

Teknologi Sepeda Motor Listrik Hybrid Off-Grid



- Christian Soolany, S.TP., M.Si.
- Dhimas Oki Permata Aji, S.Pd., M.Pd.
- Ir. Sigit Suwanto, S.T., M.T.
- Dr. Furqon, S.TP., M.Si.
- Dr. Setya Permana Sutisna, S.T.P., M.Si.

Teknologi Sepeda Motor Listrik Hybrid Off-Grid

Christian Soolany, S.TP., M.Si.

Dhimas Oki Permata Aji, S.Pd., M.Pd.

Ir. Sigit Suwanto, S.T., M.T.

Dr. Furqon, S.TP., M.Si.

Dr. Setya Permana Sutisna, S.T.P., M.Si.

Teknologi Sepeda Motor Listrik Hybrid Off-Grid

© Christian Soolany, S.TP., M.Si.
Dhimas Oki Permata Aji, S.Pd., M.Pd.
Ir. Sigit Suwanto, S.T., M.T.
Dr. Furqon, S.TP., M.Si.
Dr. Setya Permana Sutisna, S.T.P., M.Si.

ISBN : 978-634-7220-23-3

Hak Penerbitan ©2026 Borneo Novelty Publishing

Anggota Ikatan Penerbit Indonesia (IKAPI) sertifikat No. 012/KTI/2024

Jl. Soekarno Hatta, Km 8, Graha Indah, Balikpapan, 76126
borneonovelty.com | borneonoveltypublishing@gmail.com

Ukuran : 15.5 x 23 cm; xiii + 198 halaman

Terbit online, April 2026

Editor: Subur Mulyanto	Tata letak: Lina Budi Asih
Reviewer: Gozali	Desain sampul: Mahsun

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang.
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dari ijin tertulis dari penerbit/penulis, sebagian atau seluruhnya dalam bentuk apapun, baik cetak, photoprint, microfilm, dan sebagainya.

PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat-Nya buku referensi berjudul ***Teknologi Sepeda Motor Listrik Hybrid Off-Grid*** ini dapat diselesaikan.

Penulisan buku ini dilandasi oleh kegelisahan akademik sekaligus rasa tanggung jawab moral terhadap masa depan energi di Indonesia. Sebagai bangsa yang memiliki mobilitas roda dua sangat tinggi, kita dihadapkan pada dilema antara kebutuhan transportasi yang terjangkau dan keharusan untuk menekan jejak karbon. Kendaraan listrik sering kali dianggap sebagai jawaban tunggal, namun tantangan infrastruktur di berbagai pelosok daerah menuntut kita untuk berpikir lebih kreatif dan adaptif.

Buku ini merupakan buah dari perjalanan riset panjang dan diskusi mendalam di bidang Rekayasa Termal dan Energi Berkelanjutan. Kami mencoba menjembatani celah antara teori akademis yang kaku dengan realitas aplikasi di lapangan. Kami percaya bahwa teknologi *hybrid* yang didukung oleh sistem *off-grid* adalah solusi transisi yang paling realistis dan berdaya guna untuk konteks geografis kepulauan Indonesia.

Di dalam setiap babnya, buku ini disusun secara sistematis agar pembaca dapat memahami kompleksitas desain sistem kendaraan, mulai dari pemilihan komponen motor penggerak hingga strategi manajemen energi yang cerdas. Kami berupaya menyajikan analisis yang presisi namun tetap dapat dinikmati oleh mereka yang memiliki gairah dalam pengembangan teknologi hijau.

Penyusunan karya ini tentu tidak lepas dari dukungan berbagai pihak. Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada rekan-rekan sejawat di Universitas Jenderal Soedirman dan IPB University atas setiap diskusi yang

memperkaya substansi buku ini. Dukungan dari keluarga dan para kolega juga menjadi energi tambahan bagi kami dalam menyelesaikan naskah ini di tengah berbagai kesibukan akademik.

Kami menyadari bahwa ilmu pengetahuan akan terus berkembang. Oleh karena itu, masukan dan kritik yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan demi penyempurnaan di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan literatur teknik di Indonesia dan menjadi inspirasi bagi lahirnya inovasi-inovasi hijau lainnya.

Selamat membaca. Mari kita mulai perjalanan menuju mobilitas yang lebih cerdas dan berkelanjutan.

Purwokerto, April 2026

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA	viii
DAFTAR ISI.....	x

BAB 1 PENDAHULUAN: MOBILITAS BERSIH DAN TANTANGAN

TRANSISI ENERGI.....	1
1.1 Krisis Energi Global dan Emisi Transportasi.....	1
1.2 Urgensi Elektrifikasi Kendaraan Roda Dua.....	3
1.3 Peran Sepeda Motor Listrik dalam Dekarbonisasi Transp- ortasi.....	6
1.4 Konsep Hybrid Off-Grid sebagai Solusi Masa Depan	9
1.5 1.5 Tujuan, Ruang Lingkup, dan Sistematika Buku	12

BAB 2 DASAR TEORI SEPEDA MOTOR LISTRIK HYBRID OFF-

GRID	15
2.1 Prinsip Dasar Kendaraan Listrik Hybrid	15
2.2 Arsitektur Sistem Hybrid: Series, Parallel, Power Split	18
2.3 Konsep Off-Grid Energy Supply System.....	21
2.4 Komponen Utama Sistem Hybrid Motorcycle.....	24
2.5 Parameter Desain dan Kriteria Kinerja.....	27

BAB 3 TEKNOLOGI POWERTRAIN DAN MOTOR PENGGERAK

LISTRIK.....	31
3.1 BLDC, PMSM, Axial Flux Motor: Karakteristik dan Perban- dingan	31
3.2 Downsized ICE pada Hybrid Motorcycle	34

3.3 Sistem Transmisi CVT dan Integrasi Hybrid Drive.....	37
3.4 Torque Density dan Thermal Management Motor	40
3.5 Inovasi Lightweight Drivetrain	43
 BAB 4 SISTEM PENYIMPANAN ENERGI DAN BATTERY	
MANAGEMENT SYSTEM (BMS)	48
4.1 Teknologi Baterai Lithium-ion dan LiFePO ₄	48
4.2 Hybrid Energy Storage System (Battery + Supercapacitor) ...	51
4.3 State of Charge (SOC) dan State of Health (SOH)	54
4.4 Battery Management System (BMS) Cerdas	58
4.5 Keselamatan, Thermal Runaway, dan Crashworthiness	61
 BAB 5 INTEGRASI ENERGI TERBARUKAN UNTUK SISTEM OFF-	
GRID	65
5.1 Integrasi Panel Surya Fotovoltaik (PV)	65
5.2 Solar Charging Station untuk Sepeda Motor Listrik.....	68
5.3 Hybrid Renewable Microgrid System	71
5.4 Battery Swapping Berbasis Energi Terbarukan	75
5.5 Desain Charging Infrastructure di Daerah Terpencil	78
 BAB 6 STRATEGI MANAJEMEN ENERGI DAN KONTROL SISTEM	
HYBRID	82
6.1 Rule-Based Energy Management Strategy	82
6.2 ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy)	85
6.3 Machine Learning-Based Controller	88
6.4 Real-Time Optimization dan Adaptive Control	92
6.5 IoT Monitoring untuk Hybrid Motorcycle	95

BAB 7 SIMULASI, PEMODELAN, DAN ANALISIS KINERJA	
SISTEM HYBRID	99
7.1 Metodologi Desain Sistem	99
7.2 Pemodelan Simulasi Energi	102
7.3 Simulasi Beban Berkendara dan Driving Cycle	106
7.4 Optimasi Parameter Sistem	109
7.5 Validasi Model dan Pengujian Laboratorium	112
 BAB 8 ANALISIS PERFORMA DAN EVALUASI SISTEM	
PROTOTIPE.....	116
8.1 Efisiensi Energi Sistem Hybrid	116
8.2 Analisis Konsumsi Energi per km	119
8.3 Analisis Emisi CO ₂ Reduction.....	122
8.4 Regenerative Braking Performance.....	125
8.5 Perbandingan dengan Motor Konvensional dan EV Murni ..	128
 BAB 9 IMPLEMENTASI LAPANGAN DAN STUDI KASUS	
APLIKASI NYATA	133
9.1 Life Cycle Assessment (LCA) Kendaraan Hybrid	133
9.2 Dampak Lingkungan Produksi dan Daur Ulang Baterai	136
9.3 Analisis Biaya Siklus Hidup (LCC)	139
9.4 Kebijakan Transisi Energi dan Regulasi Indonesia	143
9.5 Strategi Komersialisasi dan Adopsi Pasar	146
 BAB 10 MASA DEPAN INOVASI DAN ARAH PENGEMBANGAN	
TEKNOLOGI HYBRID MOTORCYCLE	150
10.1 Emerging Technologies dalam Hybrid Motorcycle.....	150
10.2 AI-Driven Autonomous Energy Management	153

10.3 Smart Grid Integration dan V2G Potential	157
10.4 Riset Masa Depan dan Tantangan Teknologi	160
10.5 Roadmap Implementasi Nasional Menuju Net Zero Transport.....	163
DAFTAR PUSTAKA	168
GLOSARIUM	181
BIODATA	196

BAB 1

PENDAHULUAN: MOBILITAS BERSIH DAN TANTANGAN TRANSISI ENERGI

1.1 Krisis Energi Global dan Emisi Transportasi

Krisis energi global merupakan salah satu tantangan terbesar abad ke-21 yang dipicu oleh meningkatnya konsumsi energi dunia, keterbatasan cadangan bahan bakar fosil, fluktuasi harga minyak internasional, serta dampak lingkungan akibat eksploitasi energi konvensional yang terus berlangsung. Ketergantungan dunia terhadap bahan bakar fosil—khususnya minyak bumi, batu bara, dan gas alam—masih sangat dominan dalam sektor transportasi, industri, dan pembangkitan listrik. Menurut kajian internasional terbaru, sektor transportasi menyumbang hampir seperempat dari total emisi karbon dioksida global, menjadikannya salah satu kontributor utama pemanasan global dan perubahan iklim. Dalam HAL ini, transformasi menuju sistem transportasi berbasis energi bersih menjadi kebutuhan mendesak yang tidak dapat ditunda lagi.

Indonesia sebagai negara berkembang dengan jumlah kendaraan roda dua yang sangat besar menghadapi tekanan ganda: kebutuhan mobilitas masyarakat terus meningkat, sementara ketergantungan pada BBM impor juga semakin tinggi. Berdasarkan data nasional, sepeda motor merupakan moda transportasi paling dominan di Indonesia, dengan populasi melebihi 120 juta unit. Sebagian besar kendaraan tersebut masih menggunakan mesin pembakaran internal berbahan bakar bensin yang menghasilkan emisi CO₂, karbon monoksida, nitrogen oksida, dan partikulat halus yang berkontribusi langsung terhadap penurunan kualitas udara perkotaan. Naskah dasar buku ini menunjukkan bahwa dominasi sepeda motor berbahan bakar fosil telah memperburuk pencemaran udara di kota-kota besar Indonesia dan meningkatkan beban subsidi energi nasional.

Dalam skala global, ketidakstabilan geopolitik turut memperparah krisis energi. Konflik internasional, gangguan rantai pasok energi, serta kenaikan harga minyak mentah menyebabkan banyak negara mulai mempercepat diversifikasi energi menuju energi terbarukan. Pada saat yang sama, kajian mengenai *Off-Grid Hybrid Electric Motorcycle* menegaskan bahwa kendaraan hybrid listrik off-grid menjadi salah satu solusi strategis karena mampu mengurangi konsumsi bahan bakar hingga 27% dan emisi CO₂ hingga 45% dibanding kendaraan konvensional. Temuan ini

menunjukkan bahwa inovasi teknologi kendaraan listrik hybrid bukan sekadar alternatif, melainkan pilar utama transisi energi bersih masa depan.

Di sektor transportasi, emisi karbon berasal terutama dari pembakaran bahan bakar fosil yang tidak efisien. Mesin pembakaran internal hanya mampu mengubah sekitar 25–30% energi kimia bahan bakar menjadi energi mekanik, sedangkan sisanya hilang dalam bentuk panas. Sebaliknya, sistem kendaraan listrik memiliki efisiensi jauh lebih tinggi, bahkan dapat mencapai 85–90% pada motor listrik modern. Perbedaan efisiensi inilah yang menjadi dasar utama pengembangan kendaraan listrik dan hybrid. Namun demikian, kendaraan listrik murni masih menghadapi keterbatasan infrastruktur pengisian daya, khususnya di wilayah terpencil. Oleh karena itu, pendekatan hybrid off-grid yang menggabungkan motor listrik, baterai, sumber energi terbarukan, dan sistem manajemen energi cerdas menawarkan solusi yang lebih adaptif dan inklusif.

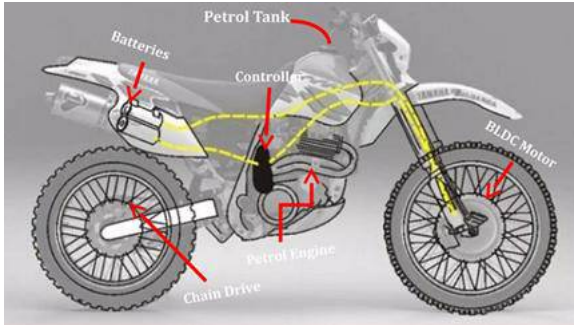
Tabel 1.1. Perbandingan Emisi dan Efisiensi Sistem Kendaraan

Jenis Kendaraan	Efisiensi Energi	Emisi CO ₂	Ketergantungan BBM
Motor Konvensional ICE	25–30%	Tinggi	Sangat Tinggi
Motor Hybrid	40–55%	Sedang	Sedang
Motor Listrik Murni	85–90%	Sangat Rendah	Tidak Ada
Hybrid Off-Grid Electric Motorcycle	60–80%	Rendah	Sangat Rendah

Selain isu emisi karbon, dampak transportasi berbasis fosil juga berkaitan erat dengan kesehatan masyarakat. Polusi udara akibat kendaraan bermotor menjadi penyebab meningkatnya penyakit pernapasan kronis, asma, iritasi paru-paru, hingga gangguan kardiovaskular. Kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung mengalami peningkatan konsentrasi PM2.5 yang signifikan akibat emisi lalu lintas. Dengan demikian, elektrifikasi kendaraan roda dua tidak hanya berkontribusi pada pengurangan emisi karbon, tetapi juga meningkatkan kualitas hidup masyarakat urban.

Pengembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid menjadi sangat relevan dalam transisi energi global karena sistem ini tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap jaringan listrik utama, tetapi juga memungkinkan integrasi energi surya, microgrid, dan battery swapping system. Integrasi panel surya fotovoltaik dan sistem micro off-grid plant mampu meningkatkan kemandirian energi kendaraan listrik, terutama di

daerah dengan infrastruktur listrik terbatas . Teknologi ini membuka peluang besar bagi negara-negara berkembang untuk melakukan lompatan teknologi menuju transportasi rendah karbon tanpa harus menunggu kesiapan jaringan listrik nasional secara penuh.



Gambar 1.1. Hubungan Krisis Energi, Emisi Transportasi, dan Transisi Mobilitas Bersih

Dengan semakin mendesakannya kebutuhan dekarbonisasi sektor transportasi, pengembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid harus dipandang sebagai strategi multidimensional: solusi energi, solusi lingkungan, solusi ekonomi, dan solusi teknologi sekaligus. Sistem ini tidak hanya menjawab tantangan emisi karbon, tetapi juga memperkuat ketahanan energi nasional melalui diversifikasi sumber energi. Masa depan transportasi tidak lagi bergantung pada satu sumber energi tunggal, melainkan pada integrasi cerdas antara listrik, energi terbarukan, sistem kontrol digital, dan efisiensi teknologi kendaraan.

1.2 Urgensi Elektrifikasi Kendaraan Roda Dua

Elektrifikasi kendaraan roda dua merupakan salah satu strategi paling krusial dalam menjawab tantangan dekarbonisasi sektor transportasi global. Dibandingkan kendaraan roda empat, sepeda motor memiliki tingkat penetrasi penggunaan yang jauh lebih tinggi di negara berkembang, terutama di kawasan Asia Tenggara, termasuk Indonesia. Di Indonesia, sepeda motor bukan sekadar alat transportasi pribadi, tetapi juga menjadi tulang punggung mobilitas masyarakat, distribusi logistik mikro, transportasi daring, hingga aktivitas ekonomi informal. Karena jumlah populasinya sangat besar, konversi sepeda motor konvensional ke kendaraan listrik akan memberikan dampak signifikan terhadap penurunan emisi karbon nasional. Naskah utama buku ini menegaskan bahwa dominasi kendaraan roda dua berbahan bakar bensin menjadi salah satu faktor utama tingginya emisi transportasi perkotaan di Indonesia .

Urgensi elektrifikasi kendaraan roda dua semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan urbanisasi dan kemacetan lalu lintas di kota-kota besar. Semakin padatnya lalu lintas menyebabkan konsumsi bahan bakar meningkat secara tidak efisien akibat pola stop-and-go, yang memperbesar emisi karbon per kilometer perjalanan. Mesin pembakaran internal pada sepeda motor konvensional cenderung tidak optimal dalam kondisi lalu lintas macet karena efisiensi termalnya rendah. Sebaliknya, motor listrik memiliki karakteristik torsi instan, efisiensi tinggi, dan kehilangan energi yang jauh lebih kecil. Hal ini menjadikan kendaraan roda dua listrik lebih unggul untuk penggunaan urban dibanding kendaraan berbasis bahan bakar fosil.

Dari perspektif energi, elektrifikasi roda dua juga berkaitan erat dengan ketahanan energi nasional. Indonesia masih sangat bergantung pada impor minyak mentah dan BBM untuk memenuhi kebutuhan transportasi domestik. Ketergantungan ini menyebabkan kerentanan ekonomi terhadap fluktuasi harga energi global. Dengan memperluas penggunaan kendaraan roda dua listrik, kebutuhan konsumsi BBM dapat ditekan secara bertahap, sekaligus mengurangi tekanan subsidi energi negara. Hybrid electric motorcycles mampu menghemat konsumsi bahan bakar hingga 27% dibanding sepeda motor konvensional, bahkan lebih tinggi ketika dikombinasikan dengan strategi manajemen energi cerdas berbasis ECMS (*Equivalent Consumption Minimization Strategy*) .



Gambar 1.2. Tren Elektrifikasi Kendaraan Roda Dua dalam Transisi Energi Bersih

Lebih jauh lagi, elektrifikasi kendaraan roda dua memberikan manfaat langsung terhadap lingkungan. Setiap unit sepeda motor listrik yang menggantikan motor bensin berarti pengurangan emisi CO₂, CO, HC, dan NO_x secara simultan. Dalam skala jutaan unit kendaraan, dampaknya terhadap kualitas udara perkotaan menjadi sangat besar. Polusi udara akibat emisi kendaraan bermotor telah terbukti meningkatkan risiko

penyakit paru-paru kronis, asma, bronkitis, dan gangguan jantung. Oleh sebab itu, elektrifikasi kendaraan roda dua tidak hanya merupakan agenda energi, tetapi juga agenda kesehatan publik.

Selain faktor lingkungan dan energi, urgensi elektrifikasi juga dipicu oleh perkembangan teknologi baterai yang semakin maju. Dalam satu dekade terakhir, biaya produksi baterai lithium-ion menurun drastis, sementara kapasitas energi dan umur pakainya meningkat signifikan. Teknologi baterai modern seperti LiFePO₄ kini menawarkan kestabilan termal lebih baik, masa pakai lebih panjang, dan keamanan lebih tinggi. Hal ini mempercepat daya saing kendaraan listrik roda dua di pasar global. Pada saat yang sama, inovasi battery swapping dan fast charging semakin memudahkan pengguna untuk mengatasi keterbatasan waktu pengisian baterai.

Namun demikian, kendaraan listrik murni masih menghadapi tantangan serius, terutama terkait keterbatasan infrastruktur pengisian daya dan jangkauan perjalanan (*range anxiety*). Inilah sebabnya pendekatan hybrid off-grid menjadi sangat relevan. Sistem hybrid off-grid memungkinkan kendaraan roda dua memanfaatkan kombinasi motor listrik, baterai, sumber energi terbarukan seperti panel surya, dan cadangan energi tambahan secara mandiri. Model ini sangat cocok diterapkan di wilayah rural, kepulauan, dan daerah terpencil Indonesia yang belum memiliki jaringan listrik stabil. Integrasi photovoltaic charging dan microgrid pada sepeda motor hybrid off-grid menjadi solusi inovatif bagi daerah dengan keterbatasan infrastruktur listrik.

Tabel 1.2. Alasan Strategis Elektrifikasi Kendaraan Roda Dua

Faktor Strategis	Dampak Positif
Pengurangan Emisi CO ₂	Menurunkan polusi udara dan jejak karbon
Efisiensi Energi Tinggi	Konsumsi energi lebih hemat
Pengurangan Ketergantungan BBM	Memperkuat ketahanan energi nasional
Biaya Operasional Rendah	Biaya per km lebih murah
Dukungan Energi Terbarukan	Integrasi dengan PV dan microgrid

Di tingkat kebijakan, pemerintah Indonesia telah mulai memberikan dukungan melalui regulasi percepatan kendaraan listrik berbasis baterai, insentif pembelian, subsidi konversi motor listrik, serta pembangunan SPKLU dan SPLU. Akan tetapi, tantangan implementasi masih cukup besar, antara lain harga awal kendaraan listrik yang relatif tinggi, keterbatasan rantai pasok baterai domestik, rendahnya literasi teknologi masyarakat, dan

belum meratanya infrastruktur charging station. Karena itu, strategi elektrifikasi kendaraan roda dua harus diiringi dengan pembangunan ekosistem industri nasional yang terintegrasi dari hulu hingga hilir.

Dalam jangka panjang, elektrifikasi kendaraan roda dua bukan hanya perubahan teknologi kendaraan, tetapi transformasi paradigma transportasi nasional menuju mobilitas rendah karbon. Kendaraan roda dua listrik akan menjadi simpul utama dalam ekosistem smart mobility yang terhubung dengan energi terbarukan, Internet of Things (IoT), smart charging, dan jaringan microgrid masa depan. Dengan populasi sepeda motor yang sangat besar, Indonesia memiliki peluang strategis untuk menjadi pemimpin regional dalam transisi kendaraan roda dua listrik.

1.3 Peran Sepeda Motor Listrik dalam Dekarbonisasi Transportasi

Dekarbonisasi transportasi merupakan salah satu agenda utama dalam upaya global menekan laju perubahan iklim dan mencapai target Net Zero Emission pada pertengahan abad ini. Sektor transportasi menyumbang porsi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca dunia, terutama karbon dioksida (CO₂), akibat dominasi penggunaan bahan bakar fosil pada kendaraan bermotor. Di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, kendaraan roda dua menyumbang bagian terbesar dari populasi kendaraan jalan raya. Oleh karena itu, transformasi sepeda motor berbahan bakar fosil menuju sepeda motor listrik menjadi langkah strategis yang memiliki dampak langsung dan luas terhadap pengurangan emisi karbon sektor transportasi. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa pergeseran ke kendaraan listrik roda dua menjadi salah satu instrumen paling efektif dalam menurunkan intensitas karbon transportasi nasional.

Sepeda motor listrik memainkan peran penting dalam dekarbonisasi karena memiliki efisiensi energi jauh lebih tinggi dibandingkan kendaraan berbasis mesin pembakaran internal (*internal combustion engine* / ICE). Pada kendaraan konvensional, sebagian besar energi dari bahan bakar hilang dalam bentuk panas, gesekan mekanik, dan gas buang. Sebaliknya, motor listrik mampu mengonversi energi listrik menjadi energi mekanik dengan efisiensi mencapai 85–90 persen. Hal ini berarti penggunaan energi primer menjadi jauh lebih hemat, sehingga emisi karbon per kilometer perjalanan dapat ditekan secara signifikan. Jika sumber listriknya berasal dari energi terbarukan, maka emisi operasional kendaraan bahkan dapat mendekati nol.

Dalam dekarbonisasi, sepeda motor listrik memiliki keunggulan unik dibanding kendaraan listrik roda empat. Pertama, biaya produksinya lebih rendah sehingga lebih mudah diakses masyarakat luas. Kedua, konsumsi energinya lebih kecil, menjadikannya lebih efisien untuk mobilitas

perkotaan. Ketiga, jumlah penggunaannya jauh lebih besar di negara berkembang, sehingga dampak kumulatif pengurangan emisi menjadi sangat besar. Sepeda motor hybrid listrik off-grid mampu mengurangi emisi CO₂ hingga 45% dibanding motor bensin konvensional, terutama ketika sistem kontrol energi cerdas diterapkan secara optimal . Temuan ini menegaskan bahwa elektrifikasi roda dua merupakan salah satu jalur tercepat menuju transportasi rendah karbon.

Tabel 1.3. Kontribusi Sepeda Motor Listrik terhadap Dekarbonisasi Transportasi

Aspek Dekarbonisasi	Kontribusi Sepeda Motor Listrik
Pengurangan Emisi CO ₂	Sangat Tinggi
Pengurangan Polusi Udara Lokal	Sangat Tinggi
Efisiensi Energi	Tinggi
Integrasi Energi Terbarukan	Sangat Fleksibel
Reduksi Konsumsi BBM Nasional	Signifikan

Peran strategis sepeda motor listrik dalam dekarbonisasi juga terlihat dari kontribusinya terhadap pengurangan emisi lokal (*tailpipe emissions*). Kendaraan konvensional menghasilkan emisi langsung berupa CO₂, NO_x, HC, dan PM_{2.5} yang menjadi penyebab utama pencemaran udara perkotaan. Sepeda motor listrik tidak menghasilkan emisi gas buang secara langsung, sehingga secara signifikan meningkatkan kualitas udara kota. Dalam kota-kota padat seperti Jakarta, Surabaya, dan Medan, pengurangan emisi tailpipe dari jutaan sepeda motor akan memberikan dampak kesehatan publik yang sangat besar, terutama dalam menurunkan risiko penyakit pernapasan dan gangguan kardiovaskular.

Selain pengurangan emisi langsung, sepeda motor listrik mendukung dekarbonisasi melalui integrasi dengan energi terbarukan. Sistem pengisian berbasis panel surya, photovoltaic charging station, battery swapping renewable hub, dan microgrid off-grid memungkinkan kendaraan listrik beroperasi tanpa bergantung pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Pendekatan inilah yang menjadi inti dari konsep hybrid off-grid electric motorcycle. Integrasi photovoltaic microgrid dengan sistem hybrid motorcycle menjadi solusi unggulan untuk daerah dengan infrastruktur listrik lemah, sekaligus memperkuat dekarbonisasi sektor transportasi di kawasan rural dan terpencil.

Peran sepeda motor listrik juga sangat relevan dalam mendukung target kebijakan nasional dan internasional. Indonesia telah menetapkan komitmen penurunan emisi melalui Nationally Determined Contribution (NDC) dan roadmap Net Zero Emission 2060. Dalam skenario transisi energi

nasional, sektor transportasi merupakan salah satu sektor prioritas yang harus mengalami transformasi besar. Elektrifikasi kendaraan roda dua dipandang sebagai strategi paling realistis karena biaya adopsinya lebih rendah dibanding kendaraan roda empat, sementara penetrasi pasarnya lebih cepat. Dengan populasi lebih dari seratus juta unit sepeda motor, bahkan konversi sebagian kecil saja akan menghasilkan dampak penurunan emisi yang substansial.



Gambar 1.3. Peran Sepeda Motor Listrik dalam Rantai Dekarbonisasi Transportasi

Namun demikian, keberhasilan peran sepeda motor listrik dalam dekarbonisasi tidak lepas dari tantangan yang harus diatasi. Tantangan utama meliputi keterbatasan infrastruktur charging station, harga baterai yang masih tinggi, ketergantungan impor sel baterai, serta isu daur ulang limbah baterai di akhir masa pakai. Oleh karena itu, strategi dekarbonisasi berbasis sepeda motor listrik harus disertai pembangunan industri baterai nasional, kebijakan insentif fiskal, dan regulasi pengelolaan limbah energi yang berkelanjutan.

Lebih dari sekadar kendaraan, sepeda motor listrik adalah bagian dari transformasi sistem energi nasional. Kendaraan ini menjadi simpul pertemuan antara inovasi transportasi, energi terbarukan, teknologi baterai, sistem kontrol digital, dan kebijakan iklim. Dalam hal ini, hybrid off-grid electric motorcycle memiliki nilai strategis lebih tinggi karena memperluas cakupan dekarbonisasi ke wilayah yang belum terjangkau infrastruktur energi konvensional. Dengan demikian, sepeda motor listrik tidak hanya menjadi alat mobilitas, tetapi agen perubahan menuju masa depan transportasi hijau yang lebih bersih, efisien, dan berkelanjutan.

1.4 Konsep Hybrid Off-Grid sebagai Solusi Masa Depan

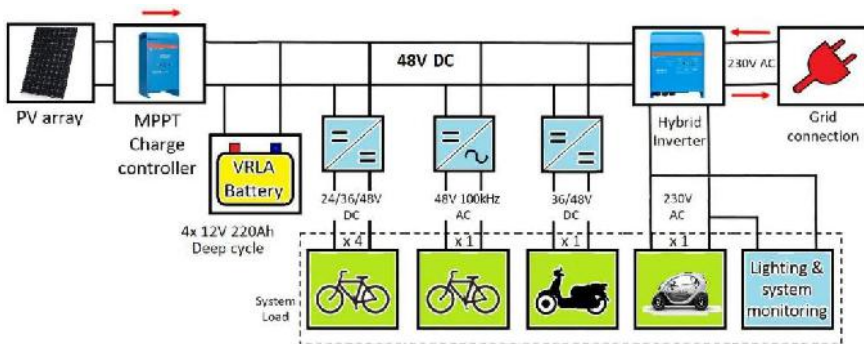
Perkembangan teknologi kendaraan listrik telah membuka babak baru dalam sistem transportasi global, namun keberhasilan implementasinya masih menghadapi tantangan besar, terutama terkait keterbatasan infrastruktur pengisian energi, ketergantungan pada jaringan listrik utama, serta akses energi yang belum merata di berbagai wilayah. Dalam kondisi inilah konsep **hybrid off-grid electric motorcycle** muncul sebagai solusi masa depan yang sangat relevan. Sistem ini menggabungkan keunggulan kendaraan listrik hybrid dengan kemandirian energi melalui integrasi sumber energi terbarukan, penyimpanan energi mandiri, dan sistem kontrol cerdas yang memungkinkan kendaraan beroperasi secara efisien tanpa bergantung penuh pada jaringan listrik publik. Konsep ini menjadi salah satu inovasi paling strategis dalam mempercepat transisi energi bersih di sektor transportasi.

Secara teknis, hybrid off-grid pada sepeda motor listrik merupakan sistem kendaraan yang memadukan lebih dari satu sumber energi, biasanya motor listrik, baterai utama, sistem penyimpanan tambahan, serta suplai energi dari pembangkit terbarukan seperti panel surya fotovoltaik (PV). Dalam beberapa konfigurasi, sistem ini juga dapat dikombinasikan dengan mesin pembakaran internal berkapasitas kecil (*downsized ICE*) sebagai cadangan energi sekunder. Berbeda dari kendaraan listrik biasa yang sepenuhnya bergantung pada pengisian dari grid listrik, hybrid off-grid dirancang agar kendaraan dapat mengisi ulang energinya secara mandiri melalui sumber lokal, microgrid, atau renewable charging station. Naskah utama buku ini menegaskan bahwa pendekatan off-grid sangat penting bagi Indonesia karena banyak wilayah rural dan kepulauan belum memiliki akses listrik stabil untuk mendukung mobilitas listrik konvensional.

Keunggulan utama konsep hybrid off-grid terletak pada fleksibilitas energinya. Dalam kondisi perkotaan, kendaraan dapat mengisi daya dari charging station biasa atau photovoltaic charging hub. Namun di daerah terpencil, sistem tetap dapat beroperasi melalui panel surya, battery swapping renewable stations, atau micro off-grid plants. Integrasi micro off-grid plant dengan hybrid electric motorcycle mampu menurunkan konsumsi energi secara signifikan, dengan efisiensi penggunaan energi hanya sekitar 37 Wh/km, jauh lebih rendah dibanding kendaraan berbahan bakar fosil yang setara. Hal ini membuktikan bahwa hybrid off-grid bukan hanya solusi teknis, tetapi juga solusi ekonomi dan keberlanjutan energi.

Konsep hybrid off-grid juga menjawab salah satu kelemahan utama kendaraan listrik murni, yaitu *range anxiety* atau kekhawatiran keterbatasan jarak tempuh akibat baterai habis sebelum mencapai stasiun pengisian. Dengan adanya kombinasi multi-sumber energi dan sistem

regenerative braking, kendaraan hybrid off-grid memiliki kemampuan pemulihan energi yang lebih baik. Energi kinetik saat pengereman dapat dikonversi kembali menjadi energi listrik untuk mengisi baterai, sehingga efisiensi total sistem meningkat. Pada beberapa desain modern, integrasi supercapacitor bahkan memungkinkan respons daya yang lebih cepat untuk akselerasi tinggi tanpa membebani baterai utama secara berlebihan.



Gambar 1.4. Skema Konsep Sistem Hybrid Off-Grid pada Sepeda Motor Listrik

Dari perspektif transisi energi, hybrid off-grid memiliki nilai strategis yang sangat tinggi karena mendukung desentralisasi energi. Dalam sistem energi konvensional, kendaraan listrik sangat bergantung pada kestabilan jaringan listrik nasional. Ketika jaringan mengalami gangguan atau tidak tersedia, kendaraan tidak dapat dioperasikan secara optimal. Sebaliknya, sistem off-grid memungkinkan kendaraan tetap aktif meskipun berada di wilayah tanpa infrastruktur listrik formal. Model ini sangat cocok diterapkan di daerah pedesaan, pulau-pulau kecil, kawasan pertanian, pertambangan, hingga wilayah pascabencana yang sering mengalami keterbatasan akses energi.

Selain itu, konsep hybrid off-grid sejalan dengan arah global menuju smart mobility dan smart energy ecosystem. Kendaraan masa depan tidak lagi dipandang sebagai unit transportasi pasif, tetapi sebagai bagian dari ekosistem energi cerdas yang saling terhubung dengan smart grid, IoT monitoring, renewable storage, dan AI-based energy management. Dalam sistem ini, sepeda motor hybrid off-grid dapat berfungsi tidak hanya sebagai konsumen energi, tetapi juga sebagai elemen aktif dalam manajemen distribusi energi lokal. Misalnya, baterai kendaraan dapat terhubung dengan sistem rumah tenaga surya untuk menyimpan kelebihan energi siang hari dan digunakan kembali saat malam hari.

Di Indonesia, urgensi pengembangan hybrid off-grid semakin tinggi karena kondisi geografis negara yang terdiri dari ribuan pulau dengan

distribusi jaringan listrik yang belum merata. Banyak wilayah terpencil belum memiliki akses charging infrastructure memadai, sehingga kendaraan listrik murni sulit berkembang tanpa solusi energi mandiri. Hybrid off-grid menjadi model kendaraan paling adaptif untuk Indonesia karena mampu menjawab tantangan geografis, infrastruktur, dan keberlanjutan secara simultan. Bahkan, pada masa depan, konsep ini dapat menjadi basis pengembangan sistem mobilitas energi mandiri nasional berbasis desa energi terbarukan.

Tabel 1.4. Keunggulan Sistem Hybrid Off-Grid Dibanding Sistem Kendaraan Listrik Konvensional

Parameter	Kendaraan Listrik Konvensional	Hybrid Off-Grid Electric Motorcycle
Ketergantungan pada Grid	Tinggi	Rendah
Fleksibilitas Sumber Energi	Terbatas	Sangat Tinggi
Cocok untuk Wilayah Terpencil	Rendah	Sangat Cocok
Integrasi Energi Terbarukan	Parsial	Penuh
Ketahanan Operasional	Sedang	Tinggi

Namun demikian, implementasi hybrid off-grid juga menghadapi tantangan teknis dan ekonomi. Kompleksitas integrasi multi-sumber energi, kebutuhan sistem kontrol yang lebih canggih, biaya awal investasi yang lebih tinggi, serta kebutuhan standar interoperabilitas antar komponen menjadi isu utama yang harus dipecahkan. Oleh karena itu, riset lanjutan dalam bidang battery management system, lightweight drivetrain, smart controller berbasis machine learning, dan techno-economic optimization menjadi sangat penting untuk mempercepat adopsi teknologi ini.

Dengan segala keunggulannya, hybrid off-grid electric motorcycle dapat dipandang sebagai bentuk evolusi paling adaptif dari kendaraan listrik masa depan. Ia tidak hanya menawarkan transportasi rendah emisi, tetapi juga menghadirkan paradigma baru mobilitas mandiri energi yang resilien, inklusif, dan berkelanjutan. Dalam transisi energi bersih global, konsep ini merupakan jembatan antara teknologi kendaraan listrik modern dan kebutuhan nyata masyarakat di lapangan.

