

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Teori Sepeda Motor Listrik dan Sistem Hybrid

2.1.1 Motor Listrik pada Sepeda Motor Listrik

Sepeda motor listrik merupakan kendaraan yang menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama, menggantikan mesin pembakaran internal yang digunakan pada sepeda motor konvensional. Motor listrik pada sepeda motor bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik, di mana aliran listrik melalui kumparan menghasilkan gaya magnet yang berputar pada rotor, yang kemudian menghasilkan gerakan mekanik. Motor listrik memiliki keuntungan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan mesin pembakaran dalam (Arifwardana, 2024). Dengan efisiensi konversi energi yang bisa mencapai lebih dari 90%, motor listrik dapat mengonversi sebagian besar energi listrik yang diterimanya menjadi energi gerak (Wang et al., 2019a).

Salah satu jenis motor yang paling banyak digunakan pada sepeda motor listrik adalah motor *BLDC (Brushless DC Motor)*. Motor ini sangat efisien karena tidak memiliki sikat yang menyebabkan gesekan, sehingga mengurangi kerugian energi dan memperpanjang umur motor (Setiawan & Hadi, 2020). Motor BLDC bekerja dengan prinsip medan magnet yang diproduksi oleh arus listrik yang mengalir melalui rotor dan stator, menghasilkan gerakan rotasi tanpa adanya kontak langsung. Keunggulan motor BLDC adalah efisiensinya yang tinggi, durabilitasnya yang baik, dan suara yang rendah saat beroperasi (Rokhim et al., 2025).

Pada sepeda motor listrik, efisiensi motor sangat bergantung pada karakteristik baterai yang digunakan, seperti kapasitas, jenis sel, dan kondisi pengisian daya. Oleh karena itu, penggunaan motor listrik yang efisien menjadi salah satu faktor penting untuk memastikan bahwa sepeda motor listrik dapat beroperasi dengan daya tahan yang optimal, tanpa mengurangi performa (Mahendra et al., 2024).

2.1.2 Teori Sistem Hybrid

Kendaraan hybrid menggabungkan dua sumber energi yang berbeda untuk menggerakkan kendaraan, yaitu motor listrik dan mesin pembakaran dalam (ICE). Pada kendaraan hybrid, kedua sumber tenaga ini bekerja bersama-sama untuk

meningkatkan efisiensi dan kinerja kendaraan. Sistem hybrid umumnya terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu *series hybrid* dan *parallel hybrid*.

a) *Series Hybrid*

Pada sistem ini, motor listrik bertanggung jawab sepenuhnya untuk menggerakkan kendaraan, sedangkan mesin pembakaran dalam hanya berfungsi sebagai generator untuk menghasilkan listrik yang digunakan untuk mengisi baterai (Sutrisno & Suryadi, 2021). Hal ini memungkinkan motor listrik beroperasi dengan efisiensi tinggi, karena mesin pembakaran dalam selalu beroperasi pada titik optimal untuk menghasilkan listrik.

b) *Parallel Hybrid*

Pada sistem parallel hybrid, baik mesin pembakaran dalam maupun motor listrik dapat beroperasi secara bersamaan. Sistem ini memberikan fleksibilitas yang lebih besar, di mana motor listrik digunakan pada kecepatan rendah dan mesin pembakaran dalam aktif pada kecepatan tinggi atau saat akselerasi diperlukan (Tavakol et al., 2015). Sistem ini memungkinkan kendaraan untuk beroperasi dengan kedua sumber energi secara efisien, mengoptimalkan konsumsi bahan bakar dan energi listrik.

Kelebihan utama sistem hybrid adalah kemampuannya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan jarak tempuh kendaraan. Dengan menggunakan motor listrik pada kondisi-kondisi tertentu, kendaraan dapat mengurangi konsumsi bahan bakar dan mengurangi emisi karbon (Yang et al., 2017). Oleh karena itu, sistem hybrid menjadi pilihan yang semakin populer dalam pengembangan kendaraan listrik. Gambar 4. Sepeda motor konversi listrik yang menggunakan sistem *hybrid off grid* (Soolany et al., 2025).



