konfigurasi 3 seri $\times$ 4 paralel sehingga menghasilkan tegangan total 11,1V dan kapasitas total 10Ah.

2.3 Modul Baterai dan Pack Baterai

Dalam pengembangan baterai modern, terutama untuk aplikasi kendaraan listrik, sistem penyimpanan energi terbarukan, dan perangkat elektronik berdaya tinggi, baterai jarang digunakan sebagai sel tunggal. Sebaliknya, sel-sel individu diorganisasikan menjadi modul baterai dan kemudian menjadi *pack* baterai untuk memenuhi kebutuhan tegangan, kapasitas, dan arus yang lebih tinggi.

2.3.1 Modul Baterai

Modul baterai merupakan kumpulan beberapa sel yang telah dihubungkan secara seri, paralel, atau kombinasi keduanya, kemudian dirakit menjadi satu unit yang lebih besar. Modul ini biasanya dilengkapi dengan sistem manajemen internal sederhana untuk memantau kondisi masing-masing sel. Fungsi dan komponen utama modul baterai yaitu: proteksi arus untuk mencegah arus lebih (*overcurrent*) yang dapat merusak sel, distribusi arus untuk mengatur arus keluar dan masuk setiap sel agar merata, pemantauan suhu pada beberapa modul dilengkapi sensor suhu internal untuk mencegah *overheating*, konektor standar untuk memudahkan integrasi modul ke *pack* yang lebih besar. Keuntungan modul baterai adalah memudahkan perakitan baterai skala besar dengan keamanan lebih tinggi, mempercepat

proses maintenance dan penggantian sel rusak, meminimalkan risiko kegagalan total pada pack besar, karena kerusakan satu modul tidak langsung mempengaruhi modul lainnya.

2.3.2 Pack Baterai

Pack baterai merupakan kesatuan utuh yang terdiri dari kumpulan modul yang dirangkai bersama *Battery Management System (BMS)* untuk menghasilkan unit penyimpanan energi dengan tegangan, kapasitas, dan arus yang telah dioptimalkan sesuai kebutuhan aplikasi pengguna. Sebagai bentuk final dari sistem penyimpanan daya, pack baterai mengandalkan modul baterai sebagai sumber energi utama yang tersusun dari sel-sel individu. Agar sistem ini beroperasi dengan aman dan efisien, peran BMS menjadi sangat krusial dalam memberikan proteksi terhadap tegangan (mencegah *overcharge* dan *overdischarge*), pengamanan arus, serta pemantauan suhu guna menghindari *overheating*. Selain itu, BMS melakukan fungsi *cell balancing* untuk menjaga keseimbangan kapasitas antar sel sehingga umur pakai baterai lebih panjang, sekaligus berperan sebagai unit monitoring yang mengirimkan data kondisi baterai ke antarmuka pengguna atau sistem kontrol seperti ESP32-S3.

Keberadaan *pack* baterai juga didukung oleh konektor eksternal dan sistem pendingin yang menjaga stabilitas suhu saat beban tinggi. Keunggulan utama dari sistem ini terletak pada fleksibilitasnya dalam menyediakan daya untuk berbagai skala aplikasi, mulai dari kendaraan listrik hingga sistem energi industri. Penggunaan desain modular tidak hanya memungkinkan pemanfaatan sel standar secara aman, tetapi juga memudahkan proses pemeliharaan karena penggantian komponen dapat dilakukan pada level modul tanpa harus mengganti keseluruhan sistem. Integrasi dengan BMS modern pun semakin meningkatkan aspek keamanan dan efisiensi, yang memungkinkan dilakukannya pengujian kapasitas secara otomatis melalui kontrol arus dan tegangan secara digital.

2.3.3 Pentingnya Modul dan Pack Baterai dalam Pengujian Kapasitas Real

Dalam penelitian pengujian kapasitas baterai otomatis, penggunaan modul baterai memegang peranan vital karena memungkinkan penyesuaian arus dan tegangan untuk setiap kelompok sel secara presisi. Keamanan selama proses pengisian (*charge*) dan pengosongan (*discharge*) dijaga oleh sistem *pack* baterai yang terintegrasi dengan *Battery Management System* (BMS) guna mencegah terjadinya *overcurrent*, *overvoltage*, maupun *overheating*.

Melalui integrasi antara modul, *pack*, mikrokontroler ESP32-S3, dan modul relay, sistem dapat membaca data secara *real-time*, menjalankan siklus otomatis, serta menghitung kapasitas riil baterai dengan tingkat akurasi yang tinggi. Selain itu, penggunaan format modul dan *pack* ini memungkinkan pengujian berbagai konfigurasi seperti seri, paralel, maupun seri-paralel secara aman, yang sangat krusial untuk implementasi nyata pada kendaraan listrik dan sistem penyimpanan energi skala besar.

2.3.4 Tren Teknologi Modul dan Pack Baterai

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi, modul dan *pack* baterai modern kini telah dilengkapi dengan berbagai fitur canggih, seperti *Smart BMS* yang mendukung protokol komunikasi standar industri seperti CAN, Modbus, atau UART. Untuk kebutuhan beban tinggi seperti pada kendaraan listrik dan aplikasi industri, sistem ini juga mulai mengintegrasikan pendingin aktif serta sensor suhu dan tegangan yang presisi untuk memungkinkan prediksi umur baterai (*State of Health*) serta peringatan dini terhadap potensi kerusakan.

Selain itu, desain dengan kemampuan modular yang tinggi memudahkan penyesuaian kapasitas total *pack* sesuai kebutuhan tanpa memerlukan desain ulang sistem secara menyeluruh. Dengan pemahaman mendalam terhadap teknologi ini, alat pengujian kapasitas *Real* dapat dirancang agar lebih fleksibel, aman, dan akurat untuk berbagai jenis serta konfigurasi baterai, mulai dari sel Li-ion berukuran kecil hingga sistem penyimpanan energi skala besar berbasis LiFePO₄.

2.3.5 Faktor yang Perlu Dipertimbangkan dalam Konfigurasi

Dalam menentukan konfigurasi baterai, terdapat beberapa faktor krusial yang harus dipertimbangkan untuk menjamin performa dan efisiensi sistem. Pertama, tegangan sistem harus direncanakan dengan cermat melalui penyesuaian jumlah sel yang disusun secara seri agar selaras dengan spesifikasi input alat pengujian maupun inverter yang digunakan. Kedua, aspek kapasitas energi yang ditentukan oleh jumlah sel paralel menjadi kunci dalam menentukan kemampuan sistem untuk menyuplai arus tinggi serta durasi pengosongan (*discharge*) yang lebih lama.

Selain itu, arus pengisian (*charge*) dan pengosongan harus dikelola dengan baik menggunakan modul DC-DC dan relay yang memiliki kapasitas mumpuni untuk mengatur arus sesuai dengan konfigurasi spesifik baterai. Faktor keamanan juga tidak boleh diabaikan, di mana sistem wajib memiliki proteksi berlapis terhadap risiko arus lebih, suhu panas yang berlebih, serta potensi distribusi beban yang tidak merata antar sel. Terakhir, seluruh komponen fisik tersebut harus memiliki kompatibilitas penuh dengan sistem otomatis, dalam hal ini mikrokontroler ESP32-S3 serta sensor arus dan tegangan, guna memastikan proses monitoring dan akuisisi data dari setiap rangkaian dapat berjalan secara akurat dan *real-time*.

2.3.6 Relevansi dengan Penelitian

Dalam penelitian ini, pemahaman mendalam mengenai konfigurasi baterai menjadi fondasi utama karena akan menentukan parameter arus dan tegangan yang harus dikendalikan secara presisi oleh modul DC-DC *step-down* dan *boost converter*. Sebagai contoh, penggunaan konfigurasi baterai Li-ion 4S2P (4 seri, 2 paralel) akan menghasilkan tegangan nominal sebesar 14,8 V dengan kapasitas total mencapai 5 Ah, di mana nilai-nilai ini menjadi acuan dasar dalam pengaturan *set-point* perangkat keras. Selain itu, penentuan arus pengosongan (*discharge*) maksimal harus dihitung secara akurat berdasarkan akumulasi jumlah sel paralel dan spesifikasi teknis kemampuan masing-masing sel individu untuk menjaga stabilitas sistem.

