

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya (*State of the Art*)

Dalam penulisan tugas akhir ini penulis menggunakan beberapa jurnal sebagai acuan dalam penelitian, yang dimuat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 *State of the Art* Penelitian Tentang Manajemen Daya

Penulis	Tahun	Judul	Metode	Hasil Penelitian
Meyer, <i>et al.</i>	2016	<i>Hybrid Model Predictive Power Management of a Battery Supercapacitor Electric Vehicle</i> [39]	<i>Hybrid model predictive control strategy</i>	Model ini terbukti berguna sebagai alat prototipe iteratif cepat dengan memvariasikan massa kendaraan dan daya maksimum penggerak listrik yang menghasilkan pengurangan konsumsi energi dan biaya operasi.
Jin, <i>et al.</i>	2016	<i>A Fuzzy Logic based Power Management Strategy for Hybrid Energy Storage System in Hybrid Electric Vehicles Considering Battery Degradation</i> [40]	<i>Fuzzy Logic Controller</i> dengan menyertakan model degradasi masa pakai baterai	Hasil simulasi dengan profil multi kecepatan dari siklus mengemudi (<i>drive cycle</i>) standar (US EPA) memverifikasi bahwa strategi manajemen daya berbasis <i>fuzzy logic controller</i> yang diusulkan membantu mengurangi degradasi baterai dengan efektif (hingga 17 %)
Jha, <i>et al.</i>	2017	<i>Power Management For Electric Vehicle with PID and Fuzzy Logic Controllers</i> [41]	Strategi manajemen daya menggunakan kontrol PID dan FLC	Hasil simulasi menunjukkan hasil yang lebih baik ketika digunakan teknik kontroler logika fuzzy. Kontroler PID menghasilkan <i>settling time</i> yang lebih tinggi dibandingkan dengan kontroler logika fuzzy.

Tabel 2. 1 *State of the Art* Penelitian Tentang Manajemen Daya (Lanjutan)

Penulis	Tahun	Judul	Metode	Hasil Penelitian
Swetha, <i>et al.</i>	2019	<i>Control Strategies for Power Management of PV/Battery System with Electric Vehicle</i> [42]	<i>Sliding Mode Control (SMC)</i> dan kontroler PI digunakan untuk mengatur DC bus voltage dari sistem	Metode SMC rata-rata memberikan pengaturan tegangan yang lebih baik dengan overshoot minimum dibandingkan dengan strategi kontrol I-V konvensional.
Saleeb, <i>et al.</i>	2019	<i>Power Management Strategy for Battery Electric Vehicles</i> [43]	Penggunaan FLC untuk mengontrol Power Control Unit (PCU) dari Battery Management System (BMS)	PCU yang diusulkan dapat mengurangi kehilangan energi di dalam baterai dan meningkatkan masa pakai baterai.
Reddy, <i>et al.</i>	2019	<i>An Intelligent Power and Energy Management System for Fuel Cell/Battery Hybrid Electric Vehicle using Reinforcement Learning</i> [44]	<i>Power and Energy Management System (PEMS)</i> yang cerdas menggunakan Reinforcement Learning	PEMS secara mandiri dapat mempelajari strategi optimal secara real time melalui interaksi dengan sistem tenaga hybrid onboard sehingga mampu meningkatkan masa pakai baterai dan efisiensi power system dengan meminimalkan variasi keadaan SOC baterai.
Giliberto, <i>et al.</i>	2019	<i>A Fuzzy-Based Solution for Optimized Management of Energy Consumption in E-bikes</i> [45]	Manajemen energi sepeda listrik dengan metode logika fuzzy	Metode yang diusulkan mengungguli metode pengontrol proportional-integralderivative (PID), dan secara signifikan memperpanjang masa pakai baterai.

Tabel 2. 1 *State of the Art* Penelitian Tentang Manajemen Daya (Lanjutan)

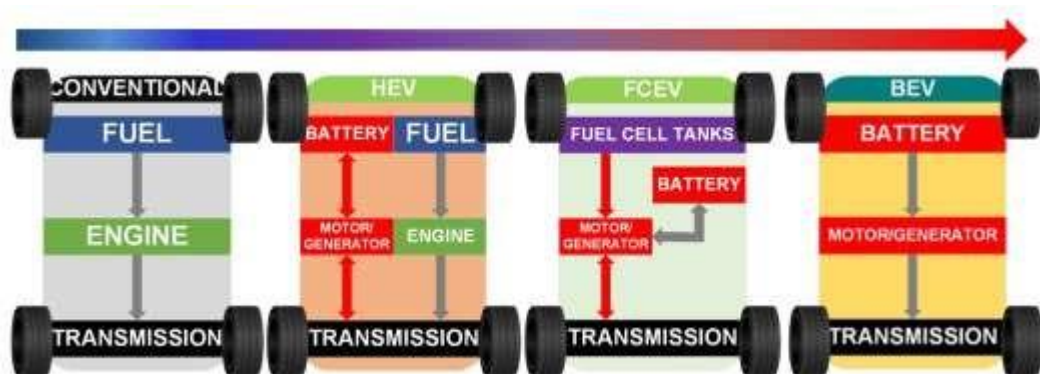
Penulis	Tahun	Judul	Metode	Hasil Penelitian
Hussain, <i>et al.</i>	2019	<i>Efficient Power Management Algorithm Based on Fuzzy Logic Inference for Electric Vehicles Parking Lot</i> [46]	Inferensi Fuzzy diterapkan pada tempat parkir EV dengan kapasitas parkir yang berbeda	dibandingkan dengan skema <i>charging only first-come-first-serve</i> (CFFCS), <i>fuzzy logic inference based algorithm</i> (FLIA) mengurangi <i>overloading grid</i> sebesar masing-masing 19.24, 28.28%, dan 42.71% dalam kasus-2, kasus-3, dan kasus-4. Selanjutnya, FLIA mengurangi masing-masing sekitar 12%, 6% dan 4% lebih banyak EV dalam kasus-2, 3 dan 4 jika dibandingkan dengan skema berbasis <i>charging & discharging first-come-first-serve</i> (CDFCFS).
Zhang, <i>et al.</i>	2020	<i>A Real-Time Energy Management Control Strategy for Battery and Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems of Pure Electric Vehicles</i> [47]	Kombinasi dari <i>Wavelet Transform</i> , <i>Neural Network</i> dan <i>Fuzzy Logic</i>	<i>Life cost</i> baterai berkurang 18%, dan 44,22% lebih banyak energi pengereman regeneratif dipulihkan dibandingkan dengan strategi kontrol berbasis filtrasi konvensional.
Pietrosanti, <i>et al.</i>	2020	<i>Power Management System For RTG Crane Using Fuzzy Logic Controller</i> [48]	Pendekatan <i>Fuzzy Logic Controller</i> (FLC) untuk memaksimalkan potensi unit penyimpanan energi ke RTG cranes	Berhasil meningkatkan penghematan energi sebesar 32% dan mengungguli pengontrol PI sebesar 26%.

Tabel 2. 1 *State of the Art* Penelitian Tentang Manajemen Daya (Lanjutan)

Penulis	Tahun	Judul	Metode	Hasil Penelitian
Kim, <i>et al.</i>	2020	<i>Co-Optimization of Speed Trajectory and Power Management for a Fuel-Cell/Battery Electric Vehicle</i> [49]	Efisiensi energi yang berfokus pada <i>vehicles dynamics</i> menggunakan <i>Co-optimization</i>	Terdapat pengurangan sebesar 0,5%-5,3% dalam konsumsi energi total dibandingkan dengan optimasi berurutan.
Araria, <i>et al.</i>	2020	<i>Performance Analysis of DC-DC Converter and DTC Based Fuzzy Logic Control for Power Management in Electric Vehicle Application</i> [50]	<i>Direct flow and torque control</i> (DTC) diagram FLC	kontrol FLC berbasis DTC yang diusulkan memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan <i>PI-control</i> klasik.
Gautam, <i>et al.</i>	2021	<i>Optimal Power Management Strategy of Regenerative Braking using Fuzzy Logic Controller for BLDC Motor-Driven E-Rickshaw</i> [51]	<i>Hybrid Energy Storage System</i> (HESS) untuk manajemen daya yang optimal menggunakan logika fuzzy	Menerapkan logika fuzzy untuk mengontrol daya bersama antara ultrakapasitor dan baterai menghasilkan baterai dengan tingkat pengosongan yang dalam dan memperpanjang masa pakai baterai.
Abdesel em, <i>et al.</i>	2021	<i>Power Management Strategy Based Sugeno Fuzzy Logic Rules In An Electric Wheelchair</i> [52]	<i>Fuzzy-logic</i> metode sugeno diterapkan di kursi roda listrik <i>hybrid</i> PV/baterai	Metode yang diusulkan memiliki efisiensi terbaik dan meningkatkan otonomi kursi roda. Selain itu, hibridasi antara baterai dan PV memberikan kombinasi yang baik, mengekstraksi daya maksimum yang digunakan MPPT, respons cepat, dan manfaat terbaik yang membuat sistem stabil.