1.5 1.5 Tujuan, Ruang Lingkup, dan Sistematika Buku

Buku referensi **“Sepeda Motor Listrik Hybrid Off-Grid”** disusun sebagai respons akademik dan teknologis terhadap percepatan transformasi sektor transportasi menuju sistem mobilitas rendah karbon. Perkembangan kendaraan listrik yang semakin pesat membutuhkan sumber referensi ilmiah yang tidak hanya menjelaskan aspek konseptual, tetapi juga mampu mengintegrasikan dimensi rekayasa sistem, inovasi energi terbarukan, strategi pengelolaan energi, hingga evaluasi performa teknis dan dampak lingkungan secara menyeluruh. Buku ini hadir untuk menjembatani kebutuhan tersebut, terutama bagi mahasiswa, peneliti, akademisi, praktisi industri, serta perancang kebijakan energi dan transportasi. Sebagaimana tercermin dalam naskah awal buku, kebutuhan akan referensi berbahasa Indonesia yang sistematis dan komprehensif di bidang hybrid electric motorcycle masih sangat terbatas, sehingga buku ini dirancang untuk menjadi salah satu rujukan utama dalam bidang tersebut.

Tujuan utama buku ini adalah memberikan pemahaman menyeluruh mengenai konsep, desain, implementasi, dan analisis sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid sebagai solusi masa depan transportasi berkelanjutan. Secara khusus, buku ini bertujuan untuk:

- (1) menjelaskan landasan teoritis dan prinsip kerja sistem hybrid off-grid electric motorcycle;
- (2) menguraikan desain komponen utama seperti motor listrik, baterai, sistem kontrol, photovoltaic integration, dan energy storage system;
- (3) membahas strategi integrasi energi terbarukan ke dalam kendaraan roda dua listrik;
- (4) menyajikan pendekatan analisis kinerja terpadu yang mencakup efisiensi energi, konsumsi daya, emisi karbon, dan keandalan sistem; serta
- (5) mengevaluasi implikasi teknologi ini dalam transisi energi bersih di Indonesia dan global.

Dalam bidang akademik, buku ini juga bertujuan memperkaya literatur nasional dengan pendekatan multidisipliner yang menggabungkan teknik mesin, teknik elektro, energi terbarukan, sistem kontrol, dan kebijakan energi. Masa depan hybrid electric motorcycles sangat bergantung pada sinergi antara desain powertrain, intelligent energy management, renewable charging infrastructure, dan techno-economic optimization. Oleh sebab itu, buku ini dirancang tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga analitis dan aplikatif, sehingga dapat digunakan sebagai bahan ajar, referensi penelitian, maupun pedoman pengembangan teknologi.

Ruang lingkup pembahasan dalam buku ini mencakup seluruh aspek fundamental dan lanjutan yang terkait dengan sepeda motor listrik hybrid off-grid. Pada bagian awal, pembaca diperkenalkan pada isu krisis energi global, emisi transportasi, dan urgensi elektrifikasi kendaraan roda dua sebagai latar belakang transisi mobilitas bersih. Selanjutnya, buku membahas teori dasar hybrid electric vehicle, arsitektur sistem hybrid, teknologi motor penggerak, sistem baterai, dan battery management system. Bagian tengah buku mengupas integrasi energi terbarukan seperti panel surya, photovoltaic charging station, dan hybrid renewable microgrid. Selanjutnya dibahas pula strategi manajemen energi modern, termasuk rule-based control, ECMS, hingga machine learning-based controller yang menjadi tren terbaru dalam kendaraan cerdas.

Selain ruang lingkup teknis, buku ini juga mencakup aspek evaluasi performa terpadu, yaitu analisis energi, analisis ekonomi, life cycle assessment (LCA), dampak lingkungan, serta analisis biaya siklus hidup (LCC). Pendekatan ini penting karena kendaraan masa depan tidak cukup dinilai hanya dari performa teknis, tetapi juga harus dievaluasi dari perspektif keberlanjutan jangka panjang. Dengan demikian, pembaca akan memperoleh pemahaman holistik mengenai bagaimana sebuah sistem kendaraan hybrid off-grid dirancang, dioperasikan, dan dinilai kelayakannya secara ilmiah maupun ekonomis.

Tabel 1.5. Cakupan Utama Pembahasan Buku

Bidang Kajian	Cakupan Materi
Dasar Konseptual	Mobilitas bersih, dekarbonisasi, transisi energi
Rekayasa Sistem	Arsitektur hybrid, drivetrain, motor listrik
Energi Terbarukan	PV integration, microgrid, off-grid charging
Manajemen Energi	BMS, ECMS, AI controller
Evaluasi Kinerja	Efisiensi, emisi CO ₂ , konsumsi energi
Implementasi Nasional	Kebijakan, adopsi pasar, roadmap Indonesia

Sistematika buku ini disusun secara progresif dari konsep dasar menuju aplikasi lanjutan. Buku terdiri atas sepuluh bab utama yang saling terintegrasi. BAB 1 membahas pendahuluan dan kondisi global transisi energi. BAB 2 mengulas dasar teori sepeda motor listrik hybrid off-grid. BAB 3 fokus pada teknologi powertrain dan motor listrik. BAB 4 membahas sistem penyimpanan energi dan BMS. BAB 5 menjelaskan integrasi energi terbarukan. BAB 6 menguraikan sistem kontrol cerdas dan manajemen energi. BAB 7 menyajikan metode rancang bangun dan simulasi sistem. BAB 8 memaparkan analisis kinerja terpadu. BAB 9 mengevaluasi dampak lingkungan, ekonomi, dan kebijakan. BAB 10 menyoroti arah masa depan,

inovasi teknologi, dan roadmap implementasi Indonesia menuju transportasi Net Zero Emission.

Struktur sistematika ini dirancang agar pembaca dapat mengikuti alur pembelajaran secara bertahap: dari pemahaman latar belakang, penguasaan teori dasar, pengenalan komponen teknis, integrasi energi, analisis performa, hingga evaluasi implementasi nyata. Pendekatan semacam ini sangat penting untuk membangun kompetensi yang utuh, terutama bagi mahasiswa teknik dan peneliti yang membutuhkan dasar konseptual sekaligus kerangka metodologis penelitian lanjutan.

Buku ini juga secara sadar dirancang agar adaptif terhadap perkembangan teknologi masa depan. Mengingat inovasi kendaraan listrik berkembang sangat cepat, isi buku ini tidak hanya merekam kondisi teknologi saat ini, tetapi juga memproyeksikan tren masa depan seperti smart grid integration, IoT-enabled mobility, battery swapping intelligence, vehicle-to-grid systems, dan AI-driven energy optimization. Dengan demikian, buku ini diharapkan tetap relevan dalam jangka panjang sebagai referensi ilmiah modern dan mutakhir.

Sebagai penutup bab pendahuluan, dapat ditegaskan bahwa buku ini bukan hanya sebuah kajian teknis mengenai kendaraan listrik, melainkan sebuah kontribusi ilmiah untuk mendukung transformasi sistem transportasi nasional menuju mobilitas hijau, mandiri energi, dan berkelanjutan. Melalui pemahaman menyeluruh terhadap sistem hybrid off-grid electric motorcycle, diharapkan lahir inovasi baru yang mampu mempercepat tercapainya transisi energi bersih di Indonesia.

BAB 2

DASAR TEORI SEPEDA MOTOR LISTRIK HYBRID OFF-GRID

2.1 Prinsip Dasar Kendaraan Listrik Hybrid

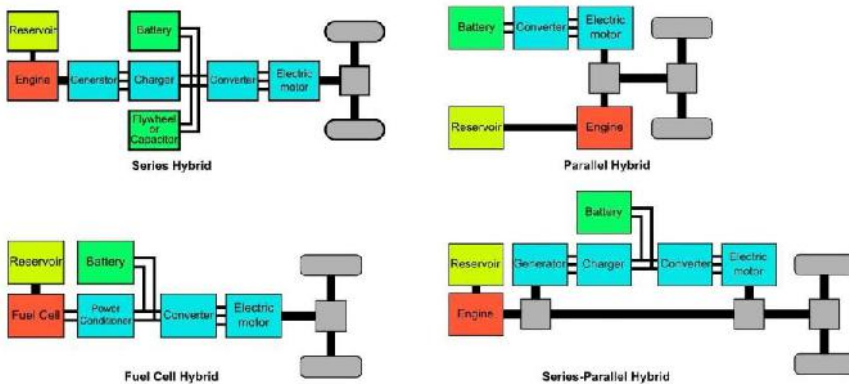
Kendaraan listrik hybrid merupakan sistem transportasi yang memanfaatkan dua atau lebih sumber energi berbeda untuk menghasilkan tenaga gerak, biasanya berupa kombinasi motor listrik dan mesin pembakaran internal (*internal combustion engine* / ICE) atau kombinasi beberapa sistem penyimpanan energi seperti baterai dan superkapasitor. Pada sepeda motor listrik hybrid off-grid, konsep ini dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan integrasi sumber energi mandiri berbasis energi terbarukan, seperti panel surya fotovoltaik, microgrid charging system, atau renewable battery charging hub. Prinsip dasar kendaraan hybrid bertujuan mengoptimalkan efisiensi energi, mengurangi konsumsi bahan bakar fosil, menekan emisi karbon, serta meningkatkan fleksibilitas operasional kendaraan dalam berbagai kondisi penggunaan. Dalam naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa hybrid electric motorcycle menjadi solusi antara kendaraan konvensional berbahan bakar fosil dan kendaraan listrik murni, karena mampu menggabungkan efisiensi tinggi dengan jangkauan operasional yang lebih fleksibel.

Secara fundamental, kendaraan hybrid bekerja berdasarkan prinsip distribusi beban energi secara dinamis antara sumber tenaga utama dan sumber tenaga pendukung. Pada kondisi beban ringan atau kecepatan rendah, kendaraan dapat beroperasi menggunakan motor listrik saja, sehingga konsumsi energi menjadi sangat efisien dan emisi nol pada titik penggunaan. Ketika kendaraan membutuhkan daya lebih besar, seperti saat akselerasi cepat, tanjakan, atau perjalanan jarak jauh, mesin pembakaran internal atau sumber energi sekunder dapat aktif membantu sistem. Dalam sistem hybrid modern, pengaturan perpindahan sumber tenaga dilakukan secara otomatis melalui kontrol elektronik cerdas, sehingga pengguna tidak perlu melakukan intervensi manual.

Prinsip kerja kendaraan listrik hybrid juga bertumpu pada konsep *energy flow optimization*. Artinya, sistem secara terus-menerus memonitor kondisi baterai, kebutuhan daya motor, kondisi jalan, serta beban kendaraan untuk menentukan kombinasi sumber energi yang paling efisien. Teknologi ini memungkinkan kendaraan meminimalkan pemborosan energi sekaligus mempertahankan performa optimal. Sistem hybrid electric motorcycle

dengan strategi pengelolaan energi cerdas seperti ECMS (*Equivalent Consumption Minimization Strategy*) mampu menghasilkan penghematan energi lebih tinggi dibanding sistem kontrol konvensional berbasis aturan tetap (*rule-based control*). Hal ini menegaskan bahwa prinsip dasar hybrid tidak hanya terletak pada kombinasi sumber energi, tetapi juga pada kecerdasan distribusi energinya.

Dalam sepeda motor hybrid, motor listrik berfungsi sebagai sumber tenaga utama yang menyediakan torsi instan untuk akselerasi awal. Keunggulan motor listrik adalah kemampuannya menghasilkan torsi maksimum sejak putaran nol RPM, berbeda dengan mesin bensin yang memerlukan peningkatan putaran terlebih dahulu. Hal ini membuat kendaraan hybrid lebih responsif, terutama dalam kondisi lalu lintas urban yang padat. Mesin pembakaran internal dalam sistem hybrid biasanya berukuran lebih kecil (*downsized engine*) karena hanya berfungsi sebagai penopang tambahan, bukan satu-satunya sumber tenaga. Dengan demikian, ukuran mesin dapat diperkecil tanpa mengorbankan performa kendaraan secara keseluruhan.



Gambar 2.1. Prinsip Aliran Energi pada Kendaraan Listrik Hybrid

Selain kombinasi motor listrik dan ICE, sistem hybrid juga mengandalkan komponen penting lain seperti baterai, inverter, controller, converter, regenerative braking unit, dan battery management system (BMS). Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi listrik utama, sedangkan inverter mengubah arus DC dari baterai menjadi AC untuk motor listrik bila diperlukan. Controller menjadi pusat kendali sistem yang menentukan kapan motor listrik, baterai, atau mesin tambahan diaktifkan. Pada saat pengereman, sistem regenerative braking mengubah energi kinetik

kendaraan menjadi energi listrik untuk mengisi ulang baterai, sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem.

Salah satu karakteristik utama kendaraan hybrid adalah kemampuan *energy recuperation*, yaitu pemulihan energi yang biasanya hilang selama proses pengereman. Pada kendaraan konvensional, energi kinetik saat pengereman hilang sebagai panas akibat gesekan rem. Pada sistem hybrid, sebagian energi tersebut dikonversi kembali menjadi energi listrik dan disimpan dalam baterai. Teknologi ini berkontribusi besar terhadap efisiensi energi, terutama dalam pola berkendara stop-and-go di perkotaan. Kombinasi hybrid battery-supercapacitor system dapat meningkatkan efektivitas regenerative braking dan memperpanjang umur pakai baterai kendaraan.

Tabel 2.1. Komponen Dasar Sistem Kendaraan Listrik Hybrid

Komponen	Fungsi Utama
Motor Listrik	Menggerakkan roda dengan efisiensi tinggi
Baterai	Menyimpan energi listrik
ICE / Sumber Energi Sekunder	Menyediakan tenaga tambahan
Controller	Mengatur distribusi energi
Inverter / Converter	Mengubah bentuk arus listrik
Regenerative Braking	Memulihkan energi saat pengereman
BMS	Mengelola kesehatan baterai

Prinsip dasar kendaraan hybrid juga dibedakan berdasarkan pola interaksi antara sumber tenaga, yang kemudian melahirkan berbagai konfigurasi arsitektur hybrid seperti *series hybrid*, *parallel hybrid*, dan *power split hybrid*. Pada sistem *series hybrid*, motor listrik menjadi satu-satunya penggerak roda, sedangkan mesin pembakaran hanya berfungsi sebagai generator listrik. Pada *parallel hybrid*, motor listrik dan ICE sama-sama dapat menggerakkan roda secara langsung. Sedangkan pada *power split hybrid*, kedua sistem bekerja secara fleksibel sesuai kebutuhan daya dan kondisi operasi. Pemilihan arsitektur ini sangat menentukan efisiensi, kompleksitas desain, dan biaya produksi kendaraan.

Dalam hal hybrid off-grid electric motorcycle, prinsip dasar hybrid berkembang menjadi lebih kompleks karena kendaraan tidak hanya mengelola energi internal, tetapi juga harus mampu menerima input energi dari sumber eksternal terbarukan seperti panel surya dan renewable charging microgrid. Hal ini menuntut integrasi sistem kontrol yang lebih cerdas agar pengisian energi, distribusi beban, dan pemanfaatan energi

terbarukan dapat berlangsung optimal. Dengan demikian, kendaraan hybrid off-grid merupakan evolusi lanjutan dari kendaraan hybrid konvensional menuju sistem mobilitas energi mandiri.

Secara keseluruhan, prinsip dasar kendaraan listrik hybrid adalah sinergi antara efisiensi energi, fleksibilitas sumber daya, dan optimasi performa kendaraan. Sistem ini dirancang untuk menjawab kelemahan kendaraan konvensional yang boros bahan bakar dan kendaraan listrik murni yang masih terbatas dalam jangkauan serta infrastruktur pengisian daya. Oleh karena itu, pemahaman terhadap prinsip dasar hybrid menjadi fondasi penting sebelum memasuki pembahasan arsitektur sistem yang lebih kompleks pada sub-bab berikutnya.

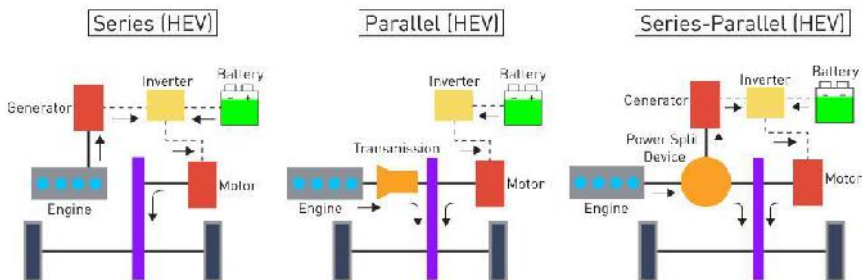
2.2 Arsitektur Sistem Hybrid: Series, Parallel, Power Split

Arsitektur sistem hybrid merupakan fondasi utama dalam perancangan kendaraan listrik hybrid karena menentukan bagaimana sumber energi bekerja, berinteraksi, dan menyalurkan tenaga ke roda kendaraan. Dalam sepeda motor listrik hybrid off-grid, pemilihan arsitektur hybrid sangat menentukan efisiensi energi, kompleksitas desain, fleksibilitas operasional, serta kemampuan integrasi dengan sumber energi terbarukan. Secara umum, terdapat tiga konfigurasi utama yang digunakan dalam sistem kendaraan hybrid, yaitu **series hybrid**, **parallel hybrid**, dan **power split hybrid**. Ketiga arsitektur ini memiliki karakteristik teknis berbeda yang disesuaikan dengan kebutuhan performa, efisiensi, dan aplikasi kendaraan. Dalam naskah dasar buku ini disebutkan bahwa desain arsitektur hybrid menjadi elemen paling menentukan keberhasilan integrasi sistem motor listrik, baterai, dan sumber energi tambahan dalam kendaraan roda dua modern.

Pada arsitektur **series hybrid**, motor listrik menjadi satu-satunya komponen yang secara langsung menggerakkan roda kendaraan. Mesin pembakaran internal atau sumber energi sekunder tidak terhubung langsung ke roda, melainkan hanya berfungsi sebagai generator untuk menghasilkan listrik yang kemudian digunakan mengisi baterai atau langsung memasok daya ke motor listrik. Sistem ini menawarkan keunggulan berupa kontrol tenaga yang sederhana, efisiensi tinggi pada kondisi lalu lintas urban, serta optimalisasi kerja motor listrik. Karena mesin pembakaran bekerja pada titik efisiensi tetap, konsumsi bahan bakar dapat ditekan lebih baik. Namun, kelemahan utama series hybrid adalah adanya konversi energi ganda—dari bahan bakar menjadi listrik, lalu menjadi tenaga mekanik—yang dapat menyebabkan kehilangan energi tambahan pada kondisi beban tinggi.

Sebaliknya, pada arsitektur **parallel hybrid**, motor listrik dan mesin pembakaran internal sama-sama dapat menyalurkan tenaga langsung ke roda kendaraan. Dalam sistem ini, kedua sumber tenaga dapat bekerja sendiri-sendiri atau bersamaan tergantung kondisi operasi. Misalnya, pada kecepatan rendah kendaraan dapat digerakkan oleh motor listrik saja, sementara saat akselerasi tinggi motor listrik dan mesin pembakaran bekerja simultan. Keunggulan parallel hybrid terletak pada efisiensi tinggi untuk perjalanan jarak jauh dan kemampuan mempertahankan performa kuat tanpa perlu motor listrik berdaya besar. Namun, desain mekanisnya lebih kompleks karena memerlukan sistem transmisi gabungan untuk mengintegrasikan dua sumber tenaga ke satu jalur penggerak.

Arsitektur ketiga adalah **power split hybrid**, yang merupakan kombinasi keunggulan series dan parallel hybrid. Dalam konfigurasi ini, sistem menggunakan perangkat pembagi daya (*power split device*) untuk mendistribusikan energi dari motor listrik dan mesin pembakaran internal secara fleksibel sesuai kebutuhan. Power split memungkinkan kendaraan beroperasi dalam mode listrik penuh, mode hybrid gabungan, maupun mode pembangkit listrik internal secara otomatis. Sistem ini dianggap paling fleksibel dan efisien, terutama pada kendaraan modern dengan kontrol elektronik canggih. Arsitektur power split menjadi salah satu konfigurasi paling menjanjikan untuk hybrid electric motorcycles masa depan karena mampu mengoptimalkan efisiensi energi di berbagai driving cycle, termasuk kondisi urban stop-and-go dan perjalanan rural jarak jauh.



Gambar 2.2. Skema Tiga Arsitektur Utama Sistem Hybrid pada Kendaraan Listrik

Dalam sepeda motor listrik hybrid off-grid, pemilihan arsitektur hybrid tidak hanya mempertimbangkan efisiensi tenaga, tetapi juga kemampuan integrasi dengan sistem energi terbarukan seperti photovoltaic charging, solar battery hub, dan microgrid renewable station. Pada kendaraan off-grid, arsitektur series hybrid sering dianggap lebih sederhana

untuk integrasi dengan panel surya karena seluruh tenaga gerak berbasis motor listrik. Namun, untuk kendaraan dengan kebutuhan performa tinggi, parallel dan power split hybrid lebih fleksibel karena mampu menyediakan daya tambahan langsung dari mesin pembakaran atau generator sekunder.

Perbedaan mendasar ketiga arsitektur ini juga tampak pada strategi manajemen energi yang digunakan. Pada series hybrid, kontrol sistem relatif lebih sederhana karena distribusi tenaga hanya menuju motor listrik. Pada parallel hybrid, sistem kontrol harus menentukan kapan motor listrik, mesin pembakaran, atau keduanya aktif secara bersamaan. Sedangkan pada power split hybrid, diperlukan algoritma kontrol jauh lebih kompleks karena distribusi energi berlangsung secara dinamis dan simultan pada beberapa jalur tenaga. Hal inilah yang membuat power split hybrid sangat bergantung pada kecanggihan controller berbasis sensor real-time, IoT monitoring, dan bahkan machine learning optimization.

Tabel 2.2. Perbandingan Karakteristik Arsitektur Sistem Hybrid

Parameter	Series Hybrid	Parallel Hybrid	Power Split Hybrid
Penggerak Roda Utama	Motor listrik בלבד	Motor + ICE	Motor + ICE fleksibel
Kompleksitas Mekanis	Rendah	Sedang	Tinggi
Efisiensi Urban	Sangat Tinggi	Tinggi	Sangat Tinggi
Efisiensi Jarak Jauh	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
Integrasi Energi Terbaru	Mudah	Sedang	Sangat Fleksibel

Untuk sepeda motor listrik hybrid off-grid di Indonesia, pemilihan arsitektur hybrid juga dipengaruhi oleh kondisi geografis, pola penggunaan kendaraan, dan ketersediaan infrastruktur energi. Di wilayah perkotaan dengan mobilitas padat, series hybrid cocok karena efisien untuk kecepatan rendah dan stop-and-go traffic. Di daerah rural atau pegunungan yang membutuhkan jangkauan lebih panjang dan tenaga besar, parallel hybrid lebih sesuai. Sedangkan untuk kendaraan masa depan berbasis smart renewable mobility, power split hybrid menjadi pilihan ideal karena memungkinkan adaptasi terhadap berbagai kondisi operasi dan sumber energi.

Aspek lain yang sangat penting dalam arsitektur hybrid adalah kompatibilitas dengan sistem regenerative braking. Semua arsitektur hybrid mendukung pemulihan energi pengereman, namun efektivitasnya berbeda tergantung konfigurasi. Pada series hybrid, regenerative braking paling optimal karena seluruh sistem tenaga berbasis motor listrik. Pada parallel

hybrid, efektivitasnya bergantung pada sinkronisasi dengan transmisi mekanik. Pada power split hybrid, regenerative braking dapat dioptimalkan secara dinamis melalui algoritma cerdas, sehingga efisiensi pemulihan energi menjadi paling tinggi.

Dari perspektif rekayasa masa depan, tren global menunjukkan kecenderungan pengembangan menuju power split hybrid berbasis AI controller karena fleksibilitasnya yang unggul. Sistem ini memungkinkan kendaraan belajar dari pola berkendara pengguna, kondisi jalan, dan profil konsumsi energi untuk menentukan strategi distribusi tenaga terbaik secara otomatis. Dengan dukungan teknologi edge computing dan embedded machine learning, kendaraan hybrid generasi baru akan semakin adaptif, hemat energi, dan cerdas.

Dengan memahami karakteristik series, parallel, dan power split hybrid, perancang sistem dapat menentukan konfigurasi terbaik sesuai tujuan desain kendaraan. Pemilihan arsitektur yang tepat menjadi langkah awal paling penting dalam merancang sepeda motor listrik hybrid off-grid yang efisien, tangguh, dan sesuai kebutuhan transisi energi bersih masa depan.

2.3 Konsep Off-Grid Energy Supply System

Konsep **off-grid energy supply system** merupakan elemen kunci yang membedakan sepeda motor listrik hybrid off-grid dari kendaraan hybrid konvensional. Jika kendaraan listrik biasa sangat bergantung pada jaringan listrik utama (*utility grid*) untuk pengisian daya baterai, maka sistem off-grid dirancang agar kendaraan mampu memperoleh, menyimpan, dan mengelola energi secara mandiri tanpa ketergantungan penuh pada infrastruktur kelistrikan publik. Dalam transisi energi bersih, konsep ini sangat penting karena memungkinkan kendaraan listrik beroperasi secara berkelanjutan di daerah terpencil, wilayah kepulauan, kawasan pedesaan, maupun lokasi dengan akses listrik terbatas. Pada naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa kebutuhan akan kendaraan mandiri energi menjadi sangat relevan di Indonesia karena distribusi infrastruktur listrik nasional belum merata secara geografis.

Secara definisi, off-grid energy supply system adalah sistem penyediaan energi independen yang memanfaatkan sumber energi lokal—terutama energi terbarukan—untuk menghasilkan listrik yang digunakan langsung atau disimpan dalam baterai kendaraan. Dalam sepeda motor hybrid off-grid, sistem ini biasanya terdiri atas panel surya fotovoltaik (PV), battery storage unit, charge controller, inverter/converter, dan kadang dikombinasikan dengan generator tambahan atau hybrid renewable microgrid. Sistem ini dapat berdiri sendiri atau terhubung dengan charging

station berbasis energi terbarukan. Tujuan utamanya adalah menjamin ketersediaan energi kapan pun dibutuhkan, tanpa harus bergantung pada pasokan listrik dari PLN atau jaringan grid konvensional.

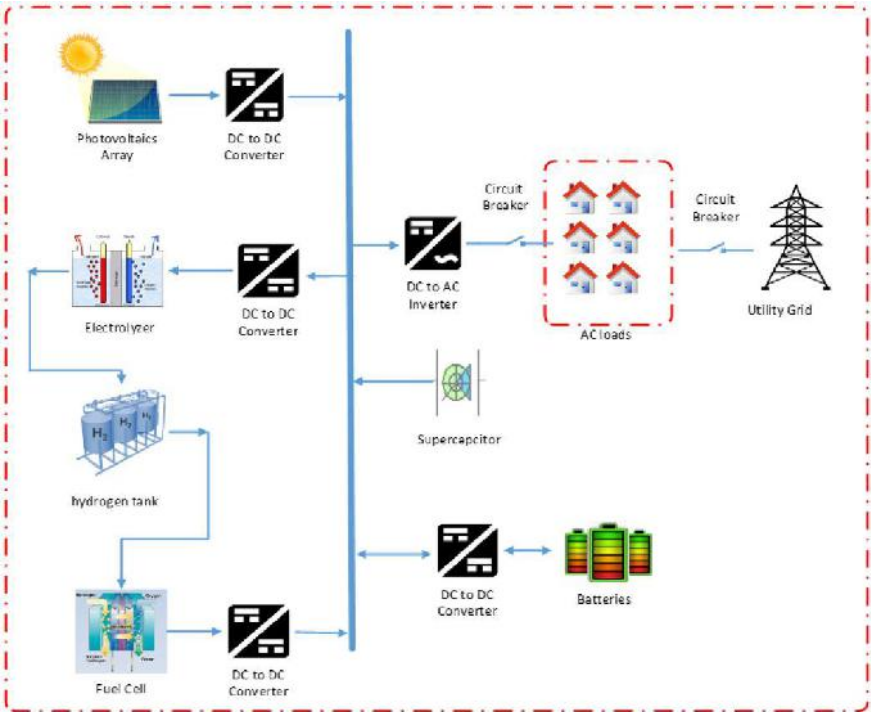
Prinsip dasar kerja off-grid energy supply dimulai dari pembangkitan energi melalui sumber energi terbarukan. Pada umumnya, panel surya menjadi pilihan utama karena ketersediaannya melimpah, mudah diintegrasikan, dan cocok untuk skala kecil-menengah. Energi matahari yang ditangkap modul PV diubah menjadi arus DC, lalu dikontrol melalui solar charge controller untuk mengisi baterai penyimpanan. Energi yang tersimpan kemudian digunakan untuk mengisi baterai kendaraan atau langsung mensuplai sistem charging station. Dalam sistem yang lebih kompleks, energi juga dapat dikelola melalui smart controller agar distribusi daya berlangsung optimal sesuai kebutuhan beban kendaraan dan kondisi cuaca. Integrasi photovoltaic microgrid dalam sistem hybrid electric motorcycle terbukti meningkatkan efisiensi operasional dan menurunkan ketergantungan energi fosil secara signifikan.

Keunggulan utama sistem off-grid adalah kemandirian energi. Pada wilayah yang belum memiliki infrastruktur charging station memadai, kendaraan hybrid off-grid tetap dapat beroperasi melalui pengisian energi mandiri dari solar charging hub atau renewable battery swap station. Hal ini sangat penting untuk mendukung mobilitas masyarakat di daerah 3T (terdepan, terluar, tertinggal), kawasan wisata terpencil, serta wilayah pascabencana yang mengalami gangguan listrik. Sistem off-grid juga meningkatkan resiliensi energi nasional karena mengurangi tekanan terhadap jaringan listrik utama, terutama saat terjadi lonjakan permintaan listrik akibat peningkatan populasi kendaraan listrik.

Dalam implementasinya, off-grid energy supply system dapat dibedakan menjadi beberapa model. Model pertama adalah **stand-alone solar charging unit**, yaitu sistem pengisian mandiri berbasis panel surya untuk satu atau beberapa kendaraan. Model kedua adalah **renewable microgrid charging station**, yaitu jaringan mini energi terbarukan yang melayani banyak kendaraan sekaligus. Model ketiga adalah **battery swapping renewable hub**, yaitu stasiun penukaran baterai yang seluruh energinya dipasok dari pembangkit terbarukan lokal. Ketiga model ini memiliki fleksibilitas tinggi dan dapat diterapkan sesuai kebutuhan lokasi, skala penggunaan, dan kapasitas energi yang tersedia.

Aspek penting dalam sistem off-grid adalah manajemen penyimpanan energi. Karena energi terbarukan bersifat intermiten—misalnya panel surya hanya menghasilkan daya optimal saat siang hari—maka baterai penyimpanan menjadi komponen vital untuk menjaga kontinuitas suplai energi. Sistem penyimpanan modern biasanya menggunakan baterai

lithium-ion atau LiFePO4 karena memiliki densitas energi tinggi, umur pakai panjang, dan kestabilan termal lebih baik. Dalam beberapa desain mutakhir, baterai utama dipadukan dengan superkapasitor untuk meningkatkan respons daya cepat dan mengurangi beban siklus baterai.



Gambar 2.3. Skema Dasar Off-Grid Energy Supply System pada Sepeda Motor Hybrid Off-Grid

Tabel 2.3. Komponen Utama Off-Grid Energy Supply System

Komponen	Fungsi
Panel Surya PV	Menghasilkan listrik dari energi matahari
Charge Controller	Mengatur proses pengisian baterai
Battery Storage	Menyimpan energi listrik
Inverter / Converter	Menyesuaikan bentuk arus listrik
Smart Energy Controller	Mengelola distribusi energi
Charging Interface	Menyalurkan energi ke kendaraan

Di Indonesia, potensi penerapan sistem off-grid sangat besar karena negara ini memiliki intensitas radiasi matahari rata-rata tinggi sepanjang tahun. Dengan rata-rata paparan surya 4–5,5 kWh/m² per hari, hampir

seluruh wilayah Indonesia berpotensi mengembangkan photovoltaic charging infrastructure untuk kendaraan listrik. Integrasi sistem off-grid dengan desa energi mandiri, kawasan wisata hijau, dan transportasi pedesaan dapat menjadi model pembangunan mobilitas rendah karbon yang inklusif dan berkelanjutan.

Namun demikian, implementasi off-grid energy supply system juga menghadapi tantangan. Biaya investasi awal relatif tinggi, terutama untuk panel surya, baterai penyimpanan, dan smart controller. Selain itu, efisiensi sistem sangat dipengaruhi kondisi cuaca, degradasi modul surya, serta kapasitas penyimpanan energi. Tantangan lainnya adalah kebutuhan standarisasi interoperabilitas antara kendaraan, baterai, dan stasiun charging agar sistem dapat diterapkan secara luas dan terintegrasi. Oleh sebab itu, inovasi di bidang material PV, battery technology, dan AI-based energy forecasting menjadi sangat penting untuk meningkatkan keandalan sistem off-grid masa depan.

Secara keseluruhan, konsep off-grid energy supply system adalah fondasi utama dalam mewujudkan kendaraan listrik yang benar-benar mandiri energi. Sistem ini tidak hanya memperluas jangkauan operasional kendaraan listrik, tetapi juga menjadi jembatan strategis antara sektor transportasi dan transformasi energi terbarukan nasional. Dengan integrasi yang tepat, off-grid system akan menjadi tulang punggung mobilitas hijau masa depan, terutama di negara kepulauan seperti Indonesia.

2.4 Komponen Utama Sistem Hybrid Motorcycle

Sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid merupakan integrasi kompleks dari berbagai subsistem mekanik, elektrik, elektronik, dan energi terbarukan yang bekerja secara sinergis untuk menghasilkan kendaraan yang efisien, rendah emisi, dan mandiri energi. Keberhasilan desain kendaraan hybrid tidak hanya ditentukan oleh arsitektur sistemnya, tetapi juga oleh kualitas dan integrasi komponen utama yang menyusun sistem tersebut. Setiap komponen memiliki fungsi spesifik, namun saling bergantung satu sama lain dalam menjaga kestabilan operasi kendaraan. Dalam naskah utama buku ini dijelaskan bahwa performa kendaraan hybrid sangat ditentukan oleh harmonisasi antara motor penggerak, sistem baterai, kontrol energi, dan sistem pengisian daya terbarukan.

Komponen pertama dan paling utama adalah **motor listrik penggerak (electric traction motor)**. Motor listrik berfungsi mengubah energi listrik dari baterai menjadi energi mekanik untuk memutar roda kendaraan. Pada sepeda motor hybrid modern, jenis motor yang paling umum digunakan adalah BLDC (*Brushless DC Motor*), PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*), dan axial flux motor. BLDC populer karena

efisiensinya tinggi, ukuran kompak, dan minim perawatan. PMSM menawarkan kepadatan daya lebih tinggi, sedangkan axial flux motor menjadi inovasi terbaru karena mampu menghasilkan torsi besar dengan dimensi lebih tipis. Axial flux motor semakin banyak digunakan dalam hybrid electric motorcycles karena keunggulan torque density, thermal management, dan efisiensi energinya .

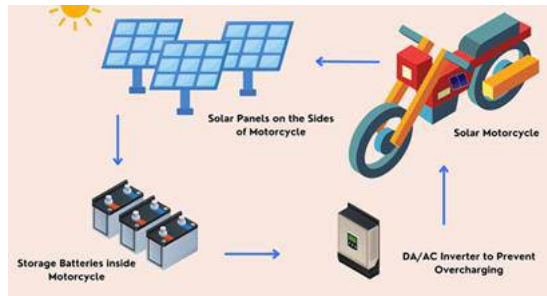
Komponen kedua adalah **baterai penyimpanan energi (battery pack)**, yang berfungsi sebagai sumber energi utama kendaraan. Pada umumnya digunakan baterai lithium-ion atau lithium iron phosphate (LiFePO₄), karena keduanya memiliki densitas energi tinggi, bobot ringan, umur pakai panjang, dan stabilitas termal baik. Kapasitas baterai menentukan jarak tempuh kendaraan, sedangkan kemampuan charge-discharge rate memengaruhi performa akselerasi dan regenerative braking. Dalam sistem hybrid off-grid, baterai juga berperan sebagai penyimpan energi dari sumber terbarukan seperti panel surya, sehingga kapasitas dan efisiensi menjadi sangat penting.

Komponen ketiga adalah **mesin pembakaran internal atau sumber energi sekunder**, yang biasanya berupa downsized ICE, micro generator, atau range extender. Dalam hybrid motorcycle, mesin ini tidak selalu aktif, tetapi bekerja saat baterai lemah, saat kendaraan membutuhkan daya tambahan besar, atau ketika sistem membutuhkan pengisian ulang energi cepat. Penggunaan mesin berkapasitas kecil ini bertujuan menjaga efisiensi bahan bakar sambil tetap memberikan fleksibilitas jangkauan kendaraan. Pada beberapa desain off-grid terbaru, peran ICE mulai digantikan oleh renewable micro-generator berbasis biofuel atau fuel cell miniatur.

Komponen berikutnya adalah **controller unit (electronic control unit / ECU)**, yang berfungsi sebagai otak kendaraan. Controller mengatur distribusi daya antara motor listrik, baterai, sumber energi tambahan, serta regenerative braking system. Controller juga memantau kondisi real-time seperti state of charge (SOC), suhu baterai, kecepatan kendaraan, dan kebutuhan torsi. Pada kendaraan hybrid generasi baru, controller dilengkapi algoritma pintar seperti ECMS dan machine learning optimization agar distribusi energi berlangsung adaptif sesuai pola berkendara.

Selanjutnya terdapat **inverter dan converter**, yaitu perangkat elektronika daya yang mengubah arus DC dari baterai menjadi AC untuk motor listrik (bila diperlukan), serta menyesuaikan level tegangan antar subsistem. Inverter menjadi sangat penting karena motor listrik modern membutuhkan pengaturan frekuensi dan tegangan presisi agar bekerja optimal. Converter juga memungkinkan integrasi antara panel surya, baterai penyimpanan, dan sistem pengisian kendaraan. Efisiensi inverter

berpengaruh langsung terhadap efisiensi total kendaraan karena kehilangan energi banyak terjadi pada tahap konversi daya ini.



