

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Terkait dengan jurnal dan makalah tentang beberapa penelitian yang menunjang sebagai referensi yaitu, Penelitian Rahman Junaedi, Priyanti Hilda Medika, Kurniawan M Hamzah 2023: Perancangan dan pembuatan SOC *balancing* baterai pada sistem DC *microgrid*, penelitian tersebut menunjukkan pentingnya penyeimbangan SOC serta pengoperasian yang tepat dalam menjaga kinerja dan umur pakai baterai.

Penelitian Khaeruddin, Wijono, Rini 2021, Desain penyeimbangan sel baterai *lithium-ion* dengan Teknik *cell-to-cell charging mode* pada *battery management system*, hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan Teknik *balancing cell-to-cell* dapat menyeimbangkan sel baterai agar mendekati kondisi sama rata.

Penelitian Setyawan Wahyu Pratomo 2020, Rancang bangun *battery management system active balancing* pada baterai *li-ion* 12V 2,5Ah, hasil pengujian menunjukkan fitur *balancing* lama waktu yang dibutuhkan untuk melakukan penyeimbangan tegangan baterai bergantung pada besarnya perbedaan tegangan antar baterai dan banyaknya baterai yang memiliki nilai tegangan yang berbed.

Penelitian Pamulu Albertus Damar 2024, Rancang bangun penyeimbang tegangan aktif sel baterai *lithium-ion* berbasis *buck-boost converter*, dengan sistem yang dirancang sebagai penyeimbang tegangan sel baterai berhasil menurunkan selisih tegangan antar baterai ke bawah *threshold* 0.05V.

2.2 Baterai Kendaraan Listrik

Kendaraan bermotor listrik adalah kendaraan yang digerakkan oleh motor listrik menggunakan energi listrik yang tersimpan dalam baterai. merupakan komponen utama sebagai sumber energi untuk menggerakkan motor. Baterai bekerja dengan proses elektrokimia yang *reversible* (dapat berkebalikan) yaitu baterai menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia, yang kemudian dapat diubah kembali menjadi energi listrik. Konversi energi kimia menjadi energi listrik disebut *discharging* / pengosongan. Reaksi kimia selama pengosongan menyebabkan elektron mengalir melalui beban yang terhubung sehingga menyebabkan arus mengalir berlawanan arah dengan aliran elektron. Sedangkan proses sebaliknya dari tenaga listrik menjadi

tenaga kimia dengan proses regenerasi dari elektroda – elektroda yang dipakai dengan melewati arus listrik dalam arah polaritas yang berlawanan di dalam sel disebut proses *charging* / pengisian.



Gambar 2.1 Baterai 72V 20Ah

Baterai pada kendaraan listrik berfungsi sebagai penyimpan energi yang dapat diisi ulang (*rechargeable*), dan menjadi sumber utama energi untuk menggerakkan motor listrik. Secara umum, sistem tenaga pada kendaraan listrik terdiri dari baterai, motor listrik, dan pengendali daya (*controller*). Baterai memiliki peran paling penting karena menentukan jarak tempuh, performa, dan efisiensi energi kendaraan. Tidak seperti kendaraan konvensional yang menggunakan mesin pembakaran berbahan bakar minyak. Keunggulan motor listrik dibandingkan dengan kendaraan konvensional antara lain efisiensi energi yang lebih tinggi, minimnya emisi, biaya operasional lebih rendah dan perawatan yang lebih mudah karena jumlah komponen mekanis yang lebih sedikit. Kapasitas dan konfigurasi baterai disesuaikan dengan kebutuhan daya kendaraan. Misalnya, pada kendaraan listrik Gesits dengan menggunakan baterai *Lithium-Ion* bertegangan 72 V dengan kapasitas 20 Ah, yang disusun dari beberapa sel secara seri dan paralel (konfigurasi 20s4p). Kombinasi ini mendukung sistem menghasilkan tegangan dan arus yang cukup besar untuk mendukung kebutuhan motor listrik BLDC (*Brushless DC Motor*).



Gambar 2.2 Kendaraan Listrik Gesits

2.3 Fungsi Baterai Pada Kendaraan Listrik

Baterai dalam kendaraan listrik tidak hanya berfungsi sebagai sumber daya, tetapi juga memiliki beberapa fungsi penting lain dalam sistem kendaraan, antara lain:

1. Sumber energi utama

Baterai menyuplai energi listrik ke motor penggerak kendaraan. Energi ini dikonversi menjadi energi mekanik untuk menghasilkan torsi dan kecepatan putaran roda.

2. Penyimpanan energi *regenerative*

Beberapa kendaraan listrik dilengkapi sistem *regenerative breaking*, energi kinetik yang dihasilkan saat pengereman dapat dikonversi kembali menjadi energi listrik dan disimpan ke dalam baterai.

3. Penentu jarak tempuh dan performa kendaraan

Kapasitas baterai menentukan seberapa jauh kendaraan dapat menempuh jarak dalam satu kali pengisian. Semakin besar kapasitasnya, semakin jauh jarak tempuh yang dihasilkan.

4. Menjaga stabilitas tegangan sistem

Baterai juga berfungsi sebagai *buffer* untuk menjaga kestabilan tegangan pada sistem kelistrikan kendaraan, terutama saat terjadi lonjakan beban sesaat.

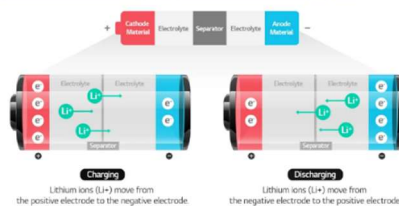
5. Sumber daya untuk sistem elektronik pendukung

Selain untuk motor utama, baterai juga menyuplai energi ke sistem pendukung seperti pencahayaan, indikator, kontrol, dan sistem komunikasi kendaraan.

Dengan demikian, kondisi dan kesehatan baterai sangat berpengaruh terhadap keandalan dan umur pakai kendaraan listrik. Oleh sebab itu, perawatan seperti balancing, monitoring, dan pengendalian suhu menjadi aspek penting dalam sistem manajemen baterai.