2.2 Jenis – Jenis EV

Berdasarkan sumber energinya, kendaraan dibagi menjadi empat kategori utama yang ditunjukkan pada Gambar 2. 1; bergerak dari kiri ke kanan adalah peningkatan elektrifikasi. Sumber energi untuk kendaraan konvensional dan *Hybrid Electric Vehicle* (HEV) adalah bensin atau solar, yang merupakan penyumbang utama radiasi karbon di lingkungan. Namun, dibandingkan kendaraan konvensional, tingkat emisi karbon dari HEV lebih rendah karena selain bensin atau solar, karena HEV juga menggunakan baterai sebagai sumber energi. Tipe ketiga dan keempat dikenal sebagai kendaraan tanpa emisi yang masing-masing bergantung pada *hydrogen fuel cell* dan baterai[53]. Adapun kelebihan dan kekurangan dari masing – masing jenis EV ini dimuat pada Tabel 2. 2.



Gambar 2. 1 Jenis – Jenis Kendaraan Berdasarkan Sumber Energinya

Tabel 2. 2 Kelebihan dan Kekurangan EV

Jenis	Kelebihan	Kekurangan
HEV[54], [55]	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan efisiensi bahan bakar dan kinerja • Biaya konsumsi bahan bakar yang lebih rendah • Mengurangi emisi CO₂ • Pemulihan beberapa energi melalui pengereman regeneratif • Mudah melakukan pengisian ulang dengan stasiun bahan bakar yang ada 	<ul style="list-style-type: none"> • Biaya awal yang lebih tinggi karena baterai • Hanya mengurangi emisi CO₂, bukan menghilangkan sepenuhnya
FCEV[56]	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Zero emissions</i> (Hanya 	<ul style="list-style-type: none"> • Biaya awal yang lebih

	<ul style="list-style-type: none"> air & panas) • Kendaraan berenergi sangat tinggi • efisiensi tinggi dibandingkan dengan ICE konvensional • Memulihkan energi dari pengereman regeneratif • Tidak ada ketergantungan pada minyak bumi 	<ul style="list-style-type: none"> • tinggi • <i>Hydrogen generation</i> dan masalah keamanan penyimpanan <i>onboard</i> Kurangnya ketersediaan dan keterjangkauan stasiun pengisian bahan bakar hidrogen • Pengembangan standar sedang berlangsung Skalabilitas untuk pembuatan massal
BEV[56], [57]	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Zero toxic emissions</i> • Tidak ada potensi emisi gas CO₂ • Kemungkinan untuk memulihkan energi dari pengereman regeneratif • Biaya perawatan dan operasional yang lebih rendah • Lebih mudah untuk di produksi • <i>Quiet operation</i> • Pasokan energi dapat dilokalisasi di sebagian besar dunia 	<ul style="list-style-type: none"> • Harga baterai cukup mahal Berat baterai berdampak pada berat kendaraan Waktu yang dibutuhkan untuk mengisi ulang Kebutuhan infrastruktur baru (misalnya, pengisi daya)

2.3 Model Manajemen Daya Baterai

2.3.1 Model Manajemen Daya dengan Menggunakan *Dynamic Programming (DP)* [29]

Dynamic Programming (DP) adalah metode optimasi yang memberikan jaminan untuk mendapatkan strategi manajemen daya optimal global untuk HEV selama waktu yang ditentukan jika siklus mengemudi terkait diketahui sebelumnya. Oleh karena itu, hasil DP dapat dilihat sebagai batas atas kinerja untuk mengembangkan strategi manajemen daya. Sebaliknya, metode optimasi instan seperti *Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)* dan *Equivalent Fuel Consumption Control*.

Strategy (EFCOCS) tidak dapat menjamin optimalitas global, tetapi dapat menghasilkan kinerja yang mendekati optimal. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa dengan menggunakan DP kerugian energi baterai dapat dikurangi saat *plug-in* HEV dioperasikan di bawah mode *Charge Depleting* (CD) di mana nilai SOC yang lebih rendah dicapai hanya pada rute akhir. Selain itu, durasi waktu pada SOC baterai rendah dapat dikurangi untuk pengoperasian mode CD, yang dapat menguntungkan masa pakai baterai. Karena masa pakai baterai bergantung pada total keluaran energi yang dapat ditoleransi oleh bahan kimia aktif, baterai akan cepat rusak jika baterai selalu bekerja pada SOC rendah. Meskipun hasil DP non causal dan tidak dapat diterapkan secara *real-time*, dengan referensi desain aturan, aturan kontrol ini terbukti memiliki kinerja kontrol yang baik dan dapat diimplementasikan untuk kontrol secara *real-time*.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f(x(k), u(k)) \\ x &= SOC \\ u &= P_{gs_elec} \end{aligned} \quad (1)$$

Di mana variabel status x adalah baterai SOC; dan input kontrol u adalah kebutuhan daya listrik untuk genset. Untuk mendapatkan kebijakan kontrol optimal untuk kendaraan listrik jarak jauh (RE-EV) untuk mengurus baterai SOC di akhir rute, masalah optimasi batas dua titik didefinisikan dalam makalah ini dengan status awal dan akhir sebagai 80% dan 20% SOC, masing-masing. Tujuan dari masalah optimasi ini adalah untuk menemukan kebijakan pengendalian optimal $u^*(k)$ pada pola penggerak tertentu untuk meminimalkan fungsi biaya sebagai:

$$J_{DP} = \sum_{k=0}^{N-1} L_{inst}(x(k), u^*(k)) \quad (2)$$

di mana N adalah durasi siklus mengemudi; dan L_{inst} adalah fungsi biaya sesaat. Untuk mengevaluasi strategi manajemen daya berorientasi kehilangan energi bahan bakar dan berorientasi pada kehilangan energi baterai, dua fungsi biaya seketika yang berbeda—kerugian energi baterai L_{inst}^b dan kerugian energi bahan bakar L_{inst}^f —didefinisikan seperti dalam Persamaan (3) dan (4).

$$L_{inst}^b = \int_k^{k+1} R_{tot} i_b^2 dt \quad (3)$$

$$L_{inst}^f = \int_k^{k+1} (\dot{m}_f Q_{HV} - 2\pi T_{eng} N_{eng}) dt \quad (4)$$

di mana i_b adalah arus baterai; \dot{m}_f adalah laju aliran massa bahan bakar mesin; Q_{HV} adalah nilai kalor bahan bakar; dan T_{eng} dan N_{eng} masing-masing adalah torsi dan kecepatan mesin. Empat jenis kendala harus diperhatikan selama proses optimasi. Tipe I adalah dinamika sistem yang didefinisikan oleh persamaan dinamika sistem sebagai Persamaan (1). Untuk memastikan operasi yang aman, jenis kendala kedua adalah batas dinamika fisik setiap komponen sebagai berikut:

$$\begin{aligned} SOC_{min} &\leq SOC(k) \leq SOC_{max} \\ P_{b.chg}(SOC(k)) &\leq P_b(k) \leq P_{b.dischg}(SOC(k)) \\ T_{m.min}(\omega_m(k), SOC(k)) &\leq T_m(k) \\ &\leq T_{m.max}(\omega_m(k), SOC(k)) \\ T_{gs.min}(\omega_{gs}(k)) &\leq T_{gs}(k) \leq T_{gs.max}(\omega_{gs}(k)) \\ \omega_{gs.min} &\leq \omega_{gs}(k) \leq \omega_{gs.max} \end{aligned} \quad (5)$$

Dimana P_b adalah daya baterai yang positif untuk pengosongan baterai dan negatif untuk pengisian baterai; $P_{b.dischg}$ dan $P_{b.chg}$ masing-masing adalah batas daya untuk pemakaian dan pengisian baterai; T_m adalah torsi motor; T_{gs} dan ω_{gs} masing-masing adalah torsi dan kecepatan putar genset yang harus dibatasi untuk memenuhi kendala operasi mesin dan generator.