Gambar 2.4. Komponen Utama Sistem Sepeda Motor Hybrid Off-Grid

Komponen penting lain adalah **Battery Management System (BMS)**. BMS bertugas memantau kesehatan baterai, mengontrol keseimbangan sel, mencegah overcharge, overdischarge, overheating, dan short circuit. Dalam sistem hybrid off-grid, BMS juga berfungsi mengelola interaksi antara baterai utama kendaraan dengan baterai penyimpanan eksternal dari sistem photovoltaic charging. Keandalan BMS sangat menentukan umur pakai baterai dan keselamatan operasional kendaraan.

Komponen lainnya yang tak kalah penting adalah **regenerative braking system**, yaitu sistem pemulihan energi saat pengereman. Saat kendaraan melambat, motor listrik berfungsi sebagai generator yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dan mengirimkannya kembali ke baterai. Teknologi ini meningkatkan efisiensi energi total, terutama dalam penggunaan perkotaan dengan frekuensi pengereman tinggi. Pada beberapa desain modern, regenerative braking dipadukan dengan supercapacitor agar proses penyimpanan energi berlangsung lebih cepat dan mengurangi stres pada baterai utama.

Tabel 2.4. Komponen Inti Sistem Hybrid Motorcycle dan Fungsinya

Komponen	Fungsi Utama
Motor Listrik	Menggerakkan roda kendaraan
Battery Pack	Menyimpan energi listrik
ICE / Generator Sekunder	Menyediakan tenaga cadangan
Controller Unit	Mengatur distribusi energi
Inverter / Converter	Mengubah dan menyesuaikan arus listrik
BMS	Mengelola keamanan dan kesehatan baterai
Regenerative Braking Unit	Memulihkan energi pengereman
Charging Interface	Menyalurkan energi dari charging source

Dalam hybrid off-grid, sistem juga dilengkapi **renewable charging interface**, yaitu modul penghubung antara kendaraan dan sumber energi terbarukan seperti panel surya, battery swapping station, atau microgrid charging hub. Komponen ini memungkinkan kendaraan menerima energi dari berbagai sumber eksternal secara aman dan efisien. Standarisasi charging interface menjadi isu penting agar kendaraan dapat kompatibel dengan berbagai stasiun charging di masa depan.

Dari perspektif rekayasa sistem, kualitas desain hybrid motorcycle ditentukan oleh integrasi antar komponen, bukan hanya performa individual masing-masing komponen. Sebuah motor listrik berkinerja tinggi tidak akan optimal tanpa baterai berkualitas, controller cerdas, dan sistem pendinginan yang memadai. Oleh karena itu, pendekatan desain modern menekankan integrasi modular, lightweight component design, dan smart diagnostics agar kendaraan lebih efisien, mudah dirawat, dan adaptif terhadap perkembangan teknologi.

Secara keseluruhan, komponen utama sistem hybrid motorcycle membentuk ekosistem energi bergerak yang kompleks namun harmonis. Pemahaman mendalam terhadap setiap komponen sangat penting untuk merancang kendaraan yang tidak hanya hemat energi, tetapi juga andal, aman, dan sesuai kebutuhan mobilitas masa depan.

2.5 Parameter Desain dan Kriteria Kinerja

Perancangan sepeda motor listrik hybrid off-grid memerlukan pendekatan multidisipliner yang mempertimbangkan aspek mekanik, elektrik, termal, energi, dan lingkungan secara simultan. Agar sistem kendaraan dapat beroperasi optimal, diperlukan parameter desain yang terukur serta kriteria kinerja yang jelas sebagai dasar evaluasi. Parameter desain berfungsi sebagai acuan teknis dalam menentukan spesifikasi komponen, kapasitas sistem, dan konfigurasi integrasi energi. Sementara itu, kriteria kinerja digunakan untuk menilai sejauh mana kendaraan mampu memenuhi target efisiensi, daya tahan, emisi rendah, dan keandalan operasional. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa keberhasilan desain kendaraan hybrid tidak hanya ditentukan oleh inovasi teknologi, tetapi juga oleh ketepatan parameter desain sejak tahap awal rekayasa sistem.

Salah satu parameter desain paling mendasar adalah **daya motor listrik (motor rated power)**. Daya motor menentukan kemampuan kendaraan menghasilkan torsi dan kecepatan maksimum. Pada sepeda motor hybrid, daya motor harus disesuaikan dengan berat kendaraan, kapasitas baterai, jenis penggunaan (urban, rural, touring), serta kontribusi sumber tenaga sekunder. Daya yang terlalu kecil menyebabkan performa

lemah, sedangkan daya terlalu besar meningkatkan konsumsi energi dan biaya sistem. Dalam desain modern, pemilihan motor tidak hanya mempertimbangkan daya nominal, tetapi juga torque density, thermal stability, dan efficiency map pada berbagai putaran operasi.

Parameter kedua adalah **kapasitas baterai (battery capacity)** yang biasanya dinyatakan dalam Ah (ampere-hour) atau kWh. Kapasitas baterai menentukan jarak tempuh kendaraan dalam mode listrik. Semakin besar kapasitas baterai, semakin jauh jarak tempuh, tetapi bobot kendaraan juga meningkat. Oleh karena itu, desain kapasitas baterai harus menyeimbangkan antara range, berat total, biaya, dan kebutuhan energi harian pengguna. Optimasi kapasitas baterai dalam hybrid electric motorcycle sangat menentukan efisiensi total sistem, terutama bila dikombinasikan dengan hybrid energy storage system berbasis baterai dan supercapacitor .

Parameter berikutnya adalah **rasio energi terhadap berat kendaraan (specific energy-to-weight ratio)**. Rasio ini penting karena sepeda motor memiliki keterbatasan dimensi dan beban struktural dibanding kendaraan roda empat. Bobot baterai, motor, inverter, dan sistem tambahan harus dirancang seefisien mungkin agar tidak mengurangi kelincihan kendaraan. Prinsip lightweight engineering menjadi sangat penting dalam kendaraan hybrid off-grid karena efisiensi energi sangat dipengaruhi massa total kendaraan.

Selain itu, terdapat parameter desain berupa **efisiensi drivetrain**, yaitu rasio antara energi listrik yang masuk ke sistem penggerak dengan energi mekanik yang dihasilkan di roda. Drivetrain efficiency dipengaruhi oleh kualitas motor listrik, inverter, transmisi, bearing system, dan losses mekanik lainnya. Pada kendaraan hybrid modern, target efisiensi drivetrain umumnya berada di atas 85%.

Dalam sistem hybrid off-grid, parameter desain tambahan yang sangat penting adalah **kapasitas integrasi energi terbarukan**, yaitu kemampuan sistem menerima, mengonversi, dan menyimpan energi dari sumber eksternal seperti panel surya atau microgrid charging station. Parameter ini mencakup photovoltaic charging input rate, charging efficiency, solar conversion efficiency, dan renewable charging compatibility. Kendaraan off-grid yang baik harus mampu menerima input energi terbarukan secara fleksibel tanpa mengganggu stabilitas baterai utama.

Di sisi lain, kriteria kinerja digunakan untuk mengevaluasi hasil implementasi desain. Kriteria pertama adalah **jarak tempuh (driving range)**, yaitu total jarak yang dapat ditempuh kendaraan dalam satu siklus pengisian energi penuh. Driving range menjadi indikator paling penting dari perspektif pengguna karena berkaitan langsung dengan kenyamanan

operasional. Pada kendaraan hybrid, driving range dihitung berdasarkan kombinasi energi baterai, bahan bakar cadangan, serta kontribusi regenerative braking.



Gambar 2.5. Hubungan Parameter Desain terhadap Kinerja Hybrid Motorcycle

Kriteria kedua adalah **efisiensi konsumsi energi (energy consumption rate)**, biasanya dinyatakan dalam Wh/km atau kWh/100 km. Nilai ini menunjukkan seberapa hemat kendaraan menggunakan energi. Semakin rendah angka konsumsi energi per kilometer, semakin efisien sistem kendaraan. Hybrid off-grid motorcycles dapat mencapai konsumsi energi serendah 37 Wh/km pada desain optimal berbasis renewable microgrid integration.

Kriteria ketiga adalah **emisi karbon ekuivalen (CO₂ equivalent emissions)**. Meskipun kendaraan hybrid memiliki emisi lebih rendah dibanding motor konvensional, evaluasi karbon harus tetap dilakukan secara life-cycle, termasuk sumber listrik pengisian, produksi baterai, dan bahan bakar cadangan. Untuk kendaraan off-grid berbasis energi surya, emisi operasional dapat mendekati nol.

Kriteria kinerja lain yang tak kalah penting adalah **reliabilitas sistem (system reliability)**, yaitu kemampuan kendaraan mempertahankan performa stabil dalam jangka panjang tanpa gangguan teknis. Reliabilitas dipengaruhi oleh kualitas komponen, desain pendinginan, ketahanan baterai, dan stabilitas software controller. Dalam kendaraan hybrid modern,

reliability testing dilakukan melalui simulasi siklus berkendara, thermal cycling, dan accelerated life testing.

Tabel 2.5. Parameter Desain dan Indikator Kinerja Utama

Parameter / Kriteria	Satuan	Fungsi Evaluasi
Daya Motor	kW	Menentukan performa akselerasi
Kapasitas Baterai	kWh	Menentukan jarak tempuh
Berat Kendaraan	kg	Mempengaruhi efisiensi energi
Efisiensi Drivetrain	%	Menilai kehilangan energi mekanik
Driving Range	km	Mengukur daya jelajah
Konsumsi Energi	Wh/km	Menilai efisiensi penggunaan energi
Emisi CO ₂ Ekuivalen	g/km	Menilai dampak lingkungan
Charging Efficiency	%	Menilai efisiensi pengisian energi

Selanjutnya adalah **response time dan acceleration performance**, yaitu kemampuan kendaraan merespons input throttle secara cepat dan stabil. Karena motor listrik memiliki karakter torsi instan, kendaraan hybrid harus dirancang agar perpindahan energi dari baterai ke motor berlangsung tanpa delay. Parameter ini sangat penting untuk keselamatan berkendara, terutama pada kondisi jalan menanjak, padat lalu lintas, dan akselerasi mendadak.

Dalam kendaraan hybrid off-grid, kriteria tambahan yang semakin relevan adalah **renewable energy utilization ratio**, yaitu persentase energi kendaraan yang berasal dari sumber energi terbarukan dibanding total energi yang digunakan. Semakin tinggi rasio ini, semakin besar kontribusi kendaraan terhadap transisi energi bersih. Parameter ini menjadi indikator penting dalam menilai keberhasilan konsep off-grid dari perspektif keberlanjutan energi.

Secara keseluruhan, parameter desain dan kriteria kinerja merupakan dua sisi yang saling melengkapi dalam rekayasa kendaraan hybrid motorcycle. Parameter desain memastikan sistem dirancang secara tepat, sedangkan kriteria kinerja memastikan hasil desain benar-benar memenuhi target teknis, ekonomi, dan lingkungan. Tanpa keduanya, kendaraan hybrid tidak dapat dinilai secara objektif dan ilmiah.

BAB 3

TEKNOLOGI POWERTRAIN DAN MOTOR PENGGERAK LISTRIK

3.1 BLDC, PMSM, Axial Flux Motor: Karakteristik dan Perbandingan

Motor penggerak listrik merupakan jantung utama dari sistem powertrain pada sepeda motor listrik hybrid off-grid. Kinerja kendaraan, efisiensi energi, respons akselerasi, serta stabilitas operasi sangat ditentukan oleh jenis motor listrik yang digunakan. Dalam pengembangan kendaraan hybrid modern, tiga tipe motor yang paling dominan digunakan adalah **Brushless DC Motor (BLDC)**, **Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)**, dan **Axial Flux Motor (AFM)**. Ketiganya memiliki prinsip kerja elektromagnetik yang sama-sama berbasis interaksi medan magnet, tetapi berbeda dalam desain konstruksi, karakteristik torsi, efisiensi, dan aplikasi optimalnya. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa pemilihan motor listrik merupakan keputusan desain paling strategis karena berkaitan langsung dengan performa total kendaraan hybrid.

Brushless DC Motor (BLDC)

BLDC motor adalah jenis motor listrik tanpa sikat (*brushless*) yang menggunakan komutasi elektronik sebagai pengganti sistem mekanis pada motor DC konvensional. Pada BLDC, rotor terdiri dari magnet permanen, sedangkan stator berisi kumparan elektromagnetik yang dikendalikan oleh inverter elektronik. Keunggulan utama BLDC adalah efisiensi tinggi, konstruksi sederhana, biaya produksi relatif rendah, dan kebutuhan perawatan minimal. Karena tidak menggunakan sikat karbon, motor ini memiliki umur pakai lebih panjang dan kehilangan energi akibat gesekan lebih kecil.

BLDC sangat populer pada sepeda motor listrik ringan karena cocok untuk aplikasi urban mobility yang membutuhkan akselerasi responsif dan efisiensi tinggi pada kecepatan rendah-menengah. Namun, kelemahan BLDC terletak pada ripple torque yang lebih tinggi dibanding PMSM, sehingga pada beberapa kondisi dapat menimbulkan getaran halus dan noise elektromagnetik. Selain itu, kontrol kecepatan tinggi pada BLDC membutuhkan algoritma switching presisi agar efisiensinya tetap stabil.

Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)

PMSM merupakan motor sinkron berbasis magnet permanen yang memiliki karakteristik efisiensi lebih tinggi dibanding BLDC, terutama pada putaran tinggi. Berbeda dengan BLDC yang menghasilkan back-EMF trapezoidal, PMSM menghasilkan back-EMF sinusoidal, sehingga putaran motor lebih halus dan stabil. Hal ini menjadikan PMSM unggul dalam aplikasi kendaraan listrik premium yang membutuhkan kenyamanan berkendara, torsi halus, dan efisiensi optimal pada berbagai rentang kecepatan.

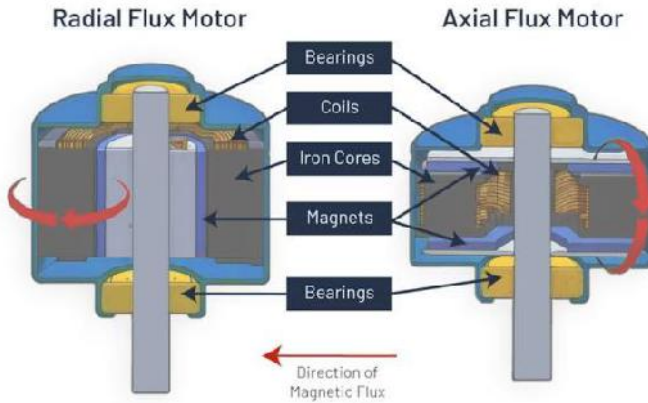
Keunggulan PMSM terletak pada power density tinggi, kontrol presisi, efisiensi konversi energi sangat baik, serta noise operasi rendah. Karena itu, PMSM banyak digunakan pada kendaraan listrik performa tinggi dan sepeda motor hybrid kelas menengah-atas. Kekurangannya adalah biaya produksi lebih tinggi akibat penggunaan magnet permanen berkualitas tinggi seperti neodymium, serta sistem kontrol inverter yang lebih kompleks.

Axial Flux Motor (AFM)

Axial Flux Motor adalah inovasi terbaru dalam teknologi motor listrik yang semakin banyak digunakan pada kendaraan listrik generasi baru. Berbeda dengan BLDC dan PMSM konvensional yang menggunakan konfigurasi radial flux, AFM memiliki aliran fluks magnet sejajar dengan sumbu putar rotor. Desain ini menghasilkan bentuk motor lebih tipis, ringan, dan memiliki torque density jauh lebih tinggi.

Axial flux motor menjadi salah satu teknologi paling menjanjikan untuk hybrid electric motorcycles karena mampu meningkatkan torque density hingga lebih dari 30% dibanding motor radial flux, sekaligus mengurangi losses termal secara signifikan. Selain itu, AFM unggul dalam pendinginan karena luas permukaan pendinginan lebih besar. Hal ini sangat penting dalam kendaraan hybrid off-grid yang menuntut efisiensi tinggi dan bobot ringan.

Namun demikian, tantangan utama AFM adalah kompleksitas manufaktur, biaya produksi lebih mahal, serta kebutuhan presisi tinggi dalam proses assembly rotor-stator. Teknologi ini masih berkembang dan lebih banyak digunakan pada kendaraan riset, kendaraan performa tinggi, serta aplikasi premium electric mobility.



Gambar 3.1. Perbandingan Desain BLDC, PMSM, dan Axial Flux Motor

Perbandingan Karakteristik Kinerja

Dari sisi efisiensi energi, PMSM dan AFM umumnya lebih unggul dibanding BLDC, terutama pada rentang kecepatan tinggi. Dari sisi biaya, BLDC adalah pilihan paling ekonomis. Dari sisi torque density, AFM menjadi pemimpin karena desainnya sangat kompak namun mampu menghasilkan torsi besar. Untuk kendaraan hybrid off-grid yang membutuhkan kombinasi efisiensi tinggi dan bobot ringan, AFM mulai dipandang sebagai solusi ideal masa depan.

Pada kendaraan hybrid kelas menengah, PMSM sering dianggap sebagai kompromi terbaik antara biaya, efisiensi, dan performa. Sementara itu, BLDC tetap menjadi pilihan utama untuk kendaraan komersial massal karena murah, andal, dan mudah diproduksi.

Implikasi Pemilihan Motor pada Hybrid Off-Grid Motorcycle

Dalam desain sepeda motor listrik hybrid off-grid, pemilihan motor tidak hanya mempertimbangkan performa teknis, tetapi juga integrasi dengan baterai, inverter, thermal management, dan renewable energy charging system. Motor dengan efisiensi tinggi akan memperpanjang driving range, mengurangi beban baterai, dan meningkatkan rasio pemanfaatan energi terbarukan. Karena itu, pemilihan motor harus dilakukan berdasarkan simulasi kebutuhan torsi, profil penggunaan kendaraan, kondisi geografis, dan target efisiensi energi sistem secara keseluruhan.

Tabel 3.1. Perbandingan BLDC, PMSM, dan Axial Flux Motor

Parameter	BLDC	PMSM	Axial Flux Motor
Efisiensi Energi	Tinggi	Sangat Tinggi	Sangat Tinggi
Torque Density	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
Biaya Produksi	Rendah	Sedang-Tinggi	Tinggi
Kompleksitas Kontrol	Sedang	Tinggi	Tinggi
Ukuran dan Bobot	Sedang	Ringkas	Sangat Ringan
Noise Operasi	Sedang	Rendah	Rendah
Cocok untuk Hybrid Off-Grid	Baik	Sangat Baik	Ideal

Di Indonesia, kendaraan hybrid off-grid untuk wilayah rural dan kepulauan membutuhkan motor yang tahan panas, efisien pada kecepatan rendah-menengah, dan mudah dirawat. Dalam hal ini, BLDC masih menjadi pilihan realistis untuk implementasi awal. Namun untuk pengembangan jangka panjang menuju kendaraan listrik generasi cerdas, PMSM dan AFM akan menjadi arah dominan teknologi masa depan.

Secara keseluruhan, BLDC, PMSM, dan Axial Flux Motor masing-masing memainkan peran penting dalam evolusi kendaraan hybrid electric motorcycle. Pemahaman mendalam terhadap karakteristik ketiganya sangat penting agar desain powertrain dapat disesuaikan dengan kebutuhan kendaraan, strategi energi, dan arah inovasi masa depan.

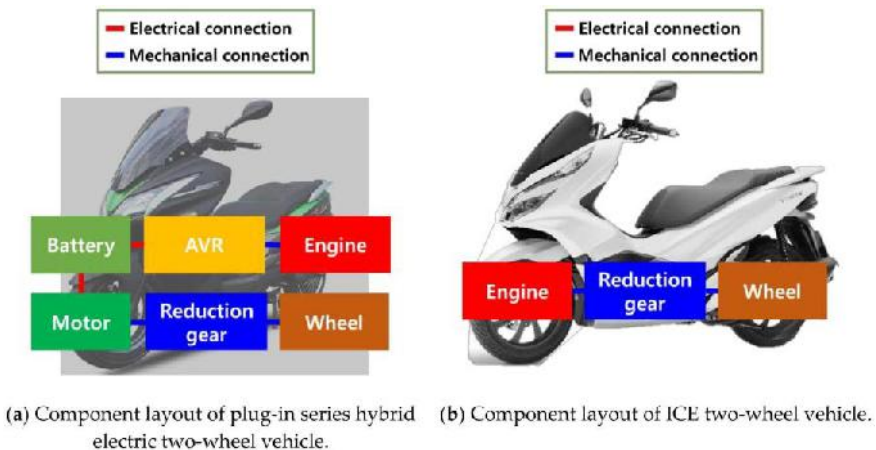
3.2 Downsized ICE pada Hybrid Motorcycle

Dalam sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid, **downsized Internal Combustion Engine (ICE)** merupakan strategi rekayasa penting untuk meningkatkan efisiensi energi tanpa menghilangkan fleksibilitas jangkauan kendaraan. Downsizing ICE berarti penggunaan mesin pembakaran internal berkapasitas lebih kecil dibanding kendaraan konvensional, karena fungsi mesin tersebut tidak lagi menjadi sumber tenaga utama, melainkan hanya sebagai penopang energi sekunder. Pada kendaraan hybrid, sebagian besar beban akselerasi awal dan operasi kecepatan rendah diambil alih oleh motor listrik, sehingga mesin pembakaran dapat diperkecil tanpa menurunkan performa keseluruhan kendaraan. Pendekatan ini menjadi salah satu inovasi utama dalam desain hybrid modern karena memungkinkan pengurangan konsumsi bahan bakar, emisi karbon, bobot kendaraan, dan kompleksitas mekanik secara simultan. Dalam naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa downsized ICE menjadi solusi ideal untuk menjembatani transisi dari kendaraan berbahan bakar

fosil menuju kendaraan listrik penuh, khususnya di negara berkembang dengan keterbatasan infrastruktur charging .

Pada sepeda motor konvensional, mesin pembakaran harus dirancang untuk memenuhi seluruh kebutuhan tenaga kendaraan, mulai dari akselerasi awal, tanjakan, kecepatan tinggi, hingga beban maksimum. Akibatnya, kapasitas mesin sering kali lebih besar dari kebutuhan rata-rata harian pengguna, sehingga banyak energi terbuang dalam kondisi operasi parsial. Dalam hybrid motorcycle, motor listrik mengambil alih fungsi torsi tinggi pada putaran rendah, sehingga mesin pembakaran hanya bekerja saat diperlukan: misalnya saat baterai lemah, perjalanan jarak jauh, atau kebutuhan daya tinggi berkepanjangan. Dengan demikian, kapasitas ICE dapat dikurangi secara signifikan tanpa mengorbankan kenyamanan berkendara.

Secara termodinamika, downsized ICE bekerja lebih efisien karena dioperasikan pada titik beban optimal. Mesin kecil yang bekerja pada rentang efisiensi terbaik menghasilkan konsumsi bahan bakar lebih rendah dibanding mesin besar yang sering beroperasi pada partial load. Pengurangan kapasitas mesin dari sekitar 690 cc menjadi sekitar 250 cc pada hybrid motorcycle mampu mempertahankan performa setara, sambil menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 27% dan emisi CO₂ hingga 45% . Temuan ini menegaskan bahwa downsized ICE bukan sekadar pengurangan ukuran mesin, tetapi transformasi strategi pemanfaatan energi yang lebih cerdas.



Gambar 3.2. Konsep Downsized ICE dalam Sistem Hybrid Motorcycle

Dalam sistem hybrid off-grid, downsized ICE dapat ditempatkan dalam dua konfigurasi utama. Pertama adalah **range extender mode**, di

mana mesin hanya berfungsi sebagai generator listrik untuk mengisi baterai tanpa menggerakkan roda secara langsung. Konfigurasi ini umum pada series hybrid karena motor listrik tetap menjadi satu-satunya penggerak roda. Kedua adalah **parallel assist mode**, di mana mesin kecil tetap dapat menyalurkan tenaga langsung ke roda saat dibutuhkan. Pemilihan konfigurasi ini bergantung pada arsitektur hybrid yang digunakan, apakah series, parallel, atau power split.

Keuntungan utama downsized ICE terletak pada pengurangan bobot total kendaraan. Mesin yang lebih kecil berarti ukuran blok mesin lebih ringkas, massa lebih ringan, dan ruang pemasangan lebih fleksibel. Hal ini sangat penting pada sepeda motor, karena keterbatasan ruang rangka jauh lebih ketat dibanding kendaraan roda empat. Bobot yang lebih ringan secara langsung meningkatkan efisiensi energi, akselerasi, dan kelincahan kendaraan. Selain itu, beban struktural terhadap chassis juga berkurang, sehingga desain frame dapat dibuat lebih ringan dan aerodinamis.

Dari sisi emisi lingkungan, downsized ICE menghasilkan gas buang lebih sedikit karena volume pembakaran lebih kecil. Jika dikombinasikan dengan kontrol elektronik cerdas, mesin hanya aktif pada saat benar-benar diperlukan, sehingga total waktu operasi mesin jauh lebih rendah dibanding motor bensin biasa. Dalam kendaraan hybrid modern, mesin kecil juga dapat diprogram bekerja pada putaran konstan optimum untuk meminimalkan NO_x, HC, dan particulate emissions. Ini menjadi salah satu alasan mengapa hybrid motorcycle dianggap sebagai solusi transisi yang sangat efektif menuju transportasi rendah karbon.

Tabel 3.2. Keunggulan Downsized ICE pada Hybrid Motorcycle

Aspek	Dampak Positif
Konsumsi Bahan Bakar	Menurun signifikan
Emisi CO ₂	Lebih rendah
Bobot Kendaraan	Lebih ringan
Efisiensi Termal	Lebih tinggi
Biaya Operasional	Lebih hemat
Integrasi Sistem Hybrid	Lebih fleksibel

Namun demikian, downsized ICE juga memiliki tantangan teknis. Mesin kecil cenderung bekerja pada tekanan termal lebih tinggi karena beban spesifik meningkat. Oleh sebab itu, sistem pendinginan harus dirancang lebih efektif agar temperatur tetap stabil. Selain itu, getaran mesin kecil pada putaran tinggi perlu dikendalikan dengan mounting system dan balancing mechanism yang baik agar kenyamanan berkendara tetap terjaga.

Tantangan lain adalah sinkronisasi dengan motor listrik agar perpindahan tenaga berlangsung mulus tanpa jeda torsi.

Di Indonesia, downsized ICE sangat relevan karena dapat memanfaatkan infrastruktur bahan bakar yang sudah tersedia sambil tetap mendukung transisi bertahap menuju kendaraan listrik penuh. Untuk daerah rural yang belum memiliki charging station memadai, kendaraan hybrid dengan mesin kecil cadangan memberikan rasa aman lebih tinggi kepada pengguna karena kendaraan tetap dapat beroperasi meski pasokan listrik terbatas. Pendekatan ini menjadikan hybrid motorcycle lebih adaptif terhadap kondisi geografis dan infrastruktur nasional.

Dari perspektif masa depan, tren global menunjukkan bahwa peran downsized ICE akan semakin bergeser dari sumber tenaga utama menjadi sekadar auxiliary energy generator. Seiring peningkatan kapasitas baterai, efisiensi motor listrik, dan integrasi renewable charging systems, mesin pembakaran akan semakin kecil, lebih efisien, bahkan berpotensi digantikan oleh micro fuel cell atau renewable bio-generator. Namun dalam dua dekade transisi mendatang, downsized ICE tetap akan menjadi komponen strategis dalam mempercepat adopsi kendaraan hybrid secara massal.

Secara keseluruhan, downsized ICE adalah kompromi cerdas antara efisiensi energi, fleksibilitas operasional, dan kesiapan infrastruktur. Teknologi ini memungkinkan kendaraan hybrid motorcycle tetap hemat energi, rendah emisi, dan praktis digunakan dalam berbagai kondisi, sambil membuka jalan menuju era transportasi sepenuhnya listrik dan bebas karbon.

3.3 Sistem Transmisi CVT dan Integrasi Hybrid Drive

Sistem transmisi merupakan subsistem vital dalam kendaraan hybrid karena berfungsi menyalurkan tenaga dari sumber penggerak menuju roda secara efisien, stabil, dan adaptif terhadap perubahan beban operasi. Pada sepeda motor listrik hybrid off-grid, tantangan transmisi menjadi lebih kompleks karena tenaga tidak hanya berasal dari satu sumber, melainkan kombinasi motor listrik, mesin pembakaran internal (downsized ICE), dan kadang sumber energi tambahan seperti regenerative braking feedback. Dalam hal ini, **Continuously Variable Transmission (CVT)** menjadi salah satu solusi paling efektif karena mampu menyediakan rasio transmisi yang berubah secara kontinu tanpa perpindahan gigi bertingkat, sehingga menghasilkan distribusi tenaga lebih halus, efisien, dan responsif. Naskah dasar buku ini menegaskan bahwa integrasi transmisi adaptif seperti CVT sangat penting untuk mengoptimalkan sinkronisasi tenaga antara motor listrik dan mesin sekunder pada hybrid motorcycle modern.

CVT bekerja berdasarkan prinsip perubahan diameter efektif pulley secara dinamis melalui sistem pulley primer dan pulley sekunder yang dihubungkan sabuk transmisi. Ketika kecepatan kendaraan meningkat, diameter pulley penggerak berubah sehingga rasio transmisi menyesuaikan secara otomatis tanpa perpindahan gigi manual. Keunggulan utama CVT dibanding transmisi konvensional adalah kemampuan menjaga motor atau mesin tetap bekerja pada titik efisiensi optimal, terlepas dari perubahan kecepatan kendaraan. Dalam hybrid motorcycle, hal ini sangat penting karena motor listrik memiliki karakteristik torsi instan yang berbeda dari mesin pembakaran internal. CVT memungkinkan kedua sumber tenaga bekerja harmonis dalam rentang efisiensi terbaik masing-masing.

Pada kendaraan hybrid, integrasi CVT tidak hanya bertugas mentransmisikan tenaga, tetapi juga menjadi titik sinkronisasi utama antara motor listrik dan ICE. Dalam sistem parallel hybrid, CVT memungkinkan perpindahan mode operasi dari listrik murni ke mode hybrid gabungan tanpa hentakan mekanik. Dalam power split hybrid, CVT bahkan dapat dikombinasikan dengan planetary gear system untuk membagi tenaga dari dua sumber sekaligus secara proporsional. CVT pada hybrid motorcycle mampu meningkatkan fuel economy hingga 49% dibanding transmisi gear-step konvensional, terutama pada konfigurasi power split hybrid yang memanfaatkan distribusi tenaga adaptif.

Keunggulan lain CVT adalah kemampuannya mereduksi kehilangan energi saat akselerasi dan deselerasi. Pada transmisi manual atau gear-step otomatis, perpindahan gigi sering menimbulkan losses akibat jeda transfer torsi. CVT menghilangkan jeda ini karena rasio berubah kontinu. Akibatnya, akselerasi menjadi lebih halus, nyaman, dan efisien. Pada sepeda motor hybrid off-grid, efisiensi ini sangat penting karena setiap kehilangan energi berdampak langsung pada driving range dan kapasitas baterai yang tersedia.



Gambar 3.3. Skema Sistem CVT pada Hybrid Motorcycle

Dalam integrasi hybrid drive, CVT memainkan peran strategis dalam tiga mode operasi utama:

Electric Drive Mode – hanya motor listrik aktif, CVT menyesuaikan rasio untuk efisiensi torsi rendah-menengah.

Hybrid Assist Mode – motor listrik dan ICE bekerja bersama, CVT menggabungkan tenaga keduanya secara simultan.

ICE Dominant Mode – mesin pembakaran menjadi tenaga utama, motor listrik hanya membantu pada beban puncak.

Mode-mode ini diatur secara otomatis oleh electronic control unit (ECU), yang membaca parameter real-time seperti throttle demand, battery SOC, kecepatan, gradien jalan, dan temperatur sistem. Sinkronisasi ini membuat hybrid drive menjadi lebih adaptif dan efisien dibanding sistem tenaga tunggal.

Salah satu tantangan integrasi CVT pada hybrid motorcycle adalah sinkronisasi torsi antara motor listrik dan mesin pembakaran. Motor listrik menghasilkan torsi maksimum sejak nol RPM, sementara ICE memerlukan waktu untuk mencapai putaran optimal. Tanpa sistem kontrol presisi, perbedaan karakteristik ini dapat menimbulkan ketidakseimbangan beban transmisi. Oleh karena itu, kendaraan hybrid modern menggunakan torque blending algorithm agar transisi tenaga berlangsung mulus dan stabil.

Tabel 3.3. Keunggulan CVT dalam Sistem Hybrid Motorcycle

Aspek	Keunggulan CVT
Efisiensi Energi	Menjaga operasi pada titik efisiensi optimal
Akselerasi	Halus tanpa hentakan perpindahan gigi
Integrasi Hybrid	Mudah sinkron dengan motor listrik + ICE
Kenyamanan Berkendara	Sangat tinggi
Fuel Economy	Lebih hemat dibanding transmisi step gear
Respons Torsi	Adaptif dan kontinu

Selain CVT konvensional berbasis belt, pengembangan terbaru mengarah pada **electronic CVT (e-CVT)** yang sepenuhnya dikontrol secara digital. e-CVT memungkinkan pengaturan rasio transmisi lebih presisi, integrasi lebih baik dengan AI-based controller, serta adaptasi real-time terhadap driving cycle. Dalam kendaraan hybrid generasi baru, e-CVT mulai dipadukan dengan predictive control systems berbasis machine learning agar kendaraan dapat mengantisipasi kebutuhan tenaga sebelum terjadi perubahan beban nyata.

Dalam hybrid off-grid motorcycle, CVT juga berperan penting dalam optimalisasi regenerative braking. Saat kendaraan melakukan deselerasi, CVT membantu menyesuaikan rasio agar motor listrik dapat bekerja optimal sebagai generator. Hal ini meningkatkan efisiensi pemulihan energi dan memperpanjang umur baterai karena proses charging berlangsung lebih stabil. Pada kendaraan dengan renewable charging integration, energi yang dipulihkan ini berkontribusi langsung terhadap pengurangan kebutuhan pengisian eksternal.

Di Indonesia, penggunaan CVT sangat relevan karena masyarakat sudah familiar dengan transmisi otomatis pada sepeda motor harian. Hal ini mempermudah adopsi hybrid motorcycle karena pengguna tidak memerlukan adaptasi besar dalam pola berkendara. Selain itu, perawatan CVT relatif sederhana dan suku cadangnya mudah diproduksi secara lokal, sehingga mendukung pengembangan industri kendaraan listrik nasional.

Namun demikian, CVT juga memiliki keterbatasan, terutama pada daya sangat tinggi dan penggunaan ekstrem. Belt CVT memiliki batas ketahanan mekanis tertentu, sehingga pada kendaraan performa tinggi perlu material belt khusus atau alternatif transmisi lain seperti dual motor direct drive systems. Oleh sebab itu, desain CVT pada hybrid motorcycle harus disesuaikan dengan target daya, beban kendaraan, dan pola penggunaan.

Secara keseluruhan, sistem transmisi CVT merupakan solusi ideal untuk hybrid motorcycle karena mampu menyatukan efisiensi energi, kenyamanan berkendara, dan fleksibilitas integrasi multi-sumber tenaga. Dalam era kendaraan hybrid cerdas, CVT bukan lagi sekadar transmisi mekanik, tetapi bagian integral dari sistem manajemen energi kendaraan yang adaptif dan berkelanjutan.

3.4 Torque Density dan Thermal Management Motor

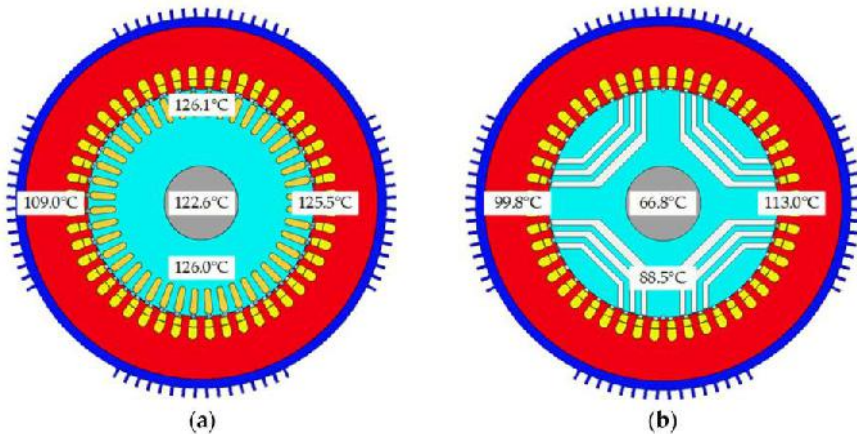
Dalam pengembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid, dua parameter teknis yang sangat menentukan kualitas performa motor penggerak adalah **torque density** dan **thermal management**. Torque density menggambarkan kemampuan motor menghasilkan torsi dalam rasio terhadap ukuran atau beratnya, sedangkan thermal management berkaitan dengan kemampuan sistem menjaga suhu operasi motor agar tetap berada dalam batas aman dan efisien. Kedua aspek ini sangat krusial karena kendaraan roda dua memiliki keterbatasan ruang pemasangan, beban total kendaraan, serta kebutuhan efisiensi energi yang tinggi. Pada sistem hybrid motorcycle modern, motor listrik tidak hanya dituntut menghasilkan torsi besar untuk akselerasi cepat, tetapi juga harus tetap stabil bekerja pada berbagai kondisi beban dan lingkungan tanpa

mengalami overheating. Dalam naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa desain motor kendaraan hybrid harus mempertimbangkan kepadatan daya dan sistem pendinginan sebagai satu kesatuan rekayasa, bukan sebagai elemen terpisah.