Gambar 4. Sepeda motor listrik sistem *hybrid off grid*

2.1.3 Komponen Sistem *Hybrid* pada Sepeda Motor Listrik

Sistem hybrid pada sepeda motor listrik terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja bersama untuk menghasilkan efisiensi energi yang optimal. Komponen-komponen tersebut meliputi:

1. Motor Listrik

Sebagai penggerak utama, motor listrik pada sepeda motor hybrid berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Dalam sistem hybrid, motor listrik dapat bekerja secara independen atau bersamaan dengan mesin pembakaran dalam, tergantung pada kondisi pengoperasian (Anggadewi, 2020).

2. Mesin Pembakaran Dalam (ICE)

Mesin pembakaran dalam pada kendaraan hybrid berfungsi untuk mengisi daya baterai atau memberikan tenaga tambahan saat diperlukan, seperti saat akselerasi atau kecepatan tinggi. Mesin ini bekerja pada titik efisiensi optimal, sehingga konsumsi bahan bakar dapat diminimalkan (Prasetyo et al., 2018).

3. Baterai

Baterai adalah komponen yang menyimpan energi untuk motor listrik. Pada sepeda motor listrik hybrid, baterai berfungsi untuk menyuplai energi listrik yang diperlukan untuk motor listrik. Baterai lithium-ion adalah pilihan yang paling umum karena kapasitas penyimpanan energi yang tinggi dan umur pakai yang lama. Pengelolaan baterai yang baik sangat penting untuk menjaga daya tahan dan efisiensi energi (Budiarto, 2020).

4. Inverter

Inverter berfungsi untuk mengubah arus searah (DC) dari baterai menjadi arus bolak-balik (AC) yang diperlukan untuk motor listrik. Inverter ini juga berperan dalam mengatur aliran energi antara motor listrik dan baterai, memastikan bahwa energi disalurkan secara efisien sesuai dengan kebutuhan penggerak kendaraan.

5. Sistem Manajemen Baterai (BMS)

Sistem manajemen baterai berfungsi untuk memantau dan mengatur kondisi baterai, seperti pengisian, kapasitas, dan suhu. BMS memastikan bahwa baterai beroperasi dalam kondisi yang aman dan optimal, serta menghindari kerusakan akibat overcharging atau overdischarging (Haryanto et al., 2019).

2.1.4 Cara Kerja Sepeda Motor Listrik Hybrid

Pada sepeda motor listrik hybrid, cara kerja sistem energi yang terintegrasi sangat bergantung pada kondisi pengoperasian. Secara umum, berikut adalah cara kerja sistem hybrid pada sepeda motor listrik:

a) Kecepatan Rendah

Pada kecepatan rendah atau saat beroperasi di lalu lintas yang padat, motor listrik akan berfungsi sepenuhnya sebagai penggerak utama. Pada kondisi ini, motor listrik bekerja dengan efisiensi tinggi, menghasilkan torsi yang baik dengan konsumsi daya yang minim (Arifwardana, 2024).

b) Kecepatan Tinggi

Pada kecepatan tinggi, mesin pembakaran dalam akan mulai bekerja untuk memberikan tenaga tambahan. Mesin ini akan mengisi daya baterai atau langsung menyuplai tenaga ke motor listrik, meningkatkan kinerja sepeda motor pada kecepatan tinggi (Zhao et al., 2020).

c) Pengisian Daya

Selain mesin pembakaran dalam, sepeda motor listrik hybrid dapat dilengkapi dengan sistem pengisian daya eksternal, seperti **panel surya** atau **pengisian dari jaringan listrik**, untuk mengisi baterai kendaraan, memungkinkan sepeda motor untuk beroperasi secara mandiri dari jaringan listrik utama (Fan et al., 2016).