2.3.2 Model Manajemen Daya Menggunakan *Pontryagin's Minimal Principle* (PMP)[37]

PMP memperkenalkan variabel *co-state*, yang memiliki efek yang sama dengan *equivalent factor* (EF) di ECMS. Peran PMP adalah mengalokasikan biaya penggunaan listrik dan mengubahnya menjadi konsumsi bahan bakar yang setara. EF ECMS atau status bersama PMP bergantung pada siklus mengemudi, yang membatasi aplikasi online. Banyak peneliti telah mengusulkan metode yang berbeda untuk menentukan parameter ini termasuk prediksi siklus mengemudi, pengenalan pola mengemudi dan *feed back* baterai

SOC. Menyesuaikan variabel *co-state* melalui umpan balik SOC adalah metode yang paling umum. Untuk biaya berkelanjutan EMS, referensi nilai SOC tetap diperlukan, sedangkan lintasan referensi SOC diperlukan dalam biaya mengkonsumsi EMS.

Tabel 2. 3 Algoritma untuk Mencari *Co-State* Optimal

Step 1	Catat urutan prediksi kecepatan $v_p[t_k + 1 : 1 : t_k + H_p]$.
Step 2	Inisialisasi: $\lambda_{min} = -1000, \lambda_{max} = 0, \delta = 0.005, N_{max} = 15, N = 0$.
Step 3	Perbarui: $\lambda = \frac{\lambda_{min} + \lambda_{max}}{2}, i = 1, N = N + 1$.
Step 4	<p>(a) Berdasarkan $F_t = m \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho C_d A_f v^2 + mgf \cos(\alpha) + mg \sin(\alpha)$</p> $T_w = r \cdot F_t$ $w_w = \frac{v}{r}$ $T_m = \begin{cases} \frac{T_w}{\eta_{fd} \cdot R_{fd}}, T_w \geq 0 \\ \eta_{fd} \cdot \frac{T_w}{R_{fd}}, T_w < 0 \end{cases}$ $w_m = w_w \cdot R_{fd}$ $P_{bus} = \begin{cases} T_m \cdot \frac{w_m}{\eta_m}, T_m \geq 0 \\ \eta_m \cdot T_m \cdot w_m, T_m < 0 \end{cases}$ <p>Hitung nilai <i>bus demand power</i> $P_{bus}(t_k + i)$;</p> <p>(b) Berdasarkan $H(SOC^*(t), P_{fc}^*(t), \lambda^*(t)) \leq H(SOC^*(t), P_{fc}(t), \lambda^*(t))$ Temukan daya keluaran optimal untuk FCS $P_{fc}^*(t_k + i)$;</p> <p>(c) Terapkan $P_{fc}^*(t_k + i)$ pada $SOC^*(t) = \frac{\partial H(SOC^*(t), P_{fc}^*(t), \lambda^*(t))}{\partial \lambda} = f(SOC^*(t), P_{fc}^*(t))$</p> <p>(d) <i>Step time</i> selanjutnya: $i = i + 1$.</p>
Step 5	<p>Jika $i < H_p$, lompat ke step 4;</p> <p>Jika $i \geq H_p$ & $SOC(t_k + H_p) - SOC_{ref} < \delta$, lompat ke step 6;</p> <p>Jika $i \geq H_p$ & $SOC(t_k + H_p) < SOC_{ref}$, maka $\lambda_{max} = \lambda$, lompat ke step 3;</p> <p>Jika $i \geq H_p$ & $SOC(t_k + H_p) > SOC_{ref}$, maka $\lambda_{min} = \lambda$, lompat ke step 3;</p> <p>Jika $N = N_{max}$, lompat ke step 6.</p>
Step 6	Output λ

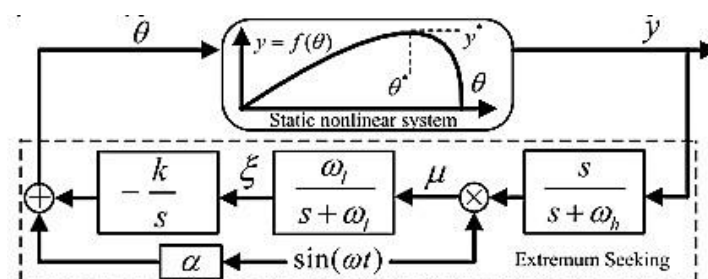
PMP adaptif yang dikombinasikan dengan prediksi kecepatan berbasis Markov yang ditingkatkan diusulkan untuk *Fuell Cell Hybrid Vehicle* (FCHV). Kontribusi dapat diringkas sebagai berikut: pertama, PMP yang dikombinasikan dengan prediksi kecepatan di FCHV dan mempertimbangkan daya tahan *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Kedua,

prediksi kecepatan berbasis Markov yang ditingkatkan diusulkan dengan mempertimbangkan perilaku mengemudi di bawah pola mengemudi yang berbeda, yang menunjukkan akurasi prediksi yang baik dibandingkan dengan prediksi kecepatan berbasis Markov tradisional. Ketiga, strategi yang diusulkan cocok untuk kondisi mengemudi yang kompleks dan dapat mengidentifikasi pola mengemudi online, memilih prediktor kecepatan yang sesuai berdasarkan hasil identifikasi, serta penggunaan algoritma biner.

Akibatnya, keadaan akhir di akhir batas prediksi ditentukan oleh *co-state* (λ). Metode pencarian biner digunakan untuk menemukan *co-state* optimal yang mengarah ke keadaan akhir tertentu di ujung batas prediksi. Algoritma menemukan *co-state* optimal pada langkah waktu t_k diringkas sebagai Tabel 2. 3, di mana *simple time* adalah $1s$, v menyatakan kecepatan kendaraan, F_t adalah gaya traksi, α mewakili sudut kemiringan jalan, T_w dan T_m masing-masing merupakan torsi dari roda dan motor, w_w dan w_m masing-masing adalah kecepatan rotasi roda dan motor, η_m merupakan nilai efisiensi motor, δ adalah kesalahan yang dapat diterima pada keadaan akhir, H_p adalah panjang prediksi, dan N_{max} adalah *maximum number of iterations*.

2.3.3 Model Manajemen Daya Menggunakan Metode *Fractional-Order Extremum Seeking* (ES) [38]

Metode ES merupakan algoritma optimasi adaptif online, yang dapat digunakan secara efektif dalam aplikasi *Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles* (FCHEVs). Metode ES adalah skema kontrol loop tertutup adaptif yang dapat digunakan untuk menemukan nilai ekstrem dari sistem nonlinier statis, skema ES konvensional yang khas ditunjukkan pada Gambar 2. 2.



Gambar 2. 2 Skema ES Konvensional

Dibandingkan dengan metode *traditional integer-order* ES, metode yang disajikan menggunakan *fractional-order calculus* berbasis aproksimasi Oustaloup mencapai titik kestabilan dengan lebih cepat dan ketahanan yang lebih tinggi.