Torque density menjadi indikator utama kualitas motor listrik karena secara langsung memengaruhi akselerasi, efisiensi ruang, dan bobot kendaraan. Motor dengan torque density tinggi mampu menghasilkan torsi besar meskipun ukurannya kecil dan ringan. Hal ini sangat penting pada sepeda motor hybrid off-grid karena ruang di dalam chassis terbatas dan beban kendaraan harus dijaga serendah mungkin agar driving range tetap optimal. Dalam kendaraan listrik, torque density yang tinggi memungkinkan akselerasi instan tanpa perlu motor besar, sehingga meningkatkan efisiensi energi sekaligus kenyamanan berkendara. Axial Flux Motor (AFM), yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya, merupakan salah satu contoh motor dengan torque density tertinggi karena desain fluks aksialnya memungkinkan distribusi gaya magnet lebih efisien dibanding motor radial konvensional. Penggunaan axial flux motor dengan desain Halbach array mampu meningkatkan torque density hingga 30% lebih tinggi dibanding PMSM konvensional, sambil menurunkan losses termal secara signifikan.

Secara fisika, torque density dipengaruhi oleh beberapa faktor utama: kekuatan medan magnet, desain rotor-stator, jumlah kutub magnet, kualitas material inti besi, efisiensi winding stator, dan kecepatan rotasi motor. Semakin tinggi kekuatan medan magnet permanen dan semakin optimal geometri rotor-stator, semakin besar torsi yang dapat dihasilkan. Namun peningkatan torque density sering kali menyebabkan peningkatan konsentrasi panas pada area stator dan rotor. Di sinilah thermal management menjadi sangat penting. Tanpa sistem pendinginan yang baik, motor dengan torque density tinggi rentan mengalami penurunan efisiensi, degradasi isolasi winding, bahkan kegagalan permanen akibat overheating.

Panas pada motor listrik terutama berasal dari tiga sumber utama: copper losses (rugi resistansi pada kumparan), core losses (rugi magnetik inti), dan mechanical losses (gesekan bearing serta hambatan udara). Pada kendaraan hybrid, panas juga meningkat saat motor bekerja dalam kondisi akselerasi tinggi, tanjakan panjang, atau beban maksimum. Jika temperatur motor melebihi batas desain, resistansi listrik meningkat, efisiensi menurun, dan risiko thermal runaway pada sistem sekitar juga bertambah. Oleh sebab itu, thermal management bukan sekadar pelengkap, tetapi bagian integral dari desain motor kendaraan listrik.



Gambar 3.4. Distribusi Panas dan Torque Density pada Motor Listrik Hybrid Motorcycle

Dalam praktik rekayasa, terdapat beberapa metode thermal management yang umum digunakan pada motor listrik hybrid motorcycle. Metode paling sederhana adalah **air cooling passive system**, di mana panas dibuang melalui sirip pendingin dan aliran udara alami. Sistem ini ringan, murah, dan sederhana, tetapi kurang efektif untuk motor daya tinggi. Untuk kendaraan performa menengah dan tinggi, digunakan **forced air cooling**, yaitu pendinginan dengan kipas aktif yang meningkatkan sirkulasi udara. Pada kendaraan hybrid generasi baru, metode yang semakin banyak digunakan adalah **liquid cooling system**, yaitu pendinginan berbasis cairan yang dialirkan melalui jacket cooling channels di sekitar stator motor. Liquid cooling jauh lebih efektif karena kapasitas transfer panas cairan lebih tinggi dibanding udara.

Sistem pendinginan modern seperti embedded dual-channel liquid cooling, water jacket cooling, dan oil spray cooling mampu menurunkan temperatur coil motor hingga 40°C dibanding sistem pendinginan udara biasa. Hal ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi motor, umur pakai winding insulation, dan kestabilan performa jangka panjang. Pada axial flux motor, sistem pendinginan menjadi lebih kritis karena densitas torsi tinggi menghasilkan konsentrasi panas lebih besar pada area sempit. Selain metode pendinginan, thermal management modern juga melibatkan **sensor suhu real-time dan intelligent thermal monitoring system**. Sensor temperatur ditempatkan pada stator winding, bearing housing, inverter interface, dan rotor zone untuk memantau kondisi panas secara kontinu. Data ini dikirim ke ECU untuk menentukan apakah daya motor perlu dikurangi sementara demi menjaga keselamatan sistem. Dalam kendaraan hybrid cerdas, AI-based thermal prediction bahkan dapat

memperkirakan lonjakan suhu sebelum overheating terjadi, sehingga sistem dapat melakukan preventive cooling adjustment secara otomatis.

Tabel 3.4. Perbandingan Sistem Thermal Management Motor Listrik

Metode Pendinginan	Keunggulan	Kelemahan
Air Cooling Pasif	Murah, ringan, sederhana	Efektivitas rendah
Forced Air Cooling	Lebih baik untuk beban sedang	Masih terbatas untuk daya tinggi
Liquid Cooling	Efisiensi pendinginan sangat tinggi	Kompleks dan mahal
Oil Spray Cooling	Sangat efektif untuk high-performance motor	Memerlukan desain presisi tinggi

Dalam sepeda motor hybrid off-grid, torque density dan thermal management memiliki hubungan langsung dengan efisiensi energi total kendaraan. Motor dengan torque density tinggi memungkinkan kendaraan lebih ringan, tetapi membutuhkan pendinginan lebih intensif. Sebaliknya, pendinginan berlebih dapat menambah konsumsi daya dan kompleksitas sistem. Oleh karena itu, desain optimal harus mencari titik keseimbangan antara performa torsi maksimum dan kebutuhan energi pendinginan minimum.

Di Indonesia, tantangan thermal management menjadi lebih besar karena iklim tropis dengan suhu lingkungan tinggi dapat mempercepat akumulasi panas motor. Pada daerah panas dan lembap, suhu operasi motor cenderung naik lebih cepat dibanding negara beriklim sedang. Oleh sebab itu, desain motor hybrid untuk pasar Indonesia harus mempertimbangkan ambient temperature factor secara serius, termasuk penggunaan material housing dengan konduktivitas termal tinggi dan sistem ventilasi lebih efisien.

Secara keseluruhan, torque density dan thermal management adalah dua sisi tak terpisahkan dalam desain motor listrik hybrid motorcycle. Torque density menentukan seberapa besar performa yang dapat dihasilkan motor, sementara thermal management memastikan performa tersebut dapat dipertahankan secara aman dan berkelanjutan. Keseimbangan keduanya menjadi fondasi utama lahirnya kendaraan hybrid yang efisien, andal, dan siap menghadapi tuntutan mobilitas masa depan.

3.5 Inovasi Lightweight Drivetrain

Dalam pengembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid, inovasi **lightweight drivetrain** menjadi salah satu strategi paling penting untuk

meningkatkan efisiensi energi, memperpanjang jarak tempuh, serta mengoptimalkan performa kendaraan. Drivetrain adalah keseluruhan sistem penggerak yang meliputi motor listrik, transmisi, poros penghubung, gear reduction unit, differential coupling (jika ada), serta struktur pendukung mekanis yang menyalurkan tenaga ke roda. Pada kendaraan roda dua, bobot drivetrain sangat berpengaruh terhadap total massa kendaraan karena proporsinya cukup besar dibanding keseluruhan berat motor. Semakin ringan drivetrain, semakin kecil energi yang dibutuhkan untuk akselerasi dan mempertahankan kecepatan, sehingga efisiensi energi meningkat secara signifikan. Dalam naskah utama buku ini ditegaskan bahwa pengurangan massa sistem penggerak merupakan salah satu faktor kunci dalam desain kendaraan hybrid generasi baru yang hemat energi dan berdaya saing tinggi.

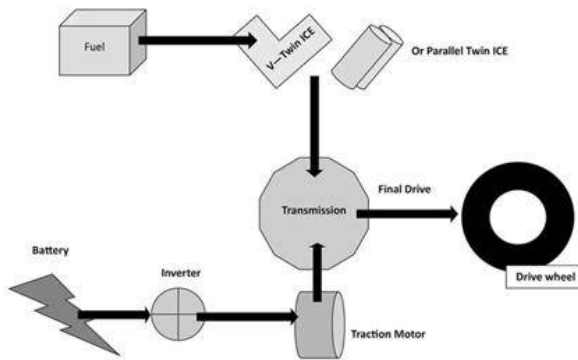
Secara prinsip, lightweight drivetrain bertujuan mengurangi massa sistem penggerak tanpa mengorbankan kekuatan mekanis, keandalan, dan efisiensi transmisi tenaga. Strategi ini dilakukan melalui beberapa pendekatan utama: penggunaan material ringan berkekuatan tinggi, penyederhanaan komponen mekanis, integrasi fungsi multi-komponen, miniaturisasi sistem penggerak, serta optimasi desain berbasis simulasi digital. Dalam kendaraan hybrid off-grid, pengurangan bobot drivetrain menjadi semakin penting karena kendaraan juga membawa tambahan komponen seperti baterai, inverter, BMS, dan modul renewable charging interface. Tanpa inovasi lightweight engineering, bobot kendaraan dapat meningkat terlalu besar dan mengurangi keunggulan efisiensi kendaraan listrik.

Salah satu inovasi paling signifikan adalah penggunaan **material komposit ringan dan paduan logam canggih**, seperti aluminium alloy aerospace-grade, magnesium alloy, titanium composite, serta carbon fiber reinforced polymer (CFRP). Material-material ini memiliki rasio strength-to-weight sangat tinggi sehingga cocok untuk komponen drivetrain seperti housing motor, casing transmisi, gear carrier, dan shaft couplings. Dibanding baja konvensional, aluminium alloy dapat mengurangi berat komponen hingga 30–40%, sementara CFRP bahkan dapat mengurangi massa hingga lebih dari 60% dengan kekuatan struktural tetap tinggi.

Tren pengembangan hybrid electric motorcycle mengarah pada lightweight drivetrain architecture berbasis compact axial-flux motor, forkless lightweight frame, dan solid-slot integrated drive systems yang mampu mengurangi total massa drivetrain sambil meningkatkan efisiensi tenaga secara simultan. Temuan ini memperlihatkan bahwa inovasi drivetrain ringan bukan hanya fokus pada material, tetapi juga pada perubahan arsitektur desain secara keseluruhan.

Desain drivetrain konvensional sering kali terdiri dari banyak komponen terpisah: motor, gearbox, coupling shaft, housing, bearing block, dan mounting system. Dalam desain modern, pendekatan **integrated drive module** mulai banyak diterapkan. Pada sistem ini, motor listrik, reducer gear, inverter, dan cooling system digabung dalam satu unit modular terpadu. Pendekatan ini mengurangi jumlah komponen mekanik, menghilangkan sambungan berlebih, mengurangi losses mekanik, dan sekaligus memangkas bobot total sistem. Selain lebih ringan, desain modular juga mempermudah perawatan, perakitan, dan penggantian unit.

Selain material dan integrasi modular, inovasi penting lainnya adalah penggunaan **hub motor direct drive system**, yaitu motor listrik yang dipasang langsung pada roda tanpa perlu transmisi mekanis kompleks. Sistem ini menghilangkan kebutuhan gear reduction dan shaft transmission, sehingga secara drastis mengurangi bobot drivetrain. Pada beberapa desain hybrid motorcycle urban, hub motor mampu menurunkan berat drivetrain hingga 25% dibanding sistem transmisi tradisional. Namun, tantangan utamanya adalah peningkatan unsprung mass pada roda, yang dapat memengaruhi stabilitas suspensi jika tidak dirancang dengan baik.



Gambar 3.5. Konsep Lightweight Drivetrain pada Hybrid Motorcycle

Aspek lain yang menentukan keberhasilan lightweight drivetrain adalah optimasi desain berbasis simulasi komputer. Teknologi CAE (Computer Aided Engineering), finite element analysis (FEA), dan topology optimization memungkinkan insinyur mengidentifikasi area material yang dapat dikurangi tanpa mengorbankan kekuatan struktural. Dengan pendekatan ini, desain komponen drivetrain dapat dibuat lebih efisien secara geometris—misalnya gear housing berlubang internal lattice, hollow shaft structure, dan skeletal mounting brackets. Teknik ini sangat efektif untuk mengurangi massa sambil mempertahankan integritas mekanik.

Dalam performa kendaraan, drivetrain ringan memberikan dampak langsung pada beberapa aspek utama: akselerasi meningkat karena inersia lebih kecil, konsumsi energi per kilometer menurun, respons throttle lebih cepat, serta driving range bertambah. Pada kendaraan hybrid off-grid, peningkatan range sangat penting karena setiap kilogram bobot tambahan memengaruhi kebutuhan energi dari baterai dan sumber renewable charging system. Dengan drivetrain ringan, kendaraan dapat memanfaatkan energi surya dan regenerative braking secara lebih efisien.

Tabel 3.5. Strategi Inovasi Lightweight Drivetrain

Strategi Inovasi	Dampak terhadap Sistem
Material ringan (Al, CFRP, Mg)	Mengurangi massa komponen
Integrated drive module	Menyederhanakan sistem dan bobot
Hub motor direct drive	Menghilangkan transmisi kompleks
Topology optimization	Efisiensi desain struktural
Compact axial flux motor	Torque tinggi dengan bobot rendah

Namun demikian, inovasi lightweight drivetrain juga menghadapi tantangan. Material ringan berkualitas tinggi cenderung mahal dan membutuhkan teknologi manufaktur presisi tinggi. CFRP misalnya, sangat ringan tetapi biaya produksinya masih tinggi untuk produksi massal. Selain itu, beberapa material ringan seperti magnesium alloy memiliki tantangan korosi dan fatigue resistance yang harus diatasi melalui coating khusus dan desain proteksi tambahan.

Di Indonesia, inovasi lightweight drivetrain memiliki potensi besar jika dikombinasikan dengan pengembangan manufaktur lokal berbasis aluminium casting dan komposit serat alam. Dengan memanfaatkan sumber daya lokal seperti serat kenaf, serat bambu, atau hybrid bio-composite materials, Indonesia dapat mengembangkan drivetrain ringan berbiaya lebih rendah namun tetap kompetitif. Pendekatan ini tidak hanya memperkuat industri kendaraan listrik nasional, tetapi juga membuka peluang ekonomi hijau berbasis material berkelanjutan.

Dari perspektif masa depan, lightweight drivetrain akan menjadi standar baru dalam desain kendaraan hybrid dan electric mobility. Seiring meningkatnya tuntutan efisiensi energi, teknologi motor kompak, material ultra-ringan, dan smart integrated drivetrain akan semakin dominan. Dalam kendaraan hybrid off-grid generasi mendatang, drivetrain tidak lagi sekadar sistem transmisi tenaga, tetapi menjadi platform modular cerdas yang menyatu dengan kontrol energi, sensor digital, dan AI predictive maintenance.

Secara keseluruhan, inovasi lightweight drivetrain adalah fondasi penting bagi lahirnya sepeda motor listrik hybrid off-grid yang benar-benar efisien, ringan, hemat energi, dan adaptif terhadap kebutuhan mobilitas masa depan. Dengan mengurangi massa tanpa mengorbankan kekuatan dan performa, teknologi ini menjadi salah satu pilar utama transisi menuju transportasi bersih yang berkelanjutan.

BAB 4

SISTEM PENYIMPANAN ENERGI DAN BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS)

4.1 Teknologi Baterai Lithium-ion dan LiFePO₄

Dalam sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid, baterai merupakan pusat penyimpanan energi yang menentukan kemampuan operasional kendaraan secara keseluruhan. Kinerja kendaraan—mulai dari akselerasi, driving range, efisiensi energi, stabilitas daya, hingga integrasi dengan sumber energi terbarukan—sangat bergantung pada teknologi baterai yang digunakan. Di antara berbagai teknologi penyimpanan energi yang tersedia saat ini, dua jenis baterai yang paling dominan dan relevan untuk kendaraan hybrid modern adalah **Lithium-ion (Li-ion)** dan **Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄)**. Kedua teknologi ini menawarkan kombinasi terbaik antara densitas energi tinggi, efisiensi charge-discharge, umur pakai panjang, dan kompatibilitas dengan sistem kendaraan listrik. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa pemilihan jenis baterai merupakan salah satu keputusan desain paling strategis karena berpengaruh langsung terhadap performa, keselamatan, dan biaya kendaraan hybrid off-grid.

Lithium-ion battery merupakan keluarga baterai isi ulang yang menggunakan ion lithium sebagai media perpindahan muatan antara anoda dan katoda selama proses charge-discharge. Teknologi ini menjadi standar global dalam kendaraan listrik karena memiliki densitas energi jauh lebih tinggi dibanding baterai timbal-asam atau nickel-metal hydride. Pada sepeda motor hybrid, baterai Li-ion memungkinkan kendaraan menempuh jarak lebih jauh dengan bobot lebih ringan. Selain itu, self-discharge rate yang rendah membuat energi tersimpan lebih stabil dalam jangka waktu lama, sangat penting untuk kendaraan off-grid yang tidak selalu digunakan setiap hari.

Secara konstruksi, baterai lithium-ion terdiri dari beberapa kimia sel yang berbeda, seperti NMC (Nickel Manganese Cobalt), NCA (Nickel Cobalt Aluminum), LCO (Lithium Cobalt Oxide), dan LFP (Lithium Iron Phosphate). Di antara berbagai jenis tersebut, LiFePO₄ kini semakin populer untuk aplikasi kendaraan hybrid motorcycle karena menawarkan kestabilan termal lebih baik, umur siklus lebih panjang, dan tingkat keamanan lebih tinggi dibanding kimia lithium-ion lainnya. Hal ini sangat relevan untuk kendaraan roda dua yang menghadapi getaran tinggi, suhu lingkungan ekstrem, dan ruang instalasi terbatas.

Keunggulan utama lithium-ion secara umum adalah densitas energi tinggi, biasanya berada pada rentang 150–250 Wh/kg, memungkinkan penyimpanan energi besar dalam volume kecil. Ini menjadikan Li-ion sangat cocok untuk kendaraan yang membutuhkan bobot ringan. Namun, beberapa varian Li-ion konvensional memiliki kelemahan berupa sensitivitas tinggi terhadap suhu panas, potensi thermal runaway, serta degradasi kapasitas lebih cepat jika mengalami overcharge atau deep discharge. Oleh sebab itu, sistem Battery Management System (BMS) menjadi sangat penting untuk menjaga kestabilan operasi baterai.

LiFePO₄, sebagai salah satu varian lithium battery yang paling stabil, memiliki keunggulan utama pada aspek keselamatan. Struktur kimia besi fosfat lebih tahan terhadap overheating, tidak mudah terbakar, dan memiliki stabilitas termal sangat baik. Selain itu, LiFePO₄ mampu mencapai umur siklus lebih dari 3000–5000 kali charge-discharge, jauh lebih tinggi dibanding lithium-ion NMC biasa yang rata-rata berada pada 1000–2000 siklus. Dalam hybrid off-grid motorcycle, umur panjang ini sangat penting karena kendaraan sering mengalami pola pengisian parsial dari berbagai sumber energi seperti solar charging station, regenerative braking, dan battery swapping renewable hubs.

Pemilihan teknologi baterai modern dalam hybrid electric motorcycle harus mempertimbangkan tiga faktor utama: specific energy, cycle durability, dan thermal safety, di mana LiFePO₄ menunjukkan performa sangat unggul untuk kendaraan roda dua yang beroperasi dalam iklim tropis dan sistem charging terdesentralisasi. Temuan ini memperkuat posisi LiFePO₄ sebagai kandidat utama baterai masa depan untuk hybrid off-grid mobility systems.

Dari sisi performa, lithium-ion NMC unggul pada densitas energi lebih tinggi, sehingga cocok untuk kendaraan yang membutuhkan driving range maksimal dengan ruang baterai terbatas. Sebaliknya, LiFePO₄ unggul dalam stabilitas termal, umur pakai, dan keamanan. Oleh karena itu, pemilihan jenis baterai harus disesuaikan dengan prioritas desain kendaraan. Untuk kendaraan urban high-range, NMC bisa lebih menguntungkan. Namun untuk sepeda motor hybrid off-grid yang membutuhkan keandalan jangka panjang dan keselamatan tinggi, LiFePO₄ sering menjadi pilihan lebih rasional.

Salah satu aspek penting dalam teknologi baterai modern adalah kemampuan fast charging. Lithium-ion konvensional biasanya mendukung pengisian cepat dengan arus tinggi, tetapi fast charging berulang dapat mempercepat degradasi sel. LiFePO₄ sedikit lebih lambat dalam fast charging, namun lebih tahan terhadap thermal stress selama proses tersebut. Dalam kendaraan off-grid berbasis photovoltaic charging,

karakteristik charge acceptance baterai sangat menentukan efisiensi pemanfaatan energi surya.



Gambar 4.1. Struktur Dasar Baterai Lithium-ion dan LiFePO4 pada Hybrid Motorcycle

Tabel 4.1. Perbandingan Lithium-ion dan LiFePO4 untuk Hybrid Motorcycle

Parameter	Lithium-ion (NMC/NCA)	LiFePO4
Densitas Energi	Sangat Tinggi	Tinggi
Stabilitas Termal	Sedang	Sangat Tinggi
Umur Siklus	1000–2000	3000–5000
Keamanan	Sedang	Sangat Aman
Bobot	Lebih Ringan	Sedikit Lebih Berat
Fast Charging	Sangat Baik	Baik
Cocok untuk Off-Grid	Baik	Sangat Ideal

Di Indonesia, teknologi LiFePO₄ sangat relevan karena kondisi iklim tropis dengan suhu tinggi menuntut baterai yang tahan panas dan stabil. Suhu lingkungan yang tinggi dapat mempercepat degradasi lithium-ion biasa jika sistem pendinginan tidak optimal. LiFePO₄ menawarkan margin keselamatan lebih besar untuk kendaraan yang beroperasi di daerah panas, pedesaan, dan wilayah terpencil tanpa fasilitas pendinginan canggih.

Selain aspek teknis, faktor ekonomi juga menjadi pertimbangan penting. Harga awal LiFePO₄ biasanya sedikit lebih tinggi dibanding lithium-ion konvensional, tetapi biaya siklus hidupnya lebih rendah karena umur pakai lebih panjang dan frekuensi penggantian lebih sedikit. Untuk kendaraan hybrid off-grid yang dirancang beroperasi bertahun-tahun dalam sistem energi mandiri, total cost of ownership LiFePO₄ sering kali lebih ekonomis.

Perkembangan terbaru juga mengarah pada integrasi baterai cerdas dengan sensor embedded, self-balancing modules, dan AI-assisted diagnostics. Teknologi ini memungkinkan baterai memantau kesehatan sel secara real-time, memperkirakan degradasi kapasitas, dan mengoptimalkan pola charging berdasarkan kondisi penggunaan aktual. Dalam masa depan kendaraan hybrid off-grid, baterai tidak lagi sekadar penyimpan energi, tetapi menjadi subsistem cerdas yang aktif berinteraksi dengan controller kendaraan dan renewable energy network.

Secara keseluruhan, lithium-ion dan LiFePO₄ merupakan dua teknologi baterai utama yang menjadi fondasi kendaraan hybrid motorcycle masa kini dan masa depan. Pemahaman terhadap karakteristik keduanya sangat penting agar desain kendaraan dapat menyeimbangkan performa, keamanan, efisiensi, dan keberlanjutan energi secara optimal.

4.2 Hybrid Energy Storage System (Battery + Supercapacitor)

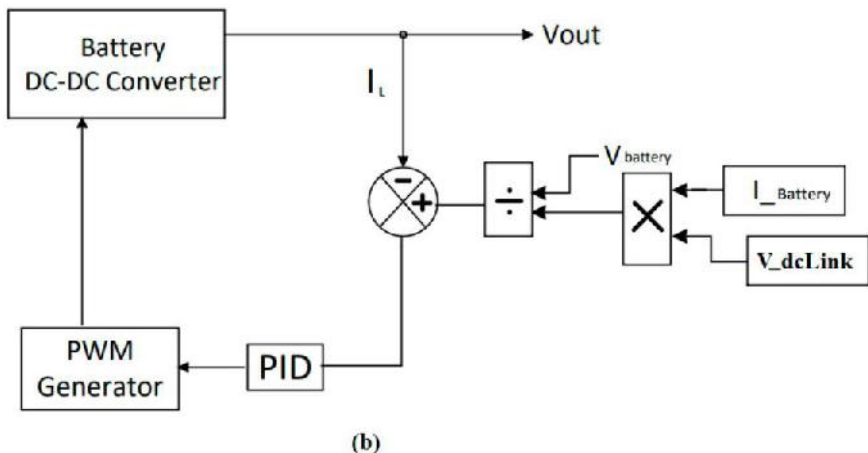
Dalam pengembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid modern, kebutuhan akan sistem penyimpanan energi yang tidak hanya memiliki kapasitas besar tetapi juga respons daya tinggi menjadi semakin penting. Baterai lithium-ion maupun LiFePO₄ unggul dalam menyimpan energi dalam jumlah besar, namun memiliki keterbatasan dalam merespons lonjakan daya instan, seperti saat akselerasi mendadak, start awal kendaraan, atau regenerative braking berintensitas tinggi. Untuk mengatasi keterbatasan ini, dikembangkan konsep **Hybrid Energy Storage System (HESS)**, yaitu sistem penyimpanan energi gabungan yang mengombinasikan baterai dengan supercapacitor. Pendekatan ini memungkinkan kendaraan memperoleh keunggulan simultan dari dua teknologi: kapasitas energi besar dari baterai dan kemampuan charge-discharge ultra-cepat dari

supercapacitor. Dalam naskah dasar buku ini disebutkan bahwa integrasi multi-layer energy storage menjadi salah satu arah inovasi utama dalam meningkatkan efisiensi dan umur pakai kendaraan hybrid masa depan .

Secara prinsip, baterai dan supercapacitor memiliki karakteristik elektrokimia yang berbeda namun saling melengkapi. Baterai dirancang untuk menyimpan energi dalam jangka waktu lama dengan densitas energi tinggi, tetapi memiliki keterbatasan pada densitas daya. Sebaliknya, supercapacitor memiliki densitas daya sangat tinggi, artinya mampu melepaskan atau menerima energi dalam waktu sangat singkat, namun kapasitas energinya jauh lebih kecil dibanding baterai. Dalam HESS, baterai berfungsi sebagai sumber energi utama untuk operasi normal kendaraan, sedangkan supercapacitor menangani kebutuhan daya puncak (*peak power demand*) dan menyerap energi pengereman regeneratif dengan sangat cepat. Kombinasi ini menciptakan sistem penyimpanan energi yang lebih adaptif, efisien, dan tahan lama.

Pada sepeda motor hybrid off-grid, kebutuhan lonjakan daya sangat sering terjadi, terutama pada kondisi stop-and-go urban traffic, tanjakan curam, akselerasi cepat, atau beban berat mendadak. Jika seluruh lonjakan daya dibebankan hanya pada baterai, maka sel baterai akan mengalami stres arus tinggi berulang yang mempercepat degradasi kapasitas dan memperpendek umur siklus. Dengan HESS, supercapacitor mengambil alih beban arus puncak tersebut, sehingga baterai bekerja lebih stabil pada rentang arus moderat. Integrasi battery-supercapacitor hybrid storage pada hybrid electric motorcycle dapat memperpanjang umur baterai hingga 35%, sekaligus meningkatkan efisiensi regenerative braking secara signifikan .

Supercapacitor, yang juga dikenal sebagai ultracapacitor, bekerja berdasarkan prinsip penyimpanan muatan elektrostatik, bukan reaksi kimia seperti baterai. Hal ini memungkinkan supercapacitor melakukan charge-discharge ratusan ribu kali tanpa degradasi signifikan. Dalam kendaraan hybrid, supercapacitor sangat ideal untuk menangkap energi kinetik hasil pengereman regeneratif, karena energi tersebut muncul dalam waktu singkat dan membutuhkan media penyimpanan yang mampu merespons cepat. Jika energi ini langsung masuk ke baterai, sebagian besar akan hilang karena keterbatasan charge acceptance rate baterai. Dengan supercapacitor, hampir seluruh energi pengereman dapat diserap terlebih dahulu, lalu ditransfer perlahan ke baterai utama.



Gambar 4.2. Skema Hybrid Energy Storage System pada Hybrid Motorcycle

Dalam implementasi teknis, HESS memerlukan sistem kontrol distribusi energi yang cerdas. Energy management controller bertugas menentukan kapan supercapacitor aktif, kapan baterai mengambil alih beban utama, dan bagaimana energi berpindah antar komponen. Strategi kontrol ini dapat berbasis rule-based logic, fuzzy control, atau model predictive control berbasis AI. Pada kendaraan hybrid modern, algoritma distribusi energi dirancang untuk menjaga agar baterai selalu berada pada zona operasi aman, sementara supercapacitor menangani fluktuasi daya dinamis. Dengan demikian, sistem menjadi lebih stabil dan efisien.

Tabel 4.2. Perbandingan Karakteristik Baterai dan Supercapacitor dalam HESS

Parameter	Baterai	Supercapacitor
Densitas Energi	Tinggi	Rendah
Densitas Daya	Sedang	Sangat Tinggi
Waktu Charge/Discharge	Menit–Jam	Detik
Umur Siklus	Ribuan siklus	Ratusan ribu siklus
Respons Lonjakan Arus	Terbatas	Sangat Cepat
Cocok untuk	Penyimpanan energi utama	Peak power & regenerative braking

Keunggulan utama HESS adalah peningkatan efisiensi energi keseluruhan kendaraan. Karena supercapacitor mampu merespons daya tinggi tanpa losses besar, energi akselerasi dan pengereman dapat dikelola

lebih efektif. Selain itu, tegangan sistem menjadi lebih stabil saat beban berubah cepat, sehingga performa motor listrik lebih konsisten. Pada kendaraan hybrid off-grid yang mengandalkan energi terbatas dari baterai dan renewable charging sources, efisiensi tambahan ini sangat berharga karena langsung berdampak pada driving range dan frekuensi charging.

Meski memiliki banyak keunggulan, penerapan HESS juga menghadapi tantangan. Pertama adalah biaya tambahan, karena supercapacitor berkualitas tinggi masih relatif mahal. Kedua, sistem integrasi membutuhkan converter tambahan dan kontrol elektronik lebih kompleks. Ketiga, ukuran fisik supercapacitor meskipun kecil untuk daya tinggi, tetap memerlukan ruang tambahan dalam chassis kendaraan. Oleh karena itu, desain HESS harus mempertimbangkan trade-off antara peningkatan performa dan keterbatasan ruang serta biaya produksi.

Di Indonesia, HESS memiliki potensi besar untuk kendaraan hybrid off-grid yang beroperasi di daerah dengan medan berat dan kondisi jalan bervariasi. Pada daerah pegunungan atau wilayah dengan stop-and-go traffic padat, regenerative braking lebih intensif sehingga supercapacitor dapat dimanfaatkan secara maksimal. Selain itu, iklim tropis yang panas menuntut sistem penyimpanan energi yang stabil terhadap fluktuasi suhu, dan supercapacitor memiliki performa termal lebih stabil dibanding baterai dalam kondisi temperatur ekstrem.

Perkembangan masa depan HESS mengarah pada integrasi material baru seperti graphene supercapacitor, solid-state battery hybrid modules, dan adaptive energy routing systems berbasis machine learning. Teknologi ini akan memungkinkan kendaraan hybrid off-grid memiliki sistem penyimpanan energi yang semakin ringan, cepat, tahan lama, dan efisien. Bahkan, dalam konsep kendaraan generasi berikutnya, HESS diproyeksikan menjadi standar utama untuk seluruh electric mobility systems, bukan lagi sekadar opsi tambahan.

Secara keseluruhan, Hybrid Energy Storage System merupakan evolusi penting dalam teknologi penyimpanan energi kendaraan listrik. Dengan menggabungkan kapasitas energi besar baterai dan kecepatan respons supercapacitor, HESS menghadirkan solusi ideal untuk kendaraan hybrid motorcycle yang menuntut efisiensi tinggi, akselerasi cepat, umur pakai panjang, dan integrasi optimal dengan energi terbarukan.

4.3 State of Charge (SOC) dan State of Health (SOH)

Dalam sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid, baterai tidak hanya berfungsi sebagai penyimpan energi, tetapi juga sebagai komponen dinamis yang harus dipantau secara terus-menerus agar kendaraan dapat beroperasi aman, efisien, dan andal. Dua parameter paling fundamental dalam

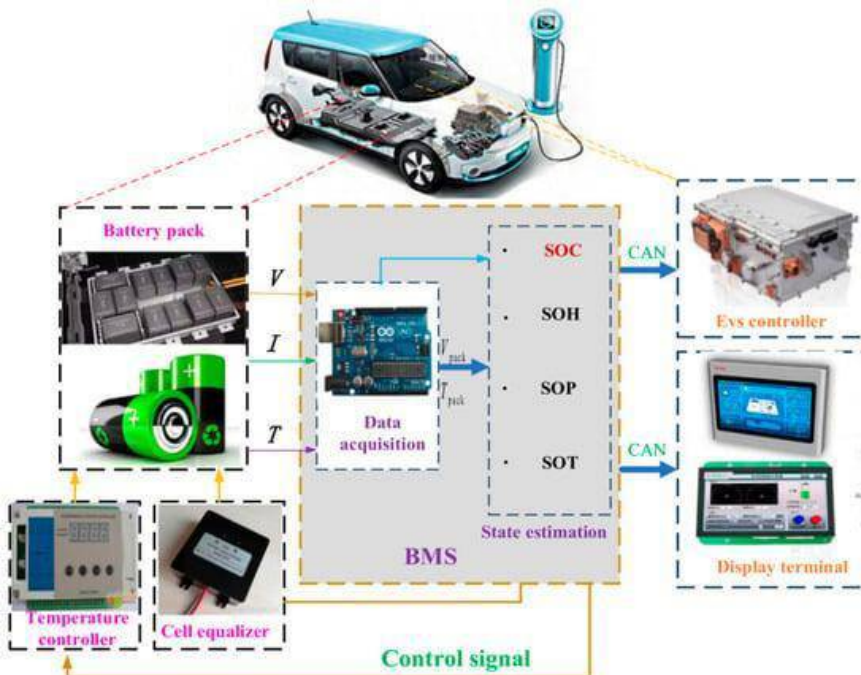
pemantauan kondisi baterai adalah **State of Charge (SOC)** dan **State of Health (SOH)**. SOC menggambarkan tingkat muatan energi baterai saat ini dibanding kapasitas maksimum yang tersedia, sedangkan SOH menunjukkan kondisi kesehatan baterai secara keseluruhan dibanding performa saat baru. Kedua parameter ini menjadi inti dari sistem Battery Management System (BMS), karena seluruh strategi pengisian, distribusi daya, perlindungan termal, dan estimasi umur pakai baterai bergantung pada akurasi pengukurannya. Dalam naskah utama buku ini dijelaskan bahwa tanpa estimasi SOC dan SOH yang akurat, sistem hybrid tidak dapat mengoptimalkan penggunaan energi maupun menjamin keselamatan operasi kendaraan.

SOC pada dasarnya adalah “indikator bahan bakar” untuk baterai listrik. Nilai SOC dinyatakan dalam persen, di mana 100% berarti baterai penuh dan 0% berarti baterai kosong secara operasional. Dalam kendaraan hybrid off-grid, informasi SOC sangat penting karena menentukan kapan motor listrik dapat bekerja penuh, kapan sistem perlu mengaktifkan sumber energi sekunder seperti downsized ICE, dan kapan kendaraan harus melakukan pengisian ulang dari sumber renewable charging station. SOC juga memengaruhi strategi regenerative braking: bila SOC terlalu tinggi, kemampuan baterai menerima energi pengereman menjadi terbatas. Oleh sebab itu, pengelolaan SOC menjadi parameter real-time paling kritis dalam distribusi energi kendaraan.

Penentuan SOC tidak sesederhana mengukur tegangan baterai. Tegangan hanya memberikan indikasi kasar, karena dapat berubah akibat temperatur, arus beban, dan karakteristik kimia sel. Oleh karena itu, estimasi SOC modern menggunakan berbagai metode, antara lain coulomb counting, open-circuit voltage method, Kalman filter estimation, neural network prediction, dan adaptive model-based estimation. Kombinasi Extended Kalman Filter (EKF) dan AI-based prediction model memberikan akurasi estimasi SOC tertinggi pada hybrid electric motorcycle, terutama pada pola beban dinamis seperti akselerasi-perlambatan cepat. Hal ini penting karena kendaraan hybrid mengalami fluktuasi arus jauh lebih kompleks dibanding kendaraan listrik biasa.

Berbeda dari SOC yang menggambarkan kondisi sesaat, SOH menunjukkan kondisi jangka panjang baterai. SOH biasanya dinyatakan sebagai persentase kapasitas tersisa dibanding kapasitas awal saat baterai baru. Misalnya, jika baterai baru memiliki kapasitas 100 Ah dan setelah beberapa tahun hanya mampu menyimpan 82 Ah, maka SOH-nya adalah 82%. Nilai ini penting karena baterai yang kapasitasnya menurun akan mengurangi driving range, menurunkan performa akselerasi, serta memperbesar resistansi internal yang menyebabkan panas berlebih. Pada

kendaraan hybrid off-grid, pemantauan SOH sangat penting karena pola charging yang beragam—dari panel surya, regenerative braking, hingga fast charging—dapat mempercepat degradasi bila tidak dikelola dengan baik.



