

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baterai Lithium

Baterai lithium merupakan salah satu jenis baterai sekunder yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi modern, mulai dari perangkat elektronik hingga sistem penyimpanan energi terbarukan. Keunggulan utama baterai lithium adalah densitas energi yang tinggi, ringan, dan memiliki umur siklus yang lebih panjang dibandingkan dengan baterai konvensional seperti NiMH atau SLA (Sealed Lead Acid). Dua tipe umum dari baterai lithium adalah Lithium-Ion (Li-Ion) dan Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄).

Dalam penggunaannya, performa baterai lithium sangat dipengaruhi oleh karakteristik pengisian dan pengosongan, serta suhu dan usia pakai. Oleh karena itu, pemantauan dan evaluasi terhadap kondisi baterai secara berkala menjadi hal yang sangat penting.

Dalam sistem tenaga surya off-grid, pemantauan SoH sangat penting untuk menjamin kontinuitas pasokan daya. Baterai yang mengalami degradasi parah dapat mengakibatkan gangguan pada beban, terutama pada malam hari atau saat cuaca mendung. Oleh karena itu, integrasi pemantauan SoH dalam Battery Management System (BMS) menjadi sangat diperlukan.

2.2 Konsep State of Health (SoH)

State of Health (SoH) adalah parameter yang digunakan untuk menunjukkan tingkat kesehatan atau performa baterai dibandingkan dengan kondisi awalnya. SoH biasanya dinyatakan dalam persentase, dengan 100% menunjukkan kondisi baterai baru dan 0% menunjukkan baterai yang sudah tidak layak digunakan. Evaluasi SoH dapat dilakukan dengan menganalisis kapasitas aktual, resistansi internal, serta efisiensi pengisian dan pengosongan.

Beberapa metode untuk mengukur SoH meliputi:

- a. Metode berdasarkan kapasitas: membandingkan kapasitas saat ini dengan kapasitas nominal awal.
- b. Metode berbasis impedansi: menggunakan pengukuran resistansi internal baterai.

- c. Metode berbasis model matematis atau machine learning: untuk aplikasi lanjutan dalam sistem monitoring baterai.

2.2.1. Fungsi dan Pentingnya SoH

SoH sangat penting dalam berbagai aplikasi, seperti:

- a. Pemeliharaan preventif sistem penyimpanan energi (ESS)
 - b. Manajemen baterai (Battery Management System/BMS) dalam kendaraan listrik
 - c. Keamanan dan efisiensi operasional perangkat elektronik
 - d. Perencanaan penggantian baterai untuk menghindari kegagalan sistem
- Dengan mengetahui SoH secara akurat, pengguna dapat menghindari risiko seperti kerusakan mendadak, efisiensi yang buruk, dan biaya operasional tinggi.

2.2.2. Parameter Penentu SoH

SoH dapat dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama:

1. Kapasitas Aktual (Actual Capacity)

Mengukur berapa banyak energi yang dapat disimpan dan dilepaskan oleh baterai saat ini, dibandingkan dengan kapasitas nominal awal.

$$\text{SoH} = \frac{C_{\text{aktual}}}{C_{\text{nominal}}} \times 100\%$$

Di mana:

C_{aktual} = kapasitas baterai saat ini (Ah),

C_{nominal} = kapasitas baterai saat baru.

2. Resistansi Internal

Seiring waktu, resistansi internal baterai meningkat akibat degradasi elektrokimia. Peningkatan resistansi akan mengurangi efisiensi dan mempercepat kenaikan suhu.

3. Efisiensi Coulombic (Coulombic Efficiency)

Rasio antara muatan yang keluar dari baterai saat pengosongan dibandingkan muatan yang masuk saat pengisian.

4. Waktu Pengisian dan Pengosongan

Baterai yang mulai rusak biasanya memerlukan waktu lebih singkat untuk penuh, tetapi juga lebih cepat habis.

2.2.3. Metode Penilaian SoH

Penilaian SoH dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan, yaitu:

1. Metode Eksperimen Langsung (Direct Measurement)

Dilakukan dengan mengisi dan mengosongkan baterai dalam kondisi terkontrol, kemudian mengukur kapasitas aktualnya.