2.4 Sistem Kerja baterai

Baterai berfungsi sebagai penyimpan dan penyedia energi listrik dalam sistem kendaraan listrik. Prinsip kerja utama baterai didasarkan pada reaksi kimia reduksi dan oksidasi (reaksi redoks) yang terjadi antara dua elektroda, yaitu anoda (kutub negatif) dan katoda (kutub positif), yang dipisahkan oleh elektrolit. Pada saat baterai digunakan (*discharging*), reaksi kimia menghasilkan aliran elektron dari anoda menuju katoda melalui rangkaian eksternal, menghasilkan energi listrik yang dapat digunakan oleh motor listrik. Sebaliknya, saat proses pengisian (*charging*), arus listrik eksternal memaksa elektron mengalir ke arah berlawanan, sehingga reaksi kimia di dalam baterai kembali ke kondisi semula.



Gambar 2.3 Proses Pengisian dan Pengosongan Dalam Baterai

Dengan demikian, sistem kerja baterai melibatkan dua proses utama, yaitu proses pengisian (*charging*) dan proses pengosongan (*discharging*). Kedua proses tersebut saling melengkapi dalam siklus energi kendaraan listrik. *Lithium-Ion (Li-Ion)* merupakan jenis baterai sekunder (dapat diisi ulang) yang bekerja berdasarkan proses perpindahan ion litium (Li^+) antara dua elektroda, yaitu anoda (kutub negatif) dan katoda (kutub positif) melalui media elektrolit cair atau gel. Setiap sel baterai *Lithium-Ion* umumnya memiliki tegangan nominal sekitar 3,6 – 3,7 volt, tergantung pada jenis material aktif yang digunakan. Komponen utama dari baterai *Lithium-Ion* terdiri atas:

1. Anoda (Negatif)

Biasanya terbuat dari grafit (karbon) yang berfungsi menyerap ion selama proses pengisian (*charging*).

2. Katoda (Positif)

Umumnya terbuat dari logam oksida seperti LiCoO_2 , LiFePO_4 , atau LiNiMnCoO_2 (NMC). Katoda berfungsi sebagai tempat penampungan ion litium selama proses *discharging*.

3. Elektrolit

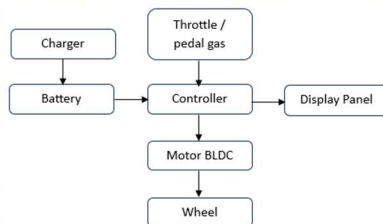
Cairan atau gel konduktif yang memungkinkan pergerakan ion Li^+

antara anoda dan katoda. Biasanya berbasis garam litium (misalnya LiPF₆) yang dilarutkan dalam pelarut organik.

4. Separator

Lapisan tipis berpori yang mencegah kontak langsung antara anoda dan katoda, namun tetap memungkinkan ion Li⁺ bergerak bebas.

Sistem kerja pengisian baterai pada kendaraan listrik dimulai dengan baterai dihubungkan dengan modul charger pengisian dengan arus pengisian rata-rata menggunakan 0,25C dari kapasitas arus baterai hingga tegangan maksimal sampai *Battery Management System BMS* menghentikan proses pengisian. Sedangkan proses pengosongan betarai pada kendaraan listrik setelah mengaktifkan kontak akan mengaktifkan *controller* sehingga seluruh perangkat siap untuk digunakan, dengan *input throttle* akan memberikan sinyal ke *controller* dan meneruskan ke baterai untuk mengirimkan tegangan sesuai sinyal yang didapatkan *controller* untuk memutar motor BLDC sehingga roda kendaraan dapat berjalan, untuk informasi yang diperlukan seperti kecepatan kendaraan, kpsitas baterai, temperature baterai dan motor BLDC dapat dipantau melalui MID / *Display panel*.



Gambar 2.4 Diagram Kerja Kendaraan Bermotor Listrik

2.4.1 Proses Pengisian Baterai

Proses pengisian baterai merupakan tahap di mana energi listrik dari sumber eksternal diubah menjadi energi kimia dan disimpan di dalam sel baterai. Dalam modul *charger* memanfaatkan rangkaian penyearah dari tegangan AC menjadi tegangan DC menggunakan merupakan bagian utama pada modul *charger* baterai kendaraan listrik. *Charger* pada kendaraan listrik berfungsi untuk mengatur arus dan tegangan pengisian sesuai dengan karakteristik baterai. Komponen utama dalam charger meliputi:

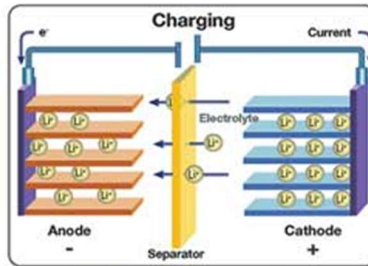
1. *Rectifier*: Mengubah arus bolak-balik (AC) dari jaringan listrik menjadi arus searah (DC).
2. *Converter*: Mengatur besarnya arus dan tegangan selama proses pengisian agar sesuai dengan kebutuhan.
3. *Battery Management System (BMS)*: Memantau suhu, tegangan, dan arus setiap sel untuk mencegah *overcharge*, *overcurrent*, dan *overheating*.



Gambar 2.5 Perangkat *Charger*

Pengisian dilakukan dengan memberikan tegangan dan arus tertentu yang sesuai dengan spesifikasi baterai agar proses berlangsung efisien dan aman. Prinsip Pengisian berlangsung saat arus listrik mengalir dari terminal positif *charger* menuju terminal positif baterai. Proses pengisian / charging baterai terjadi arus listrik dari sumber eksternal (*charger*) memaksa ion Li^+ bergerak dari katoda menuju anoda melalui elektrolit, sementara elektron bergerak melalui sirkuit eksternal ke arah anoda. Ion-ion tersebut kemudian tersimpan di lapisan grafit anoda, sehingga baterai kembali dalam keadaan terisi penuh. Secara umum, pengisian baterai lithium-ion dilakukan melalui dua tahap utama:

1. *Constant Current (CC)* – Arus Konstan: Pada tahap awal, baterai diisi dengan arus konstan (biasanya sebesar 0.5C – 1C) hingga tegangan mencapai batas maksimum, yaitu sekitar 4.2 V per sel.
2. *Constant Voltage (CV)* – Tegangan Konstan: Setelah tegangan maksimum tercapai, *charger* mempertahankan tegangan konstan dan secara perlahan mengurangi arus pengisian hingga mencapai nilai ambang (sekitar 0.05C). Pengisian dihentikan saat arus turun di bawah nilai batas tersebut untuk mencegah *overcharge*.