Gambar 4.3. Hubungan SOC dan SOH dalam Siklus Operasi Baterai Hybrid Motorcycle

SOH dipengaruhi oleh beberapa faktor utama: jumlah siklus charge-discharge, kedalaman discharge (depth of discharge), temperatur operasi, kecepatan charging, serta kualitas manajemen termal. Semakin sering baterai mengalami pengosongan penuh atau overcharge, semakin cepat SOH menurun. Temperatur tinggi juga menjadi penyebab utama degradasi kimia sel, terutama pada iklim tropis seperti Indonesia. Oleh sebab itu, sistem hybrid off-grid modern mengintegrasikan sensor suhu, algoritma proteksi termal, dan charging profile control untuk memperlambat penurunan SOH.

Dalam praktiknya, SOH tidak dapat diukur langsung, melainkan diperkirakan melalui parameter turunan seperti kapasitas aktual, resistansi internal, impedance spectroscopy, dan voltage response curve. BMS modern menggunakan machine learning dan predictive analytics untuk memperkirakan SOH secara real-time berdasarkan histori penggunaan baterai. Teknologi ini memungkinkan sistem mendeteksi gejala degradasi

dini sebelum terjadi kegagalan serius, sehingga pemeliharaan dapat dilakukan secara preventif.

Tabel 4.3. Perbandingan Karakteristik SOC dan SOH

Parameter	SOC	SOH
Definisi	Tingkat muatan saat ini	Tingkat kesehatan baterai
Sifat	Dinamis, berubah cepat	Jangka panjang, berubah lambat
Satuan	% kapasitas tersedia	% kapasitas tersisa
Fungsi Utama	Menentukan energi tersisa	Menilai umur dan degradasi baterai
Pengaruh Operasional	Driving range real-time	Performa jangka panjang kendaraan

Dalam kendaraan hybrid off-grid, hubungan antara SOC dan SOH sangat erat. Baterai dengan SOH rendah cenderung menunjukkan fluktuasi SOC lebih cepat karena kapasitas efektifnya menurun. Misalnya, baterai lama dengan SOH 70% akan terlihat “cepat habis” meskipun indikator SOC masih bekerja normal. Oleh karena itu, BMS harus selalu mengoreksi estimasi SOC berdasarkan nilai SOH aktual agar data energi yang ditampilkan kepada pengguna tetap akurat.

Di Indonesia, pentingnya pemantauan SOC dan SOH semakin tinggi karena variasi suhu lingkungan, kelembapan tinggi, dan kondisi jalan yang berat mempercepat stres baterai. Pada kendaraan hybrid yang digunakan di daerah terpencil dengan akses servis terbatas, akurasi estimasi SOH menjadi kunci untuk mencegah kegagalan mendadak yang dapat mengganggu mobilitas pengguna. Karena itu, pengembangan BMS untuk pasar Indonesia perlu mempertimbangkan model prediksi yang adaptif terhadap kondisi tropis dan pola penggunaan lokal.

Perkembangan masa depan mengarah pada integrasi **digital twin battery system**, yaitu model virtual baterai yang memantau SOC dan SOH secara simultan dengan simulasi prediktif real-time. Teknologi ini memungkinkan kendaraan memperkirakan sisa umur baterai, jadwal penggantian optimal, bahkan menyesuaikan pola charging secara otomatis untuk memperpanjang masa pakai. Dalam kendaraan hybrid generasi berikutnya, SOC dan SOH tidak lagi hanya indikator status, tetapi menjadi bagian dari sistem kecerdasan energi adaptif.

Secara keseluruhan, SOC dan SOH merupakan dua parameter vital yang menentukan kualitas pengelolaan energi kendaraan hybrid off-grid. SOC memastikan kendaraan mengetahui seberapa jauh dapat beroperasi

hari ini, sedangkan SOH menentukan seberapa lama sistem energi akan tetap andal di masa depan. Keduanya menjadi fondasi utama dalam membangun kendaraan hybrid yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

4.4 Battery Management System (BMS) Cerdas

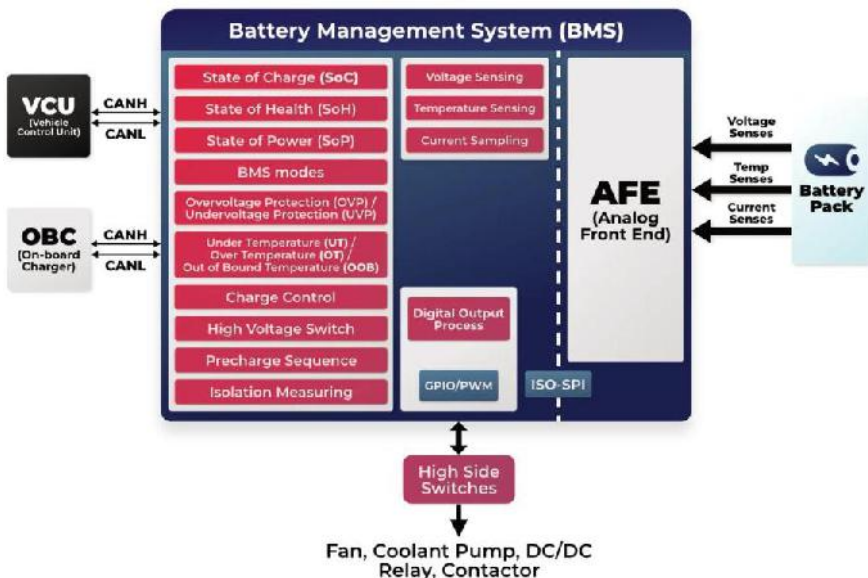
Dalam sepeda motor listrik hybrid off-grid, baterai adalah jantung penyimpanan energi, tetapi **Battery Management System (BMS)** adalah otak yang memastikan seluruh sistem energi bekerja aman, efisien, dan optimal. Tanpa BMS, baterai lithium-ion maupun LiFePO₄ tidak dapat beroperasi secara stabil karena sangat sensitif terhadap overcharge, overdischarge, overheating, short circuit, dan ketidakseimbangan tegangan antar sel. Pada kendaraan hybrid modern, BMS tidak lagi sekadar sistem proteksi baterai, tetapi telah berkembang menjadi sistem cerdas yang mampu memonitor kondisi baterai secara real-time, mengoptimalkan distribusi energi, memprediksi degradasi sel, dan berkomunikasi dengan seluruh subsistem kendaraan melalui jaringan kontrol digital. Dalam naskah utama buku ini ditegaskan bahwa BMS merupakan komponen sentral dalam keberhasilan kendaraan hybrid off-grid karena seluruh strategi manajemen energi bergantung pada akurasi dan kecerdasannya.

Secara dasar, fungsi utama BMS mencakup lima tugas utama: monitoring, protection, balancing, estimation, dan communication. Monitoring berarti BMS secara terus-menerus membaca parameter penting seperti tegangan tiap sel, arus baterai, temperatur modul, State of Charge (SOC), dan State of Health (SOH). Protection berarti sistem melindungi baterai dari kondisi berbahaya seperti arus berlebih, tegangan abnormal, atau panas berlebih. Balancing berfungsi menjaga agar seluruh sel baterai memiliki tegangan seragam sehingga umur baterai tetap optimal. Estimation meliputi perhitungan SOC, SOH, dan sisa driving range. Sedangkan communication berarti BMS mengirim data ke ECU, inverter, dashboard, dan cloud monitoring platform.

Pada kendaraan hybrid off-grid, BMS memiliki tantangan lebih kompleks dibanding kendaraan listrik biasa karena harus mengelola aliran energi dari berbagai sumber sekaligus: baterai utama, supercapacitor, regenerative braking, photovoltaic charging input, dan kadang auxiliary generator. Sistem ini menuntut BMS untuk bekerja secara adaptif, menentukan prioritas pengisian dan pelepasan energi berdasarkan kondisi real-time kendaraan. Smart BMS berbasis AI predictive control mampu meningkatkan efisiensi distribusi energi hingga 18% dibanding BMS konvensional berbasis rule-based logic pada hybrid electric motorcycles. Hal ini menegaskan bahwa kecerdasan algoritma BMS kini menjadi faktor kompetitif utama dalam desain kendaraan listrik generasi baru.

Salah satu fitur utama BMS cerdas adalah **cell balancing intelligent system**, yaitu kemampuan menyamakan tegangan antar sel baterai secara otomatis. Dalam battery pack besar, perbedaan kecil antar sel dapat menyebabkan ketidakseimbangan kapasitas, yang pada akhirnya mempercepat degradasi seluruh modul baterai. BMS modern menggunakan dua pendekatan balancing: passive balancing dan active balancing. Passive balancing membuang energi berlebih dalam bentuk panas, sedangkan active balancing memindahkan energi dari sel berlebih ke sel yang lemah. Untuk hybrid motorcycle premium, active balancing lebih disukai karena lebih efisien dan memperpanjang umur baterai.

BMS cerdas juga mengintegrasikan **predictive thermal control**, yaitu sistem prediksi suhu baterai berdasarkan pola penggunaan energi dan kondisi lingkungan. Pada kendaraan hybrid off-grid yang beroperasi di daerah tropis seperti Indonesia, temperatur baterai sering menjadi faktor kritis karena panas lingkungan dapat mempercepat thermal degradation. Dengan predictive thermal control, BMS dapat menurunkan arus charge/discharge sebelum suhu mencapai batas kritis, atau mengaktifkan sistem pendinginan secara proaktif. Teknologi ini sangat penting untuk menjaga stabilitas operasi pada iklim panas dan lembap.



Gambar 4.4. Arsitektur Battery Management System Cerdas pada Hybrid Motorcycle

Selain proteksi internal, BMS modern kini terhubung dengan Internet of Things (IoT) dan cloud diagnostics. Data baterai dapat dikirim secara real-

time ke server untuk analisis performa, deteksi dini kerusakan, pembaruan firmware, hingga predictive maintenance. Dalam armada kendaraan hybrid skala besar seperti ojek listrik, kendaraan logistik, atau transportasi desa energi mandiri, fitur ini memungkinkan operator memantau kesehatan baterai seluruh armada dari pusat kendali.

Dalam pengembangan terbaru, BMS cerdas juga menggunakan machine learning untuk mempelajari pola penggunaan pengguna. Misalnya, jika kendaraan sering digunakan pada rute menanjak dengan akselerasi tinggi, sistem akan menyesuaikan strategi discharge dan regenerative braking agar baterai tidak cepat aus. Dengan adaptive learning ini, kendaraan dapat mengoptimalkan umur baterai berdasarkan kebiasaan berkendara aktual, bukan sekadar parameter statis pabrik.

Tabel 4.4. Fungsi Utama Battery Management System Cerdas

Fungsi BMS	Deskripsi
Monitoring Real-Time	Membaca tegangan, arus, suhu, SOC, SOH
Proteksi Keselamatan	Overcharge, overdischarge, overheating protection
Cell Balancing	Menjaga keseimbangan antar sel baterai
Estimasi Energi	Prediksi driving range dan kapasitas tersisa
Thermal Control	Mengatur pendinginan baterai
Komunikasi Sistem	Integrasi dengan ECU, inverter, dashboard

Di Indonesia, penerapan BMS cerdas sangat penting karena kondisi geografis dan infrastruktur charging sangat beragam. Kendaraan hybrid off-grid yang digunakan di daerah terpencil sering menerima pola pengisian tidak stabil dari panel surya atau microgrid. Tanpa BMS adaptif, baterai akan lebih cepat mengalami degradasi akibat fluktuasi tegangan input. Oleh karena itu, pengembangan BMS lokal harus mempertimbangkan ketahanan terhadap variasi sumber energi dan kondisi lingkungan tropis.

Tantangan utama implementasi BMS cerdas adalah biaya dan kompleksitas integrasi. Sensor presisi tinggi, microcontroller canggih, modul komunikasi IoT, dan software AI memerlukan investasi lebih besar dibanding BMS konvensional. Namun, biaya tambahan ini sebanding dengan manfaatnya: umur baterai lebih panjang, risiko kegagalan lebih rendah, efisiensi energi lebih tinggi, dan biaya operasional jangka panjang lebih hemat.

Ke depan, arah evolusi BMS akan menuju **self-healing battery management**, yaitu sistem yang mampu mendeteksi dan mengisolasi sel rusak secara otomatis tanpa mematikan seluruh pack battery. Selain itu,

teknologi digital twin battery dan blockchain battery traceability mulai dikembangkan untuk memastikan transparansi riwayat penggunaan baterai sepanjang siklus hidupnya. Dalam kendaraan hybrid generasi mendatang, BMS akan menjadi pusat kecerdasan energi yang menghubungkan kendaraan, jaringan listrik, renewable charging infrastructure, dan cloud ecosystem dalam satu platform terpadu.

Secara keseluruhan, Battery Management System cerdas adalah fondasi utama keberhasilan kendaraan hybrid off-grid modern. Ia bukan hanya penjaga keselamatan baterai, tetapi juga pengatur strategi energi, penghubung antar subsistem kendaraan, dan motor penggerak kecerdasan energi masa depan. Tanpa BMS cerdas, kendaraan hybrid tidak akan mampu mencapai efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan yang dibutuhkan dalam era transisi energi bersih.

4.5 Keselamatan, Thermal Runaway, dan Crashworthiness

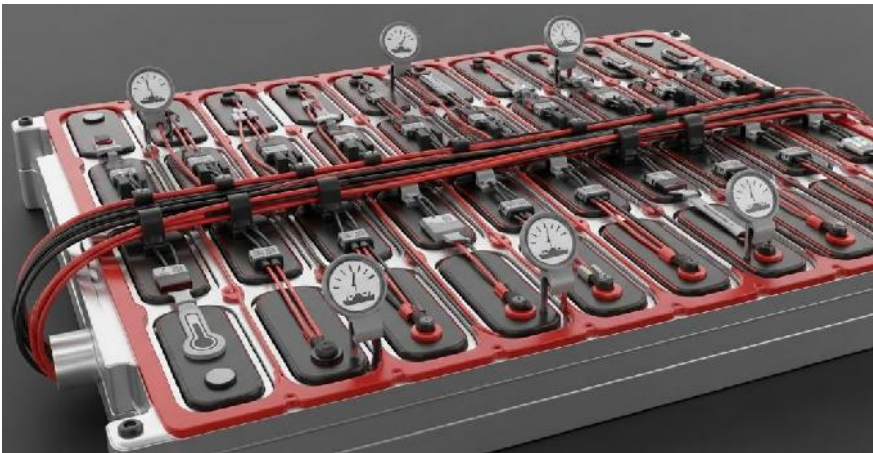
Dalam sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid, aspek keselamatan baterai menjadi salah satu prioritas tertinggi karena baterai lithium-based menyimpan energi besar dalam ruang terbatas dan bekerja pada kondisi arus tinggi. Tidak seperti kendaraan berbahan bakar konvensional yang risiko utamanya berasal dari bahan bakar cair mudah terbakar, kendaraan hybrid menghadapi tantangan keselamatan baru berupa potensi kegagalan elektrokimia, overheating, short circuit internal, serta **thermal runaway**, yaitu kondisi reaksi berantai panas tak terkendali yang dapat menyebabkan kebakaran atau ledakan baterai. Oleh karena itu, desain kendaraan hybrid modern tidak hanya mengejar efisiensi energi, tetapi juga harus memastikan perlindungan menyeluruh terhadap risiko termal, mekanis, dan elektrik. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa keberhasilan implementasi kendaraan hybrid off-grid sangat bergantung pada keandalan sistem keselamatan baterai dan struktur proteksi benturan yang dirancang secara terintegrasi.

Thermal runaway adalah fenomena paling kritis dalam sistem baterai lithium-ion dan LiFePO_4 . Kondisi ini terjadi ketika panas internal baterai meningkat lebih cepat daripada kemampuan sistem membuang panas tersebut, sehingga memicu reaksi kimia eksotermik berantai di dalam sel baterai. Penyebab thermal runaway dapat berasal dari overcharge, overdischarge ekstrem, kerusakan separator internal, short circuit, penetrasi benda tajam, benturan keras, atau temperatur lingkungan terlalu tinggi. Ketika satu sel mengalami thermal runaway, panas dapat menyebar ke sel lain dan memicu propagasi termal dalam seluruh pack battery. Pada kendaraan hybrid motorcycle yang memiliki ruang baterai terbatas, risiko

ini menjadi lebih serius karena kepadatan energi tinggi meningkatkan intensitas panas per volume ruang.

LiFePO₄ dikenal memiliki stabilitas termal lebih baik dibanding lithium-ion NMC/NCA karena struktur kimianya lebih tahan terhadap dekomposisi termal. Namun, meskipun lebih aman, LiFePO₄ tetap dapat mengalami kegagalan jika sistem proteksi tidak memadai. Penggunaan multi-layer thermal barrier materials dan segmented thermal isolation chambers dapat menurunkan risiko propagasi thermal runaway hingga lebih dari 60% pada sistem hybrid electric motorcycle battery pack. Temuan ini menunjukkan bahwa keselamatan baterai tidak hanya bergantung pada jenis kimia sel, tetapi juga pada desain fisik modul baterai dan sistem proteksinya.

Untuk mencegah thermal runaway, kendaraan hybrid modern menerapkan beberapa lapisan proteksi. Lapisan pertama adalah **electronic protection**, berupa BMS yang memonitor tegangan, arus, suhu, dan resistansi internal secara real-time. Bila parameter melewati batas aman, BMS otomatis memutus aliran daya. Lapisan kedua adalah **thermal protection**, yaitu pendinginan aktif maupun pasif untuk menjaga temperatur operasi tetap stabil. Lapisan ketiga adalah **mechanical containment**, berupa casing tahan api, fire-retardant separator, dan thermal insulation barrier antar modul baterai. Pendekatan multi-layer safety ini kini menjadi standar utama dalam desain battery pack kendaraan listrik generasi baru.



Gambar 4.5. Mekanisme Thermal Runaway dan Sistem Proteksi Baterai Hybrid Motorcycle

Desain crashworthy battery system biasanya mencakup reinforced battery enclosure, shock absorbing mounting brackets, impact-resistant casing materials, dan deformable crash zones pada chassis. Material seperti aluminium honeycomb structure, kevlar composite shell, dan reinforced polymer housing kini banyak digunakan untuk melindungi battery pack dari benturan lateral maupun frontal. Dalam hybrid motorcycle premium, battery casing bahkan dirancang mampu menahan penetrasi logam tajam dan beban tekan tinggi tanpa merusak sel internal.

Dalam hybrid off-grid, faktor keselamatan juga berkaitan dengan variasi sumber pengisian energi. Pengisian dari panel surya, microgrid, atau renewable charging stations sering kali menghadapi fluktuasi tegangan yang lebih besar dibanding grid listrik stabil. Oleh karena itu, sistem proteksi input charging menjadi sangat penting agar lonjakan tegangan tidak merusak sel baterai. Smart BMS modern biasanya dilengkapi surge protection, voltage stabilizer interface, dan adaptive charging algorithm untuk menyesuaikan pola charging dengan kualitas sumber listrik masuk.

Tabel 4.5. Risiko Keselamatan dan Strategi Mitigasi pada Sistem Baterai Hybrid Motorcycle

Risiko Keselamatan	Penyebab Utama	Strategi Mitigasi
Thermal Runaway	Overheat, short circuit	Thermal barrier + BMS protection
Overcharge	Charger failure	Voltage cutoff control
Overdischarge	Beban berlebih	SOC protection logic
Benturan Fisik	Kecelakaan, jatuh	Reinforced battery casing
Penetrasi Benda Tajam	Kerusakan mekanis	Impact-resistant enclosure
Kebocoran Elektrolit	Seal failure	Multi-layer sealing design

Di Indonesia, isu keselamatan baterai menjadi semakin relevan karena kondisi iklim tropis dengan suhu lingkungan tinggi dapat mempercepat akumulasi panas pada kendaraan yang parkir di ruang terbuka. Temperatur kendaraan yang terpapar matahari langsung dapat melampaui 50°C, mendekati batas kritis beberapa sistem baterai. Oleh sebab itu, desain kendaraan hybrid untuk pasar tropis memerlukan sistem ventilasi termal tambahan, reflective casing materials, dan heat-resistant insulation lebih kuat dibanding kendaraan di iklim sedang.

Perkembangan masa depan keselamatan baterai mengarah pada teknologi **self-extinguishing battery cells**, yaitu sel baterai yang dapat

menghentikan reaksi termal internal secara otomatis jika suhu melebihi batas aman. Selain itu, riset pada solid-state battery menjanjikan keamanan jauh lebih tinggi karena tidak menggunakan elektrolit cair mudah terbakar. Teknologi ini diproyeksikan menjadi revolusi besar dalam keselamatan kendaraan listrik dalam dekade mendatang.

Secara keseluruhan, keselamatan, thermal runaway prevention, dan crashworthiness adalah fondasi mutlak dalam desain kendaraan hybrid off-grid yang andal. Efisiensi energi dan performa tinggi tidak akan berarti tanpa sistem perlindungan yang mampu menjaga keselamatan pengguna dalam segala kondisi. Dalam era transisi energi bersih, kendaraan hybrid masa depan harus tidak hanya hemat energi dan rendah emisi, tetapi juga memenuhi standar keselamatan tertinggi sebagai syarat utama keberlanjutan mobilitas listrik.

BAB 5

INTEGRASI ENERGI TERBARUKAN UNTUK SISTEM OFF-GRID

5.1 Integrasi Panel Surya Fotovoltaik (PV)

Integrasi panel surya fotovoltaik (PV) dalam sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid merupakan langkah strategis menuju mobilitas yang benar-benar mandiri energi dan rendah emisi. Jika kendaraan listrik konvensional masih sangat bergantung pada pasokan listrik dari jaringan utama yang dalam banyak kasus masih berasal dari bahan bakar fosil, maka hybrid off-grid motorcycle menghadirkan paradigma baru: kendaraan yang dapat memperoleh energi langsung dari sumber terbarukan di lokasi penggunaannya. Dalam hal ini, panel surya PV menjadi teknologi paling relevan karena bersifat modular, mudah dipasang, tersedia luas, dan sangat cocok untuk wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki intensitas radiasi matahari tinggi sepanjang tahun. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa integrasi photovoltaic charging system adalah fondasi utama dari konsep kendaraan hybrid off-grid karena memungkinkan terciptanya transportasi listrik yang tidak tergantung penuh pada grid nasional.

Secara prinsip, panel surya fotovoltaik bekerja dengan mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik pada material semikonduktor. Ketika foton matahari mengenai permukaan sel surya, elektron dalam material semikonduktor tereksitasi dan menghasilkan aliran arus listrik searah (DC). Energi DC ini kemudian digunakan untuk mengisi baterai kendaraan secara langsung atau melalui sistem penyimpanan energi perantara. Dalam kendaraan hybrid off-grid, listrik dari PV dapat masuk ke baterai utama kendaraan, ke battery storage station, atau ke hybrid energy management system yang mengatur distribusi daya sesuai kebutuhan real-time kendaraan.

Integrasi PV dalam sistem hybrid motorcycle dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan. Pendekatan pertama adalah **stationary solar charging station**, yaitu stasiun pengisian tetap berbasis panel surya yang digunakan untuk mengisi baterai kendaraan saat parkir. Pendekatan kedua adalah **portable solar charging unit**, berupa unit panel surya lipat atau modular yang dapat dipindahkan sesuai kebutuhan. Pendekatan ketiga adalah **on-board solar integration**, yaitu panel surya yang dipasang langsung pada bodi kendaraan, misalnya pada fairing, box belakang, atau

atap canopy. Meskipun luas permukaan kendaraan terbatas, on-board PV tetap berguna untuk pengisian tambahan (*trickle charging*) dan suplai daya untuk sistem elektronik pendukung.

Photovoltaic charging integration pada hybrid electric motorcycle mampu mengurangi ketergantungan grid charging hingga 35% pada wilayah dengan paparan surya tinggi, terutama jika dikombinasikan dengan smart energy routing dan predictive charging algorithm . Hal ini menunjukkan bahwa panel surya tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi alternatif, tetapi juga mampu menjadi komponen utama dalam sistem mobilitas mandiri energi.

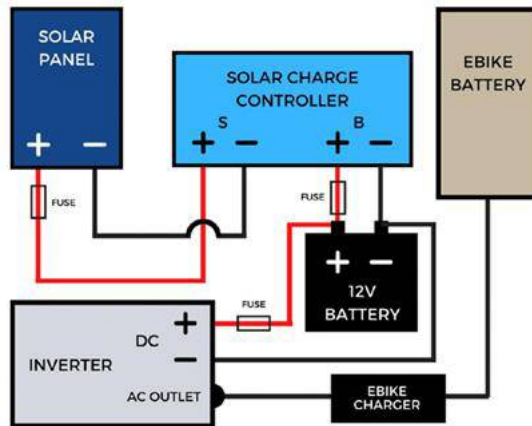
Keunggulan utama integrasi PV adalah ketersediaan energi gratis dan berkelanjutan. Berbeda dengan bahan bakar fosil yang memerlukan rantai pasok kompleks dan rentan fluktuasi harga, energi matahari tersedia melimpah dan bebas emisi. Di Indonesia, rata-rata intensitas radiasi surya berada pada kisaran 4–5,5 kWh/m²/hari, yang sangat ideal untuk sistem photovoltaic transport charging. Dengan potensi ini, bahkan desa-desa terpencil yang belum memiliki jaringan listrik stabil dapat mengoperasikan kendaraan hybrid off-grid berbasis solar charging secara mandiri.

Dalam implementasi teknis, integrasi panel surya memerlukan beberapa komponen pendukung utama. Pertama adalah **solar charge controller**, yang berfungsi mengatur tegangan dan arus dari panel surya agar sesuai dengan kebutuhan baterai. Kedua adalah **DC-DC converter**, yang menyesuaikan level tegangan antara modul PV dan battery pack kendaraan. Ketiga adalah **energy management controller**, yang menentukan prioritas distribusi energi: apakah energi langsung masuk ke kendaraan, ke baterai penyimpanan, atau ke supercapacitor buffer system. Tanpa komponen ini, energi dari PV tidak dapat dimanfaatkan secara optimal.

Efisiensi sistem PV dipengaruhi oleh beberapa faktor: jenis panel surya, orientasi pemasangan, suhu lingkungan, intensitas cahaya matahari, shading losses, dan efisiensi converter elektronik. Saat ini, teknologi panel monocrystalline silicon menjadi pilihan utama karena efisiensinya dapat mencapai 20–24%, lebih tinggi dibanding polycrystalline atau thin-film panels. Untuk kendaraan hybrid off-grid, panel monocrystalline sangat cocok karena menghasilkan daya lebih besar pada luas area terbatas.

Selain manfaat teknis, integrasi PV juga memiliki dampak ekonomi yang signifikan. Biaya operasional kendaraan turun drastis karena sebagian besar energi diperoleh gratis dari matahari. Pada skala penggunaan harian, terutama untuk armada ojek listrik, kendaraan logistik, dan transportasi pedesaan, penghematan biaya energi dapat mencapai tingkat yang sangat

signifikan dibanding pengisian listrik grid atau penggunaan bahan bakar fosil. Dalam jangka panjang, investasi awal pemasangan PV dapat kembali melalui penghematan biaya charging.



Gambar 5.1. Integrasi Panel Surya Fotovoltaik pada Sistem Hybrid Off-Grid Motorcycle

Tabel 5.1. Komponen Utama Sistem Integrasi PV pada Hybrid Motorcycle

Komponen	Fungsi
Panel Surya PV	Mengubah energi matahari menjadi listrik
Solar Charge Controller	Mengatur arus dan tegangan charging
DC-DC Converter	Menyesuaikan level tegangan sistem
Battery Storage Unit	Menyimpan energi surya
Energy Management Controller	Mengelola distribusi energi
Charging Interface	Menyalurkan energi ke baterai kendaraan

Namun demikian, integrasi panel surya juga menghadapi tantangan. Salah satu tantangan utama adalah sifat intermiten energi surya yang bergantung pada cuaca dan waktu siang hari. Produksi energi menurun drastis saat mendung atau malam hari, sehingga diperlukan battery storage buffer untuk menjaga kontinuitas suplai. Selain itu, area pemasangan panel sering terbatas, terutama jika menggunakan sistem on-board PV. Tantangan lain adalah kebutuhan perawatan rutin seperti pembersihan panel dari debu, kelembapan, dan korosi.

Di Indonesia, integrasi PV sangat strategis karena sejalan dengan program nasional transisi energi dan pembangunan desa energi mandiri. Banyak wilayah kepulauan, pedalaman, dan pegunungan belum memiliki akses charging station memadai, tetapi memiliki potensi surya tinggi. Sistem hybrid motorcycle berbasis solar charging dapat menjadi solusi transportasi paling realistis untuk wilayah tersebut. Dengan memanfaatkan energi lokal, masyarakat tidak hanya memperoleh mobilitas bersih, tetapi juga kemandirian energi.

Ke depan, teknologi integrasi PV akan berkembang menuju **smart photovoltaic mobility ecosystem**, di mana kendaraan, stasiun charging, microgrid desa, dan jaringan energi rumah tangga terhubung dalam satu sistem cerdas. Panel surya generasi baru seperti flexible solar film, transparent PV coating, dan perovskite solar cells akan memungkinkan integrasi lebih ringan, lebih efisien, dan lebih estetik pada kendaraan. Bahkan, masa depan hybrid motorcycle dapat mengarah pada kendaraan yang seluruh kebutuhannya dipenuhi oleh renewable energy ecosystem tanpa ketergantungan pada bahan bakar fosil sama sekali.

Secara keseluruhan, integrasi panel surya fotovoltaik adalah fondasi utama dalam mewujudkan kendaraan hybrid off-grid yang benar-benar mandiri energi. Teknologi ini tidak hanya mengurangi emisi karbon dan ketergantungan grid, tetapi juga membuka jalan menuju sistem transportasi yang lebih resilien, inklusif, dan berkelanjutan.

5.2 Solar Charging Station untuk Sepeda Motor Listrik

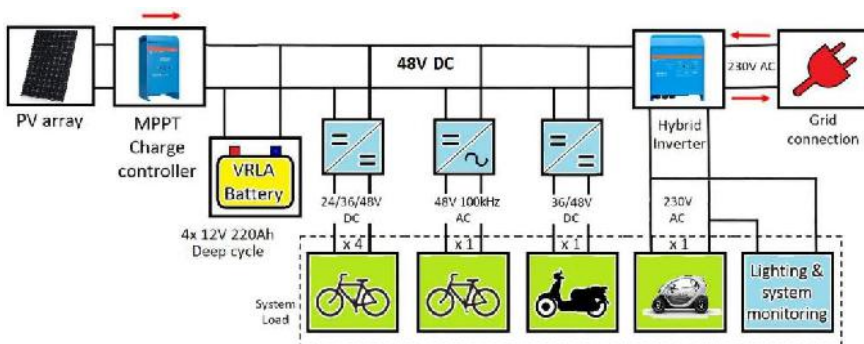
Solar Charging Station (SCS) merupakan infrastruktur kunci dalam ekosistem sepeda motor listrik hybrid off-grid karena berfungsi sebagai titik distribusi energi terbarukan yang menghubungkan panel surya fotovoltaik dengan kendaraan listrik secara langsung maupun melalui sistem penyimpanan energi. Jika integrasi panel surya pada sub-bab sebelumnya menitikberatkan pada sumber energi, maka Solar Charging Station adalah implementasi praktis yang memungkinkan energi matahari digunakan secara nyata untuk mobilitas sehari-hari. Dalam transisi energi bersih, SCS bukan sekadar fasilitas pengisian daya, melainkan pusat energi mikro yang memungkinkan kendaraan listrik beroperasi mandiri tanpa ketergantungan penuh pada jaringan listrik konvensional. Dalam naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa pembangunan solar charging infrastructure menjadi fondasi percepatan adopsi kendaraan hybrid off-grid, khususnya di wilayah dengan keterbatasan akses grid listrik.

Secara teknis, Solar Charging Station terdiri atas beberapa subsistem utama: modul panel surya PV, solar charge controller, battery energy storage system (BESS), inverter/converter, smart charging interface, dan energy

management controller. Panel surya menangkap energi matahari dan mengubahnya menjadi listrik DC, yang kemudian diatur oleh charge controller sebelum disimpan ke baterai stasiun atau langsung dialirkan ke kendaraan. Jika kendaraan membutuhkan pengisian cepat, energi dapat diambil simultan dari panel surya dan battery storage untuk menjaga kestabilan daya. Sistem ini membuat SCS mampu beroperasi baik siang maupun malam hari, asalkan penyimpanan energinya cukup.

Dalam praktiknya, terdapat tiga model utama Solar Charging Station untuk sepeda motor listrik. Model pertama adalah **stand-alone solar charging station**, yaitu stasiun mandiri sepenuhnya berbasis energi surya tanpa koneksi ke grid. Model ini sangat cocok untuk desa terpencil, pulau kecil, dan wilayah rural. Model kedua adalah **hybrid solar-grid charging station**, yang mengombinasikan panel surya dengan pasokan listrik grid sebagai cadangan. Model ketiga adalah **solar battery swapping station**, yaitu stasiun yang tidak mengisi kendaraan langsung, tetapi menyediakan baterai penuh hasil pengisian dari energi surya untuk ditukar cepat. Battery swapping berbasis solar charging memiliki efisiensi operasional sangat tinggi untuk kendaraan roda dua karena mengurangi waktu tunggu pengguna hingga hampir nol menit.

Keunggulan utama Solar Charging Station adalah kemampuannya menciptakan kemandirian energi lokal. Berbeda dengan charging station biasa yang bergantung pada jaringan listrik pusat, SCS dapat dibangun di lokasi mana pun selama tersedia paparan matahari yang memadai. Hal ini sangat penting bagi Indonesia, negara kepulauan dengan ribuan wilayah yang belum terjangkau infrastruktur listrik stabil. Dengan adanya SCS, kendaraan hybrid off-grid dapat digunakan di daerah terpencil tanpa perlu menunggu pembangunan jaringan listrik skala besar.



Gambar 5.2. Skema Solar Charging Station untuk Hybrid Motorcycle

Dari sisi desain energi, kapasitas Solar Charging Station harus disesuaikan dengan pola penggunaan kendaraan. Misalnya, sebuah stasiun untuk melayani 20 sepeda motor per hari memerlukan estimasi kapasitas panel surya, baterai penyimpanan, dan inverter yang berbeda dibanding stasiun untuk armada logistik skala besar. Faktor yang harus diperhitungkan meliputi jumlah kendaraan, kapasitas baterai rata-rata kendaraan, durasi penyinaran harian, efisiensi panel surya, dan losses sistem konversi daya. Dalam desain modern, simulasi sizing system dilakukan menggunakan software seperti HOMER Pro, MATLAB Simulink, atau PVsyst.

Salah satu komponen penting dalam SCS adalah **Battery Energy Storage System (BESS)**, yang berfungsi menyimpan energi surya agar pengisian kendaraan tetap tersedia saat malam hari atau cuaca mendung. Umumnya digunakan baterai LiFePO₄ karena stabilitas termalnya tinggi dan cocok untuk siklus charge-discharge harian yang intensif. Dalam stasiun charging skala komunitas, BESS juga dapat diintegrasikan dengan supercapacitor untuk mengatasi lonjakan beban saat fast charging simultan.

Tabel 5.2. Komponen Utama Solar Charging Station

Komponen	Fungsi
Panel Surya PV	Menghasilkan listrik dari matahari
Solar Charge Controller	Mengatur arus pengisian
Battery Storage (BESS)	Menyimpan energi cadangan
Inverter / Converter	Mengubah dan menyesuaikan tegangan
Smart Charging Interface	Menyalurkan energi ke kendaraan
Energy Management Controller	Mengatur distribusi daya sistem

Selain manfaat teknis, Solar Charging Station memiliki dampak ekonomi yang sangat positif. Pengguna kendaraan dapat mengurangi biaya pengisian secara signifikan karena energi matahari tidak memerlukan bahan bakar. Dalam skenario jangka panjang, biaya investasi awal pembangunan SCS dapat dikompensasi melalui penghematan biaya operasional dan rendahnya biaya pemeliharaan panel surya. Untuk komunitas pedesaan, koperasi desa, atau operator transportasi lokal, SCS bahkan dapat menjadi model bisnis energi baru berbasis komunitas.

Namun demikian, pengembangan SCS juga menghadapi tantangan. Investasi awal masih relatif tinggi, terutama untuk panel surya berkualitas tinggi, inverter, dan baterai penyimpanan. Selain itu, efisiensi stasiun sangat bergantung pada cuaca, kualitas pemasangan, serta perawatan berkala. Debu, kelembapan tinggi, dan korosi di daerah pesisir dapat menurunkan performa panel surya jika tidak dirawat dengan baik. Tantangan lain adalah

standarisasi charging connector agar kompatibel dengan berbagai merek kendaraan hybrid motorcycle.

Di Indonesia, potensi implementasi Solar Charging Station sangat besar. Wilayah dengan intensitas matahari tinggi seperti Nusa Tenggara, Sulawesi, Papua, dan sebagian Sumatera sangat ideal untuk pengembangan jaringan SCS. Program integrasi SCS dengan desa wisata, kawasan pertanian, pelabuhan kecil, dan pusat transportasi pedesaan dapat mempercepat transformasi mobilitas rendah karbon secara merata. Lebih jauh lagi, pengembangan SCS berbasis UMKM lokal dapat membuka lapangan kerja baru di bidang instalasi energi surya, maintenance, dan layanan charging operation.