2. Metode Model Estimasi (Model-Based Estimation)

Menggunakan algoritma estimasi seperti Kalman Filter, Neural Network, atau model matematis untuk menghitung SoH berdasarkan data historis.

3. Metode Impedansi Spektrum Elektro-Kimia (Electrochemical Impedance Spectroscopy/EIS)

Teknik canggih untuk mengukur perubahan sifat elektrokimia internal baterai melalui respons impedansi pada berbagai frekuensi.

2.2.4. Faktor-faktor yang Mempengaruhi SoH

Faktor-faktor yang Mempengaruhi SoH

Beberapa faktor yang menyebabkan penurunan SoH antara lain:

- a. Jumlah siklus pengisian dan pengosongan,
- b. Overcharging atau deep discharging,
- c. Suhu operasi ekstrem (terlalu panas/dingin),
- d. Kelebihan beban atau arus tinggi,
- e. Usia kalender (aging meskipun tidak digunakan).

2.3 Proses Pengisian dan Pengosongan Baterai

Proses pengisian dan pengosongan baterai lithium merupakan bagian paling penting dalam manajemen energi. Kedua proses ini harus dikendalikan secara cermat untuk menjaga efisiensi, umur pakai, dan keselamatan baterai. Pemahaman yang baik terhadap proses ini sangat diperlukan dalam sistem penyimpanan energi berbasis baterai, khususnya pada aplikasi seperti sistem tenaga surya off-grid, kendaraan listrik, dan perangkat elektronik portabel.

Baterai lithium, terutama jenis Lithium-Ion (Li-Ion) dan Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4), bekerja berdasarkan prinsip reaksi redoks (reduksi-oksidasi) yang reversibel. Selama proses pengisian, ion lithium bergerak dari katoda menuju anoda melalui elektrolit, sedangkan saat pengosongan, ion bergerak kembali dari anoda ke katoda sambil menghasilkan aliran listrik eksternal.

Pengisian dan pengosongan baterai lithium harus dikendalikan dengan baik agar tidak merusak struktur kimia internalnya. Ketidaktepatan dalam arus, tegangan, atau suhu dapat mengakibatkan degradasi cepat, bahkan membahayakan sistem.

Pengisian (charging) baterai lithium umumnya dilakukan dengan metode Constant Current-Constant Voltage (CC-CV), di mana arus konstan diterapkan hingga tegangan tertentu tercapai, kemudian dilanjutkan dengan tegangan konstan sambil menurunkan arus hingga mencapai ambang cut-off. Proses ini harus dikontrol secara ketat agar tidak merusak sel baterai.

Pengosongan (discharging) dilakukan saat baterai digunakan untuk memberikan daya ke beban. Selama proses ini, penting untuk memperhatikan tegangan minimum (cut-off voltage) agar tidak terjadi deep discharge yang dapat merusak baterai secara permanen.

2.3.1. Proses Pengisian (Charging Process)

- a. Metode Pengisian CC-CV (Constant Current – Constant Voltage) Metode paling umum untuk mengisi baterai lithium adalah CC-CV, yaitu:
 - Tahap 1: Constant Current (CC)
Baterai diisi dengan arus konstan (biasanya 0,5C – 1C) hingga mencapai tegangan maksimum yang ditentukan, misalnya:
 - a). 4.2V per sel untuk Li-Ion,
 - b). 3.65V per sel untuk LiFePO₄.
 - Tahap 2: Constant Voltage (CV)
Setelah tegangan maksimum tercapai, sistem mempertahankan tegangan konstan, sedangkan arus secara bertahap menurun. Proses ini berhenti saat arus mencapai ambang tertentu (biasanya 0.05C), menandakan baterai sudah penuh.
- b. Parameter Penting dalam Pengisian
 - Tegangan Maksimum: Harus sesuai spesifikasi sel baterai. Overvoltage dapat menyebabkan kerusakan atau ledakan.
 - Arus Pengisian (Charging Current): Umumnya 0.5C hingga 1C. Arus tinggi dapat mempercepat pengisian tetapi juga meningkatkan panas.