Gambar 2.6 Proses Pengisian Dalam Baterai

Selain itu, beberapa charger modern mendukung fitur pengisian cepat (*fast charging*) dengan sistem komunikasi antara *charger* dan BMS untuk menyesuaikan daya pengisian berdasarkan kondisi baterai secara *real-time*. Baterai memiliki *life cycle* / siklus perhitungan masa baterai, yaitu kemampuan penggunaan baterai dihitung berdasarkan siklus pengosongan dan pengisian. Beberapa kendaraan memiliki klaim untuk penggunaan baterai mulai dari 1.000 – 3.000 siklus hidup atau setiap 1.000 siklus setara dengan 3 tahun, setelah melewati siklus tersebut baterai akan mengalami penurunan performa. *Life cycle* / siklus ini merupakan satu periode penuh dengan penggunaan 100% dan pengisian ulang baterai, hingga 100% disebut 1 siklus, jika kondisi sisa 50 % kemudian dilakukan pengisian ulang hingga 100% berarti dihitung 0,5 siklus.

Dalam proses pengisian baterai, ada beberapa faktor yang mempengaruhi keberhasilan dan umur baterai sangat dipengaruhi oleh parameter pengisian, seperti:

1. Tegangan pengisian yang tepat (umumnya 4.2 V per sel untuk Li-ion).
2. Arus pengisian tidak melebihi kapasitas maksimum (1C).
3. Suhu pengisian ideal antara 0°C – 50°C.
4. Akurasi sistem proteksi BMS terhadap kondisi ekstrem.

Proses pengisian yang tidak sesuai dapat menyebabkan penurunan kapasitas, pemuatan sel, bahkan kerusakan permanen pada baterai.

Proses pengisian baterai pada kendaraan listrik sebagai contoh baterai 72V 20Ah membutuhkan waktu pengisian sekitar 4 – 5 jam. Arus yang digunakan *charger* harus mempertimbangkan *C-rate* (rasio arus pengisian terhadap

kapasitas baterai) supaya proses pengisian aman, efisien dan tidak merusak baterai. Disarankan dengan 0,15C – 0,25C, apabila dengan kapasitas baterai 72V 20Ah maka arus charger yang disarankan antara 3A – 5A. Jika baterai 20Ah dengan nilai 0,25C maka arus charger sebesar 5A. Sehingga waktu pengisian / charger dengan persamaan:

$$t = \frac{\text{Kapasitas Baterai (Ah)}}{\text{Arus Pengisian (A)}} \quad (2.1)$$

$$t = \frac{20Ah}{5} = 4 \text{ jam}$$

Atau jika mempertimbangkan nilai efisiensi pengisian semisal 90%, maka:

$$t = \frac{20Ah}{5 \times (90\%)} = 4,4 \text{ jam}$$

Dan untuk menghitung konsumsi energi / daya yang digunakan dalam proses pengisian baterai. Energi baterai = 72V x 20 Ah = 1440Wh, Energi input dengan persamaan :

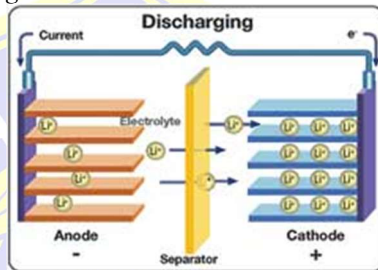
$$\begin{aligned} \text{Energi input} &= \frac{\text{Energi baterai}}{\text{efisiensi charger}} \\ &= \frac{1,44}{0,9} = 1,6 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (2.2)$$

2.4.2 Proses Pengosongan Baterai

Proses pengosongan baterai merupakan tahap di mana energi kimia dalam sel diubah kembali menjadi energi listrik untuk menggerakkan motor listrik dan sistem kelistrikan kendaraan. Prinsip Pengosongan baterai terjadi dengan reaksi oksidasi di anoda yang melepaskan elektron, proses pengosongan / *discharging* terjadi Ion Li^+ bergerak dari anoda menuju katoda, sedangkan elektron mengalir melalui rangkaian eksternal ke beban (motor listrik), menghasilkan energi listrik yang digunakan kendaraan. sedangkan reaksi reduksi terjadi di katoda yang menerima elektron. Aliran elektron inilah yang menghasilkan arus listrik untuk menyalakan beban eksternal. *Ion lithium* bergerak melalui elektrolit dari anoda ke katoda selama proses ini berlangsung. Proses berlanjut hingga tegangan setiap sel mencapai batas minimum (umumnya 2.5 V per sel), yang

menandakan baterai perlu diisi ulang. Tahapan Pengosongan meliputi:

1. *Discharge Normal* : Arus keluaran sesuai kebutuhan beban (biasanya di bawah 1C).
2. *High-Load Discharge* : Terjadi saat kendaraan membutuhkan daya besar (misalnya saat akselerasi atau tanjakan), arus dapat mencapai 2–3C.
3. *End-of-Discharge* : Saat tegangan sel mendekati batas bawah, BMS akan menghentikan proses untuk menghindari *overdischarge*.



Gambar 2.7 Proses Pengurangan Dalam Baterai

Dalam baterai yang dilengkapi BMS, bekerja selama pengosongan, dengan fungsi memonitor tegangan masing-masing sel, arus keluaran baterai dan suhu operasi. Jika salah satu sel menunjukkan tegangan terlalu rendah, BMS akan memutus arus keluaran untuk mencegah kerusakan permanen atau ketidakseimbangan antar sel (*cell imbalance*). Faktor yang mempengaruhi kinerja pengosongan baterai diantaranya:

1. Beban listrik kendaraan (arus keluaran).
2. Suhu lingkungan.
3. Kondisi keseimbangan antar sel (*balancing*).
4. Usia baterai dan resistansi internal.