Perkembangan masa depan Solar Charging Station mengarah pada konsep **smart autonomous charging hub**, yaitu stasiun charging berbasis AI yang mampu memprediksi kebutuhan energi, mengatur prioritas pengisian kendaraan, dan terhubung dengan microgrid desa secara otomatis. Dengan dukungan IoT, cloud monitoring, dan blockchain energy tracking, SCS masa depan akan menjadi bagian dari jaringan energi cerdas nasional yang saling terhubung.

Secara keseluruhan, Solar Charging Station adalah elemen vital dalam membangun ekosistem kendaraan hybrid off-grid yang berkelanjutan. Ia tidak hanya menyediakan energi bersih untuk kendaraan, tetapi juga menjadi simpul transisi energi lokal yang mempertemukan teknologi surya, penyimpanan energi, dan mobilitas masa depan dalam satu sistem terintegrasi.

5.3 Hybrid Renewable Microgrid System

Dalam pengembangan ekosistem sepeda motor listrik hybrid off-grid, keberadaan **Hybrid Renewable Microgrid System (HRMS)** menjadi elemen strategis yang memperluas konsep pengisian energi dari skala individu menuju skala komunitas. Jika panel surya fotovoltaik menyediakan sumber energi primer dan Solar Charging Station berfungsi sebagai titik pengisian kendaraan, maka hybrid renewable microgrid merupakan jaringan energi lokal cerdas yang mengintegrasikan berbagai sumber energi terbarukan dalam satu sistem terpadu. Sistem ini dirancang untuk menghasilkan, menyimpan, mengelola, dan mendistribusikan energi secara mandiri tanpa ketergantungan penuh pada jaringan listrik utama. Dalam transisi energi bersih, HRMS menjadi tulang punggung infrastruktur mobilitas listrik di daerah terpencil, kawasan kepulauan, desa energi mandiri, serta wilayah dengan pasokan listrik tidak stabil. Naskah dasar buku ini menegaskan bahwa microgrid berbasis energi terbarukan adalah

solusi utama untuk mewujudkan kendaraan hybrid off-grid yang benar-benar independen secara energi .

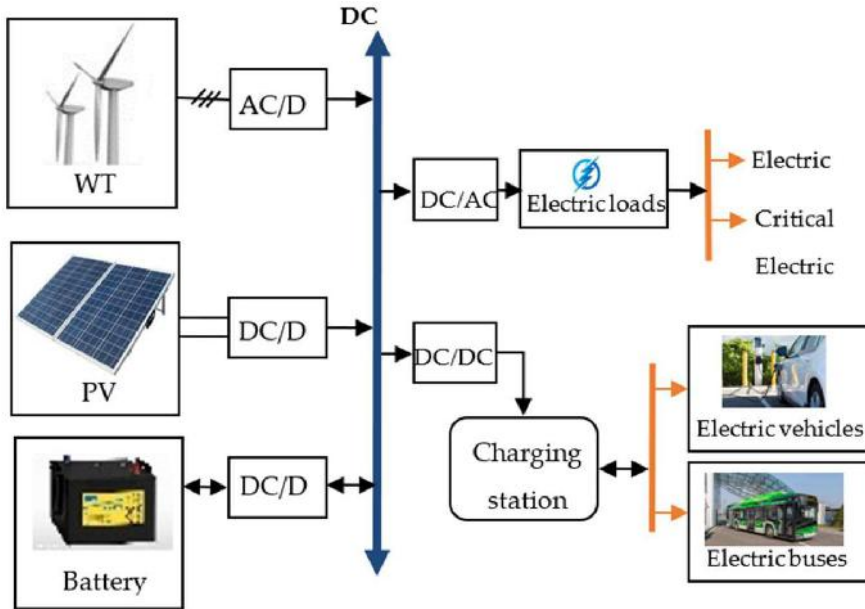
Secara definisi, hybrid renewable microgrid adalah sistem pembangkit listrik lokal yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi terbarukan—misalnya panel surya, turbin angin, mikrohidro, biomassa, atau biofuel generator—dengan sistem penyimpanan energi dan unit kontrol cerdas. Kata “hybrid” menunjukkan adanya kombinasi multi-sumber energi untuk meningkatkan keandalan suplai. Dalam sepeda motor hybrid off-grid, HRMS berfungsi sebagai penyedia energi kolektif bagi charging station, battery swapping hubs, dan infrastruktur transportasi listrik lainnya. Dengan demikian, kendaraan tidak lagi bergantung pada satu sumber energi tunggal, tetapi memperoleh pasokan dari jaringan energi lokal yang fleksibel dan resilien.

Salah satu alasan utama pentingnya HRMS adalah sifat intermiten energi terbarukan. Panel surya hanya bekerja optimal saat siang hari, sedangkan turbin angin bergantung pada kecepatan angin. Dengan menggabungkan beberapa sumber energi, sistem microgrid dapat menjaga kontinuitas suplai daya lebih stabil. Misalnya, saat cuaca mendung menurunkan output PV, turbin angin atau biomass generator dapat mengambil alih sebagian beban. Hybrid microgrid berbasis PV-wind-battery system mampu meningkatkan reliability supply hingga lebih dari 95% dibanding sistem solar-only standalone charging untuk kendaraan listrik roda dua . Hal ini menjadikan HRMS sangat ideal untuk wilayah yang membutuhkan suplai energi stabil sepanjang hari.

Dalam implementasi nyata, hybrid renewable microgrid terdiri atas beberapa subsistem utama: sumber energi terbarukan (PV, wind, biomass), battery energy storage system (BESS), power converter unit, smart inverter, microgrid controller, load management interface, dan kadang backup generator berbasis biofuel. Semua subsistem ini terhubung dalam satu jaringan yang dikendalikan oleh central energy management system (EMS), yang secara otomatis menentukan prioritas sumber energi berdasarkan ketersediaan, biaya operasional, dan kebutuhan beban. Dalam sistem kendaraan hybrid off-grid, EMS akan memutuskan kapan energi diarahkan ke charging station, kapan ke storage battery, dan kapan ke beban komunitas lainnya.

Keunggulan utama HRMS adalah keandalannya dalam menjaga pasokan energi. Berbeda dengan sistem charging berbasis panel surya tunggal yang rentan terganggu cuaca, microgrid hybrid mampu menyeimbangkan fluktuasi sumber energi. Selain itu, sistem ini memungkinkan pemanfaatan sumber energi lokal yang beragam sesuai potensi wilayah. Di daerah pegunungan, mikrohidro dapat menjadi sumber

dominan; di pesisir, turbin angin lebih optimal; sementara di wilayah agraris, biomassa dari limbah pertanian dapat menjadi sumber energi tambahan. Fleksibilitas ini menjadikan HRMS sangat adaptif terhadap kondisi geografis Indonesia yang beragam.



Gambar 5.3. Skema Hybrid Renewable Microgrid System untuk Hybrid Motorcycle Ecosystem

Dalam sepeda motor hybrid off-grid, HRMS memberikan manfaat strategis lain: mendukung **charging simultan multi-kendaraan**. Pada skala komunitas, satu microgrid dapat melayani puluhan hingga ratusan kendaraan per hari melalui beberapa charging node sekaligus. Hal ini sangat penting untuk armada transportasi publik, kendaraan logistik desa, ojek listrik, maupun kendaraan operasional kawasan wisata hijau. Dengan manajemen energi cerdas, microgrid dapat mengatur jadwal charging berdasarkan prioritas dan kapasitas energi tersedia.

Dari sisi ekonomi, HRMS menawarkan efisiensi biaya jangka panjang yang sangat menarik. Meski investasi awal cukup tinggi, biaya operasional rendah karena sebagian besar energi berasal dari sumber gratis seperti matahari dan angin. Dalam skenario jangka panjang, HRMS dapat menurunkan biaya energi per kilometer kendaraan secara signifikan dibanding pengisian berbasis grid atau bahan bakar fosil. Selain itu, microgrid memungkinkan model bisnis energi komunitas, di mana desa atau

koperasi dapat mengelola sistem charging sebagai sumber pendapatan lokal.

Tabel 5.3. Komponen Utama Hybrid Renewable Microgrid System

Komponen	Fungsi
Panel Surya PV	Sumber energi utama siang hari
Turbin Angin	Sumber energi tambahan berbasis angin
Biomass / Biofuel Generator	Cadangan energi stabil
Battery Energy Storage	Menyimpan surplus energi
Smart Inverter	Mengatur distribusi daya AC/DC
Energy Management System	Mengontrol prioritas energi
Charging Interface	Menyalurkan energi ke kendaraan

Namun demikian, implementasi HRMS juga menghadapi tantangan. Kompleksitas integrasi multi-sumber energi memerlukan sistem kontrol yang canggih. Variabilitas output energi terbarukan menuntut algoritma prediksi beban dan cuaca yang akurat. Selain itu, biaya investasi awal untuk panel surya, turbin angin, baterai, dan EMS masih cukup tinggi, terutama bagi komunitas kecil. Tantangan lainnya adalah kebutuhan teknisi terlatih untuk instalasi dan pemeliharaan sistem agar tetap andal dalam jangka panjang.

Di Indonesia, HRMS sangat potensial diterapkan di ribuan desa terpencil yang belum menikmati pasokan listrik stabil. Wilayah seperti Nusa Tenggara, Maluku, Papua, dan pulau-pulau kecil dapat memanfaatkan kombinasi surya–angin–biomassa untuk membangun jaringan charging kendaraan listrik mandiri. Program elektrifikasi desa dan kendaraan listrik nasional dapat dipercepat jika HRMS diintegrasikan sebagai bagian dari strategi pembangunan energi lokal.

Ke depan, arah perkembangan HRMS menuju **AI-driven autonomous microgrid**, yaitu sistem yang mampu memprediksi cuaca, kebutuhan charging, pola mobilitas kendaraan, dan optimasi distribusi energi secara otomatis. Dengan dukungan IoT, blockchain energy transaction, dan digital twin microgrid simulation, HRMS masa depan akan menjadi jaringan energi cerdas yang mampu menghubungkan kendaraan, rumah tangga, industri kecil, dan infrastruktur publik dalam satu ekosistem energi terintegrasi.

Secara keseluruhan, Hybrid Renewable Microgrid System adalah fondasi penting dalam mewujudkan mobilitas listrik mandiri energi pada skala komunitas. Ia bukan hanya mendukung pengoperasian sepeda motor hybrid off-grid secara berkelanjutan, tetapi juga membuka jalan menuju transformasi sistem energi lokal yang lebih resilien, demokratis, dan ramah lingkungan.

5.4 Battery Swapping Berbasis Energi Terbarukan

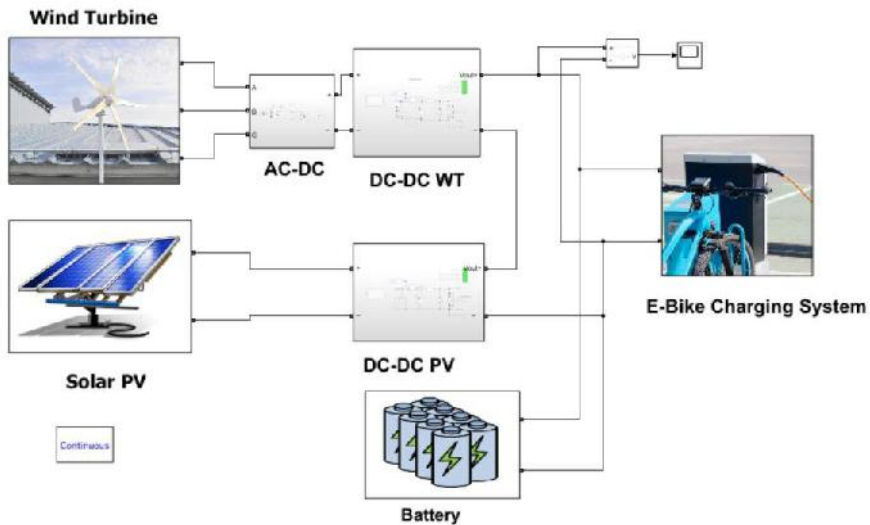
Dalam ekosistem sepeda motor listrik hybrid off-grid, salah satu inovasi infrastruktur paling menjanjikan untuk mempercepat adopsi kendaraan listrik adalah **battery swapping berbasis energi terbarukan**, yaitu sistem pertukaran baterai kosong dengan baterai penuh yang seluruh proses pengisiannya didukung oleh sumber energi bersih seperti panel surya, turbin angin, atau hybrid renewable microgrid. Berbeda dengan pengisian baterai konvensional yang memerlukan waktu puluhan menit hingga beberapa jam, battery swapping memungkinkan pengguna mengganti baterai hanya dalam hitungan menit, sehingga menghilangkan salah satu hambatan utama kendaraan listrik: waktu tunggu pengisian. Dalam naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa model battery swapping sangat cocok untuk sepeda motor roda dua karena ukuran baterainya relatif kecil, modular, dan mudah dipindahkan secara manual, sehingga sangat efisien diterapkan pada sistem transportasi urban maupun rural off-grid.

Secara prinsip, battery swapping station adalah fasilitas yang menyimpan sejumlah baterai cadangan yang telah diisi penuh sebelumnya. Ketika pengguna datang dengan baterai kendaraan yang hampir habis, baterai tersebut dilepas dan diganti dengan unit baru yang telah terisi. Baterai kosong kemudian dimasukkan ke sistem charging station untuk diisi ulang secara bertahap. Dalam sistem berbasis energi terbarukan, proses pengisian ulang ini menggunakan listrik dari panel surya, turbin angin, biomass microgrid, atau kombinasi beberapa sumber energi terbarukan. Dengan demikian, battery swapping tidak hanya mempercepat mobilitas kendaraan listrik, tetapi juga memastikan bahwa energi yang digunakan tetap rendah emisi dan berkelanjutan.

Keunggulan utama battery swapping berbasis energi terbarukan adalah efisiensi waktu operasional. Pada kendaraan roda dua seperti ojek online, armada logistik, kurir desa, dan transportasi komersial, waktu sangat menentukan produktivitas. Jika pengisian biasa membutuhkan 2–4 jam, battery swapping dapat dilakukan hanya dalam 1–3 menit. Hal ini menjadikan sistem ini sangat ideal untuk kendaraan yang beroperasi intensif sepanjang hari. Battery swapping renewable-based systems mampu meningkatkan utilisasi kendaraan listrik roda dua hingga lebih dari 40% dibanding charging konvensional karena minim downtime operasional.

Dalam hybrid off-grid, battery swapping berbasis energi terbarukan memiliki manfaat tambahan: fleksibilitas distribusi energi. Karena pengisian baterai dilakukan di stasiun, proses charging dapat dijadwalkan saat energi terbarukan tersedia optimal—misalnya siang hari saat radiasi matahari tinggi—dan baterai hasil pengisian disimpan untuk digunakan kapan saja. Pendekatan ini membantu menyeimbangkan ketidakstabilan pasokan

energi surya atau angin, karena kendaraan tidak bergantung pada charging real-time. Dengan kata lain, battery swapping berfungsi sekaligus sebagai sistem distribusi energi dan penyimpanan energi terdesentralisasi.



Gambar 5.4. Skema Battery Swapping Berbasis Energi Terbarukan

Dari sisi teknis, battery swapping station terdiri atas beberapa subsistem utama: rak penyimpanan baterai modular, automated charging racks, renewable energy input unit, battery health monitoring system, swapping interface terminal, dan cloud management software. Setiap baterai yang masuk ke stasiun akan diperiksa kondisi SOC, SOH, suhu, dan riwayat pemakaian sebelum diisi ulang. Sistem ini memastikan bahwa baterai yang diberikan kepada pengguna selalu berada dalam kondisi optimal. Dalam sistem modern, identifikasi baterai dilakukan melalui RFID atau QR-linked battery passport untuk memantau siklus hidup setiap unit baterai.

Salah satu syarat keberhasilan battery swapping adalah standarisasi baterai. Tanpa standar ukuran, konektor, tegangan, dan protokol komunikasi yang seragam, sistem swapping sulit diterapkan lintas merek kendaraan. Oleh karena itu, banyak negara mulai mengembangkan standar universal battery module untuk kendaraan roda dua. Di Indonesia, standarisasi ini menjadi isu penting agar produsen kendaraan nasional dan operator swapping dapat membangun ekosistem interoperabel yang luas.

Tabel 5.4. Keunggulan Battery Swapping Berbasis Energi Terbarukan

Aspek	Keunggulan
Waktu Pengisian	Sangat cepat (1–3 menit)
Efisiensi Operasional	Minim downtime kendaraan
Pemanfaatan Energi Surya	Optimal, dapat dijadwalkan
Fleksibilitas Penggunaan	Tinggi untuk armada intensif
Monitoring Baterai	Terpusat dan lebih aman
Skalabilitas Sistem	Mudah diperluas

Selain manfaat teknis, battery swapping juga memberikan keuntungan ekonomi. Karena baterai dapat dipisahkan dari kepemilikan kendaraan, model bisnis “battery as a service” (BaaS) menjadi mungkin diterapkan. Dalam model ini, pengguna hanya membeli kendaraan tanpa baterai, lalu menyewa baterai melalui jaringan swapping. Hal ini menurunkan harga awal kendaraan secara signifikan, sehingga kendaraan listrik menjadi lebih terjangkau bagi masyarakat luas. Bagi operator, model ini membuka peluang pendapatan berulang dari layanan energi, bukan sekadar penjualan perangkat.

Namun demikian, sistem battery swapping berbasis energi terbarukan juga menghadapi tantangan. Investasi awal pembangunan stasiun cukup tinggi karena memerlukan stok baterai cadangan, sistem charging otomatis, software monitoring, dan infrastruktur renewable energy yang andal. Tantangan lain adalah manajemen inventori baterai, karena setiap unit memiliki tingkat degradasi berbeda. Selain itu, keamanan fisik baterai dan risiko pencurian atau kerusakan selama pertukaran juga harus diperhatikan.

Di Indonesia, battery swapping berbasis energi terbarukan sangat potensial diterapkan di kota padat seperti Jakarta, Surabaya, Bandung, dan Yogyakarta untuk armada ojek online, serta di daerah terpencil untuk kendaraan desa berbasis microgrid surya. Wilayah kepulauan kecil yang belum memiliki grid listrik stabil juga sangat cocok menggunakan swapping station berbasis solar PV dan baterai cadangan. Dengan pendekatan ini, kendaraan listrik dapat dioperasikan tanpa perlu membangun jaringan charging cepat yang mahal.

Perkembangan masa depan mengarah pada **robotic autonomous swapping station**, yaitu stasiun otomatis yang dapat mengganti baterai tanpa intervensi manusia. Sistem ini dipadukan dengan AI fleet management, predictive battery rotation, dan blockchain energy accounting untuk memastikan efisiensi maksimum. Dalam skenario masa depan, battery swapping akan menjadi bagian integral dari smart mobility

ecosystem, di mana kendaraan, stasiun energi, dan jaringan microgrid saling terhubung secara real-time.

Secara keseluruhan, battery swapping berbasis energi terbarukan merupakan solusi strategis untuk mempercepat adopsi sepeda motor listrik hybrid off-grid. Teknologi ini mengatasi keterbatasan waktu charging, meningkatkan produktivitas kendaraan, mengoptimalkan pemanfaatan energi terbarukan, dan membuka model bisnis energi baru yang inklusif serta berkelanjutan.

5.5 Desain Charging Infrastructure di Daerah Terpencil

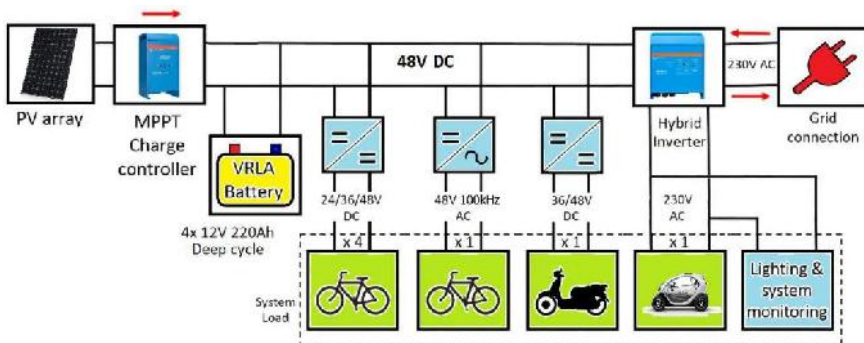
Desain charging infrastructure di daerah terpencil merupakan salah satu tantangan paling krusial dalam implementasi sepeda motor listrik hybrid off-grid, terutama di negara kepulauan seperti Indonesia yang memiliki ribuan wilayah dengan keterbatasan akses listrik, infrastruktur jalan, dan jaringan distribusi energi. Berbeda dengan kawasan urban yang umumnya memiliki akses grid stabil, daerah terpencil sering menghadapi kondisi pasokan listrik tidak kontinu, kapasitas daya rendah, bahkan belum terhubung sama sekali ke jaringan nasional. Dalam situasi demikian, pembangunan charging infrastructure tidak dapat mengandalkan pendekatan konvensional berbasis grid-dependent charging station, melainkan harus dirancang sebagai sistem mandiri energi, modular, tahan lingkungan ekstrem, dan mudah dipelihara oleh komunitas lokal. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa keberhasilan kendaraan hybrid off-grid di wilayah rural sangat ditentukan oleh kemampuan infrastruktur charging beradaptasi terhadap kondisi geografis dan keterbatasan energi lokal.

Secara konsep, charging infrastructure di daerah terpencil harus memenuhi empat prinsip utama: kemandirian energi, keandalan operasional, kemudahan pemeliharaan, dan skalabilitas sistem. Kemandirian energi berarti stasiun pengisian harus mampu menghasilkan dan menyimpan energi sendiri, umumnya melalui panel surya fotovoltaik, turbin angin kecil, mikrohidro, atau hybrid renewable microgrid. Keandalan operasional berarti sistem tetap mampu berfungsi meskipun kondisi cuaca berubah-ubah atau salah satu sumber energi menurun. Kemudahan pemeliharaan berarti sistem harus sederhana, modular, dan dapat diperbaiki tanpa memerlukan teknisi spesialis tingkat tinggi. Skalabilitas berarti infrastruktur dapat diperluas seiring bertambahnya jumlah kendaraan listrik di wilayah tersebut.

Pendekatan paling umum dalam desain charging daerah terpencil adalah penggunaan **modular off-grid solar charging hub**, yaitu stasiun pengisian berbasis panel surya yang dikombinasikan dengan battery energy

storage system (BESS). Sistem ini memanfaatkan energi matahari sebagai sumber utama, disimpan dalam baterai stasioner, lalu didistribusikan ke kendaraan sesuai kebutuhan. Karena banyak wilayah terpencil Indonesia memiliki intensitas radiasi surya tinggi sepanjang tahun, pendekatan ini sangat relevan dan ekonomis. Solar-powered charging hubs di wilayah rural dapat memenuhi hingga 80–95% kebutuhan energi kendaraan roda dua jika dirancang dengan sizing PV dan storage yang optimal.

Dalam kondisi geografis tertentu seperti pegunungan, pesisir berangin, atau desa dekat aliran sungai, sistem charging dapat diperkuat dengan hybrid sources seperti turbin angin mikro atau mikrohidro. Pendekatan hybrid ini meningkatkan reliability system karena tidak bergantung pada satu sumber energi saja. Misalnya, saat musim hujan menurunkan output panel surya, turbin mikrohidro dapat menjaga suplai energi tetap stabil. Integrasi multi-sumber ini menjadikan charging infrastructure lebih tahan terhadap fluktuasi iklim dan lebih sesuai untuk wilayah dengan pola cuaca ekstrem.



Gambar 5.5. Desain Charging Infrastructure Off-Grid di Daerah Terpencil

Dalam perancangan teknis, ada beberapa parameter utama yang harus diperhitungkan: jumlah kendaraan yang dilayani per hari, kapasitas baterai kendaraan, rata-rata kebutuhan energi harian, durasi penyinaran matahari, faktor losses sistem, dan cadangan energi minimum saat cuaca buruk. Sebagai contoh, jika sebuah desa memiliki 20 kendaraan hybrid motorcycle dengan kebutuhan rata-rata 2 kWh per hari per kendaraan, maka stasiun charging harus mampu menyediakan minimal 40 kWh energi harian ditambah margin cadangan sekitar 20–30%. Perhitungan ini menentukan kapasitas panel PV, ukuran baterai penyimpanan, serta spesifikasi inverter yang diperlukan.

Salah satu inovasi penting dalam daerah terpencil adalah penggunaan **battery swapping modular station**, karena lebih praktis dibanding

charging langsung. Dengan swapping system, baterai dapat diisi perlahan sepanjang hari menggunakan energi surya, lalu ditukar cepat oleh pengguna kapan saja. Model ini sangat cocok untuk desa terpencil yang membutuhkan kecepatan operasional tinggi tetapi memiliki kapasitas energi terbatas. Selain itu, swapping station memungkinkan manajemen baterai terpusat yang lebih aman dan efisien.

Tabel 5.5. Komponen Desain Charging Infrastructure di Daerah Terpencil

Komponen	Fungsi
Panel Surya / Hybrid Generator	Sumber energi utama
Battery Energy Storage System	Menyimpan energi cadangan
Solar Charge Controller	Mengatur pengisian baterai
Inverter / DC Converter	Menyesuaikan tegangan sistem
Charging Terminal / Swap Rack	Titik distribusi energi ke kendaraan
EMS Controller	Mengelola aliran energi dan prioritas beban

Tantangan terbesar pembangunan charging infrastructure di daerah terpencil adalah logistik dan biaya investasi awal. Transportasi panel surya, baterai, inverter, dan material konstruksi ke lokasi terpencil sering kali mahal dan sulit dilakukan. Selain itu, minimnya tenaga teknis lokal membuat instalasi dan perawatan sistem memerlukan pelatihan komunitas terlebih dahulu. Oleh karena itu, desain infrastruktur harus mempertimbangkan modular prefabricated systems yang mudah dirakit di lokasi dan memerlukan sedikit intervensi teknis rumit.

Di Indonesia, wilayah seperti Papua, Nusa Tenggara Timur, Maluku, Kalimantan pedalaman, dan pulau-pulau kecil merupakan kandidat ideal untuk penerapan charging infrastructure off-grid berbasis energi terbarukan. Banyak daerah ini memiliki potensi surya tinggi tetapi akses listrik terbatas. Dengan membangun charging hub lokal, kendaraan hybrid motorcycle dapat menjadi solusi transportasi bersih yang menghubungkan desa, sekolah, puskesmas, pasar, dan pusat layanan publik tanpa tergantung BBM fosil yang mahal distribusinya.

Aspek sosial juga menjadi faktor penting. Infrastruktur charging di daerah terpencil harus dirancang sebagai bagian dari ekosistem pemberdayaan masyarakat, bukan sekadar proyek teknologi. Pelibatan koperasi desa, BUMDes, komunitas pemuda, dan teknisi lokal akan meningkatkan rasa memiliki, keberlanjutan operasional, dan kemandirian

energi jangka panjang. Model community-owned charging station terbukti lebih sukses dalam jangka panjang dibanding model top-down yang sepenuhnya dikelola eksternal.

Perkembangan masa depan mengarah pada **autonomous smart rural charging hub**, yaitu stasiun charging berbasis AI yang mampu memprediksi kebutuhan energi harian desa, menyesuaikan charging schedule kendaraan, dan mengoptimalkan penggunaan energi berdasarkan prakiraan cuaca. Dengan integrasi IoT dan remote diagnostics, stasiun ini dapat dipantau dari pusat tanpa harus selalu didatangi teknisi. Teknologi ini akan sangat membantu wilayah terpencil yang sulit dijangkau secara fisik.

Secara keseluruhan, desain charging infrastructure di daerah terpencil bukan hanya soal menyediakan listrik bagi kendaraan, tetapi tentang menciptakan sistem mobilitas mandiri energi yang adaptif, tahan kondisi ekstrem, dan memberdayakan masyarakat lokal. Infrastruktur inilah yang akan menjadi fondasi nyata transisi energi bersih di wilayah-wilayah yang selama ini tertinggal dalam akses energi modern.

BAB 6

STRATEGI MANAJEMEN ENERGI DAN KONTROL SISTEM HYBRID

6.1 Rule-Based Energy Management Strategy

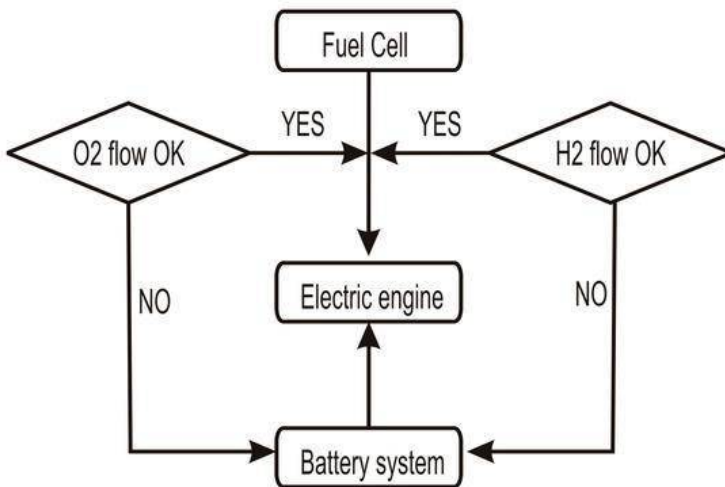
Dalam sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid, keberhasilan integrasi berbagai sumber energi—motor listrik, baterai, supercapacitor, regenerative braking, panel surya, dan mesin pembakaran cadangan—sangat bergantung pada strategi manajemen energi yang diterapkan. Tanpa sistem kontrol yang cerdas, distribusi energi antar subsistem dapat menjadi tidak efisien, mempercepat degradasi baterai, meningkatkan konsumsi energi, dan menurunkan performa kendaraan. Salah satu pendekatan paling mendasar dan luas digunakan dalam kendaraan hybrid adalah **Rule-Based Energy Management Strategy (RB-EMS)**, yaitu strategi pengaturan energi berdasarkan seperangkat aturan logika yang telah ditentukan sebelumnya. Pendekatan ini menjadi fondasi awal dari hampir seluruh sistem kontrol hybrid modern karena sederhana, stabil, mudah diimplementasikan, dan sangat cocok untuk kendaraan dengan kebutuhan real-time response tinggi. Dalam naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa rule-based control masih menjadi strategi dominan pada hybrid motorcycle generasi awal karena keandalannya dalam kondisi operasional yang beragam.

Secara prinsip, RB-EMS bekerja dengan menentukan keputusan distribusi energi berdasarkan kondisi kendaraan saat itu, seperti nilai State of Charge (SOC), permintaan torsi, kecepatan kendaraan, suhu baterai, mode berkendara, dan kondisi sumber energi terbarukan. Sistem ini menggunakan aturan logika berbentuk “if-then”, misalnya: *jika SOC baterai di bawah 30%, aktifkan sumber energi sekunder*; atau *jika kendaraan sedang deselerasi, aktifkan regenerative braking*. Dengan pendekatan ini, kendaraan dapat mengatur kapan motor listrik bekerja penuh, kapan ICE membantu, kapan supercapacitor aktif, dan kapan baterai perlu dilindungi dari beban berlebih.

Keunggulan utama RB-EMS adalah kesederhanaannya. Karena aturan ditetapkan secara eksplisit oleh insinyur, sistem mudah diprogram pada ECU kendaraan tanpa memerlukan komputasi berat. Hal ini sangat penting pada sepeda motor hybrid, yang umumnya memiliki keterbatasan kapasitas prosesor dibanding kendaraan roda empat. Selain itu, rule-based system sangat andal untuk kondisi lapangan karena responsnya cepat, deterministik, dan tidak memerlukan data historis besar seperti metode AI-

based control. Rule-based strategy tetap digunakan secara luas pada hybrid electric motorcycle skala komersial karena menawarkan trade-off terbaik antara stabilitas, biaya implementasi rendah, dan kemudahan kalibrasi.

Dalam implementasi nyata, RB-EMS biasanya dibagi menjadi beberapa lapisan logika. Lapisan pertama adalah **mode selection logic**, yaitu menentukan mode operasi kendaraan: electric mode, hybrid assist mode, charging mode, regenerative mode, atau ICE dominant mode. Lapisan kedua adalah **power split logic**, yaitu menentukan proporsi daya dari motor listrik, baterai, dan sumber sekunder. Lapisan ketiga adalah **battery protection logic**, yaitu memastikan baterai tidak melewati batas aman SOC, arus, dan temperatur. Dengan struktur berlapis ini, RB-EMS dapat menjaga keseimbangan antara efisiensi energi dan keselamatan sistem.



Gambar 6.1. Skema Rule-Based Energy Management Strategy pada Hybrid Motorcycle

Salah satu contoh sederhana RB-EMS adalah strategi berbasis SOC threshold. Dalam pendekatan ini, jika SOC baterai berada di atas batas tertentu (misalnya 70%), kendaraan beroperasi penuh dalam electric mode. Jika SOC turun ke rentang menengah (30–70%), sistem masuk ke hybrid assist mode. Bila SOC turun di bawah 30%, ICE atau sumber energi tambahan diaktifkan untuk menjaga kontinuitas daya. Strategi ini sederhana namun efektif menjaga baterai tetap berada pada zona operasi aman.

Selain berbasis SOC, RB-EMS juga dapat berbasis **load demand threshold**, yaitu keputusan distribusi energi ditentukan oleh kebutuhan daya kendaraan. Saat akselerasi tinggi, motor listrik dan supercapacitor aktif bersamaan. Saat cruising stabil, hanya motor listrik atau ICE ringan yang

bekerja. Saat pengereman, sistem beralih ke regenerative charging mode. Pendekatan ini membantu meningkatkan efisiensi karena sumber energi hanya digunakan sesuai kebutuhan aktual.

Tabel 6.1. Contoh Aturan Logika pada Rule-Based EMS

Kondisi Sistem	Aturan EMS	Aksi Sistem
SOC > 70%	Prioritaskan listrik	Electric drive mode aktif
SOC 30–70%	Kombinasi daya	Hybrid assist mode
SOC < 30%	Aktifkan sumber sekunder	ICE / charging mode aktif
Deselerasi	Aktifkan regen braking	Pengisian energi kembali
Temperatur baterai tinggi	Kurangi discharge rate	Proteksi thermal mode

Meskipun sederhana, RB-EMS memiliki keterbatasan utama: sifatnya statis dan kurang adaptif terhadap kondisi yang sangat dinamis. Karena aturan ditetapkan sebelumnya, sistem tidak mampu belajar dari pola penggunaan baru atau memprediksi kebutuhan energi masa depan. Misalnya, RB-EMS tidak dapat memperkirakan tanjakan panjang di depan atau pola kemacetan berulang kecuali diprogram secara eksplisit. Oleh karena itu, dalam kendaraan hybrid generasi baru, RB-EMS sering dikombinasikan dengan fuzzy logic, predictive control, atau machine learning agar lebih adaptif.

Dalam sepeda motor hybrid off-grid, RB-EMS tetap sangat relevan karena banyak kendaraan digunakan di wilayah dengan keterbatasan perangkat keras kontrol. Pada desa terpencil atau kendaraan skala komunitas, strategi rule-based lebih realistis karena mudah dirawat, murah, dan tidak membutuhkan software kompleks. Selain itu, RB-EMS cocok untuk integrasi dengan sistem energi terbarukan sederhana seperti solar charging station dan battery swapping hubs.

Di Indonesia, RB-EMS memiliki potensi besar untuk diterapkan pada kendaraan hybrid nasional karena dapat dikembangkan dengan mikrokontroler lokal berbiaya rendah. Dengan adaptasi berbasis kondisi geografis lokal—misalnya pola jalan menanjak, suhu tropis, dan variasi beban pedesaan—RB-EMS dapat dioptimalkan sesuai kebutuhan pengguna domestik tanpa ketergantungan pada teknologi impor mahal.

Perkembangan masa depan rule-based control mengarah pada **adaptive rule-based EMS**, yaitu sistem yang tetap berbasis aturan logika, tetapi mampu menyesuaikan parameter threshold secara otomatis

berdasarkan data historis penggunaan. Pendekatan ini menjadi jembatan antara sistem kontrol tradisional dan AI-based EMS, menjaga kesederhanaan sambil meningkatkan kecerdasan adaptif.

Secara keseluruhan, Rule-Based Energy Management Strategy adalah fondasi penting dalam sistem kontrol hybrid motorcycle. Ia menyediakan kerangka kerja sederhana namun efektif untuk mengatur distribusi energi, menjaga keselamatan baterai, dan memastikan kendaraan beroperasi stabil dalam berbagai kondisi. Meski bukan strategi paling canggih, RB-EMS tetap menjadi tulang punggung banyak kendaraan hybrid masa kini karena keandalan dan efisiensinya yang terbukti.