- Suhu: Pengisian ideal dilakukan pada suhu 10–45°C. Suhu ekstrem harus dihindari.
- Durasi: Tergantung kapasitas baterai dan arus pengisian. Pengisian penuh umumnya membutuhkan 1–3 jam.

c. Perlindungan Selama Pengisian

- Overvoltage protection
- Overcurrent protection
- Thermal protection
- Monitoring oleh Battery Management System (BMS).

2.3.2. Proses Pengosongan (Discharging Process)

Pengosongan terjadi saat baterai digunakan untuk memberikan daya ke beban.

a. Karakteristik Pengosongan

Pengosongan baterai memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Tegangan Minimum: Ditentukan oleh jenis baterai, misalnya:
 - a). 3.0V atau 2.5V per sel untuk Li-Ion
 - b). 2.0V per sel untuk LiFePO₄.
- Arus Pengosongan (Discharge Current): Tergantung pada kapasitas beban. Biasanya $\leq 1C$ untuk keamanan dan efisiensi.
- Kapasitas Energi: Diukur dalam ampere-jam (Ah). Kapasitas aktual bisa menurun seiring degradasi.

b. Efisiensi Pengosongan

Efisiensi pengosongan dipengaruhi oleh:

- Resistansi internal
- Suhu baterai
- Kondisi kimia internal
- Tingkat SoH baterai

Pengosongan cepat (dengan arus tinggi) menghasilkan panas dan menurunkan efisiensi. Oleh karena itu, penting untuk mengontrol arus pengosongan agar tidak melebihi spesifikasi.

2.3.3. Siklus Pengisian dan Pengosongan (Charge/Discharge Cycle)

Satu siklus penuh terdiri dari satu kali pengisian hingga penuh dan satu kali pengosongan hingga batas minimum. Umur baterai sering dinyatakan dalam jumlah cycle life, misalnya:

- a). Li-Ion: ± 500 – 1000 siklus
- b). LiFePO_4 : ± 2000 – 3000 siklus

Namun, semakin dalam tingkat pengosongan (depth of discharge, DoD), semakin cepat degradasi baterai terjadi.

2.3.4. Dampak Pengisian dan Pengosongan pada Kesehatan Baterai

Proses pengisian dan pengosongan yang tidak ideal dapat menyebabkan:

- a). Degradasi Kapasitas: Penurunan jumlah muatan yang bisa disimpan.
- b). Kenaikan Resistansi Internal: Menyebabkan overheat dan penurunan efisiensi.
- c). Kerusakan Struktural: Elektrolit terdegradasi, lithium plating terjadi pada elektroda.

Oleh karena itu, sistem Battery Management System (BMS) yang canggih sangat diperlukan untuk memantau, mengontrol, dan melindungi baterai selama proses ini.

2.3.5. Monitoring Proses Charging dan Discharging

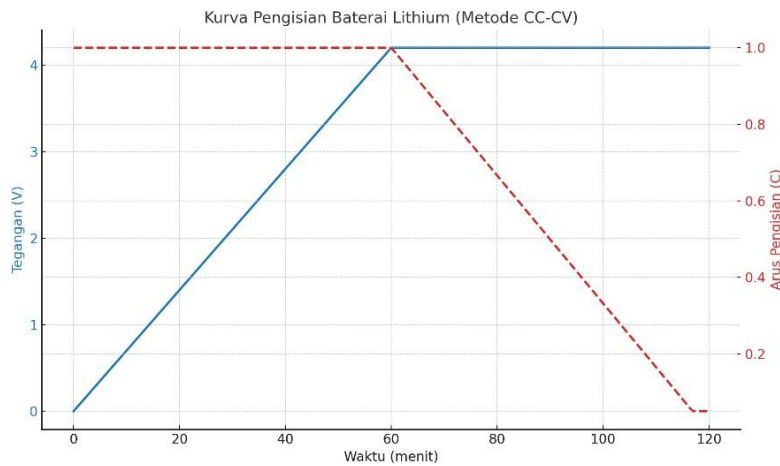
Dalam penelitian atau sistem nyata, proses pengisian dan pengosongan dapat dimonitor menggunakan:

- a). Multimeter digital atau data logger
- b). Sensor suhu
- c). Software monitoring (BMS interface)
- d). Parameter yang dicatat meliputi: tegangan, arus, waktu, suhu, dan kapasitas.