Turunan dan integral dari *fractional-order* memberikan kemampuan untuk meningkatkan pengontrol orde integer; sehingga lebih objektif dan orisinal untuk mengungkapkan sifat operator kalkulus, dan memberikan lebih banyak faktor untuk mengatur parameter pengontrol terbaik untuk meningkatkan kinerja kontrol. Sebagai algoritma yang penting dan efisien, pendekatan Oustaloup menggunakan beberapa filter orde integer untuk pendekatan *fractional-order calculus*. Pendekatan aproksimasi Oustaloup digunakan untuk *fractional-order calculus*, dimana rentang frekuensi ditentukan dengan $[\omega_b, \omega_h]$, sedangkan faktor turunan *fractional-order* s^α didapat dengan persamaan berikut:

$$K(s) = \left(\frac{bs}{d\omega_b}\right)^\alpha \left(1 + \frac{-ds^2 + d}{ds^2 + b\omega_h s}\right)^\alpha \quad (6)$$

Dimana b dan b merupakan faktor konstan. Persamaan (6) dapat ditulis dengan menggunakan orde pertama *Taylor expansion*:

$$\left(\frac{bs}{d\omega_b}\right)^\alpha \left[1 + \alpha \frac{-ds^2 + d}{ds^2 + b\omega_h s} + \frac{\alpha^2 - \alpha}{2} \left(\frac{-ds^2 + d}{ds^2 + b\omega_h s}\right)^2\right] \quad (7)$$

dengan demikian, faktor turunan *fractional-order* s^α dinyatakan oleh:

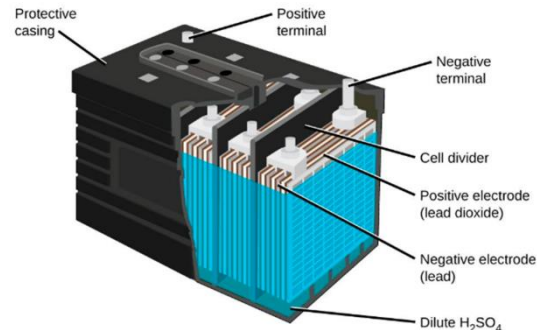
$$s^\alpha = \left(\frac{d\omega_b}{b}\right)^\alpha \left(\frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1 - \alpha)s^2 + b\omega_h s + d\alpha}\right) K(s) \quad (8)$$

2.4 Baterai

Baterai merupakan sumber tegangan arus searah yang terdiri dari dua atau lebih sel elektrokimia yang dihubungkan secara seri atau paralel untuk mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Terdapat dua jenis baterai, yakni Baterai primer yang tidak dapat diisi ulang dan Baterai sekunder yang dapat

diisi ulang[58]. Lead acid, nikel-kadmium, nikel-logam hidrida, lithium ion dan polimer lithium-ion merupakan baterai isi ulang yang umum digunakan[17].

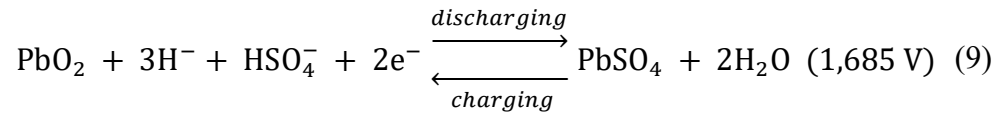
2.4.1 Baterai Lead Acid



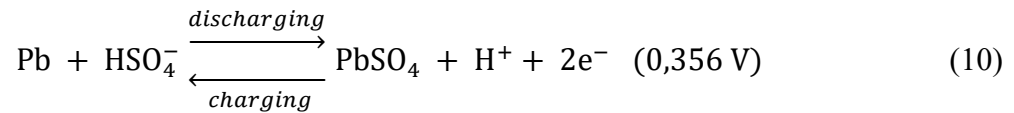
Gambar 2. 3 Struktur Baterai Lead Acid[59]

Baterai lead acid dengan struktur yang dapat dilihat pada Gambar 2. 3, dan karakteristik yang dimuat pada Tabel 2. 4 banyak digunakan sebagai baterai penyimpanan atau baterai sekunder. Bahan yang digunakan untuk sel penyimpanan ini adalah timbal peroksida (PbO_2), timbal spons (Pb) dan asam sulfat encer (H_2SO_4). Plat positif baterai asam timbal terbuat dari PbO_2 (zat keras rapuh berwarna coklat tua). Pelat negatif baterai asam timbal terbuat dari timbal murni yang dalam kondisi spons lembut. H_2SO_4 encer dan air memiliki perbandingan 1:3. Pelat PbO_2 dan pelat timah spons dicelupkan ke dalam asam sulfat encer. Sebuah beban terhubung secara eksternal antara dua pelat ini. Dalam asam H_2SO_4 encer, molekul asam, terpecah menjadi ion hidrogen positif (H^+) dan ion sulfat negatif (SO_4)[60]. Berikut ini adalah reaksi-reaksi yang terjadi pada sel:

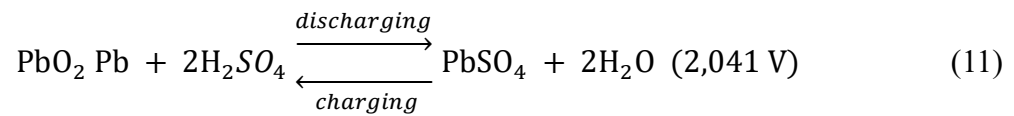
Pada *positive electrode*:



Pada *negative electrode*:



Reaksi keseluruhan sel:



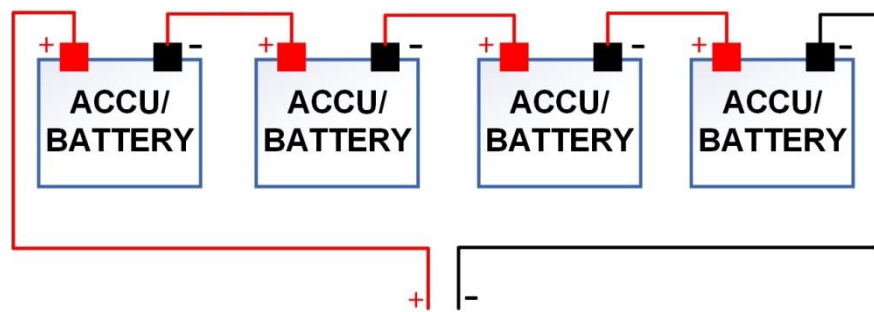
Tabel 2. 4 Karakteristik Baterai Lead Acid

Harga (\$/kWh) [61]	50-150
Tegangan Nominal (V)[62]	2.0
Tingkat Energi (MWh)[61]	0.001-40
Rasio Energi (Wh/kg)[61]	30-50
Kepadatan Daya (W/kg)[62]	180
DOD (%) [61]	70
Efisiensi (%) [61]	70-80
Self-discharge rate (%/bulan)[62]	5
Suhu Kerja (°C)[62]	-20 s/d 50
Masa Pakai (Tahun)[61]	5-15

2.4.2 Koneksi Antar Baterai

2.4.2.1 Koneksi Baterai Secara Seri

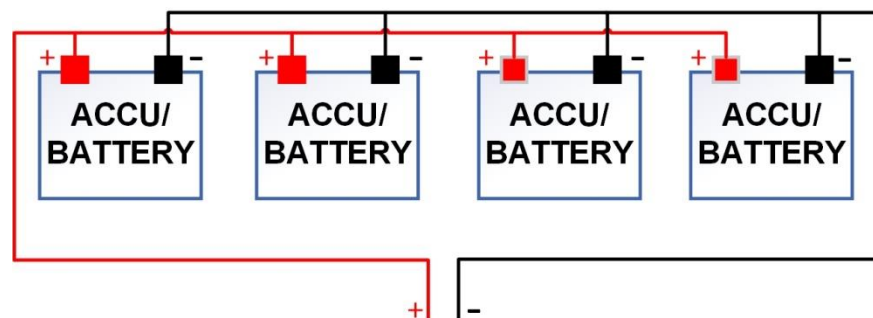
Definisi khas dari koneksi seri adalah susunan sel dalam baterai yang dibuat dengan menghubungkan terminal positif setiap sel ke terminal negatif sel berikutnya sehingga tegangannya bersifat aditif (bertambah) seperti yang tampak pada Gambar 2. 4. Definisi tersebut mencakup susunan seri yang paling umum, di mana kapasitas baterai sama dengan kapasitas sel tunggal dan tegangan nominal baterai sama dengan tegangan sel nominal dikalikan jumlah sel[63].