Lebih lanjut, mikrokontroler ESP32-S3 berperan sentral dalam membaca data arus dan tegangan total secara *real-time*, yang kemudian digunakan untuk

menghitung kapasitas riil baterai melalui metode integrasi arus terhadap waktu, Integrasi antara pemahaman konfigurasi fisik baterai dan algoritma perhitungan ini sangat krusial agar alat pengujian kapasitas otomatis yang dirancang dapat beroperasi secara optimal, menjamin standar keamanan yang tinggi, serta mampu menghasilkan data pengujian yang valid dan akurat bagi pengguna.

2.4 Tantangan pada Baterai Motor Listrik

Implementasi baterai pada kendaraan listrik, khususnya motor listrik, dihadapkan pada beberapa tantangan teknis utama yang memengaruhi efisiensi dan masa pakainya. Tantangan pertama adalah terjadinya penurunan kapasitas energi secara gradual seiring dengan meningkatnya usia pakai baterai (*battery aging*) dan jumlah siklus pengisian-pengosongan yang telah dilalui. Fenomena degradasi ini menuntut adanya sistem pemantauan kondisi baterai yang sangat akurat, terutama dalam mengestimasi *State of Charge* (SoC) atau sisa daya aktif, serta dalam mengukur kapasitas riil baterai saat itu (*State of Health*). Tanpa adanya monitoring yang presisi, pengguna dapat mengalami kesalahan estimasi jarak tempuh yang berisiko merugikan aktivitas berkendara. Selain itu, faktor ketidakstabilan arus maupun tegangan selama proses operasional—baik saat pengisian cepat (*fast charging*) maupun saat akselerasi spontan—menjadi ancaman serius yang dapat merusak struktur kimia internal baterai jika tidak dikontrol dengan ketat. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem manajemen dan alat pengujian yang andal untuk memitigasi risiko tersebut demi menjaga performa optimal dan keselamatan berkendara.

2.4.1 Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai adalah kemampuan baterai dalam menyimpan dan menyuplai energi listrik. Kapasitas biasanya dinyatakan dalam *Ampere-hour* (Ah) atau *milliampere-hour* (mAh). Kapasitas ini penting untuk mengetahui seberapa lama baterai dapat menyuplai arus pada beban tertentu.

Perhitungan Kapasitas

Kapasitas dapat dihitung dengan rumus:

$$C = I \times t \quad (2.3)$$

Dimana:

C = kapasitas baterai (Ah)

I = arus beban (A)

t = waktu discharge (jam)

Dalam praktik modern, kapasitas real dihitung dengan **mengintegrasikan arus terhadap waktu** selama proses discharge:

$$C = \int I(t)dt \quad (2.4)$$

Metode ini lebih akurat untuk baterai motor listrik yang sering digunakan dalam kondisi variabel.

2.4.2 Faktor yang Mempengaruhi Kapasitas

Kapasitas baterai adalah jumlah energi yang dapat dilepas oleh baterai selama proses discharge penuh pada kondisi tertentu. Kapasitas *Real* baterai sering berbeda dari kapasitas nominal yang tercantum pada spesifikasi pabrik karena berbagai faktor. Memahami faktor-faktor ini sangat penting untuk merancang alat pengujian kapasitas otomatis yang akurat dan aman.

2.4.2.1 Jenis dan Teknologi Baterai

Setiap jenis dan teknologi baterai memiliki karakteristik kimiawi unik yang secara langsung memengaruhi kapasitas serta perilakunya selama proses operasional. Pada baterai jenis *lead-acid* (asam timbal), misalnya, kapasitas efektifnya akan berkurang secara signifikan jika dipaksa menyuplai arus tinggi secara terus-menerus akibat adanya fenomena efek Peukert. Di sisi lain, baterai berbasis nikel seperti Ni-Cd (*Nikel-Kadmium*) dan Ni-MH (*Nikel-Metal Hidrida*) menghadapi tantangan berupa *memory effect*, di mana kapasitas fungsional baterai dapat menurun drastis apabila proses pengisian ulang dilakukan sebelum baterai benar-benar kosong sepenuhnya. Sementara itu, teknologi baterai modern seperti Li-ion (Litium-ion) dan LiFePO₄ (Litium Besi Fosfat) menawarkan efisiensi yang jauh lebih tinggi, di mana kapasitasnya sangat bergantung pada kualitas material sel, usia pakai, serta keandalan proteksi dari *Battery Management System* (BMS). Karakteristik baterai litium ini cenderung stabil dan memiliki efisiensi tinggi asal-kan dioperasikan secara ketat dalam rentang tegangan dan suhu yang aman.

Relevansi karakteristik ini terhadap penelitian yang dilakukan sangatlah krusial, karena jenis teknologi baterai yang diuji akan menentukan metode pengisian (*charge*) dan pengosongan (*discharge*) yang harus diterapkan, seperti metode *Constant Current-Constant Voltage* (CC-CV) pada litium. Selain itu, perbedaan ini juga mendikte batasan pengaturan arus dan *cut-off* tegangan pada sistem otomatis. Oleh karena itu, alat pengujian kapasitas riil yang dirancang harus memiliki fleksibilitas tinggi agar mampu mendeteksi dan menyesuaikan parameter pengujian secara dinamis sesuai dengan jenis baterai yang sedang dievaluasi guna menjamin akurasi data serta keamanan perangkat.

2.4.2.2 Suhu Operasi

Suhu lingkungan dan suhu operasional merupakan faktor eksternal paling krusial yang mempengaruhi kinerja kinetika kimia di dalam sel baterai. Paparan suhu tinggi memang dapat meningkatkan laju reaksi kimia secara instan yang terkadang tampak seperti peningkatan performa, namun dalam jangka panjang hal ini justru memicu degradasi prematur pada komponen elektrolit dan material elektroda, yang pada akhirnya menyebabkan penurunan kapasitas permanen. Sebaliknya, pengoperasian pada suhu rendah akan meningkatkan resistansi internal baterai dan memperlambat reaksi elektrokimia, sehingga kapasitas yang tersedia menurun secara signifikan untuk sementara waktu. Sebagai contoh konkret, baterai jenis Li-ion dapat kehilangan sekitar 20% hingga 30% dari total kapasitasnya saat dipaksa bekerja pada suhu di bawah 0°C, sementara paparan konsisten di atas 45°C akan mempercepat laju kerusakan termal yang memangkas masa pakai baterai jauh lebih cepat dari spesifikasi pabrikannya.

Relevansi fenomena termal ini terhadap penelitian sangatlah fundamental, terutama dalam menjamin validitas pengujian kapasitas *Real*. Tanpa adanya data suhu yang presisi, hasil pengukuran kapasitas bisa menjadi bias karena dipengaruhi oleh fluktuasi resistansi internal akibat panas. Oleh karena itu, sistem monitoring suhu yang terintegrasi menjadi komponen wajib dalam alat penguji ini; di mana ESP32-S3 berperan aktif dalam memantau data dari sensor suhu yang ditempatkan pada modul dan *pack* baterai. Dengan pengawasan suhu yang ketat secara *real-time*, sistem tidak hanya dapat memastikan keamanan pengujian dari risiko *thermal*

runaway, tetapi juga mampu menghasilkan data kapasitas yang lebih akurat dan konsisten dalam berbagai kondisi operasional.

2.4.2.3 Umur dan Siklus Baterai (Cycle Life)

Kapasitas fungsional sebuah baterai tidaklah bersifat statis, melainkan akan terus mengalami degradasi secara progresif seiring dengan bertambahnya jumlah siklus pengisian dan pengosongan (*charge/discharge*) yang dilalui. Fenomena penurunan performa ini disebabkan oleh berbagai proses degradasi internal pada level sel yang kompleks, salah satunya adalah pembentukan dan penebalan lapisan *Solid Electrolyte Interface* (SEI) pada elektroda anoda. Meskipun lapisan SEI diperlukan untuk stabilitas, pertumbuhan yang berlebihan akan mengonsumsi litium aktif dan meningkatkan impedansi internal. Selain itu, seiring berjalannya waktu, terjadi penurunan aktivitas pada material aktif di katoda maupun anoda yang diperparah oleh hilangnya *volume* elektrolit akibat penguapan atau reaksi samping, serta munculnya korosi internal pada kolektor arus.