Semakin tinggi arus pengosongan dan semakin rendah suhu operasi, maka kapasitas efektif baterai akan menurun.

2.5 Jenis Baterai Kendaraan Listrik

Baterai yang digunakan pada kendaraan listrik memiliki beberapa jenis dengan karakteristik berbeda, baik dari segi material, densitas energi, siklus hidup, maupun biaya produksi. Jenis-jenis baterai yang umum digunakan antara lain:

1. Baterai *Lead-Acid* (Aki Timbal-Asam)

Perkembangan ateari ini merupakan jenis tertua yang digunakan pada kendaraan listrik generasi awal. Keunggulannya adalah biaya produksi yang rendah dan teknologi yang sederhana. Namun, baterai jenis ini memiliki densitas energi rendah (30–50 Wh/kg) dan berat yang relatif besar. Selain itu, siklus pengisian-pengosongan (*charge-discharge cycle*) relatif pendek, sekitar 300–500 kali. Oleh karena itu, baterai ini sudah jarang digunakan pada kendaraan listrik modern.



Gambar 2.8 Baterai SLA

2. Baterai *Nickel-Metal Hydride* (NiMH)

Jenis baterai ini memiliki densitas energi lebih tinggi dibandingkan baterai timbal-asam (60–120 Wh/kg) dan lebih ramah lingkungan karena tidak mengandung logam berat berbahaya. NiMH pernah digunakan pada mobil hibrida seperti Toyota Prius generasi awal. Namun, kelemahannya terletak pada self-discharge rate yang tinggi dan efisiensi pengisian yang rendah, sehingga penggunaannya mulai tergantikan oleh baterai Lithium-Ion.



Gambar 2.9 Baterai NiMH

3. Baterai *Lithium-ion*

Baterai *Lithium-Ion* saat ini merupakan standar utama pada kendaraan listrik seperti *Lithium-ion*, *Nickel Manganese Cobalt* (NMC) dan *Lithium Ferro Phosphate* (LiFePO₄) karena memiliki densitas energi tinggi (150–250 Wh/kg), tegangan kerja tinggi

(sekitar 3,6–3,7 V per sel), dan siklus hidup panjang (hingga 2000–3000 kali pengisian). Kelebihan lain adalah bobot yang ringan dan efisiensi konversi energi yang tinggi, mencapai 90–95%. Namun, baterai ini sensitif terhadap suhu tinggi dan *overcharge*, sehingga memerlukan sistem pengelolaan baterai (*Battery Management System – BMS*) atau *balancer* untuk menjaga keseimbangan antar sel dan mencegah degradasi.



Gambar 2.10 Baterai *Lithium-Ion*

4. Baterai *Solid-state*

Merupakan generasi baterai terbaru yang menggunakan elektrolit padat sebagai pengganti cairan. Teknologi ini menjanjikan keamanan tinggi, kepadatan energi lebih besar, dan umur siklus yang lebih panjang karena degradasi yang lebih lambat dibandingkan dengan teknologi baterai saat ini. Namun, hingga saat ini, baterai solid-state masih dalam tahap riset dan pengembangan sehingga belum diproduksi massal secara luas.



Gambar 2.11 Baterai *Solid State*

2.6 Bentuk Fisik Baterai

Baterai *lithium-ion* memiliki beberapa jenis bentuk fisik, yang disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi dan desain perangkat. Bentuk baterai ini mempengaruhi kapasitas, kestabilan termal, kekuatan

mekanik, serta efisiensi ruang dalam perakitan baterai. Secara umum, bentuk baterai *lithium-ion* dibedakan menjadi empat jenis utama, yaitu:

1. *Cylindrical Cell* (Baterai Tabung)

Baterai berbentuk tabung merupakan jenis paling umum digunakan pada perangkat berdaya besar. Struktur internalnya menggunakan konsep *jelly roll*, di mana lapisan anoda, katoda, dan separator digulung secara spiral ke dalam wadah logam (biasanya baja atau aluminium). Baterai jenis ini memiliki kekuatan mekanik tinggi, konsistensi produksi baik, serta disipasi panas yang efisien, sehingga banyak digunakan pada kendaraan listrik dan peralatan industri. Contoh model yang populer adalah 18650 dan 21700.

2. *Prismatic Cell* (Baterai Kotak)

Sel *prismatic* memiliki bentuk kotak atau balok dengan wadah logam keras. Keunggulannya terletak pada efisiensi ruang dan kapasitas yang lebih besar dibandingkan sel silinder. Namun, bentuk ini memiliki keterbatasan dalam pembuangan panas, dan rentan mengalami pembengkakan (*swelling*) akibat tekanan internal. Baterai *prismatic* banyak digunakan pada mobil listrik dan sistem penyimpanan energi.

3. *Pouch Cell* (Baterai Kantong)

Baterai *pouch* dikemas dalam bahan aluminium-plastic laminate, menjadikannya sangat ringan dan fleksibel dalam desain. Densitas energi yang tinggi membuatnya cocok untuk perangkat yang membutuhkan kapasitas besar dalam ruang sempit, seperti *smartphone*, *drone*, dan *EV modern*. Kelemahannya, baterai ini tidak tahan tekanan fisik dan dapat mengembang akibat pemanasan berlebih atau usia pakai yang lama.

4. *Coin Cell* (Baterai Koin)

Baterai koin berukuran kecil dan berbentuk pipih, umumnya digunakan untuk aplikasi arus rendah seperti jam tangan, *remote*, dan sensor kecil. Kapasitasnya rendah dan kebanyakan bersifat primer (sekali pakai). Keunggulannya adalah stabilitas mekanik dan biaya produksi yang rendah.

2.7 Pemilihan Jenis Baterai Untuk Kendaraan Listrik

Pemilihan Baterai merupakan komponen utama dalam sistem propulsi kendaraan listrik yang berfungsi sebagai penyimpan energi listrik yang kemudian dikonversi menjadi energi mekanik melalui motor listrik. Kinerja kendaraan listrik sangat bergantung pada kemampuan baterai dalam menyuplai energi secara efisien, stabil, dan

aman. Oleh karena itu, pemilihan jenis baterai menjadi faktor krusial dalam desain dan performa keseluruhan kendaraan listrik.