Gambar 2. 4 Koneksi Baterai Secara Seri

2.4.2.2 Koneksi Baterai Secara Paralel

Koneksi baterai secara paralel adalah di mana semua polaritas dari jenis yang sama saling di hubungkan seperti yang tampak pada Gambar 2. 5. Bentuk paling dasar dan umum dari koneksi secara paralel adalah sambungan pelat untuk membentuk tumpukan elektroda positif atau negatif dari sel prismatic yang menghubungkan beberapa pelat identik ke tali atau batang pengumpul, untuk selanjutnya dihubungkan ke *terminal post*[63].



Gambar 2. 5 Koneksi Baterai Secara Paralel

2.5 *Battery Management System (BMS)*[64]

Dalam EV atau HEV, manajemen baterai harus berinteraksi dengan sejumlah sistem *on-board* lainnya, dan harus bekerja secara *real time* dalam kondisi pengisian/pengosongan yang berubah dengan cepat saat kendaraan berakselerasi dan mengerem, dan harus bekerja di lingkungan yang keras dan tidak terkendali .

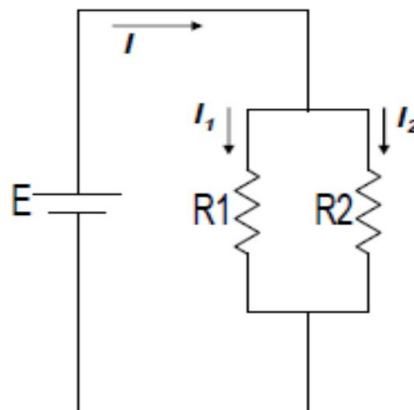
BMS harus mengelola sistem di seluruh siklus operasi kendaraan EV/HEV, dan harus memastikan fungsi-fungsi berikut:

- Mengumpulkan informasi dari sensor dalam baterai: arus, tegangan, suhu, dll. Informasi tersebut diproses oleh BMS untuk memastikan pengoperasian baterai yang benar.
- Mengontrol pengisi daya untuk memastikan pengisian baterai yang tepat. Pengisi daya dapat berupa *on-board* atau di luar *board*. Kontrol dirancang untuk bereaksi terhadap data dari sensor yang terkait dengan setiap modul baterai, dan merespons sesuai dengan parameter atau algoritme khusus di komputer. Kontrol pengisi daya biasanya dilakukan melalui bus komunikasi kendaraan, yang memungkinkan dialog dengan peralatan terpasang lainnya.
- Mengelola keseimbangan sel untuk memastikan kinerja baterai yang optimal. Penyeimbangan diperlukan dalam baterai multi-sel: sel terlemah membatasi kinerja total baterai. BMS mengontrol perangkat elektronik penyeimbang yang terintegrasi pada setiap papan telemetri sesuai dengan strategi atau algoritma yang telah ditentukan.
- Kontrol keamanan: menghindari *over-charge* atau *over-discharge* atau anomali besar lainnya yang dapat terjadi jika terjadi kegagalan baterai, peralatan tambahan atau lingkungan sekitarnya. Tindakan sistem elektronik dapat berupa fisik (mematikan baterai secara darurat) atau informasional (melaporkan masalah kepada pengguna).
- Melaporkan status baterai: komunikasi informasi (alarm, pengukur, dll.) kepada pengguna dan peralatan terpasang lainnya melalui bus komunikasi.
- Manajemen termal baterai: BMS memantau suhu sel dalam semua mode operasi (penggerak, pengisian daya, dll.) dan mengontrol pompa, kipas, dan pemanas untuk mengatur suhu baterai.
- Komunikasi dengan kendaraan: komputer kendaraan dan pertukaran data BMS melalui bus komunikasi. Bus ini merupakan standar bidang otomotif.

- Pemeliharaan melalui BMS: pengguna akan memiliki kemampuan untuk menghubungkan alat pemeliharaan dan diagnostik untuk melakukan operasi yang diperlukan untuk pemeliharaan baterai.
- Transfer data ke PC laptop, yang dapat memantau dan menyimpan data pengukuran baterai yang dikumpulkan oleh BMS; dengan cara ini, hasilnya dapat diperiksa menggunakan perangkat lunak biasa seperti *spreadsheet*.

2.6 Rangkaian Pembagi Arus

Konsep dasar pembagi arus adalah menggunakan 2 buah atau lebih resistor yang salah satu kakinya dihubungkan menjadi satu ke sumber arus sementara kaki yang lain dihubungkan ke beban yang berbeda. Dasar pembagian arus secara teori dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut.



Gambar 2. 6 Rangkaian Pembagi Arus

Pada rangkaian pembagi arus, berlaku persamaan:

$$I_1 = V_{R1}/R_1 \quad (12)$$

$$V_{R1} = V_{R2} = E \quad (13)$$

$$E = IR_T \quad (14)$$

$$R_T = R_1 // R_2 \quad (15)$$

Dimana I_1 merupakan besar arus yang melewati R_1 yang dapat ditentukan dengan persamaan:

$$I_1 = \frac{R_T}{R_1} I \quad (16)$$

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (17)$$

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad (18)$$

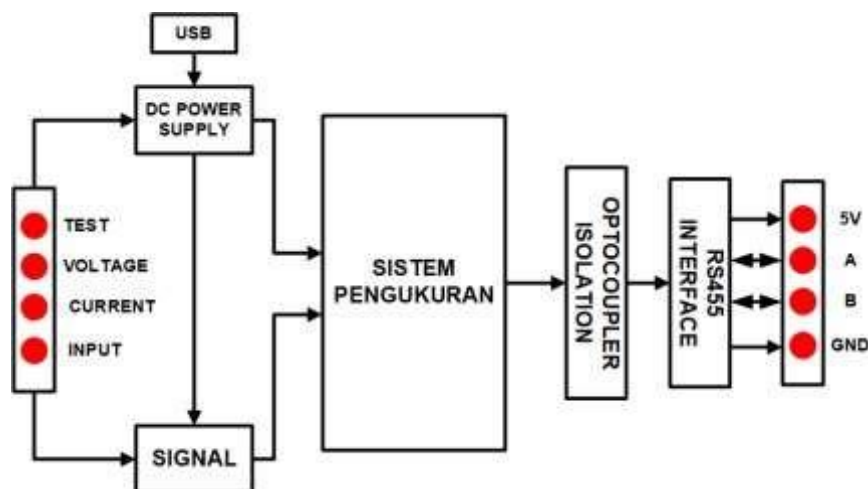
2.7 Depth of Discharge (DOD)

DOD selama setiap siklus penggunaan baterai memiliki dampak yang signifikan terhadap jumlah siklus yang dapat digunakan baterai sebelum habis, dan harus dimodelkan secara akurat untuk mendapat suatu manajemen energi yang praktis. Secara khusus, dengan setiap siklus pengisian dan pengosongan, baterai akan menurun secara progresif dengan kecepatan degradasi tergantung pada DOD, yang didefinisikan sebagai rasio antara total debit dalam satu siklus dan total kapasitas baterai. Faktanya, jumlah siklus yang dapat digunakan baterai seumur hidup berkurang dengan cepat seiring dengan meningkatnya DOD[65].

2.8 Sensor

Sensor adalah perangkat yang menghasilkan sinyal output yang bertujuan untuk mendeteksi perubahan besaran fisik. Dalam definisi yang lebih luas, sensor adalah perangkat, modul, mesin, atau subsistem yang mendeteksi peristiwa atau perubahan di lingkungannya dan mengirimkan informasi ke elektronik lain, oleh karenanya sensor tidak dapat digunakan tanpa perangkat elektronik lainnya. Dengan kemajuan dalam *platform* mikrokontroler yang mudah digunakan, penggunaan sensor telah berkembang di berbagai bidang seperti pengukuran suhu, aliran, dan tekanan[66].