Relevansi aspek siklus hidup ini terhadap penelitian terletak pada kemampuan alat pengujian otomatis untuk melakukan evaluasi performa secara komparatif. Dengan sistem yang terintegrasi, perangkat ini memungkinkan pencatatan kapasitas *Real* secara presisi baik pada baterai baru maupun baterai yang telah lama digunakan (*second-life battery*). Data yang dikumpulkan melalui pengujian berulang ini sangat krusial untuk menganalisis tren penurunan kapasitas akibat pemakaian, yang pada akhirnya memberikan wawasan berharga dalam memprediksi sisa umur layanan baterai serta menentukan kelayakan baterai tersebut untuk terus digunakan dalam sistem kendaraan listrik atau dialihfungsikan sebagai penyimpanan energi stasioner.

2.4.2.4 Arus Charge dan Discharge

Besarnya arus listrik yang mengalir selama proses pengisian maupun pengosongan memiliki korelasi langsung terhadap kapasitas efektif yang dapat diberikan oleh sebuah baterai. Ketika baterai dioperasikan pada arus tinggi, baik saat pengisian cepat (*rapid charge*) maupun pengosongan beban tinggi (*high discharge rate*), kapasitas efektif cenderung menurun akibat meningkatnya

resistansi internal yang memicu jatuh tegangan (*voltage drop*) lebih awal sebelum energi benar-benar habis. Selain itu, arus yang besar mengakibatkan fenomena pemanasan *Joule* ($P = I^2R$) di dalam sel, yang tidak hanya mengurangi efisiensi energi tetapi juga dapat mempercepat degradasi material aktif. Sebaliknya, pengoperasian pada arus rendah atau slow charge/discharge memungkinkan reaksi kimia di dalam sel berlangsung lebih merata dan stabil, sehingga energi yang tersimpan dapat dikeluarkan secara optimal dan menghasilkan pembacaan kapasitas yang mendekati nilai nominal pabrikan.

Relevansi fenomena ini dalam penelitian pengujian kapasitas sangat penting, karena penentuan parameter arus pengujian akan sangat menentukan akurasi data yang diperoleh. Oleh karena itu, sistem kontrol otomatis pada alat uji ini harus mampu mengatur laju arus secara konsisten melalui modul DC-DC agar perbandingan kapasitas riil antar baterai dapat dilakukan secara objektif. Dengan memahami pengaruh laju arus (*C-rate*), alat ini dapat dikonfigurasi untuk melakukan pengujian standar yang mencerminkan kondisi penggunaan nyata, baik untuk skenario penggunaan normal maupun skenario beban puncak pada motor listrik.

2.4.2.5 Tegangan Operasi dan Rentang SOC (*State of Charge*)

Nilai kapasitas *Real* sebuah baterai sangat bergantung pada batasan tegangan operasi yang ditetapkan, khususnya pada titik tegangan pengisian penuh (*full charge voltage*) dan tegangan ambang batas pengosongan (*cut-off voltage*). Penentuan batas-batas ini sangat krusial karena energi yang tersimpan dalam baterai didefinisikan oleh area di antara kedua titik tegangan tersebut; jika sistem beroperasi di luar batas aman yang direkomendasikan pabrikan, akan terjadi stres elektrokimia yang dapat merusak struktur sel secara permanen dan memicu penurunan kapasitas yang drastis. Selain itu, perilaku pengisian atau pengosongan secara parsial (*partial cycling*) akan menghasilkan pembacaan kapasitas yang berbeda secara signifikan jika dibandingkan dengan siklus penuh dari 0% hingga 100%, sehingga konsistensi dalam penentuan rentang SoC menjadi kunci dalam standarisasi pengujian.

Relevansi dari parameter tegangan ini terhadap sistem pengujian otomatis

adalah perlunya sinkronisasi yang ketat antara kontrol perangkat lunak dan perangkat keras. Dalam penelitian ini, mikrokontroler ESP32-S3 yang bekerja sama dengan *Battery Management System* (BMS) bertugas melakukan pemantauan tegangan secara *real-time* untuk memastikan setiap sel tetap berada dalam koridor operasi yang aman. Dengan integrasi ini, alat penguji dapat menghentikan proses pengosongan tepat saat mencapai *cut-off voltage* yang telah ditentukan, sehingga pengukuran kapasitas *Real* tidak hanya menjadi akurat secara matematis, tetapi juga tetap menjamin keamanan fisik baterai dari risiko *over-discharge*.

2.4.2.6 Resistansi Internal dan Efisiensi Sel

Resistansi internal merupakan parameter kritis yang menentukan efisiensi penyaluran energi di dalam sel baterai. Secara teknis, nilai resistansi internal yang tinggi akan menyebabkan jatuh tegangan (*voltage drop*) yang signifikan saat baterai diberi beban, yang pada gilirannya menurunkan kapasitas efektif yang dapat dimanfaatkan, terutama ketika beroperasi pada arus besar. Peningkatan resistansi internal ini biasanya terjadi secara progresif seiring dengan bertambahnya usia sel, yang dipicu oleh degradasi pada material elektroda, penipisan elektrolit, serta pembentukan kristal internal yang menghambat aliran ion. Akibatnya, sebagian energi yang seharusnya disuplai ke beban justru terbuang menjadi panas di dalam sel, yang tidak hanya menurunkan efisiensi tetapi juga mempercepat kerusakan komponen kimia baterai.

Relevansi faktor ini terhadap penelitian terletak pada kebutuhan akan sistem akuisisi data yang sangat presisi. Sensor arus dan tegangan yang terintegrasi pada sistem harus memiliki tingkat akurasi tinggi agar mampu memperhitungkan penurunan kapasitas yang disebabkan oleh resistansi internal tersebut. Dengan data yang akurat, mikrokontroler dapat membedakan antara kapasitas yang hilang akibat degradasi kimia murni dan kapasitas yang tidak terbaca karena jatuh tegangan, sehingga perhitungan kapasitas *Real* yang dihasilkan oleh alat penguji menjadi lebih tepat dan mencerminkan kondisi kesehatan baterai yang sebenarnya.

2.4.2.7 Kualitas dan Keseragaman Sel

Kualitas dan tingkat keseragaman antar-sel dalam satu modul atau *pack* baterai merupakan faktor penentu utama bagi performa sistem penyimpanan energi

secara keseluruhan. Ketidakkonsistenan atau variasi pada kapasitas dan tegangan antar-sel individu—yang sering disebut sebagai ketidakseimbangan sel—dapat menyebabkan beberapa sel mencapai ambang batas kosong (*empty*) atau penuh (*full charge*) lebih cepat dibandingkan sel lainnya dalam rangkaian yang sama. Kondisi ini memaksa *Battery Management System* (BMS) untuk menghentikan seluruh proses pengisian atau pengosongan demi keamanan, sehingga kapasitas total yang dapat dimanfaatkan oleh sistem menjadi terbatas pada kapasitas sel yang paling lemah. Oleh karena itu, fitur *cell balancing* pada BMS menjadi sangat krusial untuk mendistribusikan ulang energi atau membuang kelebihan tegangan pada sel tertentu, guna menjaga agar seluruh sel beroperasi dalam tingkat kapasitas yang optimal dan seragam.

Relevansi aspek keseragaman sel ini terhadap penelitian terletak pada validitas data yang dihasilkan oleh alat penguji. Perangkat pengujian otomatis harus memiliki kompatibilitas penuh dengan modul dan *pack* baterai yang telah terintegrasi dengan BMS agar hasil pengukuran kapasitas riil tidak mengalami bias atau penyimpangan. Tanpa adanya sinkronisasi dengan fungsi *cell balancing*, alat penguji mungkin akan mencatat kapasitas yang jauh lebih rendah dari potensi sebenarnya hanya karena adanya satu sel yang tidak seimbang. Dengan memastikan sistem monitoring bekerja secara harmonis dengan BMS, alat pengujian dapat memberikan data kapasitas riil yang lebih representatif terhadap kondisi kesehatan baterai secara menyeluruh.