2.1.5 Keuntungan dan Tantangan Sistem Hybrid

Sistem hybrid pada sepeda motor listrik menawarkan berbagai keuntungan, di antaranya pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi, serta peningkatan efisiensi energi. Namun, terdapat beberapa tantangan yang harus dihadapi dalam implementasi sistem ini, seperti penambahan bobot akibat komponen tambahan seperti mesin pembakaran dalam dan sistem penggerak. Selain itu, kompleksitas dalam desain sistem hybrid juga memerlukan perhatian khusus dalam perancangan agar kinerja kendaraan tetap optimal (Rasheed et al., 2020).

Meskipun demikian, dengan perkembangan teknologi baterai dan sistem manajemen yang semakin efisien, sepeda motor listrik hybrid memiliki potensi untuk menjadi solusi transportasi yang lebih ramah lingkungan dan lebih efisien dalam jangka panjang (Zhang et al., 2019).

2.2. Karakteristik Baterai dan Konsumsi Daya

2.3.1 Definisi Konsumsi Daya pada Kendaraan Listrik

Konsumsi daya pada kendaraan listrik merujuk pada energi listrik yang digunakan oleh kendaraan selama pengoperasian dari baterai untuk menggerakkan motor listrik, termasuk energi yang dibutuhkan untuk akselerasi, mempertahankan kecepatan, menghadapi resistansi aerodinamis, dan gaya gesekan ban. Konsep konsumsi daya sering dikaitkan dengan satuan energi spesifik seperti Wh/km (watt-jam per kilometer), yang mencerminkan energi yang digunakan untuk menempuh satu kilometer jarak tempuh. Istilah ini berbeda dengan konsumsi bahan bakar pada kendaraan konvensional, karena energi listrik yang digunakan dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk gaya mengemudi, kondisi jalan, dan suhu lingkungan. Salah satu studi telah menunjukkan bagaimana faktor eksternal seperti berat pengendara dan kecepatan rata-rata secara signifikan mempengaruhi konsumsi energi pada sepeda motor listrik saat berkendara nyata di jalan perkotaan (Kusalaphirom et al., 2023).

2.3.2 Perhitungan Konsumsi Daya Dasar

Secara sederhana, konsumsi daya baterai pada kendaraan listrik dapat dihitung melalui hubungan energi (Wh) = tegangan (V) $\times$ arus (A) $\times$ waktu (jam). Dengan mengetahui tegangan nominal dan arus yang ditarik dari baterai selama pengoperasian, maka energi yang terpakai dapat dihitung. Perhitungan seperti ini sering digunakan dalam pengujian karakteristik baterai BLDC dan motor listrik untuk mengetahui konsumsi energi aktual dalam kondisi tertentu. Misalnya, perhitungan konsumsi daya dapat dilakukan berdasarkan arus dan tegangan motor pada kondisi jalan mendatar atau menanjak, yang menunjukkan bahwa konsumsi daya meningkat pada kondisi medan yang lebih menantang (Charoen-amornkitt et al., 2023).

Dalam banyak studi yang melibatkan uji energi aktual, energi konsumsi spesifik juga dikaitkan dengan jarak tempuh, dimana total energi yang digunakan

selama pengujian dibagi oleh jarak yang ditempuh kendaraan. Metode ini memberikan ukuran yang lebih representatif tentang efisiensi energi kendaraan listrik dalam kondisi berkendara nyata dibandingkan sekadar pengukuran arus dan tegangan saja.

2.3.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Konsumsi Daya Baterai

Konsumsi daya pada sepeda motor listrik tidak hanya bergantung pada kapasitas baterai, tetapi juga dipengaruhi oleh berbagai variabel operasional:

1. Berat Kendaraan dan Beban Pengendara

Berat total yang dibawa kendaraan termasuk pengendara dan muatan menambah kebutuhan energi untuk mengatasi gaya gravitasi dan resistensi gerak. Artikel yang mengkaji pengaruh nyata menunjukkan bahwa berat pengendara memiliki pengaruh positif terhadap konsumsi listrik, sedangkan gaya mengemudi juga memengaruhi secara signifikan.