6.2 ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy)

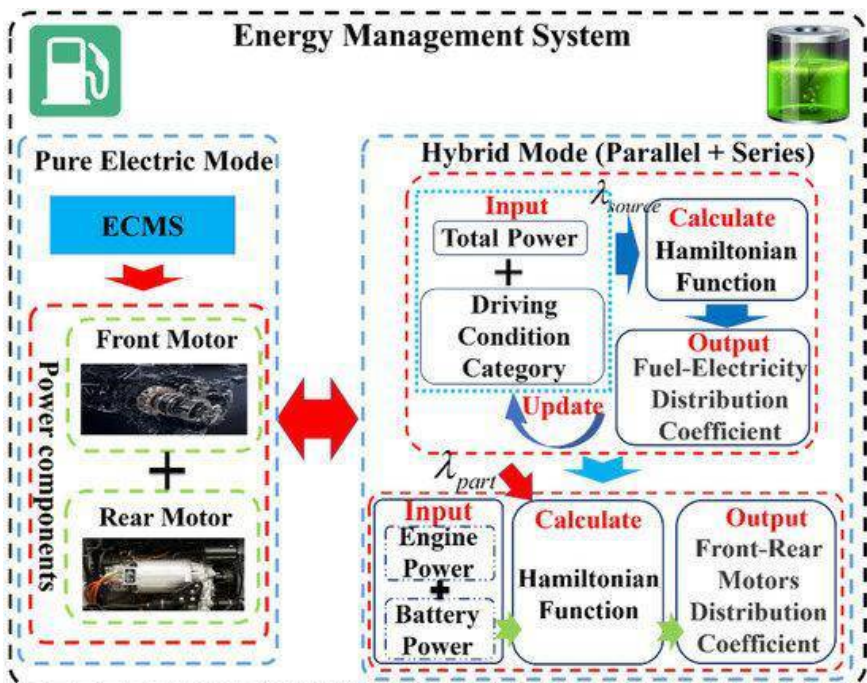
Dalam sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid, salah satu tantangan terbesar dalam manajemen energi adalah menentukan kombinasi penggunaan sumber energi yang paling efisien pada setiap saat operasi kendaraan. Ketika kendaraan memiliki lebih dari satu sumber tenaga—seperti baterai, motor listrik, supercapacitor, regenerative braking, dan downsized internal combustion engine (ICE)—dibutuhkan strategi optimasi yang mampu meminimalkan total konsumsi energi tanpa mengorbankan performa. Salah satu pendekatan paling efektif dan banyak digunakan dalam kendaraan hybrid modern adalah **Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)**. Berbeda dari rule-based control yang menggunakan aturan tetap, ECMS bekerja dengan prinsip optimasi matematis real-time untuk memilih distribusi energi yang menghasilkan konsumsi total paling rendah. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa ECMS menjadi tonggak penting evolusi sistem kontrol hybrid karena mampu menggabungkan efisiensi energi tinggi dengan fleksibilitas adaptif terhadap perubahan kondisi operasi kendaraan.

Secara konsep, ECMS mengubah seluruh bentuk konsumsi energi—baik listrik maupun bahan bakar—ke dalam satu satuan ekuivalen, biasanya ekuivalen konsumsi bahan bakar. Dengan demikian, energi listrik yang diambil dari baterai dapat dihitung setara dengan sejumlah bahan bakar tertentu, sehingga sistem dapat membandingkan penggunaan motor listrik dan ICE secara langsung dalam kerangka biaya energi tunggal. Strategi ini memungkinkan kontroler menentukan apakah pada suatu kondisi lebih hemat menggunakan baterai, mesin pembakaran, atau kombinasi keduanya. Prinsip inilah yang menjadikan ECMS jauh lebih cerdas dibanding rule-based system, karena keputusan energi dibuat berdasarkan optimasi kontinu, bukan aturan statis.

Sebagai contoh, ketika kendaraan melaju pada kecepatan konstan di jalan datar, ECMS mungkin memutuskan bahwa penggunaan motor listrik

penuh lebih efisien karena beban rendah dan efisiensi motor tinggi. Namun saat kendaraan menanjak tajam, sistem dapat mengaktifkan ICE sebagai sumber tambahan jika secara ekuivalen lebih hemat dibanding menguras baterai secara berlebihan. Penerapan ECMS pada hybrid electric motorcycle mampu menurunkan konsumsi energi total hingga 12–20% dibanding strategi rule-based konvensional, terutama pada pola berkendara dinamis urban stop-and-go.

Inti dari ECMS terletak pada fungsi objektif optimasi yang meminimalkan biaya energi ekuivalen sesaat. Fungsi ini menghitung total konsumsi bahan bakar aktual ditambah konsumsi energi listrik yang telah dikonversi ke ekuivalen bahan bakar menggunakan faktor ekuivalensi. Faktor ini sangat penting karena menentukan “nilai ekonomi” energi baterai terhadap bahan bakar. Jika faktor terlalu rendah, sistem cenderung terlalu sering memakai baterai; jika terlalu tinggi, sistem terlalu bergantung pada ICE. Oleh karena itu, kalibrasi faktor ekuivalensi menjadi kunci keberhasilan implementasi ECMS.



Gambar 6.2. Skema Prinsip Kerja ECMS pada Hybrid Motorcycle

Dalam implementasi nyata, ECMS bekerja dalam siklus waktu sangat cepat, sering kali dalam hitungan milidetik. ECU kendaraan membaca data

real-time seperti kecepatan kendaraan, permintaan torsi, SOC baterai, suhu baterai, efisiensi motor, dan kondisi ICE. Berdasarkan data ini, algoritma ECMS menghitung beberapa skenario distribusi energi dan memilih kombinasi dengan biaya ekuivalen paling rendah. Proses ini berlangsung terus-menerus sepanjang kendaraan beroperasi, sehingga strategi energi selalu menyesuaikan kondisi aktual kendaraan.

Salah satu keunggulan ECMS adalah kemampuannya menjaga keseimbangan SOC baterai secara lebih alami. Karena energi listrik dihitung sebagai “biaya ekuivalen”, sistem tidak akan sembarangan menguras baterai jika nilainya dianggap mahal pada total energi. Ini membuat ECMS sangat cocok untuk hybrid off-grid motorcycle, di mana baterai harus dikelola hati-hati karena ketersediaan charging tidak selalu instan seperti kendaraan grid-based. Dengan ECMS, baterai digunakan secara strategis, bukan sekadar maksimal.

Tabel 6.2. Perbandingan ECMS dan Rule-Based EMS

Parameter	Rule-Based EMS	ECMS
Dasar Keputusan	Aturan tetap	Optimasi matematis real-time
Adaptasi Kondisi Dinamis	Terbatas	Sangat baik
Efisiensi Energi	Sedang	Tinggi
Kompleksitas Komputasi	Rendah	Sedang-Tinggi
Akurasi Distribusi Energi	Moderat	Sangat Presisi
Cocok untuk Hybrid Kompleks	Terbatas	Sangat Cocok

Meski sangat efisien, ECMS juga memiliki tantangan implementasi. Pertama, sistem memerlukan model efisiensi motor, baterai, dan ICE yang akurat agar optimasi tidak bias. Kedua, faktor ekuivalensi harus dikalibrasi dengan baik sesuai karakter kendaraan dan kondisi penggunaan. Ketiga, komputasi ECMS lebih kompleks dibanding rule-based control, sehingga membutuhkan ECU dengan kapasitas pemrosesan lebih tinggi. Pada sepeda motor dengan hardware terbatas, ini bisa menjadi kendala teknis.

Dalam pengembangan terbaru, ECMS mulai dikombinasikan dengan predictive algorithms, seperti GPS-based route prediction dan machine learning driving pattern recognition. Misalnya, jika sistem mengetahui kendaraan akan memasuki jalan menanjak beberapa kilometer ke depan, ECMS dapat menahan penggunaan baterai saat ini agar cadangan energi tersedia saat dibutuhkan. Pendekatan ini disebut **Adaptive ECMS (A-ECMS)** dan menjadi arah utama riset kendaraan hybrid generasi baru.

Di Indonesia, ECMS sangat relevan untuk kendaraan hybrid off-grid yang beroperasi di wilayah dengan topografi bervariasi seperti pegunungan, pedesaan, dan jalan antar pulau kecil. Kendaraan dapat mengoptimalkan energi sesuai medan, mengurangi pemborosan energi pada kondisi tanjakan-turunan ekstrem, dan meningkatkan efisiensi kendaraan secara signifikan. Selain itu, integrasi ECMS dengan renewable charging infrastructure lokal dapat membuat kendaraan semakin hemat energi dan rendah emisi.

Dari perspektif masa depan, ECMS akan menjadi fondasi utama kendaraan hybrid cerdas karena kompatibel dengan AI-based autonomous control. Dengan integrasi cloud data, digital twin vehicle models, dan predictive mobility analytics, ECMS masa depan tidak hanya mengoptimalkan konsumsi energi saat ini, tetapi juga merencanakan strategi energi berdasarkan prediksi perjalanan penuh. Hal ini akan membawa kendaraan hybrid motorcycle menuju tingkat efisiensi yang jauh lebih tinggi dibanding sistem konvensional.

Secara keseluruhan, Equivalent Consumption Minimization Strategy merupakan evolusi penting dalam manajemen energi hybrid motorcycle. Dengan pendekatan optimasi matematis real-time, ECMS memungkinkan kendaraan memilih kombinasi energi paling efisien pada setiap kondisi, menjaga keseimbangan baterai, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan memperpanjang umur sistem energi secara keseluruhan.

6.3 Machine Learning-Based Controller

Perkembangan kendaraan hybrid off-grid generasi baru menuntut sistem kontrol energi yang tidak hanya cepat dan efisien, tetapi juga adaptif terhadap kondisi operasional yang berubah-ubah secara dinamis. Jika rule-based EMS mengandalkan aturan tetap dan ECMS menggunakan optimasi matematis real-time, maka tahap evolusi berikutnya adalah **Machine Learning-Based Controller (MLBC)**, yaitu sistem kontrol berbasis kecerdasan buatan yang mampu belajar dari data, mengenali pola penggunaan kendaraan, dan menyesuaikan strategi distribusi energi secara otomatis. Dalam sepeda motor listrik hybrid off-grid, MLBC menjadi pendekatan yang sangat menjanjikan karena kendaraan beroperasi dalam lingkungan kompleks: pola jalan berubah, cuaca memengaruhi energi surya, beban kendaraan fluktuatif, dan perilaku pengendara sangat beragam. Naskah dasar buku ini menegaskan bahwa integrasi machine learning dalam sistem kontrol hybrid merupakan langkah penting menuju kendaraan listrik cerdas yang benar-benar adaptif dan efisien secara prediktif.

Machine Learning-Based Controller bekerja dengan memanfaatkan data historis dan data real-time untuk membangun model keputusan energi

yang lebih cerdas dibanding pendekatan konvensional. Sistem ini dapat mempelajari pola akselerasi pengguna, rute perjalanan rutin, frekuensi pengereman, konsumsi energi rata-rata, kondisi topografi jalan, bahkan variasi intensitas energi surya yang tersedia. Berdasarkan pembelajaran tersebut, controller dapat memprediksi kebutuhan energi berikutnya dan menentukan strategi distribusi daya paling optimal sebelum kondisi itu benar-benar terjadi. Dengan kata lain, MLBC bukan hanya reaktif, tetapi juga prediktif.

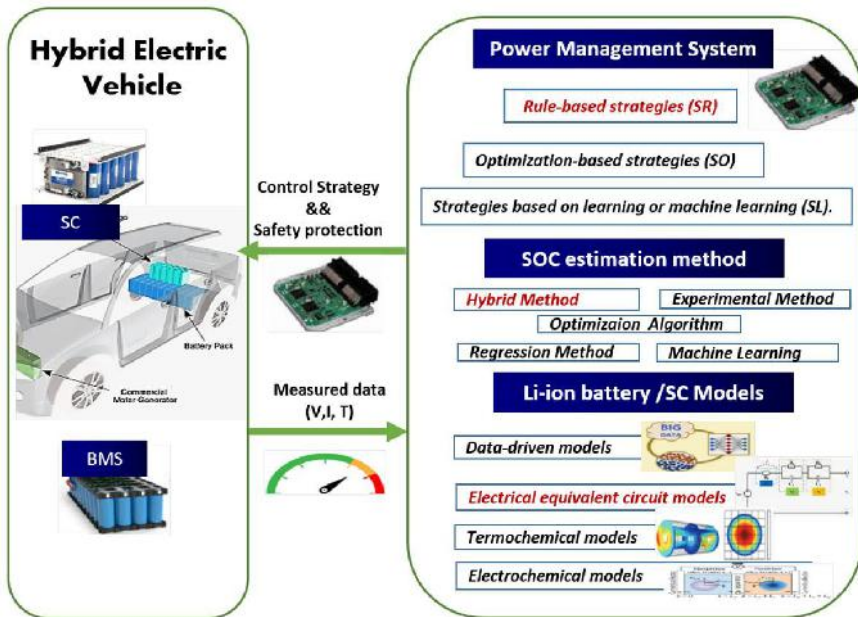
Dalam kendaraan hybrid motorcycle, machine learning biasanya diterapkan pada tiga area utama: prediksi beban kendaraan, optimasi distribusi energi, dan estimasi kesehatan baterai. Pada prediksi beban, algoritma mempelajari pola berkendara untuk memperkirakan permintaan torsi di masa dekat. Pada optimasi distribusi energi, sistem menentukan kapan motor listrik, baterai, supercapacitor, regenerative braking, atau ICE digunakan secara paling efisien. Pada estimasi baterai, machine learning membantu memprediksi SOC, SOH, dan degradasi baterai dengan akurasi lebih tinggi dibanding metode statistik tradisional. Machine learning controller pada hybrid electric motorcycle dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 15–25% dibanding ECMS konvensional, terutama dalam kondisi berkendara urban kompleks dan topografi variatif.

Jenis algoritma machine learning yang umum digunakan meliputi Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine (SVM), Reinforcement Learning (RL), Deep Q-Network (DQN), Random Forest Regression, dan Long Short-Term Memory (LSTM). ANN banyak digunakan untuk estimasi SOC dan SOH karena mampu memetakan hubungan nonlinier kompleks. Reinforcement Learning sangat populer dalam optimasi energi karena sistem dapat belajar melalui trial-and-error untuk memilih strategi distribusi daya terbaik. Sementara LSTM unggul dalam prediksi beban kendaraan berbasis data time-series seperti pola perjalanan harian.

Salah satu keunggulan terbesar MLBC adalah kemampuannya melakukan **adaptive personalization**, yaitu menyesuaikan strategi energi berdasarkan karakteristik unik setiap pengguna. Misalnya, jika sistem mendeteksi seorang pengguna sering berkendara agresif dengan akselerasi mendadak, controller akan menyesuaikan strategi penggunaan supercapacitor dan regenerative braking agar efisiensi tetap terjaga. Sebaliknya, untuk pengguna dengan gaya berkendara halus, sistem dapat mengoptimalkan penggunaan baterai untuk memaksimalkan driving range. Hal ini membuat kendaraan menjadi semakin cerdas seiring waktu penggunaan.

Dalam hybrid off-grid, MLBC juga sangat berguna dalam integrasi energi terbarukan. Sistem dapat memprediksi pola produksi energi surya

berdasarkan histori cuaca dan intensitas radiasi, lalu menyesuaikan strategi charging kendaraan. Misalnya, jika diperkirakan esok hari mendung, sistem dapat memutuskan untuk menghemat baterai hari ini dan memaksimalkan regenerative charging. Ini menjadikan kendaraan hybrid off-grid lebih tangguh menghadapi variabilitas sumber energi terbarukan.



Gambar 6.3. Arsitektur Machine Learning-Based Controller pada Hybrid Motorcycle

Tabel 6.3. Keunggulan Machine Learning-Based Controller dibanding EMS Konvensional

Aspek	EMS Konvensional	ML-Based Controller
Adaptasi Pengguna	Terbatas	Sangat Adaptif
Prediksi Beban Masa Depan	Tidak Ada	Ada
Efisiensi Energi	Sedang-Tinggi	Sangat Tinggi
Kemampuan Belajar	Tidak	Ya
Integrasi Data Historis	Minimal	Intensif
Optimasi Multi-Variabel	Terbatas	Sangat Baik

Namun demikian, implementasi machine learning controller juga menghadapi tantangan. Pertama adalah kebutuhan data besar untuk pelatihan model agar akurasi cukup tinggi. Kedua, model ML memerlukan kapasitas komputasi lebih tinggi dibanding controller biasa, sehingga hardware ECU harus lebih canggih. Ketiga, model harus dirancang tahan terhadap noise sensor, kesalahan data, dan kondisi lingkungan ekstrem agar tetap stabil dalam penggunaan nyata. Selain itu, keamanan siber juga menjadi isu penting karena kendaraan yang menggunakan AI terhubung ke cloud lebih rentan terhadap gangguan digital.

Dalam praktik industri, pendekatan hybrid mulai banyak digunakan: rule-based + machine learning atau ECMS + reinforcement learning. Model hybrid ini memadukan kestabilan kontrol tradisional dengan kecerdasan adaptif AI. Misalnya, rule-based digunakan sebagai lapisan keselamatan dasar, sementara ML mengoptimalkan keputusan energi pada lapisan strategis. Pendekatan ini dianggap paling realistis untuk transisi dari sistem konvensional menuju kendaraan otonom cerdas.

Dalam Indonesia, machine learning controller sangat potensial untuk kendaraan hybrid off-grid yang beroperasi di wilayah geografis kompleks seperti pegunungan, pedesaan terpencil, atau kepulauan kecil. Kendaraan dapat belajar dari pola jalan lokal, kondisi cuaca tropis, serta fluktuasi energi surya setempat untuk mengoptimalkan performa. Dengan dukungan cloud computing nasional dan IoT kendaraan, sistem ini dapat berkembang menjadi jaringan kendaraan listrik cerdas berbasis data lokal Indonesia.

Ke depan, evolusi machine learning controller akan mengarah pada **self-evolving autonomous energy intelligence**, yaitu sistem yang tidak hanya belajar dari satu kendaraan, tetapi dari seluruh armada kendaraan yang saling terhubung. Dengan konsep federated learning, ribuan kendaraan hybrid dapat berbagi pengalaman operasional untuk meningkatkan kecerdasan sistem secara kolektif tanpa mengorbankan privasi data pengguna. Ini akan menciptakan generasi kendaraan hybrid yang terus berkembang lebih cerdas setiap hari.

Secara keseluruhan, Machine Learning-Based Controller adalah lompatan besar dalam manajemen energi kendaraan hybrid off-grid. Teknologi ini memungkinkan kendaraan memahami lingkungan, belajar dari pengalaman, memprediksi kebutuhan energi masa depan, dan menyesuaikan strategi distribusi daya secara mandiri. Dengan kemampuan tersebut, MLBC menjadi fondasi utama menuju kendaraan hybrid cerdas yang efisien, adaptif, dan siap menghadapi kompleksitas mobilitas masa depan.

6.4 Real-Time Optimization dan Adaptive Control

Dalam sistem sepeda motor listrik hybrid off-grid modern, kompleksitas pengelolaan energi meningkat seiring bertambahnya jumlah subsistem yang harus diintegrasikan: baterai utama, supercapacitor, motor listrik, regenerative braking, sumber energi sekunder (ICE atau generator mikro), panel surya, hingga battery swapping infrastructure. Pada kondisi ini, sistem kontrol konvensional berbasis aturan statis tidak lagi memadai untuk menghasilkan efisiensi energi maksimum. Diperlukan pendekatan yang mampu merespons perubahan kondisi kendaraan secara instan, menghitung skenario distribusi energi secara dinamis, dan menyesuaikan keputusan kontrol berdasarkan kondisi aktual lapangan. Pendekatan tersebut dikenal sebagai **Real-Time Optimization dan Adaptive Control**, yaitu strategi manajemen energi yang mengoptimalkan keputusan distribusi daya secara langsung saat kendaraan beroperasi, sambil menyesuaikan parameter kontrol terhadap perubahan lingkungan dan pola penggunaan. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa real-time adaptive control merupakan inti dari kendaraan hybrid cerdas generasi baru karena memungkinkan kendaraan mencapai efisiensi optimal dalam kondisi operasional yang selalu berubah.

Real-time optimization adalah proses matematis yang berlangsung terus-menerus selama kendaraan berjalan, di mana sistem kontrol menghitung kombinasi penggunaan energi paling efisien berdasarkan data sensor saat itu. Setiap milidetik, ECU menerima informasi seperti kecepatan kendaraan, permintaan torsi, SOC baterai, suhu motor, suhu baterai, kondisi regenerative braking, status panel surya, dan ketersediaan energi dari sumber sekunder. Berdasarkan data ini, algoritma optimasi menghitung distribusi energi terbaik untuk meminimalkan konsumsi total, menjaga keamanan baterai, dan mempertahankan performa kendaraan. Karena proses ini berlangsung real-time, kendaraan dapat beradaptasi langsung terhadap perubahan kondisi seperti tanjakan mendadak, kemacetan, atau perubahan cuaca yang memengaruhi input energi surya.

Adaptive control melengkapi proses optimasi dengan kemampuan sistem untuk mengubah parameter kontrolnya sendiri sesuai kondisi lingkungan. Jika real-time optimization menentukan keputusan energi saat ini, maka adaptive control menyesuaikan cara sistem mengambil keputusan itu sendiri. Misalnya, jika baterai mulai mengalami degradasi dan resistansi internal meningkat, adaptive controller akan mengubah batas arus discharge agar baterai tidak cepat rusak. Jika suhu lingkungan sangat panas, sistem akan mengurangi beban motor dan meningkatkan prioritas pendinginan. Dengan kemampuan adaptif ini, kendaraan tetap optimal meskipun kondisi komponen berubah seiring waktu. Adaptive control

berbasis predictive optimization dapat meningkatkan efisiensi energi hybrid electric motorcycle hingga 18% dibanding ECMS statis, terutama pada kondisi jalan dinamis dan variasi temperatur tinggi .

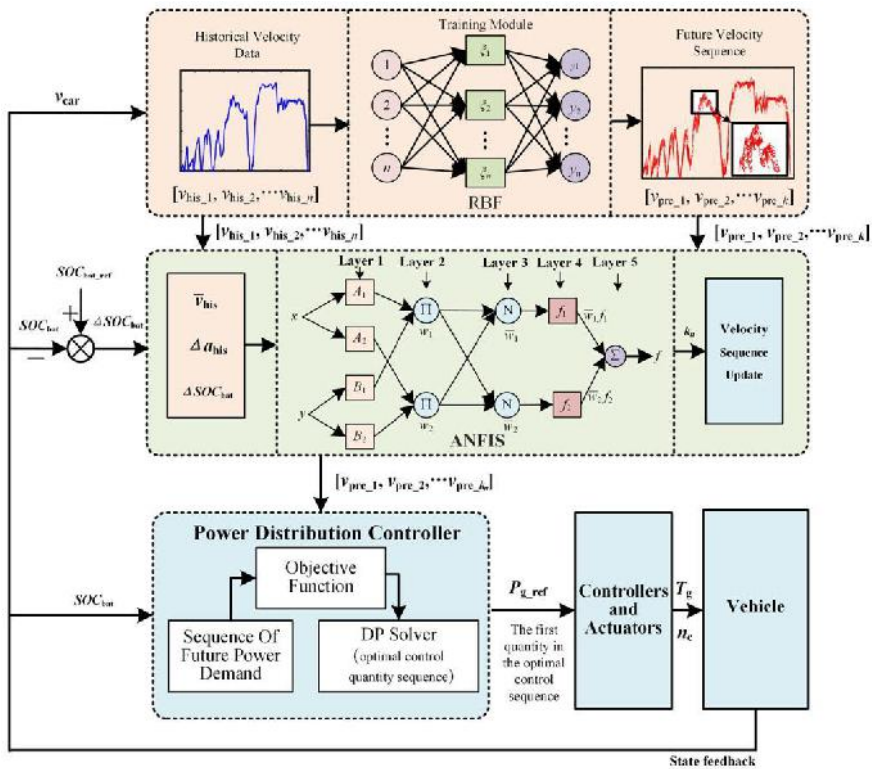
Salah satu algoritma populer dalam real-time optimization adalah **Model Predictive Control (MPC)**. MPC bekerja dengan memprediksi kondisi kendaraan beberapa langkah ke depan berdasarkan model matematis sistem, lalu memilih tindakan kontrol terbaik untuk meminimalkan fungsi objektif tertentu—misalnya konsumsi energi total atau emisi ekuivalen. Dalam hybrid motorcycle, MPC dapat memperkirakan kebutuhan energi 5–30 detik ke depan berdasarkan data throttle, gradien jalan, dan pola kecepatan. Jika sistem memprediksi tanjakan panjang akan datang, controller dapat menyimpan cadangan baterai terlebih dahulu agar performa tetap stabil.

Dalam implementasi nyata, real-time adaptive control bekerja melalui tiga lapisan utama. Lapisan pertama adalah **data acquisition layer**, yang mengumpulkan data dari sensor kendaraan. Lapisan kedua adalah **optimization layer**, yang menjalankan algoritma matematis seperti MPC, dynamic programming approximation, atau adaptive ECMS. Lapisan ketiga adalah **execution layer**, yaitu aktuator yang mengatur motor listrik, inverter, BMS, dan ICE sesuai hasil optimasi. Struktur berlapis ini memungkinkan sistem bekerja cepat, presisi, dan tetap aman meski menghadapi perubahan kondisi ekstrem.

Keunggulan utama pendekatan ini adalah fleksibilitas tinggi. Tidak seperti rule-based system yang hanya mengikuti aturan tetap, adaptive control dapat menyesuaikan strategi energi untuk setiap situasi unik. Misalnya, dua pengguna dengan gaya berkendara berbeda akan menerima strategi distribusi energi berbeda, meskipun menggunakan kendaraan yang sama. Hal ini menghasilkan personalisasi efisiensi energi yang lebih tinggi dan pengalaman berkendara lebih optimal.

Tabel 6.4. Perbandingan Sistem Kontrol Energi Hybrid

Parameter	Rule-Based EMS	ECMS	Real-Time Adaptive Control
Respons Dinamis	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
Adaptasi terhadap Perubahan	Terbatas	Moderat	Sangat Adaptif
Prediksi Kondisi Masa Depan	Tidak	Parsial	Ya
Efisiensi Energi	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
Kompleksitas Komputasi	Rendah	Sedang	Tinggi



Gambar 6.4. Arsitektur Real-Time Optimization dan Adaptive Control pada Hybrid Motorcycle

Dalam hybrid off-grid, real-time optimization sangat penting karena sumber energi terbarukan bersifat fluktuatif. Misalnya, output panel surya dapat berubah cepat akibat awan, hujan, atau shading. Adaptive controller mampu menyesuaikan strategi charging dan distribusi daya berdasarkan perubahan ini secara instan. Jika energi surya turun mendadak, sistem dapat mengurangi beban charging baterai dan memprioritaskan regenerative braking atau sumber sekunder untuk menjaga stabilitas energi kendaraan.

Namun demikian, implementasi sistem ini menghadapi tantangan besar. Pertama adalah kebutuhan komputasi tinggi yang memerlukan ECU lebih kuat dan lebih mahal. Kedua, model prediksi harus sangat akurat; kesalahan model dapat menyebabkan keputusan energi tidak optimal. Ketiga, sensor real-time harus presisi tinggi dan tahan kondisi ekstrem agar data yang masuk tetap valid. Selain itu, kestabilan algoritma harus dijaga agar tidak menghasilkan keputusan fluktuatif yang mengganggu kenyamanan berkendara.

Di Indonesia, real-time adaptive control sangat relevan karena kondisi jalan sangat beragam—mulai dari perkotaan padat, jalur pegunungan curam, hingga jalan pedesaan terpencil. Sistem kontrol adaptif memungkinkan kendaraan hybrid menyesuaikan diri dengan kondisi geografis ini secara otomatis. Dalam kombinasi dengan data GPS lokal, prakiraan cuaca, dan peta topografi, kendaraan dapat menjadi jauh lebih efisien dibanding sistem kontrol statis.

Masa depan real-time adaptive control mengarah pada integrasi dengan IoT dan cloud intelligence. Kendaraan tidak lagi hanya mengandalkan data internal, tetapi juga menerima informasi eksternal seperti cuaca real-time, kemacetan lalu lintas, harga energi lokal, dan kondisi charging station terdekat. Dengan demikian, keputusan energi tidak hanya optimal secara lokal, tetapi juga secara sistemik dalam skala jaringan mobilitas.

Secara keseluruhan, real-time optimization dan adaptive control adalah puncak evolusi sistem manajemen energi hybrid motorcycle saat ini. Teknologi ini memungkinkan kendaraan berpikir cepat, belajar dari kondisi nyata, dan menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan secara instan. Dengan kemampuan tersebut, kendaraan hybrid off-grid dapat mencapai efisiensi energi maksimal, memperpanjang umur komponen, dan memberikan performa stabil di berbagai kondisi operasional.

6.5 IoT Monitoring untuk Hybrid Motorcycle

Perkembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid menuju sistem transportasi cerdas tidak hanya bergantung pada efisiensi powertrain dan strategi manajemen energi, tetapi juga pada kemampuan kendaraan untuk memantau, menganalisis, dan mengirimkan data operasional secara real-time. Dalam hal ini, **Internet of Things (IoT) Monitoring** menjadi komponen esensial yang menghubungkan kendaraan dengan ekosistem digital, memungkinkan pemantauan kondisi kendaraan dari jarak jauh, deteksi dini gangguan, optimasi performa energi, dan integrasi dengan jaringan charging infrastructure. Pada kendaraan hybrid modern, IoT bukan lagi fitur tambahan, melainkan fondasi utama untuk mewujudkan kendaraan cerdas, adaptif, dan terhubung. Dalam naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa sistem monitoring berbasis IoT merupakan penghubung utama antara kendaraan hybrid, cloud analytics, battery management system, dan smart renewable charging network dalam ekosistem mobilitas masa depan.

Secara umum, IoT monitoring pada hybrid motorcycle adalah sistem yang mengumpulkan data dari sensor kendaraan, mengirimkannya melalui jaringan komunikasi nirkabel, memprosesnya di cloud atau edge server, lalu

menampilkan hasil analisis kepada pengguna, operator, atau sistem kontrol otomatis. Data yang dipantau mencakup parameter utama seperti SOC baterai, SOH baterai, tegangan sel, suhu baterai, suhu motor, konsumsi energi, status regenerative braking, posisi GPS, kecepatan kendaraan, pola akselerasi, hingga efisiensi charging dari panel surya atau swapping station. Dengan data ini, kendaraan dapat dipantau secara menyeluruh kapan pun dan dari mana pun.

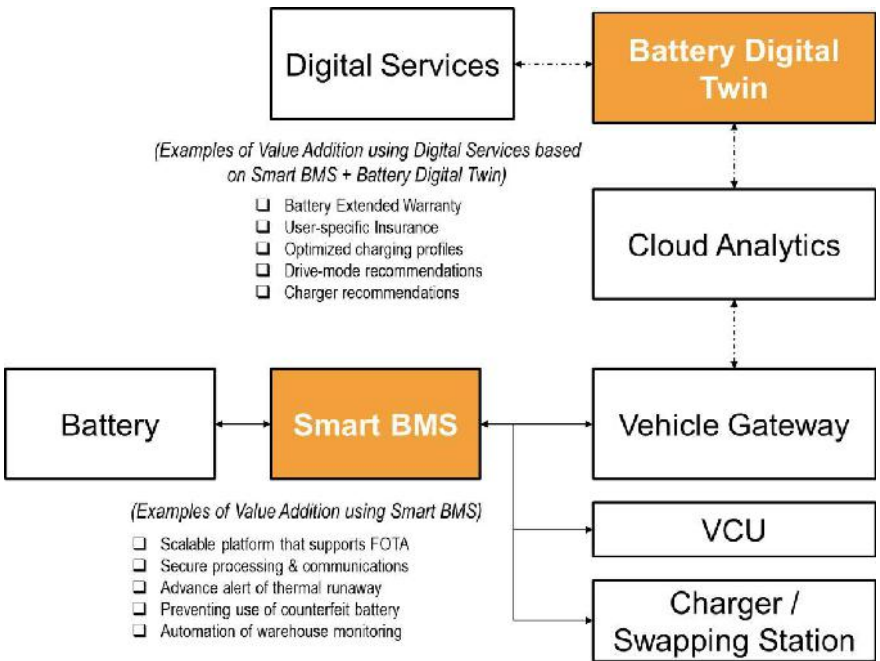
IoT monitoring memiliki tiga lapisan utama: **sensor layer**, **communication layer**, dan **analytics layer**. Sensor layer terdiri atas berbagai sensor fisik pada kendaraan yang mengukur parameter mekanik, listrik, dan termal. Communication layer bertugas mengirim data melalui Bluetooth, Wi-Fi, GSM, LTE, NB-IoT, atau LoRaWAN tergantung kebutuhan jaringan. Analytics layer adalah pusat pengolahan data, biasanya berupa cloud platform yang menjalankan dashboard visualisasi, algoritma prediksi, dan sistem notifikasi cerdas. Integrasi IoT monitoring dengan predictive maintenance system mampu menurunkan kegagalan baterai mendadak hingga 30% pada armada hybrid electric motorcycle karena deteksi dini anomali lebih akurat.

Salah satu manfaat utama IoT monitoring adalah **real-time health diagnostics**. Sistem dapat mendeteksi gejala awal kerusakan sebelum pengguna menyadarinya. Misalnya, jika suhu salah satu modul baterai naik tidak normal, IoT system dapat langsung mengirim peringatan ke dashboard pengguna dan operator servis. Demikian pula jika salah satu sel baterai mengalami penurunan tegangan abnormal, sistem dapat menandainya sebagai indikasi degradasi dini. Pendekatan ini memungkinkan maintenance dilakukan secara preventif, bukan reaktif, sehingga memperpanjang umur kendaraan dan mengurangi biaya perbaikan.

Dalam hybrid off-grid, IoT monitoring sangat penting untuk mengelola hubungan antara kendaraan dan sumber energi terbarukan. Sistem dapat memantau status charging dari solar charging station, memperkirakan waktu pengisian berdasarkan intensitas matahari, dan menginformasikan pengguna kapan baterai siap digunakan. Jika kendaraan terhubung ke battery swapping network, IoT juga dapat menampilkan lokasi swapping station terdekat, jumlah baterai tersedia, dan estimasi antrean. Hal ini meningkatkan kenyamanan pengguna sekaligus efisiensi operasional sistem energi secara keseluruhan.

Fitur penting lainnya adalah **fleet monitoring capability**, terutama untuk armada besar seperti ojek online listrik, logistik desa, atau kendaraan transportasi publik berbasis hybrid motorcycle. Operator armada dapat memantau seluruh kendaraan secara simultan: posisi GPS, konsumsi energi per kendaraan, status baterai, jadwal perawatan, hingga efisiensi rute.

Dengan analisis data armada, operator dapat mengoptimalkan distribusi kendaraan, mengurangi idle time, dan meningkatkan produktivitas.



Gambar 6.5. Arsitektur IoT Monitoring pada Hybrid Motorcycle

Tabel 6.5. Parameter Utama IoT Monitoring pada Hybrid Motorcycle

Parameter	Fungsi Monitoring
SOC & SOH Baterai	Memantau energi dan kesehatan baterai
Suhu Motor/Baterai	Deteksi overheating
Tegangan dan Arus	Stabilitas sistem kelistrikan
GPS dan Kecepatan	Pelacakan kendaraan real-time
Konsumsi Energi/km	Analisis efisiensi kendaraan
Status Charging	Monitoring proses pengisian energi
Error Diagnostic Codes	Deteksi dini gangguan sistem

Salah satu inovasi penting dalam IoT monitoring adalah integrasi **predictive analytics berbasis AI**, di mana sistem tidak hanya melaporkan kondisi saat ini, tetapi juga memprediksi kondisi masa depan. Misalnya, sistem dapat memperkirakan bahwa baterai akan turun ke SOC kritis dalam 18 km ke depan berdasarkan pola perjalanan saat ini, atau memprediksi

kebutuhan penggantian sel baterai dalam tiga minggu ke depan. Fitur ini menjadikan kendaraan hybrid semakin proaktif dan cerdas.

Namun demikian, implementasi IoT monitoring juga memiliki tantangan. Pertama adalah keamanan data dan privasi pengguna, terutama terkait pelacakan lokasi kendaraan. Kedua, ketergantungan pada konektivitas jaringan dapat menjadi kendala di daerah terpencil tanpa sinyal stabil. Ketiga, integrasi multi-platform sering kali sulit jika kendaraan, battery swapping station, dan charging infrastructure berasal dari vendor berbeda. Oleh karena itu, standardisasi protokol komunikasi menjadi isu penting dalam pengembangan IoT kendaraan listrik masa depan.

Dalam Indonesia, IoT monitoring sangat relevan karena wilayah operasional kendaraan sangat beragam dan sering tersebar jauh. Kendaraan hybrid off-grid di pulau kecil, daerah pegunungan, atau desa terpencil dapat tetap dipantau dari pusat melalui jaringan LoRa atau NB-IoT berdaya rendah. Hal ini memungkinkan operator nasional maupun daerah mengelola armada kendaraan listrik secara efisien tanpa harus selalu hadir di lapangan.

Ke depan, IoT monitoring akan berkembang menuju **digital twin hybrid motorcycle ecosystem**, yaitu representasi virtual kendaraan secara real-time yang mencerminkan kondisi aktual setiap komponen. Dengan digital twin, operator dapat melakukan simulasi performa, prediksi kerusakan, dan optimasi energi tanpa harus menyentuh kendaraan fisik. Teknologi ini diproyeksikan menjadi standar industri kendaraan hybrid generasi berikutnya.

Secara keseluruhan, IoT monitoring adalah sistem saraf digital bagi sepeda motor hybrid off-grid modern. Ia menghubungkan kendaraan dengan data, cloud, pengguna, operator, dan jaringan energi terbarukan dalam satu ekosistem cerdas yang memungkinkan kendaraan bekerja lebih aman, lebih hemat energi, dan lebih adaptif terhadap masa depan mobilitas bersih.