2.4.2.8 Faktor Lingkungan dan Mekanik

Selain faktor elektrokimia internal, integritas fisik dan kondisi lingkungan eksternal turut memegang peranan vital dalam menentukan stabilitas kapasitas sebuah baterai. Faktor mekanik seperti getaran yang terus-menerus dan guncangan ekstrem, terutama pada aplikasi motor listrik, berisiko tinggi merusak struktur internal sel serta melemahkan sambungan antarsel (*interconnects*). Kerusakan mekanis ini tidak hanya meningkatkan resistansi kontak, tetapi juga dapat memicu sirkuit pendek mikro yang secara progresif menggerus kapasitas total baterai. Di samping itu, faktor lingkungan seperti kelembapan udara yang tinggi dapat memicu korosi pada terminal baterai dan komponen konduktif lainnya, yang dalam jangka

panjang akan mengganggu aliran arus dan menurunkan efisiensi energi secara keseluruhan.

Relevansi faktor-faktor tersebut terhadap penelitian ini sangat krusial dalam menentukan validitas data yang diperoleh. Agar hasil pengukuran kapasitas *Real* bersifat konsisten dan dapat diulang (*repeatable*), proses pengujian idealnya dilakukan dalam kondisi lingkungan yang terkontrol dan stabil. Dengan meminimalkan gangguan mekanik dan fluktuasi lingkungan selama pengambilan data, sistem otomatis berbasis ESP32-S3 dapat memastikan bahwa penurunan kapasitas yang terdeteksi murni merupakan representasi dari degradasi sel, bukan akibat dari faktor gangguan eksternal yang tidak terukur.

2.4.2.9 Riwayat Penggunaan Baterai

Baterai bekas atau yang sering digunakan pada arus tinggi dan suhu ekstrem biasanya memiliki kapasitas lebih rendah dibandingkan baterai baru. Siklus pengisian parsial atau pemakaian tidak sesuai spesifikasi pabrik dapat menurunkan kapasitas *Real*. Relevansi: Alat pengujian harus mampu membedakan kapasitas baterai baru dan bekas, sehingga data kapasitas *Real* yang dihasilkan dapat digunakan untuk evaluasi performa baterai.

2.5 Charge dan Discharge Baterai

Pengisian baterai atau proses *charge* merupakan mekanisme penyaluran energi listrik dari sumber eksternal ke dalam sel baterai untuk mengonversi kembali energi tersebut ke dalam bentuk energi kimia, sehingga baterai siap digunakan kembali sebagai sumber daya. Secara fundamental, proses ini melibatkan rangkaian reaksi redoks pada elektroda yang disertai dengan transportasi ion melintasi medium elektrolit. Meskipun setiap teknologi baterai, seperti *Lead-acid*, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion, hingga LiFePO₄, memiliki protokol pengisian yang spesifik, prinsip dasar operasionalnya tetap serupa. Saat arus listrik dialirkan ke terminal baterai, terjadi beda potensial yang memaksa ion positif bergerak menuju elektroda negatif (katoda saat pengosongan, menjadi anoda saat pengisian), sementara ion negatif bergerak menuju elektroda positif melalui elektrolit.

Transformasi energi ini terjadi melalui reaksi kimia pada permukaan elektroda yang secara bertahap menyimpan muatan dalam struktur molekul material aktif.

Selama proses ini berlangsung, tegangan pada terminal baterai akan mengalami kenaikan secara progresif seiring dengan bertambahnya konsentrasi muatan yang tersimpan. Proses pengisian harus dikendalikan dengan ketat agar berhenti tepat saat mencapai tegangan maksimum yang ditentukan oleh pabrik (*full charge voltage*). Pengawasan terhadap parameter ini sangat krusial, karena kelebihan energi melampaui kapasitas kimia sel dapat memicu pemanasan berlebih, degradasi elektrolit, atau bahkan kerusakan permanen pada struktur internal baterai.

2.5.1 Rumus Dasar Hubungan Arus, Kapasitas, dan Waktu

$$Q = I \times t \quad (2.5)$$

di mana:

Q = kapasitas yang terisi (Ah)

I = arus pengisian (A)

t = waktu pengisian (jam)

2.5.2 Tahapan Proses *Charge*

1. Bulk Charge (Pengisian Awal)

Tahap *Bulk Charge* merupakan fase pertama dalam siklus pengisian baterai di mana perangkat pengisi daya menyuplai arus listrik secara konstan atau dikenal dengan metode *Constant Current* (CC). Pada fase ini, baterai akan menerima aliran arus maksimal yang aman untuk meningkatkan tegangan terminal secara progresif seiring dengan bertambahnya energi yang tersimpan di dalam sel. Tujuan utama dari tahapan ini adalah untuk mengembalikan sebagian besar kapasitas energi baterai, biasanya hingga mencapai kisaran 80%, dalam waktu yang relatif cepat.

Dalam implementasi teknisnya, besaran arus yang dialirkan biasanya diatur pada rentang 0,5C hingga 1C, di mana nilai C merepresentasikan kapasitas nominal baterai tersebut. Sebagai ilustrasi, jika sebuah baterai Li-ion memiliki kapasitas sebesar 10 Ah dan diisi menggunakan laju 1C, maka sistem kontrol pada alat penguji atau *charger* harus mampu menyuplai arus stabil sebesar 10 A. Fase *Bulk Charge* ini sangat krusial dalam efisiensi waktu pengisian, namun memerlukan pengawasan suhu yang ketat karena aliran arus konstan pada level maksimal berpotensi menimbulkan panas akibat resistansi internal baterai.

2. Absorption / Taper Charge

Setelah tegangan baterai mencapai ambang batas maksimum yang ditentukan, seperti pada sel Li-ion yang menyentuh nilai 4,2 V per sel, sistem secara otomatis beralih dari mode arus konstan ke mode tegangan konstan atau *Constant Voltage* (CV). Pada fase ini, tegangan dijaga agar tetap stabil pada nilai puncaknya sementara arus listrik mulai menurun secara bertahap (meluruh) seiring dengan meningkatnya resistansi internal baterai yang mendekati kondisi penuh. Penurunan arus ini memungkinkan ion-ion yang tersisa untuk terus bergerak menuju elektroda dan menyelesaikan reaksi kimia secara lebih halus, guna mengisi sisa kapasitas energi yang berkisar antara 10% hingga 20% terakhir.

Penerapan fase tegangan konstan ini sangat krusial dalam manajemen baterai karena berfungsi sebagai mekanisme proteksi utama untuk mencegah fenomena *overcharge*. Dengan menjaga tegangan agar tidak melebihi batas nominal, risiko degradasi pada material elektroda dan penguraian elektrolit dapat diminimalisir secara signifikan. Tahap ini memastikan bahwa setiap sel mencapai tingkat saturasi energi yang optimal tanpa mengorbankan stabilitas struktur kimia internalnya, sehingga umur pakai baterai tetap terjaga dalam jangka panjang.

3. Float / Trickle Charge (Opsional, Lead-Acid)

Digunakan untuk baterai *Lead-acid* yang tetap terhubung dengan beban. Arus kecil diberikan untuk menjaga baterai tetap penuh tanpa *overcharge*. Tidak semua teknologi baterai memerlukan tahap ini.

2.5.3 Faktor yang Mempengaruhi Proses Charge

Proses pengisian baterai dipengaruhi oleh berbagai parameter teknis yang menentukan kecepatan, keamanan, dan kesehatan jangka panjang sel. Arus pengisian memegang peranan ganda; penggunaan arus tinggi mampu mempercepat durasi pengisian, namun berisiko meningkatkan resistansi internal dan suhu operasional yang dapat memperpendek umur baterai. Sebaliknya, arus rendah cenderung lebih aman karena memungkinkan kapasitas tercapai lebih dekat dengan nilai nominalnya. Selain itu, tegangan maksimum (*cut-off voltage*) harus dijaga dengan ketat, karena melampaui batas ini dapat memicu kerusakan struktur

elektroda, oksidasi elektrolit, dan degradasi siklus hidup baterai secara permanen.