Perbedaan jenis baterai akan berpengaruh langsung terhadap jarak tempuh, daya motor, kecepatan maksimum, umur pemakaian, waktu pengisian, serta bobot kendaraan. Selain itu, setiap jenis baterai memiliki karakteristik kimia, densitas energi, dan karakteristik pengisian yang berbeda-beda. Pemilihan baterai yang tepat harus mampu memberikan keseimbangan antara performa, efisiensi energi, keamanan, dan biaya produksi.

2.7.1 *Density Energi*

Densitas energi merupakan ukuran jumlah energi yang dapat disimpan oleh baterai per satuan massa atau volume, yang umumnya dinyatakan dalam satuan Wh/kg atau Wh/L. Semakin tinggi nilai densitas energi, semakin besar energi yang dapat disimpan pada ukuran atau berat yang sama. Hal ini sangat penting bagi kendaraan listrik karena secara langsung mempengaruhi jarak tempuh, efisiensi energi, serta rasio berat kendaraan terhadap daya.

Baterai dengan densitas energi tinggi memungkinkan kendaraan menempuh jarak lebih jauh tanpa menambah berat yang signifikan. Baterai *lithium-ion* saat ini memiliki densitas energi berkisar antara 150–260 Wh/kg, jauh lebih tinggi dibandingkan baterai timbal-asam yang hanya sekitar 30 – 50 Wh/kg.

Faktor yang mempengaruhi densitas energi antara lain material elektroda, jenis elektrolit, serta struktur internal baterai. Namun, peningkatan densitas energi sering kali menurunkan stabilitas termal dan meningkatkan biaya produksi. Oleh karena itu, pemilihan baterai perlu menyeimbangkan antara kapasitas energi dan aspek keamanan operasional.

2.7.2 *Daya dan Kapasitas*

Kapasitas baterai menunjukkan jumlah total muatan listrik yang dapat disimpan, yang dinyatakan dalam satuan *ampere-hour* (Ah), sedangkan daya menunjukkan kemampuan baterai untuk melepaskan energi dalam waktu tertentu, dinyatakan dalam *watt* (W).

Hubungan antara keduanya dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$E = V \times C \quad (2.3)$$

dengan:

E adalah energi (Wh),

V adalah tegangan nominal (V)

C adalah kapasitas (Ah).

Dalam kendaraan listrik, kapasitas menentukan lama waktu kendaraan dapat beroperasi, sementara daya menentukan kemampuan baterai dalam menyediakan arus tinggi untuk akselerasi atau mendaki. Kemampuan baterai untuk mengalirkan arus tinggi dinyatakan dalam satuan *C-rate*, di mana 1C berarti baterai dapat mengalirkan arus sebesar nilai kapasitas nominalnya. Misalnya, baterai 5 Ah dengan rating 2C berarti mampu mengalirkan arus maksimum sebesar 10 A.

Pemilihan baterai dengan kapasitas dan daya yang sesuai sangat penting agar mampu mendukung beban motor listrik tanpa menyebabkan penurunan tegangan berlebihan atau panas berlebih. Pada sistem baterai 72 V 20 Ah, konfigurasi 20s4p dengan sel 21700 berkapasitas 5 Ah mampu menghasilkan arus maksimum sekitar 40 A, setara daya keluaran sekitar 2.880 W pada kondisi nominal.

2.7.3 Siklus Baterai (*life cycle*)

Siklus hidup baterai (*cycle life*) adalah jumlah siklus pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) yang dapat dilakukan hingga kapasitas baterai turun hingga 80 % dari kapasitas awalnya. Semakin tinggi siklus hidup, semakin lama umur pemakaian baterai sebelum perlu diganti. Faktor-faktor yang mempengaruhi umur siklus antara lain:

1. *Depth of Discharge* (DoD) : semakin dalam pengosongan, semakin cepat degradasi kapasitas.
2. Laju pengisian dan pelepasan (*C-rate*) : pengisian cepat meningkatkan stres elektrokimia.
3. Suhu operasi : suhu tinggi mempercepat degradasi elektrolit dan elektroda.
4. Batas tegangan pengisian dan pengosongan : *overcharge* dan *overdischarge* mempercepat kerusakan.

Baterai *lithium-ion* umumnya memiliki siklus hidup antara 1.000 sampai 3.000 siklus, sedangkan jenis LiFePO_4 dapat mencapai 2.000 sampai 5.000 siklus karena stabilitas kimianya

lebih tinggi. Untuk memperpanjang umur baterai, digunakan *Battery Management System* (BMS) yang memantau kondisi sel, membatasi arus, dan menjaga keseimbangan tegangan antar sel.

2.7.4 Keamanan dan Stabilitas Termal

Keamanan baterai menjadi faktor utama dalam pemilihan jenis baterai untuk kendaraan listrik. Salah satu risiko terbesar adalah *thermal runaway*, yaitu kondisi di mana kenaikan suhu mempercepat reaksi kimia eksotermik di dalam baterai, sehingga menyebabkan kenaikan suhu lebih lanjut hingga berpotensi menimbulkan kebakaran atau ledakan. Untuk mencegah hal tersebut, desain baterai harus memperhatikan stabilitas termal dari material elektrode, sistem ventilasi sel, serta pengendalian suhu operasi dengan menambahkan *Battery Management System* (BMS).

2.7.5 Biaya Produksi dan Perawatan

Baterai sebagai komponen utama kendaraan listrik sangat mempengaruhi kualitas, performa, dan harga jual kendaraan. Oleh karena itu, produsen baterai terus berinovasi untuk menurunkan biaya produksi tanpa mengorbankan kualitas dan keamanan. Peningkatan efisiensi proses manufaktur, penggunaan material alternatif yang lebih murah, serta optimalisasi sistem pendinginan dan BMS menjadi fokus utama dalam pengembangan teknologi baterai modern.