2.7.1 PZEM 017[67]



Gambar 2. 7 Wiring PZEM 017

Modul PZEM 017 digunakan untuk mengukur tegangan DC, arus, daya aktif, frekuensi dan konsumsi energi, dimana data dibaca melalui antarmuka RS485. Untuk pengukuran arus PZEM-017 memiliki rentang pengukuran 50A,100A, 200A,300A (tergantung pada spesifikasi *module*), dengan resolusi 0,01 A, serta akurasi pengukuran 1 %. Untuk rentang pengukuran tegangannya 0,05 V – 300 V (apabila tegangan yang diuji < 7 V gunakan mode catu daya independen), untuk resolusi dan akurasi pengukurannya sama dengan pada saat pengukuran arus. Dan untuk pengukuran daya memiliki rentang pengukuran 0,2 – 90 kW, untuk resolusi dan akurasinya sama. Untuk konsumsi energi rentang pengukurannya 0-9999 kWh, memiliki resolusi 1Wh dan akurasi pengukuran: 1%. Ambang tegangan dapat diatur, dan dibagi menjadi ambang tegangan tinggi dan ambang tegangan rendah. Ambang tegangan tinggi *default* adalah 300V, ambang tegangan rendah *default* adalah 7V. *Wiring* untuk PZEM 017 dapat dilihat pada Gambar 2. 7.

2.9 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah komputer *chip* tunggal yang mencakup setidaknya mikroprosesor, memori, dan modul I/O. Tergantung pada kerumitannya, beberapa mikrokontroler menyertakan komponen tambahan seperti *counter*, *timer*, *interrupt control circuits*, modul komunikasi serial, *analog-to-digital converter*, dan modul pemrosesan sinyal digital. Oleh karena

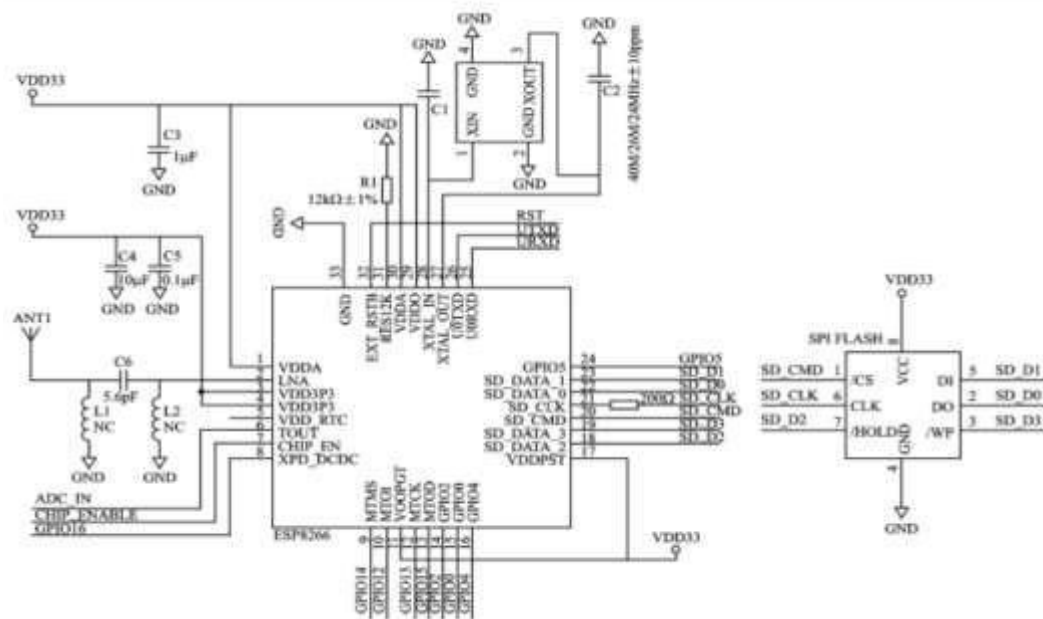
itu, mikrokontroler dapat berupa apa saja, mulai dari pengontrol tertanam *chip* tunggal yang kecil hingga sistem komputer yang besar dan kompleks. Mikroprosesor berbeda dari mikrokontroler karena memerlukan *chip* pendukung eksternal tambahan seperti memori dan sirkuit input/output sebelum dapat digunakan sebagai suatu *controller*[68].

2.8.1 Node MCU (ESP8266) [69]

ESP8266 adalah *System on a Chip* mikrokontroler, dengan harga rendah dan sepenuhnya dapat diprogram dengan Wi-Fi *onboard*. ESP8266 memiliki delapan buah *male pins* 0,1 inch yang dapat dengan mudah digunakan dengan kabel *jumper* untuk konfigurasi awal dan pengujian pada *protoboard*, maupun penyolderan ke *board*. *Pinout* yang dimiliki oleh

ESP8266 ditampilkan pada Gambar 2. 8, pin tersebut antara lain termasuk VCC (3,3 V) dan GND (*Ground*), TX/RX (*Transmit/Receive*) untuk komunikasi serial, dan empat pin kontrol RST (*Reset*), CH_PD (*Chip Power Down*), GPIO0 dan GPIO2 (*General Purpose Input/Output*). Adapun yang membuat chip ini sangat berguna dalam aplikasi IoT adalah fleksibilitasnya yang ekstrem, karena memiliki tiga mode operasional, yakni:

1. Wi-Fi *Access Point* (AP), dengan komunikasi dua arah yang dibuat antara ESP8266 dan perangkat eksternal – umumnya MCU.
2. *Station mode* (STA), bertindak sebagai perangkat mandiri yang terhubung ke Wi-Fi *Access Point* eksternal.
3. Gabungan mode AP dan STA.

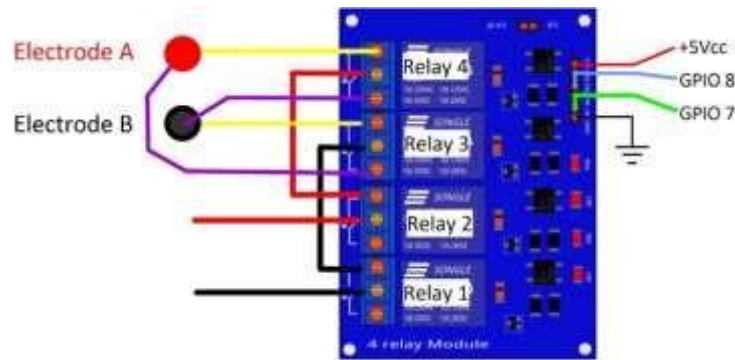


Gambar 2. 8 ESP8266 *Circuit Design*[70]

2.10 Relay

Prinsip *relay* menyerupai saklar yang dioperasikan secara elektrik, yang terdiri dari satu set terminal input untuk sinyal kontrol tunggal atau ganda, dan satu set terminal kontak operasi. Perbedaan diantara *relay* dan saklar adalah saklar hanya memiliki beberapa fungsi, seperti membuat kontak, memutuskan kontak, atau kombinasinya, sedangkan *relay* dapat digunakan untuk mengontrol rangkaian dengan sinyal dengan daya rendah, atau jika terdapat beberapa rangkaian yang harus dikendalikan oleh satu sinyal[71].

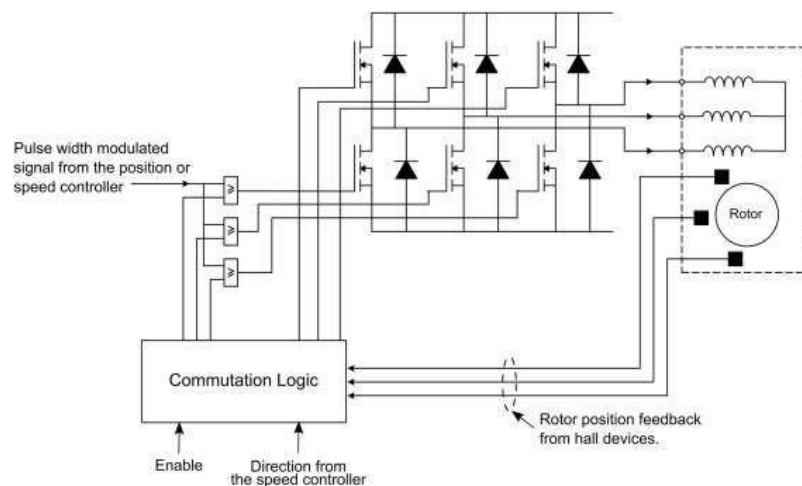
Relay tradisional menggunakan elektromagnet untuk memutuskan atau menghubungkan kontak, tetapi prinsip operasi *relay* saat ini telah dikembangkan, seperti *solid-state relays* yang menggunakan sifat semikonduktor untuk kontrol tanpa bergantung pada bagian yang bergerak, kemudian *protective relays* yang dapat digunakan untuk melindungi rangkaian listrik dari beban berlebih atau gangguan[71], serta *relay channel* yang merupakan model probabilitas komunikasi antara pengirim dan penerima yang dibantu oleh satu atau lebih sambungan relai perantara[72] seperti yang tampak pada Gambar 2. 9.