2.3.6. Grafik Pengisian dan Pengosongan Baterai Lithium

a. Grafik Pengisian

Grafik pada Gambar 2.1. menggambarkan dinamika pengisian baterai lithium yang umum digunakan dalam sistem kontrol pengisian untuk menjaga umur baterai dan efisiensi pengisian.



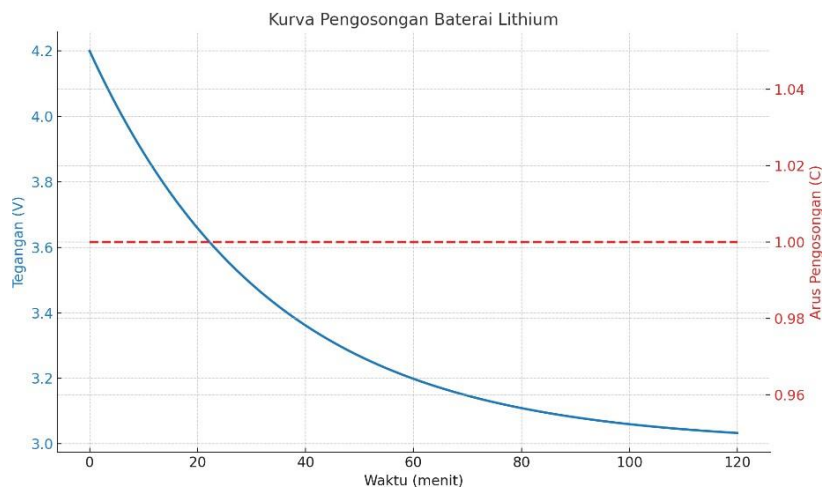
Gambar 2.1. Grafik siklus pengisian

Pada Gambar 2.1. memperlihatkan grafik kurva pengisian baterai lithium dengan metode CC-CV (Constant Current – Constant Voltage) dengan penjelasan sebagai berikut :

- Tegangan (garis biru): Meningkat secara linier pada tahap Constant Current hingga mencapai batas maksimum (misalnya 4.2V), lalu stabil pada tahap Constant Voltage.
- Arus (garis merah putus-putus): Tetap konstan selama tahap Constant Current, kemudian menurun perlahan selama Constant Voltage hingga mencapai nilai minimum (cut-off current).

b. Grafik Pengosongan

Pada Gambar 2.2. membantu memvisualisasikan bagaimana baterai melepaskan energi dan bagaimana tegangan berubah saat kapasitas menurun.



Gambar 2.2. Grafik Pengosongan Baterai Lithium

Gambar 2.2. memperlihatkan grafik **kurva pengosongan baterai lithium** dengan penjelasan sebagai berikut :

- **Tegangan (garis biru):** Menurun secara eksponensial seiring waktu hingga mendekati tegangan minimum (misalnya 3.0V), sesuai karakteristik khas baterai lithium saat melepaskan energi.
- **Arus (garis merah putus-putus):** Dijaga konstan selama proses pengosongan (misalnya 1C), yang umum diterapkan untuk keperluan pengujian atau beban tetap.