Selain itu, biaya perawatan baterai diharapkan seminimal mungkin agar konsumen tidak terbebani selama masa penggunaan kendaraan. Melalui penerapan *Battery Management System* (BMS) yang canggih, pengguna dapat memantau kondisi sel secara *real-time*, mencegah kerusakan dini, dan memperpanjang umur baterai tanpa memerlukan perawatan fisik yang rumit. Dengan demikian, kompromi antara biaya awal, kinerja, dan umur pakai baterai menjadi kunci utama dalam pemilihan jenis baterai yang ideal untuk kendaraan listrik. Baterai *lithium-ion* memiliki biaya awal yang relatif tinggi dibandingkan baterai timbal-asam, namun biaya per siklusnya lebih rendah karena umur pakai yang panjang, efisiensi energi tinggi, serta perawatan yang rendah.

2.8 Konfigurasi Baterai Pack *Lithium-Ion* 72Volt 20Ah

Baterai sebagai sumber energi listrik membutuhkan kapasitas yang besar untuk menentukan jarak tempuh, sehingga diperlukan baterai pack dengan susunan atau penggabungan beberapa sel baterai untuk mencapai tegangan dan kapasitas tertentu sesuai kebutuhan sistem. Dalam aplikasi kendaraan listrik, satu sel baterai tunggal (biasanya 3,6–3,7 V) tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan tegangan dan kapasitas yang tinggi, sehingga beberapa sel harus disusun secara seri dan paralel. Tujuan dari konfigurasi ini adalah untuk:

1. Meningkatkan tegangan total (melalui sambungan seri).
2. Meningkatkan kapasitas total (Ah) (melalui sambungan paralel).
3. Menyesuaikan daya dan energi total sesuai kebutuhan motor listrik dan pengontrol.

2.8.1 Spesifikasi Sel Baterai *Lithium-Ion*

Pemakaian spesifikasi sel *lithium-ion* model 21700.

Tabel 2.1 Spesifikasi sel model 21700

Parameter	Nilai	Keterangan
Kapasitas Nominal	5Ah (nominal) / 4,9Ah (minimal)	Kapasitas penyimpanan energi per sel
Tegangan Nominal	3,6 Volt	Tegangan rata-rata
Tegangan maks	4,2 Volt $\pm 0,05V$	Batas tegangan pengisian
Tegangan min (cut-off)	2,5volt	Batas tegangan pengosongan
Arus pengisian Maks	1C	Batas arus pengisian aman
Arus pengosongan maks	2C	Batas arus pengosongan
Berat sel	$\pm 69gr$	Berat per unit sel
Dimensi	Diameter 21,22mm x 70,8 mm (panjang)	Ukuran fisik sel

2.8.2 Perhitungan Konfigurasi Baterai 72V 20Ah

Untuk mendapatkan baterai pack dengan tegangan 72 V dan kapasitas 20 Ah dengan menggunakan sel dengan tegangan

nominal 3,6V dan kapasitas 5Ah, maka diperlukan kombinasi beberapa sel dengan persamaan:

$$V_{total} = N_s \times V_{cell} \quad (2.4)$$

$$C_{total} = N_p \times C_{cell} \quad (2.5)$$

Di mana:

N_s = jumlah sel seri

N_p = jumlah sel paralel

V_{cell} = tegangan per sel (3,6 V)

C_{cell} = kapasitas per sel (5 Ah)

Menentukan jumlah sel seri (N_s) dengan tegangan yang dibutuhkan 72V.

N_s = Tegangan total / tegangan per sel

$N_s = 72V / 3,6V$

$N_s = 20$ sel seri

Maka, terdapat 20 sel yang disusun seri untuk mencapai tegangan total 72V.



Konfigurasi Rangkaian Seri

$$V_{total} = N_s \times V_{sel}$$

$$C_{total} = C_{sel}$$

Gambar 2.12 Perhitungan Tegangan & Kapasitas Rangkaian Seri

Menentukan jumlah sel paralel N_p dengan kapasitas baterai 20Ah

N_p = Kapasitas baterai yang dibutuhkan / Kapasitas Sel

$N_p = 20Ah / 5Ah$

$N_p = 4$ sel paralel

Maka, setiap rangkaian seri terdiri dari 4 sel paralel agar total kapasitas menjadi 20Ah.



Konfigurasi Rangkaian Pararel

$$V_{\text{total}} = V_{\text{sel}}$$

$$C_{\text{total}} = N_p \times C_{\text{sel}}$$

Gambar 2.13 Perhitungan Tegangan & Kapasitas Rangkaian Pararel

Sehingga konfigurasi sel yaitu 20S4P dengan nilai tegangan 72V 20Ah. Sambungan seri dengan menghubungkan sel disetiap kelompok baterai yang telah di pararel dengan susunan 4 sel. Sambungan seri bertujuan untuk meningkatkan tegangan dan sambungan pararel untuk meningkatkan kapasitas total.

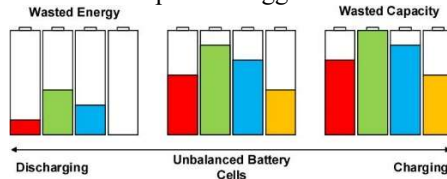


Gambar 2.14 Baterai *Pack* 20S4P 72V 20Ah

2.9 Penurunan Kinerja Pada Baterai

Baterai kendaraan listrik memiliki masa pakai terbatas yang ditentukan oleh jumlah siklus pengisian dan pengosongan (*cycle life*) serta kondisi operasi selama penggunaan. Seiring waktu, baterai akan mengalami penurunan kapasitas dan peningkatan resistansi internal yang menyebabkan menurunnya kemampuan baterai dalam menyimpan dan mengalirkan energi listrik. Penurunan tersebut juga dikarenakan kondisi tiap sel baterai terjadi perbedaan tegangan, kondisi ini dapat menyebabkan saat baterai dilakukan pengisian tidak sepenuhnya sel

terisi hingga penuh, dikarenakan ada sel yang sudah penuh mengakibatkan BMS melakukan *cut off* proses pengisian sehingga kapasitas baterai tidak terisi penuh hingga 100%.