2. Kecepatan Berkendara

Kenaikan kecepatan kasat mata akan meningkatkan konsumsi energi karena gaya hambatan udara (aerodinamis) tumbuh secara kuadrat terhadap kecepatan. Pada kecepatan lebih tinggi, sistem motor dan inverter harus bekerja lebih intensif, sehingga konsumsi listrik menjadi lebih tinggi.

3. Kondisi Jalan

Jalan mendatar memiliki konsumsi daya yang lebih rendah dibandingkan dengan jalan menanjak karena tidak perlu mengatasi gaya gravitasi tambahan. Sejumlah pengujian lapangan menunjukkan adanya peningkatan konsumsi daya baterai saat kendaraan menghadapi medan menanjak dibanding medan datar.

4. Perilaku Berkendara

Percepatan, deselerasi, serta penggunaan aksesoris listrik seperti lampu atau inverter tambahan akan mempengaruhi total konsumsi energi. Perilaku berkendara agresif memicu arus baterai yang lebih tinggi, sehingga mempercepat pengosongan energi baterai dan memperpendek jarak tempuh per pengisian.

Analisis konsumsi real-world pada sepeda motor listrik memperlihatkan bahwa mobilitas nyata di jaringan jalan perkotaan menghasilkan lonjakan konsumsi

energi bila situasi lalu lintas padat atau beragam kecepatan terjadi, yang berdampak langsung terhadap energi rata-rata yang digunakan per kilometer (Yuwono et al., 2024).

2.3.4 Konsumsi Daya Spesifik dan Efisiensi Energi

Konsumsi daya spesifik sering kali diukur sebagai Wh/km, menggambarkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menempuh satu kilometer jarak tempuh. Studi perbandingan antara sepeda motor listrik dan kendaraan bermesin pembakaran dalam menunjukkan bahwa sepeda motor listrik dapat menurunkan konsumsi energi hingga puluhan persen dibandingkan mesin bensin dalam jarak yang sama, serta mengurangi emisi CO₂. Selain itu, konsumsi energi yang lebih rendah berdampak langsung pada penghematan biaya operasi kendaraan listrik dibandingkan kendaraan konvensional.

Pada penelitian lain yang relevan, energi konsumsi dikelompokkan berdasarkan model kendaraan listrik dengan atau tanpa sistem tambahan seperti baterai swap atau panel fotovoltaik. Penelitian semacam ini membandingkan total energi yang digunakan dari sumber utama (grid atau panel surya) untuk mengetahui konfigurasi yang paling efisien. Hasilnya menunjukkan bahwa integrasi sistem energi terbarukan dapat mengurangi kebutuhan energi dari jaringan listrik utama (Ermawati et al., 2024).

2.3.5 Dampak Konsumsi Daya terhadap Performa dan *Range* Kendaraan

Konsumsi daya secara langsung memengaruhi jarak tempuh (*range*) kendaraan listrik per satu siklus pengisian baterai. Range ini merupakan salah satu parameter kunci dalam desain dan pengembangan sepeda motor listrik karena berkaitan dengan kebutuhan pengguna dan arah pengembangan teknologi baterai. Semakin rendah konsumsi energi per kilometer, semakin jauh kendaraan dapat berjalan pada satu kali pengisian baterai penuh. Hal ini juga dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti aerodinamika kendaraan, rolling resistance ban, serta strategi manajemen energi yang diterapkan oleh sistem kontrol kendaraan (Wang et al., 2019b).

Selain itu, konsumsi energi yang rendah membantu memperpanjang umur baterai karena baterai tidak perlu diisi atau dikosongkan secara ekstrem terlalu sering. Situasi pengisian dan pengosongan yang moderat berkaitan dengan umur

siklus baterai yang lebih panjang, yang berarti biaya operasional total kendaraan listrik dapat berkurang selama umur pakai kendaraan.