Gambar 2. 9 4-Channel Relay Module Board[74]

2.11 Motor Brushless DC (BLDC)

Motor BLDC menghilangkan kelemahan utama dari motor DC konvensional yakni komutator dan sikat, dengan menggunakan rotor magnet permanen dan medan putar. Namun, motor BLDC memiliki kekurangan menurut segi ukuran dan kekuatannya serta memerlukan pengontrol *drive* dan antarmuka yang kompleks agar pada bagian stator motor dihasilkan medan putar. Perbedaan motor BLDC dengan motor DC konvensional dapat diamati pada Tabel 2. 5. Prinsip operasi motor BLDC mirip dengan motor *stepper*, tetapi dirancang untuk rotasi terus menerus[73].



Gambar 2. 10 Blok Diagram Motor BLDC[74]

Struktur motor DC brushless umumnya terdiri dari bodi motor, sensor posisi rotor dan komutator elektronik tiga bagian dengan blok diagram seperti yang tampak pada Gambar 2. 10. Bodi motor termasuk rotor dan stator. Posisi kutub rotor dideteksi oleh sensor posisi. Sinyal posisi kutub rotor diubah

menjadi sinyal listrik di bawah aksi sensor. Setelah rangkaian logika diproses, pergantian belitan stator dikendalikan. Sensor posisi motor DC brushless memiliki tiga jenis yaitu tipe elektromagnetik, tipe fotolistrik dan sensor posisi *Hall*. Sensor posisi *Hall* tidak hanya dapat mendeteksi medan magnet dan perubahan medan magnet, tetapi juga dapat digunakan di lingkungan medan magnet yang kompleks[75].

Tabel 2. 5 Perbandingan Motor DC Konvensional dan Motor BLDC[76]

Parameter	Konvensional	BLDC
Struktur Mekanik	Medan magnet pada stator	Medan Magnet pada rotor, Mirip dengan motor sinkron AC
Fitur Khas	Respon cepat dan kemampuan kontrol yang sangat baik	Tahan lama, Perawatan mudah (Biasanya tidak diperlukan pemeliharaan)
Metode Pergantian	Kontak mekanis antara sikat dan komutator	<i>Elektronic switching</i> menggunakan transistor
Metode Deteksi Posisi Rotor	Terdeteksi secara otomatis oleh sikat	Elemen <i>Hall</i> , <i>Encoder</i> optik, dll.
Metode Pembalikan	Kebalikan dari terminal tegangan	Mengatur ulang <i>logic sequencer</i>

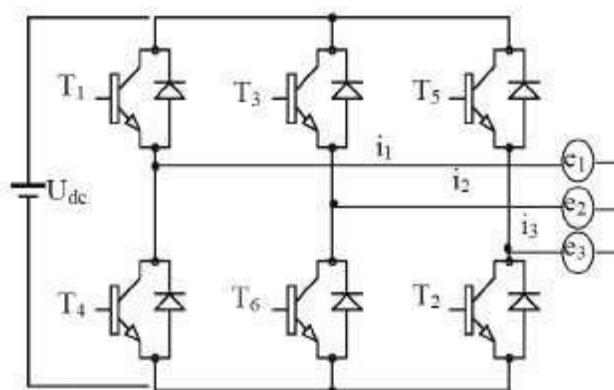
2.10.1 Prinsip Kerja Motor BLDC

Tidak seperti motor DC konvensional, pergantian motor BLDC dikendalikan secara elektronik. Untuk memutar motor BLDC, belitan stator harus diberi energi secara berurutan. Penting untuk mengetahui posisi rotor untuk memahami belitan mana yang akan diberi energi mengikuti urutan pemberian energi. Posisi rotor dideteksi menggunakan sensor efek *Hall* yang disematkan ke stator. Sebagian besar motor BLDC memiliki tiga sensor *Hall* yang tertanam ke dalam stator di ujung motor. Setiap kali kutub magnet rotor lewat di dekat sensor Hall, mereka memberikan sinyal tinggi atau rendah, yang menunjukkan kutub N atau S lewat di dekat sensor. Berdasarkan kombinasi ketiga sinyal sensor *Hall* ini, urutan pergantian yang tepat dapat ditentukan[76].

2.10.2 Kontroler Motor BLDC (*Motor Driver*)

Kontroler pada motor DC brushless berperan sangat penting dan dapat dikatakan sebagai penunjang utama operasi motor BLDC karena motor BLDC membutuhkan suatu *trigger* pulsa yang masuk ke bagian elektromagnetik (stator) motor BLDC untuk memberikan pengaturan besarnya arus yang mengalir sehingga putaran motor dapat diatur secara akurat[76]. Berikut merupakan bagian-bagian dari kontroler motor BLDC:

2.10.2.1 *Inverter Six Step Comutation*



Gambar 2. 11 *Inverter Six Step Comutation*[77]

Motor BLDC mengandalkan pergantian elektronik. *Driver* memonitor posisi rotor dan membangkitkan lilitan yang sesuai untuk mempertahankan sudut pergantian sekitar 90° . Pada motor DC konvensional, sudut pergantian dipertahankan dengan mengganti fase masuk dan keluar secara mekanis. Motor DC konvensional memiliki banyak fase, setiap fase hanya mewakili beberapa derajat putaran listrik dan torsi dari motor sikat halus. Teknik yang setara digunakan pada motor BLDC dalam metode pergantian yang disebut *six-step* seperti yang tampak pada Gambar 2. 11, tetapi menghasilkan gangguan torsi besar pada setiap transisi karena motor BLDC biasanya hanya memiliki tiga fase[78].

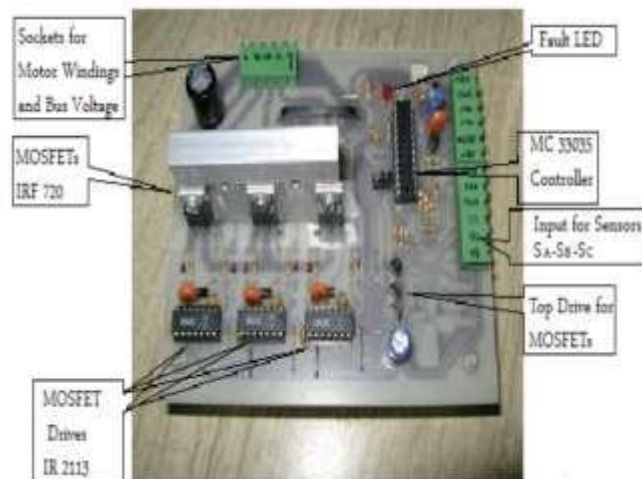
2.10.2.2 *Pulse Width Modulation (PWM)*

Kontrol kecepatan dalam BLDC melibatkan perubahan tegangan yang diterapkan di seluruh fase motor, yang dapat dilakukan dengan menggunakan metode sensor berdasarkan konsep modulasi amplitudo pulsa, PWM, atau

kontrol histeresis. Algoritma kontrol yang umum untuk motor BLDC adalah kontrol arus PWM. Hal ini didasarkan pada asumsi hubungan linier antara arus fasa dan torsi, mirip dengan motor DC konvensional. Oleh karena itu, dengan menyesuaikan arus fasa, torsi elektromagnetik dapat dikontrol untuk memenuhi persyaratan[79].

2.10.2.3 MOSFET[80]

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) adalah bentuk transistor efek medan yang telah menjadi jenis transistor yang paling umum digunakan. Pada MOSFET terdapat tiga terminal, yang disebut *source*, *gate*, dan *drain*, dengan tegangan pada *gate* yang mengendalikan arus antara *source* dan *drain*. Arus yang mengalir di *gate* hampir tak terukur (sangat kecil), oleh karenanya rangkaian *amplifier* menggunakan resistor yang terhubung ke *drain* dan suplai bias tegangan ke *gate* dapat membantu mengatasi permasalahan arus yang kecil tersebut. Gambar 2. 12 memuat pengaplikasian MOSFET pada rangkaian *driver* motor BLDC yang berfungsi untuk menstabilkan tegangan pada *driver*.