Gambar 2.15 Perbedaan Kapasitas Baterai

Fenomena penurunan ini disebut degradasi baterai dan merupakan proses alami yang tidak dapat dihindari, namun dapat diperlambat melalui pengaturan sistem dan kondisi operasi yang optimal. Secara umum, degradasi baterai dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu degradasi dan degradasi siklus, yang kemudian dipengaruhi oleh beberapa variabel lingkungan dan operasional seperti suhu, arus, dan tegangan.

2.9.1 Suhu Operasi

Suhu merupakan salah satu faktor paling dominan dalam mempercepat degradasi baterai. Berikut pengaruh tingkat suhu yang dapat mempengaruhi reaksi kimia di dalam baterai:

1. Suhu tinggi ($> 50^{\circ}\text{C}$) menyebabkan reaksi kimia internal meningkat, mempercepat pertumbuhan lapisan SEI (*Solid Electrolyte Interphase*) pada anoda dan mempercepat dekomposisi elektrolit. Hal ini mengakibatkan penurunan kapasitas dan umur pakai baterai.
2. Suhu rendah ($< 0^{\circ}\text{C}$) menurunkan mobilitas ion lithium di dalam elektrolit, meningkatkan resistansi internal dan menurunkan efisiensi pengisian.

Untuk itu, sistem manajemen termal pada kendaraan listrik perlu menjaga suhu operasi baterai pada rentang 20°C – 40°C agar degradasi dapat diminimalkan.

2.9.2 Tegangan Pengisian dan Pengosongan

Baterai *lithium-ion* sangat sensitif terhadap batas tegangan maksimum dan minimum, tegangan berikut yang dapat menyebabkan perunan pada baterai:

1. *Overcharge* (pengisian berlebih) di atas 4.2 V per sel dapat menyebabkan oksidasi berlebihan pada katoda, pemuatan, bahkan risiko *thermal runaway*.
2. *Overdischarge* (pengosongan berlebih) di bawah 2.5 V per sel dapat mengakibatkan kerusakan permanen pada struktur anoda dan hilangnya kapasitas aktif.

Oleh karena itu, sistem *Battery Management System* (BMS) sangat penting untuk mengontrol tegangan tiap sel agar tetap berada dalam batas aman.

2.9.3 Arus Pengisian dan Pengosongan (*C-Rate*)

C-rate menunjukkan laju arus pengisian atau pengosongan terhadap kapasitas nominal baterai. Arus yang terlalu tinggi, baik saat pengisian (*charge rate*) maupun pengosongan (*discharge rate*), dapat meningkatkan panas dan mempercepat degradasi elektrokimia. Berikut pengaruh arus yang menyebabkan kerusakan pada baterai:

1. Pengisian cepat di atas 1C berpotensi menimbulkan penumpukan ion lithium pada anoda yang dapat menurunkan kapasitas secara signifikan.
2. Pengosongan arus tinggi di atas 2C–3C mempercepat keausan material aktif katoda.

Untuk menjaga umur baterai, disarankan pengisian dilakukan pada 0.5C–1C dan pengosongan tidak melebihi 2C

2.9.4 Pengosongan Berlebih (*Depth of Discharge – DoD*)

Depth of Discharge (DoD) adalah persentase kapasitas baterai yang digunakan dalam satu siklus. Semakin besar DoD, semakin cepat baterai mengalami degradasi. Sebagai contoh:

1. Pengosongan 100% (DoD penuh) menghasilkan umur siklus sekitar 500–800 kali.
2. Pengosongan 50% dapat memperpanjang umur hingga lebih dari 1500 siklus.

Dengan demikian, menjaga baterai agar tidak terlalu sering dikosongkan sepenuhnya dapat memperpanjang umur pakai secara signifikan.

2.9.5 Ketidakseimbangan Antar Sel

Dalam sistem baterai pack yang terdiri dari banyak sel, ketidakseimbangan tegangan antar sel dapat menyebabkan

sebagian sel bekerja lebih berat dari yang lain. Sel dengan tegangan lebih tinggi akan cepat terisi penuh, sedangkan sel dengan tegangan rendah akan lebih cepat habis, sehingga menimbulkan stres elektrokimia yang berbeda-beda. BMS berperan penting dalam menyeimbangkan tegangan antar sel (*cell balancing*) untuk menghindari degradasi dini dan memperpanjang masa pakai keseluruhan baterai pack, meskipun BMS masih kurang efektif untuk dapat menyeimbangkan tegangan antar sel karena keterbatasan arus penyeimbang.

2.9.6 Siklus Pemakaian (*life cycle*)

Setiap kali baterai menjalani satu siklus pengisian dan pengosongan penuh, sebagian kecil material aktif elektroda akan menurun kualitasnya. Lama-kelamaan, penurunan ini menumpuk dan mengurangi kapasitas total. Faktor ini sangat dipengaruhi oleh:

1. Frekuensi penggunaan kendaraan,
2. Kedalaman pengosongan per siklus, dan
3. Laju pengisian dan pengosongan.

Baterai lithium-ion umumnya memiliki umur antara 1.000 hingga 3.000 siklus, tergantung pada manajemen penggunaannya.

2.10 *Battery Management Sistem (BMS)*

Baterai pada kendaraan Listrik dilengkapi dengan *Battery Management System (BMS)* yang berfungsi untuk memantau dan mengatur operasi baterai untuk memastikan keamanan, performa dan masa pakai yang optimal. Fungsi utamanya meliputi :

1. *Overcharge Protection* untuk mencegah pengisian daya berlebih yang dapat merusak baterai dan mencegah risiko panas maupun terbakar.
2. *Overdischarge Protection* untuk menghentikan pengosongan daya saat baterai mencapai tegangan minimum saat digunakan, sehingga melindungi dari kerusakan yang dapat menurunkan performa baterai.
3. *Overcurrent Protection* untuk menghindari arus yang terlalu tinggi selama pengisian dan pengosongan yang dapat menyebabkan panas berlebih.
4. *Over temperature* untuk memantau mengatur suhu dalam rentang yang aman dan melindungi saat baterai terjadi panas melebihi batas.