2.3.6 Perhitungan Energi Konsumsi pada Sepeda Motor Listrik

Perhitungan energi yang dikonsumsi oleh sepeda motor listrik umumnya melibatkan data voltase dan arus baterai selama operasi serta jarak tempuh. Rumus dasar yang digunakan adalah:

$$\text{Energi (Wh)} = V \times I \times t \dots\dots\dots(1)$$

di mana ;

V = tegangan nominal baterai (Volt)

I = arus listrik yang mengalir dari baterai (Ampere)

t = waktu operasional (Jam)

Energi spesifik per jarak tempuh kemudian bisa dihitung sebagai:

$$\text{Energi spesifik (Wh/km)} = \frac{\text{Energi Total (Wh)}}{\text{Jarak (km)}} \dots\dots\dots(2)$$

Pendekatan semacam ini sering digunakan dalam pengujian kendaraan nyata untuk mendapatkan gambaran konsumsi baterai pada kondisi jalan mendatar maupun menanjak, serta dengan variasi beban kendaraan (Simons & Bauer, 2015).

2.3.7 Evaluasi Konsumsi Energi dalam Konteks Transisi Energi

Dalam konteks transisi dari kendaraan konvensional berbahan bakar fosil ke kendaraan listrik, konsumsi energi baterai menjadi salah satu metrik utama yang digunakan tidak hanya untuk evaluasi performa teknis tetapi juga untuk analisis emisi gas rumah kaca (GHG) dan efisiensi sistem energi total (*well-to-wheel*). Analisis energi swapping atau integrasi panel surya menunjukkan bahwa konsumsi total energi tidak hanya berasal dari baterai kendaraan, tetapi juga dari sumber energi yang mendukungnya. Integrasi sistem energi terbarukan dapat membantu menurunkan konsumsi daya dari jaringan listrik utama dan mengurangi emisi terkait produksi energi (Mara et al., 2023).

2.3. Penelitian Terkait pada Kendaraan Listrik dan Pengujian Baterai

Perkembangan penelitian dalam bidang kendaraan listrik (EV) dan pengujian baterai lithium-ion terus mengalami kemajuan pesat, terutama dalam mengoptimalkan kinerja, efisiensi, dan umur pakai baterai yang digunakan dalam kendaraan listrik. Seiring dengan meningkatnya adopsi kendaraan listrik, penelitian tentang performa baterai EV, pengujian kapasitas, dan evaluasi kondisi kesehatan

baterai (SoH) telah menjadi fokus utama dalam memastikan kendaraan listrik dapat beroperasi secara optimal dalam jangka panjang.

Beberapa penelitian, seperti yang dilakukan oleh Voltsi dan Elmasides (2025), menguji baterai lithium-ion menggunakan standar IEC 62660-1 untuk mensimulasikan kondisi pengisian dan pengosongan yang lebih realistis. Mereka mengembangkan model simulasi baterai yang dapat digunakan untuk memprediksi perilaku baterai dalam kendaraan listrik dengan lebih akurat. Ini penting untuk memastikan bahwa baterai EV dapat beroperasi dalam kondisi yang sesuai dan mempertahankan performa optimal selama masa pakainya. Penelitian ini menunjukkan pentingnya uji standar dalam memastikan konsistensi dan validitas data yang diperoleh (Voltsi & Elmasides, 2025).

Sejalan dengan itu, Chen et al. (2025) mengembangkan metode baru yang memanfaatkan data penggunaan aktual oleh pengguna untuk menilai residual performance baterai EV. Ini membuka jalan untuk menghubungkan kebiasaan pemakaian kendaraan dengan degradasi baterai, sehingga memungkinkan pengelolaan baterai yang lebih baik berdasarkan perilaku pengemudi. Dengan menggabungkan data lapangan, mereka memperkenalkan pendekatan baru dalam memperkirakan sisa umur baterai tanpa bergantung sepenuhnya pada pengukuran alat yang mahal (Chen et al., 2025).