Gambar 2. 12 Pengaplikasian MOSFET pada Rangkaian *Driver*

Motor BLDC[81]

2.12 Sistem Monitoring

Sistem *monitoring* merupakan sistem yang didesain untuk bisa memberikan *feedback* ketika program sedang menjalankan fungsinya. *Feedback* dimaksudkan untuk memberikan informasi atau keadaan sistem pada

saat itu. *Monitoring* baterai sangat penting untuk sebagian besar EV, karena keselamatan, pengoperasian, dan bahkan kehidupan penumpang bergantung pada sistem baterai. Oleh karenanya, *monitoring* baterai adalah fungsi utama dari *Battery Management System* (BMS) yang bertujuan untuk memeriksa dan mengontrol status baterai agar tetap dalam kondisi operasi aman yang telah ditentukan[82].

2.11.1 *Human Machine Interface* (HMI)

HMI menghubungkan mesin dengan perangkat keras input fisik seperti *keyboard*, *mouse*, atau sensor, dan perangkat keras keluaran seperti *monitor* komputer, *speaker*, dan *printer*. Perangkat yang mengimplementasikan HMI disebut *human interface device* (HID) [83]. Pada sistem *monitoring* EV, HMI digunakan untuk menampilkan data berupa arus, tegangan, daya, suhu, SOC baterai, dan sebagainya. Tampilan untuk HMI ditampilkan pada Gambar 2. 13.

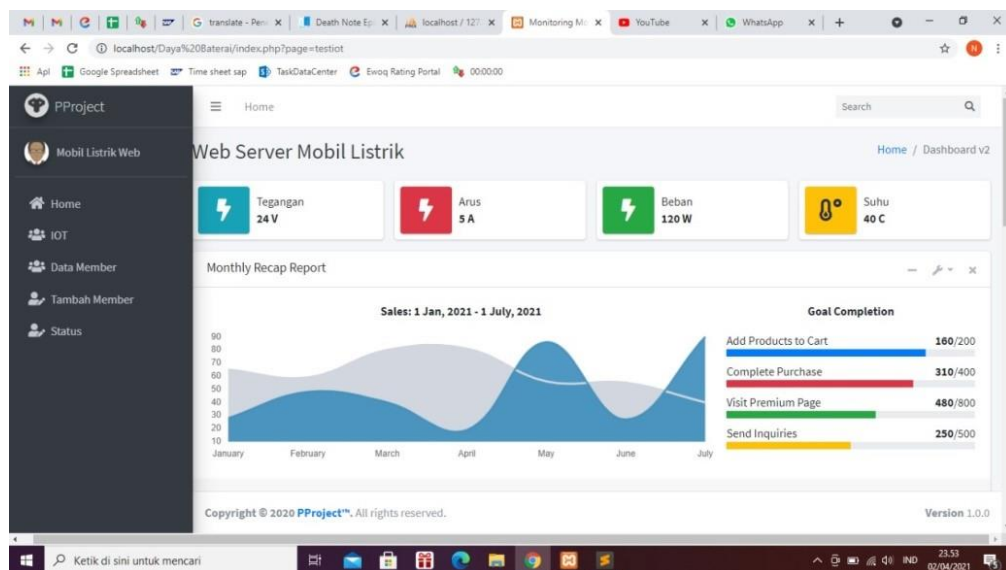


Gambar 2. 13 HMI Display[84]

2.11.2 *Monitoring* Berbasis Web

Teknologi web telah mengalami perkembangan yang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Secara khusus, *browser* web telah banyak berkembang karena peningkatan JavaScript, CSS3, dan HTML5. Oleh karena itu, tersedia solusi perangkat lunak berbasis web yang lebih bervariasi dengan berbagai fungsi yang meningkat. Dengan menggunakan *Responsive Web Design* (RWD), sebuah teknologi untuk menampilkan konten tanpa mengubah ukuran pada layar yang berbeda[85]. Untuk memungkinkan pemantauan EV secara *real-time*, sinyal dari berbagai sensor yang terhubung ke mikrokontroler diperlukan.

Monitoring yang ditampilkan menggunakan perangkat keras akan memakan lebih banyak biaya dan ruang pada EV sehingga kurang efektif. Sedangkan dengan menggunakan sistem *monitoring* berbasis web pengguna dapat mengakses beragam perangkat dengan lebih mudah karena satu *server* web untuk menampilkan data dari berbagai sensor sekaligus seperti yang tampak pada Gambar 2. 14.



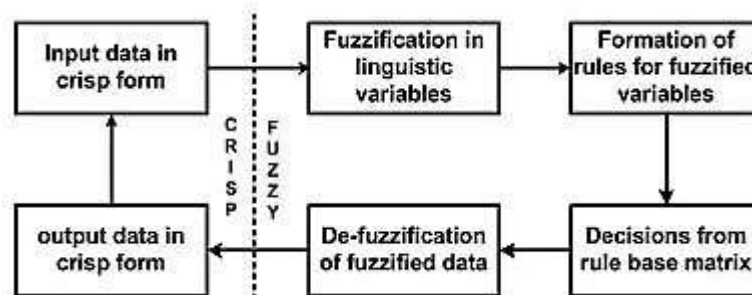
Gambar 2. 14 Tampilan Web Server

2.13 Fuzzy Logic Controller (FLC)[86]

FLC pertama kali diperkenalkan oleh Profesor Lotfi Zadeh pada tahun 1965 dan telah mendapatkan popularitas karena kemampuan beradaptasi dan kinerjanya yang tinggi. FLC menggunakan informasi linguistik atau kualitatif untuk algoritma kontrolnya. Oleh karena itu, FLC mampu mengatasi kesulitan informasi yang tajam dalam hal nilai numerik. FLC bekerja dalam rentang informasi tertentu dan menyimpulkan dari *rule base*. *Rule base* adalah representasi dari data historis, dan konsekuensinya serta tindakan yang diambil atau diperlukan.

FLC adalah kontrol *range-to-point* atau *range-to-range* yang didasarkan pada rasionalitas multinilai dan mencakup perkiraan alih-alih nilai yang ditentukan dan akurat. Kontroler ini sangat cocok untuk proses

multivariabel dan tidak konsisten, di mana pengukuran input yang tepat dan efeknya sulit dilakukan. FLC mungkin memiliki satu atau beberapa input dan output tergantung pada aplikasinya. Himpunan fuzzy dan penalaran fuzzy digunakan dalam FLC untuk desain dan eksekusinya. Desain FLC mencakup aturan —if ... then ...!, yang didasarkan pada riwayat data yang tersedia dan/atau pengetahuan pakar. Aturan-aturan ini adalah deskripsi linguistik dari perilaku dan karakteristik sistem dengan nilai numeriknya yang tidak tepat. Gambar 2. 15 memiliki tiga tahapan atau blok utama dari FLC.



Gambar 2. 15 Tahapan Utama *Fuzzy Logic Controller*

1. Fuzzifikasi

Pada langkah pertama FLC, nilai-nilai yang tidak tepat dari data masukan diubah menjadi fuzzy, sebuah variabel yang disebut fuzzifikasi. Ini menggunakan semesta wacana yang ditentukan oleh fungsi keanggotaan. Fungsi relasi dapat berupa tipe segitiga, eksponensial, atau Gaussian. Selain itu, untuk sistem yang lebih rumit, lebih dari satu fungsi keanggotaan dalam kombinasi dapat digunakan. Kinerja fungsi keanggotaan tergantung pada sistem di mana ia akan diimplementasikan. Namun, fungsi keanggotaan segitiga adalah yang paling umum.

2. Inferensi atau Interpretasi

Pada langkah kedua FLC aturan dirumuskan dalam variabel linguistik berdasarkan kinerja sistem dan pengalaman sebelumnya. Interpreter digunakan untuk pengambilan keputusan untuk input dan *rule base* yang diberikan.

3. Defuzzifikasi

Pada langkah terakhir FLC, keputusan yang diambil oleh blok inferensi diubah menjadi nilai numerik yang sesuai dan disebut defuzzifikasi.