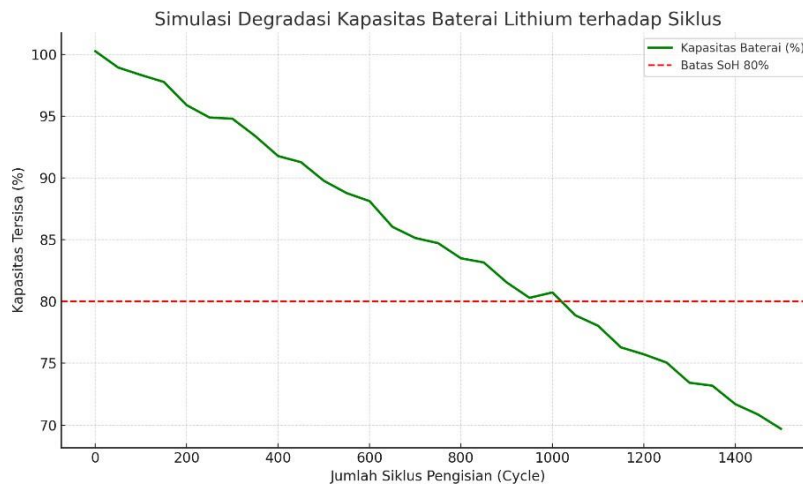
2.4 Degradasi Baterai Lithium

Degradasi baterai lithium adalah proses penurunan kinerja dan kapasitas baterai secara bertahap seiring waktu dan siklus penggunaan. Proses ini mengakibatkan berkurangnya **kapasitas penyimpanan energi, peningkatan resistansi internal, dan penurunan efisiensi pengisian dan pengosongan.** Faktor-faktor utama penyebab degradasi baterai lithium diuraikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Faktor Utama Penyebab Degradasi Baterai Lithium

| Faktor | Dampak Terhadap Degradasi |
|----------------------------------|---|
| Suhu tinggi | Mempercepat reaksi kimia dan pertumbuhan SEI (Solid Electrolyte Interphase) |
| Pengisian cepat | Memicu lithium plating |
| Overcharge/ Overdischarge | Merusak struktur kimia internal baterai |
| Kedalaman Discharge (DOD) tinggi | Meningkatkan stres siklus pada elektroda |
| Umur kalendar (ageing) | Degradasi tetap terjadi meskipun tidak digunakan |

Degradasi ini menyebabkan berkurangnya kapasitas, meningkatnya resistansi internal, dan penurunan efisiensi. Gambar 2.3. adalah grafik degradasi kapasitas baterai lithium terhadap jumlah siklus pengisian.



Gambar 2.3. Grafik Degradasi Kapasitas Baterai Lithium Terhadap Jumlah Siklus Pengisian

Gambar 2.3. menjelaskan bahwa:

- Kapasitas baterai menurun secara bertahap seiring bertambahnya siklus pengisian.
- Setelah sekitar **1000–1200 siklus**, kapasitas turun mendekati **80%**, yang umumnya dianggap sebagai ambang batas akhir masa pakai efektif baterai (**SoH = 80%**).
- Fluktuasi kecil pada grafik menggambarkan variasi alami karena kondisi lingkungan, suhu, dan metode pengisian yang tidak ideal.

Pemahaman tentang degradasi baterai sangat penting untuk memperpanjang masa pakai dan efisiensi sistem penyimpanan energi, terutama dalam aplikasi seperti **PLTS Off-Grid**. Dengan pengelolaan yang baik, umur baterai bisa diperpanjang dan investasi menjadi lebih efisien.

2.5 Evaluasi Kinerja Baterai

Evaluasi kinerja baterai bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan kapasitas, efisiensi energi, serta parameter listrik lainnya dalam siklus pengisian dan pengosongan. Metode evaluasi umumnya melibatkan:

- a. Pengukuran tegangan, arus, waktu, dan suhu selama siklus pengisian dan pengosongan
- b. Perhitungan efisiensi coulombic (rasio muatan keluar/masuk)
- c. Perbandingan kapasitas aktual dengan kapasitas nominal awal

Dengan pendekatan ini, kondisi kesehatan baterai dapat diketahui secara lebih akurat dan dapat dijadikan dasar untuk pemeliharaan atau penggantian. State of Health (SoH) merupakan indikator kunci dalam evaluasi performa dan kelayakan baterai lithium. Dengan pemantauan SoH yang akurat dan berkelanjutan, sistem penyimpanan energi dapat beroperasi secara lebih efisien, aman, dan ekonomis. Pemahaman terhadap parameter-parameter yang memengaruhi SoH juga dapat membantu dalam merancang strategi perawatan dan penggantian baterai secara tepat waktu.

2.6 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas tentang evaluasi SoH baterai lithium menggunakan pendekatan analisis performa. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode berbasis pengisian dan pengosongan memberikan hasil yang cukup akurat dalam memantau degradasi baterai. Selain itu, pendekatan ini relatif sederhana dan mudah diterapkan dalam sistem monitoring baterai di lapangan.

Penelitian ini mengambil pendekatan serupa dengan fokus pada sistem PLTS off-grid, yang menggunakan baterai lithium sebagai media penyimpanan energi utama.