Sementara itu, de la Vega Hernández et al. (2025) menyediakan dataset siklus baterai EV dengan profil dinamis, yang meliputi pengukuran dalam siklus pengujian seperti WLTP. Dataset ini tidak hanya berguna dalam mengembangkan Battery Management System (BMS) tetapi juga mempercepat pengembangan model prediksi yang lebih presisi terkait performa baterai dalam kondisi berkendara nyata. Penelitian ini sangat relevan untuk memperkirakan degradasi kapasitas dan mengoptimalkan siklus pengisian agar kendaraan listrik dapat beroperasi dengan lebih efisien (de la Vega Hernández et al., 2025).

Selain itu, Etxandi-Santolaya et al. (2024) melakukan analisis yang mendalam tentang bagaimana degradasi kapasitas baterai mempengaruhi performa kendaraan listrik, seperti kecepatan dan akselerasi. Mereka menunjukkan bagaimana penurunan kapasitas baterai dapat mempengaruhi kinerja kendaraan di berbagai kondisi jalan, baik jalan datar maupun menanjak. Penelitian ini

memberikan wawasan penting tentang bagaimana degradasi baterai dapat mempengaruhi pengalaman berkendara di dunia nyata (Etxandi-Santolaya et al., 2024).

Di sisi lain, penelitian oleh Mueangngoen dan Kumsuwan (2025) mengusulkan serangkaian uji penting untuk paket baterai lithium-ion yang digunakan dalam kendaraan listrik. Dengan tujuan untuk menilai keselamatan dan performa, penelitian ini memastikan bahwa baterai yang digunakan dalam kendaraan listrik tidak hanya efisien tetapi juga aman. Ini sangat penting untuk menghindari masalah teknis seperti overheating atau kebakaran yang dapat merusak kendaraan dan membahayakan pengemudi (Mueangngoen & Kumsuwan, 2025).

Sementara itu, Das dan Kumar (2023) memfokuskan perhatian pada penggunaan machine learning untuk menilai kondisi kesehatan baterai dan memprediksi remaining useful life (RUL) baterai EV. Penelitian mereka memberikan pendekatan yang lebih canggih dan berbasis data untuk memperkirakan SoH dengan menggunakan algoritma yang dapat meningkatkan akurasi prediksi. Pendekatan berbasis AI ini menjadi semakin penting karena memungkinkan pengelolaan baterai yang lebih dinamis dan efisien dalam kendaraan listrik.

Dalam penelitian yang mengkaji strategi pengurangan degradasi, Tawfik et al. (2024) mengusulkan strategi trade-off untuk meminimalkan degradasi baterai sembari mempertahankan kemampuan pengisian dan pengendaraan kendaraan listrik. Pendekatan ini memberikan panduan praktis bagi perancang kendaraan listrik untuk menciptakan sistem penyimpanan energi yang lebih tahan lama dan efisien. Hal ini tentu sangat penting untuk memperpanjang umur pakai baterai dan mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang (Tawfik et al., 2024).

Beberapa penelitian lain juga menekankan pada analisis performa baterai EV di kondisi nyata, seperti penelitian oleh Bangse (2024) yang memfokuskan pada analisis baterai 48V/100Ah pada kendaraan listrik nyata, yang mengukur tegangan dan konsumsi energi berdasarkan beban operasi yang berbeda. Hasilnya menunjukkan adanya hubungan langsung antara beban dan performa baterai, yang menjadi faktor penentu dalam desain baterai EV agar dapat mendukung performa kendaraan dengan maksimal (Bangse, 2024).

Terakhir, Rokhim & Soolany (2025) melakukan studi perakitan sepeda listrik berbasis motor BLDC dan baterai lithium-ion, mengukur kinerja sepeda listrik di dunia nyata. Pengujian ini melibatkan evaluasi terhadap jarak tempuh, efisiensi energi, dan performa motor. Penelitian ini menunjukkan bagaimana pengujian baterai pada kendaraan nyata sangat penting untuk memahami kapasitas pengisian, pengosongan, dan daya tahan baterai dalam aplikasi nyata (Rokhim et al., 2025).