Faktor eksternal seperti suhu juga sangat krusial, di mana setiap jenis baterai memiliki rentang ideal tertentu, seperti Li-ion yang optimal pada 20-45°C. Pengisian pada suhu ekstrem rendah akan menghambat kinetika kimia sehingga pengisian menjadi sangat lambat, sementara suhu tinggi yang berlebihan akan mempercepat degradasi termal sel. Lebih lanjut, kondisi fisik sel dan *State of Charge (SOC)* awal turut menentukan dinamika pengisian; sel baru umumnya lebih toleran terhadap arus tinggi, sedangkan sel bekas dengan resistansi internal tinggi memerlukan arus yang lebih rendah. Pada *SOC* rendah, fase *bulk charge* akan berlangsung lebih lama dengan kenaikan tegangan yang cepat, sedangkan pada *SOC* tinggi, arus akan menurun secara otomatis untuk menghindari risiko *overcharge*.

2.5.4 Jenis Metode Pengisian (*Charging Method*)

Pemilihan metode pengisian yang tepat sangat bergantung pada kimia baterai dan tujuan penggunaannya. Metode *CC-CV (Constant Current – Constant Voltage)* merupakan standar yang paling umum digunakan untuk baterai modern seperti Li-ion dan LiFePO₄. Metode ini memulai proses dengan arus konstan hingga tegangan mencapai batas atas, kemudian beralih menjadi tegangan konstan di mana arus secara perlahan menurun hingga mencapai titik *cut-off*.

Selain *CC-CV*, terdapat metode *Trickle Charge* atau *Float Charge* yang umumnya diterapkan pada baterai *lead-acid* atau Ni-Cd; metode ini menyuplai arus dalam skala sangat kecil secara kontinu untuk mempertahankan kondisi daya penuh tanpa risiko *overcharge*. Di sisi lain, teknologi pengisian modern mulai banyak mengadopsi metode *Pulse Charge*, di mana arus diberikan dalam bentuk pulsa pendek yang diselingi dengan jeda waktu tertentu. Teknik ini sangat efektif dalam mengurangi akumulasi panas serta memperbaiki penetrasi ion ke dalam struktur elektroda, sehingga sering digunakan dalam sistem manajemen baterai canggih dan penelitian kapasitas riil untuk mengoptimalkan efisiensi pengisian.

2.5.5 Proteksi Selama Proses *Charge*

Untuk menjamin integritas sel dan keamanan operasional, sistem pengisian modern wajib dilengkapi dengan berbagai fitur proteksi otomatis yang berlapis. *Overvoltage Protection* berfungsi krusial untuk memutus aliran arus secara instan ketika tegangan sel mencapai ambang batas maksimal guna menghindari ketidakstabilan kimia, sementara *Overcurrent Protection* berperan dalam membatasi arus agar tidak melampaui kemampuan termal konduktor dan material aktif baterai. Selain itu, fitur *Thermal Cutoff* akan menonaktifkan proses pengisian jika sensor mendeteksi kenaikan suhu yang tidak wajar, dan mekanisme *Cell Balancing* bekerja secara aktif untuk memastikan distribusi muatan yang merata pada setiap sel di dalam modul atau *pack*. Dalam penelitian ini, integrasi antara mikrokontroler ESP32-S3, modul relay, serta sensor arus dan tegangan bertindak sebagai unit kendali pusat yang memonitor proses pengisian secara otomatis. Penggunaan modul DC-DC *step-down* dan *Step=Up Converter* memungkinkan penyesuaian parameter arus serta tegangan secara dinamis sesuai dengan spesifikasi teknis baterai, sehingga tercapai kondisi pengisian yang optimal tanpa mengabaikan aspek keselamatan.

2.5.6 Hubungan Proses *Charge* dengan Pengujian Kapasitas *Real*

Keakuratan dalam menentukan kapasitas riil sebuah baterai sangat bergantung pada kualitas proses pengisian awal sebelum pengujian dimulai. Kapasitas *Real* secara matematis dihitung melalui integrasi arus terhadap waktu selama proses pengosongan penuh dilakukan. Oleh karena itu, proses pengisian yang tepat dan tuntas sangatlah vital untuk memastikan seluruh sel berada pada kondisi saturasi energi yang sebenarnya; jika proses pengisian tidak mencapai titik penuh yang standar, maka data kapasitas yang diperoleh saat *discharge* akan menjadi bias dan tampak lebih rendah dari potensi kapasitas yang sesungguhnya. Kesalahan dalam pengaturan arus atau tegangan selama fase pengisian dapat mengakibatkan pengumpulan data yang tidak valid, sehingga standarisasi prosedur *charge* menjadi prasyarat utama dalam menghasilkan metrik kesehatan baterai yang akurat.

2.5.7 Proses Discharge

Discharge merupakan mekanisme pengosongan energi listrik di mana energi kimia yang tersimpan di dalam sel dikonversi kembali menjadi energi listrik untuk mensuplai beban eksternal. Secara fundamental, saat baterai dihubungkan ke beban, terjadi reaksi elektrokimia pada elektroda yang memicu pergerakan ion positif dari elektroda positif ke elektroda negatif melalui medium elektrolit, sementara elektron mengalir melalui rangkaian eksternal untuk menghasilkan arus listrik.

Selama proses transformasi energi ini berlangsung, tegangan terminal baterai akan mengalami penurunan secara bertahap seiring dengan menipisnya cadangan energi kimia di dalam sel. Laju penurunan tegangan ini sangat dipengaruhi oleh besarnya beban yang ditarik; pemantauan yang ketat terhadap kurva penurunan tegangan ini menjadi dasar utama bagi mikrokontroler untuk menghitung jumlah energi yang telah dilepaskan dan menentukan titik ambang batas bawah (*cut-off*) guna mencegah terjadinya pengosongan berlebih yang dapat merusak struktur internal baterai.

2.5.8 Rumus Hubungan Arus, Kapasitas, dan Waktu:

$$Q = \int I dt \quad (2.6)$$

di mana:

Q = kapasitas yang dilepas (Ah)

I = arus discharge (A)

t = waktu pengosongan (jam)

2.5.9 Tahapan Proses *Discharge*

Proses pengosongan energi pada baterai terbagi ke dalam tiga fase utama yang mencerminkan kondisi kimiawi dan stabilitas tegangan di dalam sel. Tahap pertama adalah *Initial Discharge* atau awal pengosongan, di mana tegangan baterai cenderung stabil dan berada pada level yang mendekati tegangan nominalnya. Pada fase ini, arus mengalir keluar sesuai dengan besaran beban yang terpasang dengan tingkat efisiensi yang tinggi karena resistansi internal baterai masih berada pada

titik rendah, sehingga energi dapat tersalurkan secara optimal tanpa kehilangan panas yang signifikan.

Memasuki tahap kedua, yaitu *Mid Discharge* atau pengosongan tengah, tegangan terminal mulai mengalami penurunan secara bertahap seiring dengan berkurangnya konsentrasi muatan di dalam elektrolit. Meskipun kapasitas yang tersisa mulai menipis, sel baterai pada umumnya masih mampu memasok arus penuh untuk mendukung operasional beban. Fase ini merupakan tahapan yang paling krusial dalam siklus hidup baterai karena sebagian besar kapasitas energi dilepaskan pada rentang ini, dengan kurva penurunan tegangan yang relatif landai pada jenis baterai modern seperti Li-ion.

Tahap terakhir adalah *End Discharge* atau pengosongan akhir, di mana kondisi baterai mulai mendekati ambang batas *cut-off voltage* atau tegangan minimum yang aman bagi sel. Pada fase ini, arus dan tegangan akan mengalami penurunan secara drastis akibat peningkatan resistansi internal yang tajam serta menipisnya material aktif pada elektroda. Pengawasan pada tahap ini sangatlah vital; jika proses pengosongan terus dipaksakan melewati batas *cut-off*, maka akan terjadi fenomena *overdischarge* yang berisiko merusak struktur elektroda secara permanen, menurunkan umur siklus secara signifikan, hingga menyebabkan kegagalan total yang membuat baterai tidak dapat diisi ulang kembali.