5. Memberikan informasi *State of Charge* (SoC) atau persentase kapasitas yang tersedia didalam baterai dan kebalikan dari SOC adalah *Depth of Discharge* (DoD) yaitu kapasitas yang telah terpakai / pengosongan baterai. Status informasi DoD atau SoC biasanya ditampilkan pada *Multi Information Display* (MID)
6. Penyeimbang Sel (*Cell Balancing*), dalam baterai *lithium-ion* terdapat banyak sel dan seiring berjalannya pemakaian menyebabkan kemampuan sel berbeda saat proses pengisian maupun pengosongan sehingga dibutuhkan proses penyeimbang tegangan antar sel oleh BMS untuk dapat meratakan ditiap selnya. Tetapi kerja BMS sebagai penyeimbang tegangan bukan merupakan fungsi utama, dikarenakan hanya mampu bekerja pada arus 0,5A dengan membuang arus pada resistor menjadi panas.



Gambar 2.16 *Battery Management System* (BMS)

2.11 Sistem Penyeimbangan Tegangan Baterai

Pada sistem baterai kendaraan listrik, beberapa sel disusun secara seri dan paralel untuk mencapai tegangan dan kapasitas yang diinginkan. Dalam penggunaan jangka panjang, setiap sel akan mengalami perbedaan kapasitas, resistansi internal, dan efisiensi pengisian, sehingga menyebabkan ketidakseimbangan tegangan antar sel. Perbedaan kecil tegangan antar sel dapat menimbulkan dampak besar, seperti overcharge pada sel dengan kapasitas kecil atau *overdischarge* pada sel dengan kapasitas besar. Hal ini dapat mempercepat degradasi, menurunkan kapasitas total baterai *pack*, bahkan berpotensi menyebabkan kegagalan sistem.

Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan perawatan baterai dengan sistem penyeimbangan tegangan sel dengan *Battery*

Management System (BMS), penyeimbang aktif, maupun metode lain yang sederhana adalah dengan membuat rangkaian paralel seluruh sel baterai tetapi memerlukan waktu 1 hari dan harus merubah rangkaian susunan baterai. Sistem ini berfungsi untuk memastikan semua sel dalam baterai *pack* memiliki tegangan yang seragam. Secara umum, metode penyeimbangan tegangan dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu penyeimbangan pasif (*passive balancing*) dan penyeimbangan aktif (*active balancing*).

2.11.1 Penyeimbangan Pasif (*Passive Balancing*)

Penyeimbangan pasif merupakan metode paling sederhana dan banyak digunakan pada BMS komersial karena biayanya rendah dan sirkuitnya sederhana. Metode ini bekerja dengan membuang kelebihan energi dari sel yang memiliki tegangan lebih tinggi melalui resistor atau beban eksternal, sehingga tegangan antar sel menjadi seimbang. Prinsip kerja sistem ini ketika salah satu sel memiliki tegangan lebih tinggi dibandingkan sel lainnya, sistem BMS akan mengaktifkan resistor *shunt* pada sel tersebut, energi berlebih diubah menjadi panas. Proses ini terus dilakukan hingga seluruh sel memiliki tegangan yang relatif sama, akan tetapi dengan arus yang rendah membuat sistem BMS untuk proteksi kelebihan tegangan akan menghentikan proses pengisian termasuk proses penyeimbangan tegangan.

Sistem ini memiliki kelebihan dengan rangkaian sederhana dan biaya implementasi rendah sehingga cocok untuk aplikasi dengan kapasitas sedang dan tingkat efisiensi tidak terlalu kritis. Tetapi kekurangan sistem ini yaitu energi berlebih dibuang sebagai panas, sehingga efisiensi rendah. Tidak cocok untuk baterai berkapasitas besar atau sistem kendaraan listrik dengan siklus pengisian cepat. Dapat meningkatkan suhu lokal pada modul baterai akibat panas resistif.

2.11.2 Penyeimbangan Aktif (*Active Balancing*)

Berbeda dengan sistem pasif, metode penyeimbangan aktif tidak membuang energi ke lingkungan, melainkan memindahkan energi dari sel bertegangan tinggi ke sel bertegangan rendah. Dengan demikian, energi dalam sistem tetap dimanfaatkan secara efisien. Sistem ini umumnya menggunakan konverter DC-DC,

kapasitor, atau induktor untuk mentransfer energi antar sel. Prinsip Kerja sistem ini saat salah satu sel mencapai tegangan lebih tinggi, energi listrik dari sel tersebut ditransfer ke sel lain yang memiliki tegangan lebih rendah. Proses transfer dapat dilakukan secara langsung antar sel (*cell-to-cell*) atau melalui bus energi bersama (*cell-to-pack*) tergantung pada arsitektur sistem.

Jenis-jenis Penyeimbangan Aktif diantaranya sebagai berikut:

1. *Capacitor based Balancing*: Menggunakan kapasitor *switching* untuk memindahkan muatan antar dua sel secara bergantian. Efisien dan cepat, cocok untuk sistem tegangan menengah.
2. *Inductor-based Balancing*: Menggunakan induktor atau trafo kecil untuk mentransfer energi dengan efisiensi tinggi. Cocok untuk sistem besar seperti kendaraan listrik.
3. *Converter-based Balancing*: Menggunakan konverter DC-DC untuk mentransfer energi antar sel secara terkontrol. Memiliki efisiensi tertinggi namun biaya dan kompleksitas rangkaian lebih besar.

Kelebihan sistem ini penyeimbang aktif yaitu efisiensi energi tinggi karena energi tidak terbuang sebagai panas, proses penyeimbangan yang cepat karena menggunakan arus yang cukup besar, dapat memperpanjang umur baterai dengan menjaga keseimbangan kapasitas antar sel sehingga cocok untuk sistem berkapasitas besar seperti kendaraan listrik dan baterai penyimpanan energi (ESS).

Namun sistem ini memiliki kekurangan yaitu biaya produksi dan kompleksitas sirkuit lebih tinggi, memerlukan pengendalian mikroprosesor atau sistem kontrol canggih. Ukuran rangkaian lebih besar dibandingkan sistem pasif.