2.5.10 Faktor yang Mempengaruhi Proses *Discharge*

Efisiensi dan jumlah energi yang dapat dilepaskan oleh baterai selama proses pengosongan dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara parameter elektrik, termal, dan kondisi fisik sel. Faktor pertama adalah arus beban, di mana penggunaan arus yang besar akan menyebabkan kapasitas *Real* yang terukur tampak lebih rendah akibat peningkatan resistansi internal yang memicu panas berlebih dan jatuh tegangan (*voltage drop*) prematur. Sebaliknya, pengosongan dengan arus kecil memungkinkan energi dilepaskan secara lebih stabil sehingga kapasitas yang dihasilkan mendekati nilai nominalnya. Selain itu, penentuan tegangan *cut-off* yang tepat sangat krusial, mengingat setiap jenis kimia baterai memiliki ambang batas minimum yang aman; jika pengosongan dipaksakan melampaui batas tersebut, sel akan mengalami kerusakan elektroda yang mengakibatkan pengurangan kapasitas secara permanen.

Kondisi eksternal seperti suhu operasi juga memberikan dampak yang signifikan terhadap kinetika kimia di dalam sel. Pada suhu rendah, reaksi kimia akan melambat sehingga kapasitas riil menurun untuk sementara, sedangkan suhu tinggi dapat memicu arus *discharge* yang lebih besar namun berisiko merusak integritas sel dalam jangka panjang. ESP32-S3 merupakan mikrokontroler canggih berbasis *dual-core* dengan kecepatan prosesor hingga 240 MHz yang telah dilengkapi dengan konektivitas *WiFi* dan *Bluetooth* terintegrasi, serta memiliki kanal ADC (*Analog-to-Digital Converter*) dan GPIO yang melimpah. Dalam sistem ini, ESP32-S3 menjalankan fungsi krusial sebagai unit pemrosesan pusat yang mengontrol modul *relay* untuk mekanisme *switching* antara fase *charge* dan *discharge*, membaca input dari sensor arus dan tegangan, serta mengolah data mentah menjadi informasi kapasitas baterai. Selain itu, mikrokontroler ini bertugas menampilkan hasil pengukuran secara *real-time* melalui *serial monitor* maupun media tampilan eksternal. Keunggulan utamanya terletak pada kapasitas pemrosesan yang tinggi untuk pengambilan sampel data secara cepat, kemampuan komunikasi nirkabel untuk monitoring jarak jauh, serta konsumsi daya yang efisien sehingga sangat ideal untuk aplikasi sistem portabel. busi beban; pada rangkaian seri, tegangan total akan merosot lebih cepat jika terdapat satu sel yang melemah, sementara pada rangkaian paralel, arus terdistribusi ke lebih banyak sel untuk menghasilkan kapasitas total yang lebih besar. Oleh karena itu, mekanisme *cell balancing* tetap diperlukan agar setiap sel dalam sebuah sistem *pack* dapat berkontribusi secara optimal dan seragam.

2.5.11 Jenis Discharge

Metode pengosongan energi pada baterai dapat dikategorikan berdasarkan cara beban berinteraksi dengan sel, di mana pemilihan metode ini sangat menentukan karakteristik data yang diperoleh. Metode pertama adalah *Constant Current* (CC), di mana arus listrik yang mengalir keluar dari baterai dijaga pada nilai yang tetap secara konsisten hingga tegangan terminal menyentuh titik *cut-off*. Metode ini merupakan standar emas dalam pengujian kapasitas laboratorium karena penyederhanaan variabel arus memudahkan proses kalkulasi integrasi arus terhadap waktu (metode *Coulomb Counting*) untuk mendapatkan nilai kapasitas *Real* yang akurat.

Selain itu, terdapat metode *Constant Power* (CP) yang bekerja dengan cara menyesuaikan beban secara dinamis agar total daya keluar tetap konstan sepanjang

waktu. Dalam skenario ini, seiring dengan menurunnya tegangan baterai, sistem kontrol harus meningkatkan penarikan arus untuk mempertahankan level daya yang sama, yang memberikan gambaran lebih nyata mengenai efisiensi konverter daya pada aplikasi praktis. Terakhir, metode **Pulse Discharge** menerapkan pengosongan dalam bentuk pulsa-pulsa arus pendek yang diselingi dengan jeda waktu istirahat (*rest period*). Metode ini sangat efektif untuk meniru profil beban nyata pada kendaraan listrik, seperti saat akselerasi dan pengereman regeneratif, sekaligus memungkinkan peneliti untuk mengamati pemulihan tegangan (*voltage recovery*) dan karakteristik termal sel secara lebih mendetail.

2.5.12 Hubungan Proses *Discharge* dengan Pengujian Kapasitas *Real*

Proses pengosongan atau *discharge* merupakan fase operasional paling krusial dalam metodologi penentuan kapasitas aktual sebuah baterai, karena pada tahap inilah energi yang tersimpan benar-benar dikeluarkan dan diukur. Secara matematis, kapasitas *Real* (C_{real}) ditentukan melalui integrasi arus terhadap waktu sejak dimulainya pengosongan hingga mencapai tegangan ambang batas (t_{cutoff}), yang dirumuskan sebagai:

$$C_{real} = \int_0^{t_{cutoff}} I(t) dt \quad (2.7)$$

Dalam sistem pengujian ini, besaran tegangan dan arus yang mengalir dari baterai direkam secara *real-time* dengan presisi tinggi menggunakan mikrokontroler ESP32-S3 yang terintegrasi dengan sensor arus dan tegangan. Untuk menjaga stabilitas selama pengujian, modul DC-DC *step-down converter* diimplementasikan guna memastikan arus *discharge* tetap berada pada koridor batas aman yang ditentukan, sementara modul *relay* berperan sebagai sakelar otomatis yang mengatur siklus pengosongan sesuai dengan parameter logika pemrograman.

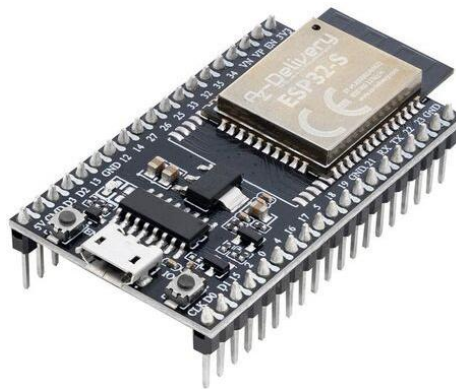
Data yang dikumpulkan selama fase *discharge* ini menjadi variabel utama dalam perhitungan matematis untuk mengevaluasi kapasitas energi yang sesungguhnya. Lebih jauh lagi, hasil rekaman data ini tidak hanya digunakan untuk mengukur kapasitas, tetapi juga menjadi fondasi dalam menganalisis efisiensi sel

dan memetakan kondisi kesehatan baterai (*State of Health*). Dengan membandingkan hasil pengosongan saat ini terhadap spesifikasi nominal pabrik, sistem dapat memberikan diagnosis yang akurat mengenai tingkat degradasi dan sisa masa pakai baterai yang sedang diuji secara objektif.

2.6 Pengujian Kapasitas

Pengujian kapasitas dilakukan dengan menerapkan siklus standar yang dimulai dari pengisian daya penuh (*full charge*), diikuti dengan proses pengosongan (*discharge*) total hingga mencapai batas tegangan minimum, serta pencatatan arus dan waktu secara kontinu. Melalui akumulasi data yang tercatat selama siklus tersebut, nilai kapasitas *Real* baterai dapat dikalkulasi secara presisi. Metode ini memberikan gambaran objektif mengenai kemampuan aktual baterai dalam menyimpan dan menyalurkan energi dibandingkan dengan spesifikasi teoritisnya.

2.7 Mikrokontroler ESP32-S3

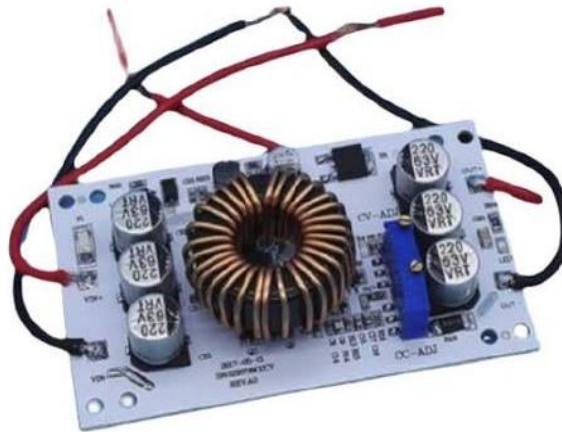


Gambar 2. 2 Mikrokontroller ESP 32

ESP32-S3 merupakan mikrokontroler canggih berbasis *dual-core* dengan kecepatan prosesor hingga 240 MHz yang telah dilengkapi dengan konektivitas WiFi dan Bluetooth terintegrasi, serta memiliki kanal ADC (*Analog-to-Digital Converter*) dan GPIO yang melimpah. Dalam sistem ini, ESP32-S3 menjalankan fungsi krusial sebagai unit pemrosesan pusat yang mengontrol modul *relay* untuk mekanisme *switching* antara fase *charge* dan *discharge*, membaca input dari sensor arus dan tegangan, serta mengolah data mentah menjadi informasi kapasitas baterai. Selain itu, mikrokontroler ini bertugas menampilkan hasil pengukuran secara *real-time* melalui *serial monitor* maupun media tampilan eksternal. Keunggulan utamanya terletak pada kapasitas pemrosesan yang tinggi untuk pengambilan

sampel data secara cepat, kemampuan komunikasi nirkabel untuk monitoring jarak jauh, serta konsumsi daya yang efisien sehingga sangat ideal untuk aplikasi sistem portabel.

2.8 Step-Up Converter 600W dan Step-Down Converter 300W



Gambar 2. 3 Step-Up Converter 600W

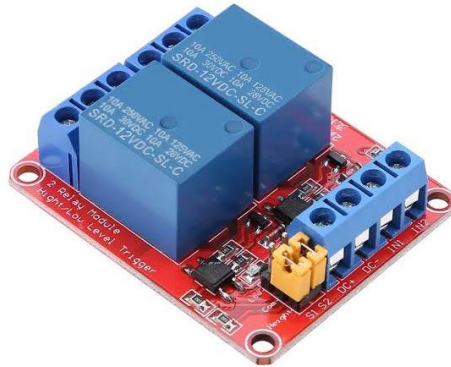


Gambar 2. 4 Step-Down Converter 300W

Dalam arsitektur sistem pengujian ini, konverter daya berfungsi sebagai pengatur aliran energi listrik agar sesuai dengan spesifikasi tegangan kerja baterai. *Step-Up Converter 600W* digunakan untuk menaikkan tegangan input dari sumber daya utama ke level yang lebih tinggi guna memenuhi ambang batas pengisian (*charging*) baterai motor listrik yang membutuhkan potensial besar. Di sisi lain, *Step-Down Converter 300W* berperan dalam menurunkan tegangan ke level yang lebih rendah dan stabil, baik untuk kebutuhan penyediaan beban saat fase pengosongan maupun sebagai penyuplai daya bagi komponen kontroler. Kedua

modul ini sangat krusial dalam menjaga efisiensi konversi energi, meminimalkan panas berlebih, serta memastikan bahwa fluktuasi tegangan dari sumber tidak merusak sel baterai yang sedang diuji.

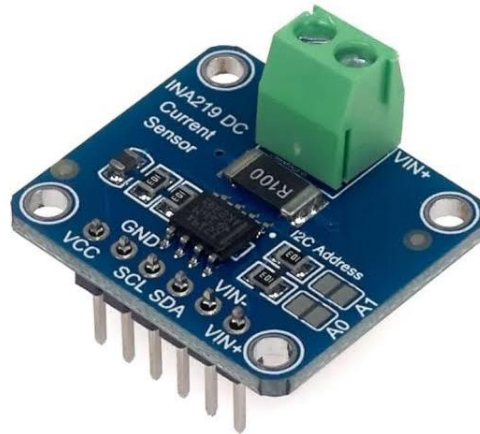
2.9 *Relay Module Dual Channel*



Gambar 2. 5 *Relay Dual-Channel*

Relay merupakan sakelar elektromagnetik yang dioperasikan secara elektrik melalui sinyal logika dari mikrokontroler untuk memutus atau menghubungkan arus pada rangkaian daya tinggi. Fungsi utama modul *relay* dalam penelitian ini adalah sebagai unit pemilih jalur otomatis yang mengatur transisi antara siklus pengisian (*charge*) dan pengosongan (*discharge*) tanpa memerlukan intervensi manual dari operator. Dengan konfigurasi dual channel, sistem memiliki dua jalur independen yang memungkinkan kontrol terpisah antara sirkuit suplai energi dan sirkuit beban pengurasan. Implementasi *relay* ini memastikan isolasi yang aman antara sistem kontrol tegangan rendah dan sistem daya baterai tegangan tinggi, sekaligus menjamin konsistensi siklus pengujian secara repetitif.

2.10 Sensor Arus



Gambar 2. 6 Sensor Arus

Keakuratan data penelitian sangat bergantung pada performa instrumen pengukuran yang bekerja secara *real-time*. Sensor Tegangan diimplementasikan untuk memantau fluktuasi level potensial listrik pada kutub-kutub baterai, baik menggunakan metode pembagi tegangan (*voltage divider*) yang presisi maupun modul sensor khusus yang mampu membaca rentang tegangan tinggi secara linear. Sementara itu, Sensor Arus bertugas mengukur laju aliran elektron selama proses pengisian maupun pengosongan, menggunakan teknologi berbasis *shunt resistor* atau sensor efek Hall untuk meminimalkan jatuh tegangan pada jalur utama. Gabungan data dari kedua sensor ini merupakan parameter fundamental yang diolah oleh mikrokontroler untuk melakukan kalkulasi kapasitas *Real* baterai melalui metode integrasi waktu, yang pada akhirnya menentukan nilai kesehatan baterai tersebut.

2.11 Sistem Otomatisasi

Sistem otomatisasi bertujuan agar pengujian baterai **berjalan** tanpa intervensi manusia. Fungsi sistem otomatisasi dalam penelitian ini:

1. Charge otomatis hingga tegangan cut-off maksimum.
2. Peralihan otomatis ke discharge melalui relay.
3. Monitoring arus dan tegangan secara real-time.
4. Perhitungan kapasitas secara otomatis.

Sistem ini mengurangi risiko kesalahan manual dan meningkatkan akurasi pengujian.

2.13 Perhitungan Kapasitas *Real* Baterai

$$C = \int I(t)dt \quad (2.8)$$

Dimana:

C = kapasitas baterai (Ah)

I = arus beban (A)

t = waktu discharge (jam)

2.14 Tegangan *Cut-Off* Baterai

Penentuan tegangan *cut-off* merupakan parameter yang sangat krusial dalam manajemen baterai karena berfungsi sebagai instrumen utama untuk menjamin keamanan operasional sekaligus memperpanjang umur pakai sel. Secara teknis, tegangan *cut-off* terbagi menjadi dua batasan kritis, yaitu batas maksimum dan batas minimum. *Cut-off* maksimum berfungsi sebagai interupsi otomatis untuk mencegah fenomena *overcharge* yang berisiko memicu ketidakstabilan termal dan kerusakan struktur kimia internal sel saat pengisian. Sebaliknya, *cut-off* minimum ditetapkan sebagai ambang batas penghentian arus saat pengosongan guna mencegah *over-discharge*, suatu kondisi yang dapat menyebabkan degradasi permanen pada elektroda dan hilangnya kemampuan sel untuk menyimpan muatan di masa depan.

Nilai ambang batas ini tidak bersifat universal, melainkan ditentukan secara spesifik berdasarkan karakteristik kimiawi dan spesifikasi teknis dari pabrikan masing-masing jenis baterai. Sebagai contoh, pada baterai berbasis *Lithium-ion* (Li-ion), rentang tegangan operasi yang aman umumnya ditetapkan di antara 3v sebagai titik *cut-off* minimum dan 4,2v per sel sebagai titik *cut-off* maksimum. Dalam sistem pengujian otomatis, kepatuhan terhadap parameter ini sangat bergantung pada akurasi pembacaan sensor dan kecepatan respon kontroler ESP32-S3 dalam memutus aliran arus melalui modul *relay*, sehingga integritas baterai tetap terjaga selama proses pengujian kapasitas riil berlangsung.

2.15 Faktor yang Mempengaruhi Kapasitas

Catatan: Pembahasan mendalam tentang setiap faktor yang mempengaruhi kapasitas beserta relevansinya terhadap penelitian ini telah diuraikan pada Subbab 2.4.2. Bagian 2.15 ini menyajikan rangkuman untuk konteks pemahaman umum.

Kapasitas baterai merupakan jumlah energi listrik yang dapat disimpan dan dilepaskan oleh baterai dalam satu siklus charge dan discharge. Kapasitas ini biasanya dinyatakan dalam satuan Ampere-hour (Ah). Namun dalam praktiknya, kapasitas yang diperoleh (kapasitas riil) seringkali berbeda dari kapasitas nominal aki-bat berbagai faktor internal maupun eksternal.

Pemahaman terhadap faktor-faktor ini sangat penting dalam penelitian pengujian kapasitas baterai, karena akan mempengaruhi akurasi hasil pengukuran dan performa sistem secara keseluruhan.

2.15.1 Jenis dan Teknologi Baterai

Jenis kimia pada baterai sangat menentukan karakteristik kapasitas dan profil kinerjanya, karena setiap teknologi memiliki sifat elektrokimia yang unik. Pada baterai *Lead-acid*, misalnya, kapasitas aktual sangat dipengaruhi oleh besaran arus beban yang ditarik, sebuah fenomena yang dikenal sebagai *Peukert's Effect*; semakin besar arus yang diberikan, semakin rendah kapasitas efektif yang dapat dihasilkan. Sementara itu, teknologi berbasis nikel seperti *Ni-Cd* dan *Ni-MH* memiliki karakteristik khas berupa *memory effect*, di mana kapasitas efektif sel dapat berkurang jika baterai berulang kali diisi ulang sebelum benar-benar kosong, sehingga memerlukan prosedur perawatan khusus untuk menjaga akurasi kapasitasnya.

Di sisi lain, teknologi baterai modern seperti *Lithium-ion (Li-ion)* dan *Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)* menawarkan stabilitas kapasitas yang jauh lebih tinggi dan kepadatan energi yang lebih baik dibandingkan teknologi pendahulunya. Namun, sel jenis ini sangat sensitif terhadap kondisi *overcharge* dan fluktuasi suhu ekstrem yang dapat memicu ketidakstabilan termal (*thermal runaway*). Perbedaan fundamental dalam sifat elektrokimia ini secara langsung memengaruhi metodologi pengujian yang harus diterapkan. Pengaturan arus pengisian, batas tegangan *cut-*

off, serta durasi istirahat antar-siklus pada alat penguji otomatis harus dikonfigurasi secara spesifik untuk setiap jenis baterai guna memastikan bahwa data kapasitas riil yang diperoleh bersifat valid tanpa merusak integritas sel yang diuji.

2.15.2 Arus *Charge* dan *Discharge*

Besaran arus yang diterapkan selama siklus pengisian dan pengosongan merupakan variabel penentu utama dalam validasi kapasitas sebuah sel baterai. Penggunaan arus tinggi cenderung memicu peningkatan suhu operasional secara signifikan akibat adanya disipasi daya pada resistansi internal baterai. Kondisi ini tidak hanya mempercepat degradasi material aktif di dalam sel, tetapi juga menyebabkan jatuhnya tegangan (*voltage drop*) yang lebih cepat, sehingga kapasitas riil yang terukur akan tampak lebih rendah dari potensi aslinya. Sebaliknya, penerapan arus rendah memungkinkan reaksi kimia elektrokimia di dalam sel berlangsung lebih sempurna dan merata, sehingga kapasitas yang dilepaskan dapat mencapai nilai yang mendekati kapasitas nominal pabrikan. Oleh karena itu, pengujian dengan laju arus yang rendah dan stabil dianggap lebih akurat untuk memetakan profil kesehatan baterai secara presisi.

Fenomena ketergantungan kapasitas terhadap laju pengosongan ini secara ilmiah dijelaskan melalui Hukum Peukert. Hukum ini menyatakan bahwa kapasitas efektif baterai akan berkurang secara non-linear seiring dengan meningkatnya laju arus pengosongan (*discharge rate*). Hal ini terjadi karena efisiensi perpindahan ion di dalam elektrolit memiliki keterbatasan kecepatan; ketika arus yang ditarik terlalu besar, reaksi kimia tidak dapat mengimbangi kebutuhan elektron pada terminal, yang mengakibatkan energi tersisa di dalam sel namun tidak dapat diakses karena tegangan telah menyentuh titik *cut-off* prematur. Dalam perancangan alat penguji otomatis berbasis ESP32-S3, pemahaman terhadap Hukum Peukert sangat penting untuk menentukan parameter beban yang konsisten agar hasil pengujian kapasitas riil dapat diperbandingkan secara objektif.

2.15.3 *State of Charge (SOC)* Awal

State of Charge (SOC) merupakan parameter yang merepresentasikan level ketersediaan energi di dalam baterai dibandingkan dengan kapasitas totalnya

sebelum proses pengosongan (*discharge*) dimulai. Dalam metodologi pengujian kapasitas *Real*, status *SOC* awal memegang peranan yang sangat krusial karena menjadi titik acuan dalam perhitungan integrasi arus. Jika pengujian dimulai pada kondisi *SOC* penuh (100%), maka seluruh spektrum energi yang tersimpan di dalam sel dapat diekstraksi hingga mencapai tegangan *cut-off*, sehingga kapasitas maksimum yang terukur mencerminkan kemampuan penyimpanan energi yang sebenarnya. Sebaliknya, apabila proses pengosongan dimulai pada kondisi *SOC* tidak penuh, maka hasil kapasitas yang tercatat secara otomatis akan lebih kecil dari potensi aslinya, sehingga data tersebut tidak dapat digunakan untuk memvalidasi kesehatan baterai secara objektif.

Oleh karena itu, dalam prosedur pengujian otomatis menggunakan ESP32-S3, standarisasi kondisi awal sangat diperlukan; baterai harus dipastikan berada dalam kondisi *fully charged* melalui fase pengisian CC-CV yang tuntas sebelum sistem beralih ke mode pengujian *discharge*. Hal ini bertujuan untuk mengeliminasi variabel ketidakkonsistenan data yang disebabkan oleh perbedaan muatan awal, sehingga setiap sel yang diuji memiliki titik berangkat yang setara. Akurasi dalam mendeteksi titik *SOC* 100% ini sangat bergantung pada pembacaan tegangan saturasi dan arus minimal pada akhir fase pengisian, yang menjadi prasyarat utama agar hasil kalkulasi kapasitas riil memiliki reliabilitas yang tinggi.

2.15.4 Pengaruh Lingkungan dan Kondisi Operasional Eksternal

Selain faktor internal elektrokimia, performa dan akurasi pengukuran kapasitas baterai juga sangat dipengaruhi oleh variabel lingkungan serta kondisi fisik infrastruktur pendukungnya. Faktor eksternal seperti kelembapan udara yang tinggi dapat memicu kondensasi pada permukaan modul, yang berisiko menyebabkan arus bocor (*leakage current*) atau gangguan pada sirkuit kontroler. Selain itu, paparan getaran mekanis yang terus-menerus, terutama pada aplikasi kendaraan listrik, dapat melemahkan struktur internal sel dan sambungan fisik antar-komponen. Hal ini sering kali berujung pada munculnya korosi pada konektor dan penurunan kualitas sambungan kabel akibat oksidasi atau pelonggaran mekanis.

Kondisi lingkungan yang buruk dan tidak terkontrol tersebut secara kumulatif akan meningkatkan nilai resistansi kontak pada jalur distribusi daya. Peningkatan resistansi ini mengakibatkan terjadinya jatuh tegangan (*voltage drop*) yang

signifikan dan disipasi energi dalam bentuk panas sebelum arus mencapai beban pengujian. Akibatnya, kapasitas baterai yang terukur oleh sistem sensor akan tampak lebih rendah dari kapasitas riilnya karena inefisiensi pada jalur transmisi energi. Oleh karena itu, dalam merancang sistem pengujian otomatis berbasis ESP32-S3, integritas koneksi fisik dan perlindungan terhadap anomali lingkungan menjadi prasyarat mutlak untuk memastikan bahwa data yang diperoleh benar-benar merepresentasikan kemampuan sel baterai secara objektif dan bukan akibat kerugian daya pada sistem kabel