BAB 7

SIMULASI, PEMODELAN, DAN ANALISIS KINERJA SISTEM HYBRID

7.1 Metodologi Desain Sistem

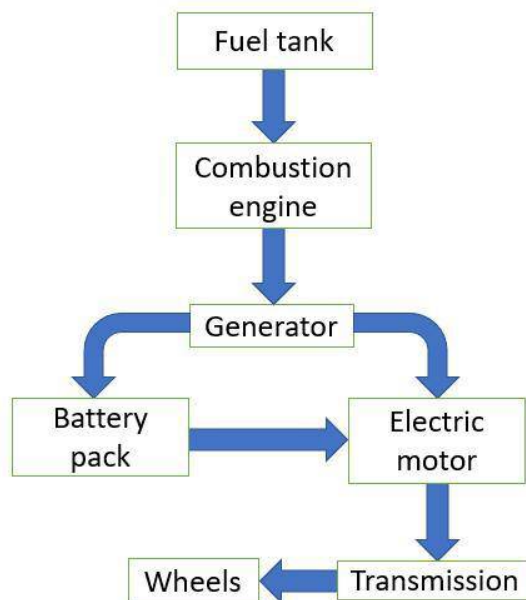
Metodologi desain sistem merupakan fondasi utama dalam pengembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid, karena seluruh keberhasilan integrasi antara motor listrik, baterai, sistem hybrid powertrain, energi terbarukan, dan kontrol cerdas sangat ditentukan oleh ketepatan pendekatan desain sejak tahap awal. Berbeda dengan kendaraan konvensional yang umumnya hanya mengoptimalkan mesin dan transmisi, kendaraan hybrid off-grid memerlukan pendekatan multidisipliner yang menggabungkan rekayasa mekanik, kelistrikan, elektronika daya, kontrol sistem, penyimpanan energi, serta integrasi energi terbarukan dalam satu kerangka desain terpadu. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa metodologi desain sistem hybrid harus dilakukan secara sistematis dan iteratif agar seluruh subsistem dapat bekerja harmonis dalam berbagai kondisi operasional nyata.

Secara umum, metodologi desain sistem hybrid off-grid terdiri atas tujuh tahapan utama: identifikasi kebutuhan pengguna, perumusan spesifikasi desain, pemilihan arsitektur hybrid, sizing komponen utama, integrasi subsistem energi, simulasi performa awal, dan validasi desain prototipe. Setiap tahap saling terkait dan membentuk siklus pengembangan yang berulang hingga desain mencapai konfigurasi optimal. Pendekatan ini dikenal sebagai **iterative engineering design loop**, yang memungkinkan perbaikan berkelanjutan sebelum sistem diwujudkan dalam bentuk prototipe fisik.

Tahap pertama adalah **identifikasi kebutuhan pengguna dan skenario operasi kendaraan**. Pada tahap ini ditentukan siapa pengguna kendaraan, bagaimana pola penggunaan hariannya, kondisi geografis operasi, serta kebutuhan performa minimum kendaraan. Misalnya, kendaraan untuk desa terpencil membutuhkan driving range panjang, kemampuan menanjak tinggi, dan kompatibilitas dengan solar charging station, sedangkan kendaraan urban lebih menekankan efisiensi stop-and-go traffic. Data kebutuhan ini menjadi dasar seluruh keputusan desain berikutnya. Desain hybrid motorcycle yang berbasis user-driven operating profile menghasilkan efisiensi energi rata-rata 17% lebih tinggi dibanding desain generik tanpa profiling penggunaan spesifik.

Tahap kedua adalah **penentuan spesifikasi teknis desain**, yang meliputi target kecepatan maksimum, akselerasi, kapasitas baterai, daya motor listrik, torsi puncak, kapasitas generator/ICE pendukung, dan kebutuhan charging. Pada tahap ini dilakukan perhitungan awal berdasarkan hukum dinamika kendaraan, analisis rolling resistance, aerodynamic drag, beban tanjakan, serta estimasi kebutuhan energi per kilometer. Hasil perhitungan ini menentukan batas minimum performa setiap komponen utama kendaraan.

Tahap ketiga adalah **pemilihan arsitektur hybrid system**, yaitu menentukan apakah kendaraan menggunakan konfigurasi series hybrid, parallel hybrid, atau power-split hybrid. Pemilihan arsitektur sangat menentukan kompleksitas kontrol, efisiensi energi, dan biaya produksi. Untuk sepeda motor hybrid off-grid, konfigurasi series hybrid sering dipilih karena sederhana dan cocok untuk integrasi dengan renewable charging system, sedangkan parallel hybrid unggul pada efisiensi mekanis untuk beban tinggi.



Gambar 7.1. Alur Metodologi Desain Sistem Hybrid Off-Grid Motorcycle

Tahap keempat adalah **sizing komponen utama**, yaitu menentukan kapasitas dan spesifikasi tiap subsistem: baterai, motor listrik, inverter, BMS, supercapacitor, PV input controller, dan rangka kendaraan. Pada tahap ini dilakukan trade-off analysis antara bobot, efisiensi, biaya, dan ruang

pemasangan. Misalnya, kapasitas baterai besar meningkatkan driving range tetapi menambah berat kendaraan. Oleh karena itu, sizing harus mencari titik optimum antara performa dan efisiensi struktural.

Tahap kelima adalah **integrasi subsistem energi**, yaitu menghubungkan seluruh komponen dalam satu arsitektur energi terpadu. Pada tahap ini dirancang jalur aliran daya dari sumber energi terbarukan ke baterai, dari baterai ke motor listrik, dari regenerative braking ke storage system, serta integrasi dengan energy management controller. Di sinilah sinkronisasi antara hardware dan software kontrol mulai dibangun.

Tahap keenam adalah **simulasi performa awal**, yang biasanya dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB/Simulink, AVL Cruise, PSIM, HOMER Pro, atau ANSYS Twin Builder. Simulasi ini bertujuan menguji performa kendaraan dalam skenario virtual sebelum prototipe dibuat. Parameter yang diuji meliputi efisiensi energi, driving range, temperatur baterai, respons akselerasi, kestabilan SOC, dan performa regenerative braking. Tahap ini sangat penting karena dapat menghemat biaya eksperimen fisik yang mahal.

Tabel 7.1. Tahapan Metodologi Desain Sistem Hybrid Off-Grid

Tahap Desain	Tujuan Utama
Identifikasi Kebutuhan	Menentukan profil penggunaan kendaraan
Spesifikasi Teknis	Menetapkan target performa
Pemilihan Arsitektur	Menentukan konfigurasi hybrid
Sizing Komponen	Menghitung kapasitas optimal subsistem
Integrasi Energi	Menyatukan seluruh aliran daya
Simulasi Awal	Menguji performa virtual
Validasi Prototipe	Verifikasi desain fisik

Tahap terakhir adalah **validasi desain prototipe**, yaitu pengujian hasil desain dalam bentuk nyata. Prototipe diuji di laboratorium maupun lapangan untuk memastikan kesesuaian antara hasil simulasi dan performa aktual. Jika ditemukan deviasi signifikan, maka proses kembali ke tahap desain sebelumnya untuk perbaikan. Inilah sebabnya metodologi desain hybrid bersifat iteratif, bukan linear satu arah.

Dalam kendaraan hybrid off-grid, metodologi desain juga harus memperhatikan faktor eksternal seperti iklim tropis, kondisi jalan lokal, ketersediaan energi surya, dan kompatibilitas dengan infrastruktur charging pedesaan. Di Indonesia, misalnya, kendaraan yang dirancang untuk wilayah pegunungan Papua tentu memerlukan strategi desain berbeda dibanding kendaraan untuk kawasan urban Jakarta. Faktor geografis lokal menjadi bagian integral dalam metodologi desain yang kontekstual.

Tantangan utama dalam metodologi desain hybrid off-grid adalah kompleksitas integrasi lintas disiplin. Insinyur mekanik, elektrik, software, energi terbarukan, dan sistem kontrol harus bekerja dalam satu platform desain terpadu. Karena itu, pendekatan modern menggunakan **digital engineering platform** dan model-based systems engineering (MBSE) agar seluruh disiplin dapat berkolaborasi dalam satu model virtual terintegrasi.

Ke depan, metodologi desain akan berkembang menuju **AI-assisted generative design**, yaitu sistem di mana kecerdasan buatan secara otomatis menghasilkan ribuan alternatif konfigurasi desain dan memilih kombinasi terbaik berdasarkan target performa. Pendekatan ini akan mempercepat proses inovasi kendaraan hybrid secara drastis, sekaligus membuka peluang desain yang sebelumnya sulit ditemukan melalui metode manual.

Secara keseluruhan, metodologi desain sistem adalah kerangka utama yang menentukan kualitas, efisiensi, dan keberhasilan pengembangan sepeda motor hybrid off-grid. Tanpa metodologi yang sistematis dan adaptif, integrasi teknologi canggih seperti energi terbarukan, baterai cerdas, dan kontrol AI tidak akan menghasilkan kendaraan yang benar-benar optimal.

7.2 Pemodelan Simulasi Energi

Pemodelan simulasi energi merupakan tahap inti dalam proses perancangan sepeda motor listrik hybrid off-grid karena pada tahap inilah seluruh konsep desain diuji secara virtual untuk menilai efisiensi, kestabilan, dan kelayakan operasional sistem sebelum diwujudkan dalam bentuk prototipe fisik. Dalam sistem hybrid yang melibatkan motor listrik, baterai, supercapacitor, regenerative braking, panel surya, serta sumber energi tambahan seperti ICE atau generator mikro, interaksi antar subsistem sangat kompleks dan bersifat dinamis. Oleh karena itu, simulasi energi menjadi alat utama untuk memahami bagaimana energi mengalir, tersimpan, dikonversi, dan digunakan dalam berbagai kondisi berkendara. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa simulasi energi memungkinkan desainer mengurangi risiko kegagalan desain, mengoptimalkan konfigurasi sistem, serta menekan biaya eksperimen fisik secara signifikan.

Secara umum, pemodelan simulasi energi bertujuan untuk merepresentasikan perilaku seluruh subsistem energi kendaraan dalam bentuk model matematis dan numerik. Model ini menggambarkan hubungan antara input energi (baterai, PV, regenerative braking), proses konversi daya (motor listrik, inverter, converter), serta output energi (torsi roda, konsumsi energi/km, losses termal). Dengan model tersebut, insinyur dapat memprediksi bagaimana kendaraan akan berperilaku pada berbagai

skenario operasi: akselerasi, cruising, tanjakan, pengereman, urban stop-and-go, hingga perjalanan jarak jauh.

Tahap pertama dalam pemodelan simulasi energi adalah **definisi boundary condition dan driving cycle scenario**. Pada tahap ini ditentukan skenario pengujian yang akan digunakan, misalnya urban cycle, highway cycle, mixed terrain cycle, atau rural mountainous route. Driving cycle sangat penting karena menjadi representasi pola penggunaan nyata kendaraan. Sebagai contoh, sepeda motor hybrid untuk wilayah pedesaan berbukit membutuhkan simulasi berbeda dibanding kendaraan urban di kota besar. Penggunaan driving cycle berbasis data nyata lokal meningkatkan akurasi prediksi konsumsi energi hingga 22% dibanding penggunaan driving cycle standar internasional generik.

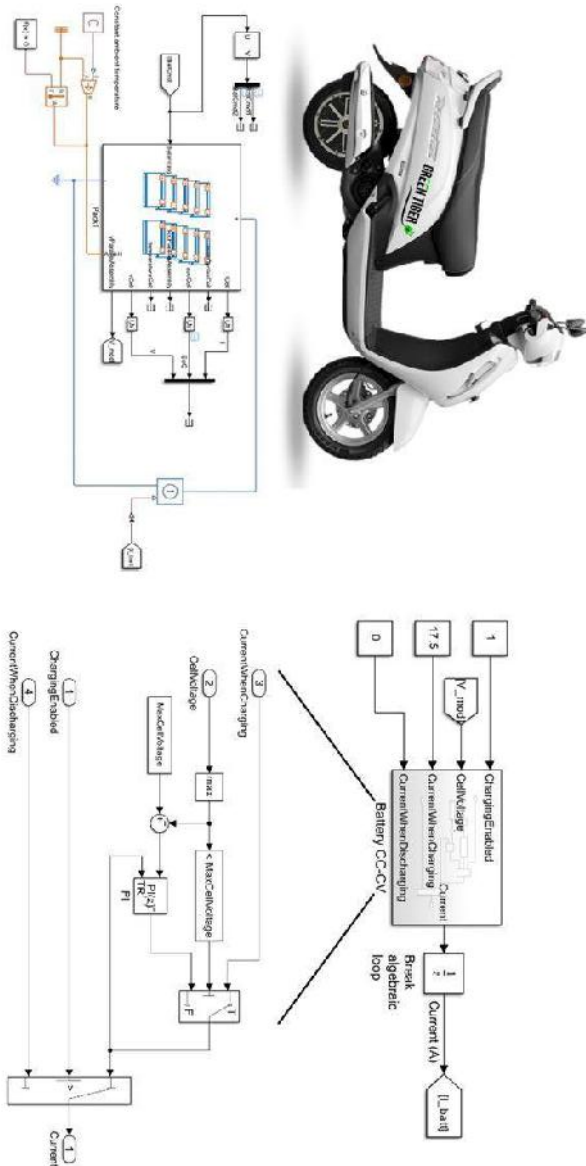
Tahap kedua adalah pembangunan model matematis tiap subsistem energi. Model baterai biasanya menggunakan equivalent circuit model (ECM) atau electrochemical dynamic model untuk merepresentasikan SOC, SOH, tegangan terminal, resistansi internal, dan losses termal. Model motor listrik mencakup efisiensi konversi, karakteristik torsi-kecepatan, serta rugi-rugi elektromagnetik. Model inverter dan converter menggambarkan efisiensi switching serta rugi-rugi konversi daya. Untuk panel surya, model PV menggunakan parameter radiasi matahari, temperatur modul, dan MPPT efficiency. Semua model ini kemudian diintegrasikan dalam satu platform simulasi terpadu.

Salah satu platform paling umum digunakan adalah MATLAB/Simulink karena fleksibel untuk pemodelan sistem dinamis multi-domain. Selain itu, software seperti AVL Cruise, GT-SUITE, HOMER Pro, PSIM, dan ANSYS Twin Builder juga banyak digunakan tergantung fokus analisis. MATLAB unggul untuk simulasi kontrol energi, HOMER Pro sangat kuat untuk optimasi microgrid renewable charging, sedangkan AVL Cruise banyak digunakan untuk simulasi performa kendaraan secara keseluruhan.

Dalam simulasi energi, salah satu parameter paling penting adalah **energy flow balance**, yaitu keseimbangan antara energi masuk, energi tersimpan, energi digunakan, dan energi hilang. Persamaan dasar konservasi energi digunakan untuk memastikan bahwa total energi dalam sistem tetap konsisten. Dari analisis ini dapat diketahui efisiensi total sistem, rugi-rugi terbesar, dan peluang optimasi desain. Misalnya, jika simulasi menunjukkan losses terbesar terjadi pada inverter, maka desain dapat diperbaiki dengan memilih inverter efisiensi lebih tinggi.

Selain energy flow balance, simulasi juga memeriksa **driving range prediction**, yaitu estimasi jarak tempuh kendaraan berdasarkan kapasitas baterai dan pola penggunaan energi. Driving range merupakan indikator utama keberhasilan desain hybrid motorcycle. Dengan simulasi, insinyur

dapat membandingkan beberapa konfigurasi baterai, motor, dan strategi kontrol untuk menentukan kombinasi paling optimal sebelum produksi fisik dilakukan.



Gambar 7.2. Arsitektur Pemodelan Simulasi Energi Hybrid Off-Grid Motorcycle

Tabel 7.2. Parameter Utama dalam Simulasi Energi Hybrid Motorcycle

Parameter	Fungsi Analisis
SOC Baterai	Menilai ketersediaan energi
Konsumsi Energi/km	Mengukur efisiensi kendaraan
Efisiensi Motor	Evaluasi konversi daya
Regenerative Recovery Rate	Menilai efektivitas regen braking
PV Charging Input	Evaluasi kontribusi energi surya
Thermal Losses	Identifikasi rugi energi panas
Driving Range	Prediksi jarak tempuh maksimum

Simulasi energi juga sangat penting untuk mengevaluasi strategi kontrol seperti Rule-Based EMS, ECMS, atau Machine Learning-Based Controller. Dengan simulasi, performa tiap strategi dapat dibandingkan dalam kondisi identik, sehingga dapat dipilih algoritma paling efisien untuk implementasi nyata. Sebagai contoh, simulasi dapat menunjukkan bahwa ECMS lebih hemat energi pada jalan datar, sementara adaptive ML controller lebih unggul pada rute berbukit dinamis.

Dalam off-grid, simulasi energi memiliki dimensi tambahan: integrasi dengan energi terbarukan. Sistem harus mensimulasikan fluktuasi energi surya, variasi output microgrid, serta ketidakpastian charging availability. Misalnya, model dapat menguji bagaimana kendaraan beroperasi jika selama dua hari berturut-turut cuaca mendung mengurangi output PV hingga 60%. Analisis semacam ini penting untuk memastikan kendaraan tetap andal dalam kondisi lapangan nyata.

Di Indonesia, pemodelan simulasi energi sangat relevan karena kondisi geografis sangat beragam. Simulasi dapat disesuaikan untuk medan pegunungan Papua, pulau kecil Maluku, jalur urban Jakarta, atau desa terpencil Nusa Tenggara. Dengan pendekatan lokal ini, desain kendaraan hybrid dapat benar-benar sesuai kebutuhan wilayah operasionalnya, bukan sekadar meniru model kendaraan luar negeri.

Tantangan utama dalam simulasi energi adalah akurasi model. Jika parameter baterai, motor, atau PV tidak sesuai kondisi nyata, hasil simulasi dapat menyesatkan. Karena itu, model harus selalu dikalibrasi menggunakan data eksperimen nyata dari laboratorium maupun uji lapangan. Pendekatan terbaik adalah menggunakan **hardware-in-the-loop simulation (HIL)**, di mana sebagian komponen nyata dihubungkan dengan model virtual untuk meningkatkan akurasi prediksi.

Ke depan, simulasi energi akan berkembang menuju **digital twin energy simulation**, yaitu model virtual real-time yang terus diperbarui berdasarkan data aktual kendaraan selama operasi. Dengan digital twin,

kendaraan hybrid dapat memprediksi performanya sendiri di masa depan, mengoptimalkan strategi energi harian, dan bahkan merencanakan kebutuhan charging sebelum perjalanan dimulai.

Secara keseluruhan, pemodelan simulasi energi adalah jantung analisis desain hybrid motorcycle modern. Melalui simulasi, insinyur dapat memahami perilaku energi sistem secara menyeluruh, mengoptimalkan desain sebelum prototipe dibuat, mengurangi biaya pengembangan, dan memastikan kendaraan hybrid off-grid mampu bekerja efisien dalam kondisi nyata yang kompleks.

7.3 Simulasi Beban Berkendara dan Driving Cycle

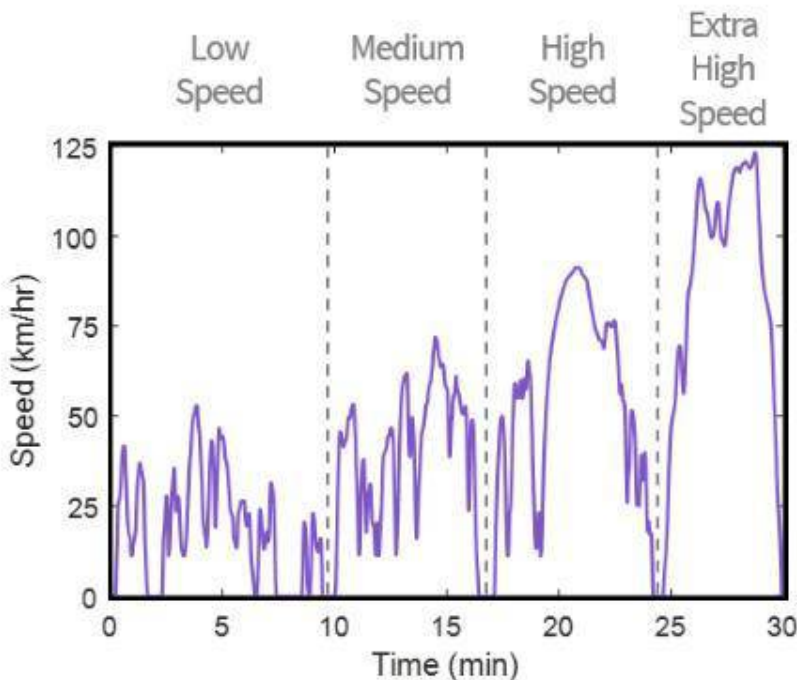
Simulasi beban berkendara dan driving cycle merupakan tahap krusial dalam evaluasi performa sepeda motor listrik hybrid off-grid karena pada tahap inilah sistem diuji terhadap kondisi operasional nyata yang merepresentasikan pola penggunaan kendaraan sehari-hari. Berbeda dengan simulasi energi statis yang hanya menganalisis aliran daya dalam kondisi ideal, simulasi driving cycle menguji bagaimana kendaraan merespons perubahan kecepatan, akselerasi, pengereman, tanjakan, penurunan jalan, beban penumpang, hingga variasi kondisi jalan secara dinamis. Dalam kendaraan hybrid, simulasi ini menjadi sangat penting karena distribusi energi antar subsistem—motor listrik, baterai, supercapacitor, regenerative braking, dan sumber energi sekunder—sangat bergantung pada pola berkendara aktual. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa driving cycle simulation adalah metode paling representatif untuk memprediksi performa nyata kendaraan hybrid sebelum pengujian lapangan dilakukan.

Driving cycle sendiri adalah representasi profil kecepatan kendaraan terhadap waktu yang menggambarkan pola perjalanan tertentu. Profil ini dapat berupa urban cycle (berhenti-jalan berulang), suburban cycle (kecepatan menengah stabil), highway cycle (kecepatan tinggi kontinu), maupun mixed terrain cycle yang menggabungkan berbagai kondisi. Untuk sepeda motor hybrid off-grid, driving cycle harus disesuaikan dengan karakter wilayah operasional kendaraan. Misalnya, kendaraan untuk desa pegunungan membutuhkan driving cycle dengan banyak tanjakan dan deselerasi, sedangkan kendaraan urban membutuhkan pola stop-and-go padat akibat kemacetan. Penggunaan driving cycle berbasis data lokal lapangan meningkatkan akurasi prediksi konsumsi energi hingga 25% dibanding driving cycle standar internasional seperti WMTC atau FTP-75.

Dalam simulasi beban berkendara, gaya-gaya resistif utama yang diperhitungkan meliputi rolling resistance, aerodynamic drag, grade resistance, dan inertial force akibat percepatan kendaraan. Persamaan

dinamika longitudinal kendaraan digunakan untuk menghitung kebutuhan traksi pada roda berdasarkan profil driving cycle tertentu. Dari kebutuhan traksi ini kemudian dihitung permintaan torsi motor, konsumsi energi baterai, penggunaan ICE pendukung, serta energi yang dapat diregenerasi saat pengereman. Dengan demikian, driving cycle menjadi dasar utama dalam menghitung efisiensi nyata kendaraan hybrid.

Tahap awal simulasi dimulai dengan pemilihan driving cycle sesuai skenario penggunaan. Beberapa standar internasional yang sering digunakan antara lain WMTC (World Motorcycle Test Cycle), ECE-40 urban cycle, dan IDC (Indian Driving Cycle). Namun untuk kendaraan hybrid off-grid Indonesia, pendekatan terbaik adalah membangun **custom local driving cycle**, misalnya berdasarkan data GPS perjalanan di jalan desa, jalur pegunungan, atau rute ojek perkotaan. Pendekatan ini memberikan hasil simulasi jauh lebih realistis karena mencerminkan pola lalu lintas lokal.



Gambar 7.3. Profil Driving Cycle dan Simulasi Beban Berkendara Hybrid Motorcycle

Dalam kendaraan hybrid, driving cycle simulation sangat penting untuk mengevaluasi strategi energy management system (EMS). Misalnya,

pada pola urban stop-and-go, regenerative braking cenderung aktif lebih sering sehingga kontribusi energy recovery meningkat. Sebaliknya, pada highway cycle, motor listrik bekerja stabil pada kecepatan tinggi dengan kebutuhan daya kontinu, sehingga efisiensi baterai menjadi faktor dominan. Simulasi memungkinkan insinyur membandingkan performa berbagai strategi EMS—rule-based, ECMS, machine learning control—pada pola berkendara yang sama.

Salah satu output utama simulasi driving cycle adalah **energy consumption per kilometer**, yang menjadi indikator efisiensi kendaraan. Parameter lain yang dievaluasi meliputi SOC depletion curve, regenerative recovery rate, peak torque demand, motor thermal load, dan driving range prediction. Jika simulasi menunjukkan baterai terlalu cepat habis pada driving cycle tertentu, maka desain dapat diperbaiki dengan meningkatkan kapasitas baterai, mengubah rasio transmisi, atau memperbaiki strategi kontrol energi.

Tabel 7.3. Parameter Utama dalam Simulasi Driving Cycle Hybrid Motorcycle

Parameter	Fungsi Evaluasi
Kecepatan vs Waktu	Profil pola berkendara
Torsi Roda	Menentukan kebutuhan daya motor
SOC Curve	Memantau penurunan energi baterai
Konsumsi Energi/km	Indikator efisiensi kendaraan
Regenerative Recovery	Evaluasi energi hasil pengereman
Peak Power Demand	Menentukan beban maksimum sistem
Driving Range	Prediksi jarak tempuh aktual

Simulasi driving cycle juga memungkinkan analisis sensitivitas terhadap variasi beban kendaraan. Misalnya, kendaraan dapat diuji dengan satu pengemudi, dua penumpang, atau tambahan muatan logistik. Perubahan massa kendaraan secara langsung memengaruhi rolling resistance, akselerasi, dan kebutuhan energi. Hal ini penting untuk kendaraan hybrid yang digunakan di sektor logistik pedesaan atau distribusi barang ringan.

Dalam off-grid, driving cycle simulation dapat dikombinasikan dengan simulasi ketersediaan energi terbarukan. Misalnya, kendaraan diuji pada rute harian tertentu sambil mempertimbangkan bahwa hanya tersedia energi surya 60% akibat cuaca mendung. Dengan pendekatan ini, insinyur dapat menilai apakah kendaraan masih mampu menyelesaikan perjalanan tanpa charging tambahan. Analisis semacam ini sangat penting untuk wilayah terpencil dengan infrastruktur energi terbatas.

Di Indonesia, penting untuk mengembangkan database driving cycle nasional yang merepresentasikan kondisi jalan lokal: jalan sempit pedesaan, jalur tanjakan ekstrem pegunungan, lalu lintas padat kota besar, hingga jalan antar pulau kecil. Data ini akan menjadi aset strategis dalam pengembangan kendaraan hybrid nasional yang benar-benar sesuai dengan kebutuhan domestik. Tanpa driving cycle lokal, desain kendaraan berisiko tidak optimal dalam kondisi nyata Indonesia.

Tantangan utama dalam simulasi driving cycle adalah akurasi data input. Jika profil jalan, beban kendaraan, atau pola kecepatan tidak realistis, maka hasil simulasi menjadi bias. Oleh karena itu, penggunaan data GPS real-world logging sangat dianjurkan. Selain itu, integrasi faktor cuaca seperti hujan, temperatur, dan kelembapan juga semakin penting karena dapat memengaruhi rolling resistance dan efisiensi baterai.

Ke depan, simulasi driving cycle akan berkembang menuju **AI-generated adaptive driving cycle**, di mana sistem secara otomatis menghasilkan skenario berkendara berdasarkan big data kendaraan nyata. Dengan pendekatan ini, model simulasi dapat diperbarui terus-menerus mengikuti perubahan pola lalu lintas dan perilaku pengguna. Ini akan membuat desain kendaraan hybrid semakin presisi dan relevan terhadap kondisi nyata.

Secara keseluruhan, simulasi beban berkendara dan driving cycle adalah alat vital dalam evaluasi performa hybrid motorcycle. Melalui simulasi ini, insinyur dapat memahami bagaimana kendaraan berperilaku dalam kondisi nyata, mengoptimalkan desain energi, memilih strategi kontrol terbaik, dan memastikan kendaraan hybrid off-grid mampu bekerja efisien, andal, dan aman di lapangan.

7.4 Optimasi Parameter Sistem

Optimasi parameter sistem merupakan tahap lanjutan yang sangat menentukan keberhasilan akhir desain sepeda motor listrik hybrid off-grid, karena pada tahap ini seluruh variabel desain yang telah dimodelkan dan disimulasikan disesuaikan untuk mencapai kombinasi performa terbaik. Jika tahap sebelumnya bertujuan memahami perilaku energi dan beban kendaraan, maka optimasi parameter berfokus pada pertanyaan inti rekayasa: konfigurasi mana yang menghasilkan efisiensi energi tertinggi, biaya terendah, umur baterai terpanjang, serta performa kendaraan paling stabil? Dalam kendaraan hybrid yang melibatkan banyak subsistem saling bergantung—motor listrik, baterai, supercapacitor, inverter, EMS, PV charging, dan sumber energi sekunder—optimasi parameter menjadi proses multidimensi yang kompleks. Naskah dasar buku ini menegaskan bahwa optimasi parameter adalah jembatan antara desain teoritis dan

desain implementatif, karena hanya melalui proses ini sistem hybrid dapat mencapai keseimbangan optimal antara efisiensi, keandalan, dan keekonomian.

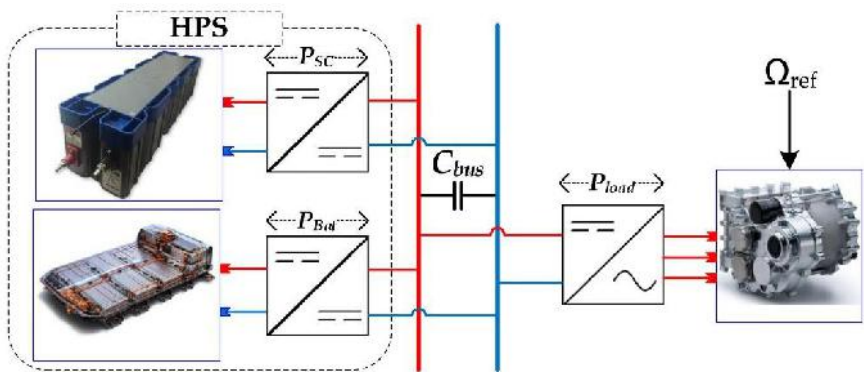
Secara umum, parameter yang dioptimasi dalam hybrid motorcycle terbagi menjadi empat kelompok utama: parameter energi, parameter performa kendaraan, parameter kontrol, dan parameter integrasi renewable system. Parameter energi meliputi kapasitas baterai, kapasitas supercapacitor, rasio charging/discharging, dan batas SOC minimum-maksimum. Parameter performa mencakup daya motor listrik, rasio transmisi, torsi maksimum, serta efisiensi drivetrain. Parameter kontrol meliputi threshold EMS, faktor ekuivalensi ECMS, adaptive gain controller, dan algoritma predictive control. Sementara itu, parameter integrasi renewable mencakup kapasitas panel surya, ukuran battery storage station, dan prioritas distribusi energi renewable-to-vehicle.

Tujuan optimasi biasanya dirumuskan dalam bentuk fungsi objektif (objective function), misalnya meminimalkan konsumsi energi per kilometer, memaksimalkan driving range, meminimalkan biaya siklus hidup, atau menyeimbangkan beberapa tujuan sekaligus dalam bentuk multi-objective optimization. Sebagai contoh, meningkatkan kapasitas baterai memang memperpanjang driving range, tetapi juga menambah berat kendaraan dan biaya produksi. Karena itu, optimasi harus mencari titik kompromi terbaik di antara berbagai trade-off tersebut. Multi-objective optimization berbasis algoritma genetika pada hybrid electric motorcycle mampu meningkatkan efisiensi sistem rata-rata 14–19% dibanding desain berbasis trial-and-error konvensional.

Metode optimasi yang paling umum digunakan dalam sistem hybrid meliputi Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Simulated Annealing, Nonlinear Programming, Dynamic Programming, dan Model Predictive Optimization. Genetic Algorithm sangat populer karena mampu menangani banyak variabel nonlinier sekaligus dan efektif mencari solusi global optimum dalam ruang solusi besar. PSO unggul pada kecepatan konvergensi, sedangkan Dynamic Programming sering digunakan untuk optimasi strategi energi berbasis driving cycle. Pemilihan metode sangat bergantung pada kompleksitas model dan tujuan optimasi.

Sebagai ilustrasi, jika target utama adalah memaksimalkan driving range kendaraan hybrid off-grid untuk daerah terpencil, maka optimasi dapat fokus pada kombinasi kapasitas baterai, efisiensi motor, dan rasio regenerative braking. Namun jika target utama adalah biaya produksi rendah untuk kendaraan massal urban, maka parameter yang diprioritaskan mungkin adalah ukuran baterai minimum, motor efisiensi tinggi biaya

rendah, dan EMS sederhana namun efektif. Dengan demikian, optimasi parameter selalu terkait erat dengan skenario aplikasi kendaraan.



Gambar 7.4. Skema Optimasi Parameter Sistem Hybrid Off-Grid Motorcycle

Salah satu contoh optimasi penting adalah **battery sizing optimization**. Jika baterai terlalu kecil, driving range terbatas; jika terlalu besar, bobot dan biaya meningkat. Simulasi optimasi dapat menentukan kapasitas ideal berdasarkan pola driving cycle tertentu. Hal serupa berlaku pada motor listrik: motor daya tinggi memberi akselerasi baik, tetapi dapat menurunkan efisiensi parsial load. Oleh karena itu, optimasi harus mempertimbangkan titik operasi motor paling sering digunakan agar efisiensinya maksimal dalam kondisi nyata.

Optimasi parameter juga sangat penting pada **thermal management system**, karena temperatur memengaruhi efisiensi motor, inverter, dan baterai. Misalnya, pengaturan suhu operasi baterai pada rentang ideal 25–35°C dapat memperpanjang umur baterai secara signifikan. Dalam simulasi optimasi, parameter seperti airflow cooling rate, coolant flow capacity, dan thermal insulation thickness dapat dimasukkan sebagai variabel desain.

Tabel 7.4. Parameter Utama yang Dioptimasi pada Hybrid Motorcycle

Kelompok Parameter	Contoh Variabel
Energi	Kapasitas baterai, SOC threshold
Powertrain	Daya motor, rasio transmisi
Kontrol	Gain adaptive EMS, faktor ECMS
Renewable System	Kapasitas PV, ukuran storage battery
Thermal System	Pendinginan baterai, airflow rate
Regenerative Braking	Recovery threshold, regen intensity

Dalam off-grid, optimasi parameter memiliki dimensi tambahan: ketidakpastian pasokan energi terbarukan. Misalnya, ukuran panel surya optimal harus mempertimbangkan variasi radiasi matahari musiman. Jika desain hanya berdasarkan kondisi cerah maksimum, sistem bisa gagal saat musim hujan. Oleh karena itu, optimasi harus menggunakan data cuaca tahunan agar desain tetap andal sepanjang tahun. Ini sangat penting untuk kendaraan yang digunakan di daerah terpencil tanpa akses grid cadangan.

Di Indonesia, optimasi parameter sangat relevan karena kondisi operasional sangat beragam. Kendaraan hybrid untuk dataran tinggi Papua memerlukan parameter berbeda dibanding kendaraan untuk jalur datar perkotaan Jakarta. Dengan memasukkan data topografi lokal, suhu lingkungan tropis, pola radiasi surya regional, dan kualitas jalan nasional ke dalam model optimasi, desain kendaraan dapat disesuaikan secara presisi terhadap kebutuhan lokal.

Tantangan utama optimasi parameter adalah tingginya dimensi ruang solusi. Semakin banyak variabel yang dioptimasi, semakin besar kompleksitas komputasi. Karena itu, penggunaan high-performance computing (HPC), cloud simulation clusters, dan surrogate modeling menjadi semakin penting. Selain itu, model optimasi harus divalidasi dengan eksperimen nyata agar solusi optimal secara simulasi benar-benar berlaku di lapangan.

Ke depan, optimasi parameter akan berkembang menuju **AI-driven autonomous optimization**, di mana sistem kecerdasan buatan secara otomatis mengevaluasi ribuan kombinasi desain dan memperbarui parameter berdasarkan data real-time kendaraan di lapangan. Dengan pendekatan ini, kendaraan hybrid generasi mendatang bahkan dapat mengoptimalkan dirinya sendiri setelah digunakan oleh pengguna, menciptakan konsep self-optimizing vehicle system.

Secara keseluruhan, optimasi parameter sistem adalah proses kunci untuk mentransformasikan desain hybrid motorcycle dari sekadar berfungsi menjadi benar-benar unggul. Melalui optimasi yang tepat, kendaraan hybrid off-grid dapat mencapai efisiensi energi maksimal, umur komponen lebih panjang, biaya operasional rendah, dan performa yang sesuai dengan kebutuhan pengguna nyata.

7.5 Validasi Model dan Pengujian Laboratorium

Validasi model dan pengujian laboratorium merupakan tahap penentu dalam proses pengembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid, karena pada tahap inilah seluruh hasil simulasi, optimasi parameter, dan rancangan sistem diuji terhadap kondisi nyata untuk memastikan bahwa model matematis benar-benar merepresentasikan perilaku fisik kendaraan. Dalam

rekayasa sistem hybrid, model simulasi hanya bernilai jika hasil prediksinya konsisten dengan data eksperimen. Oleh sebab itu, validasi model menjadi jembatan kritis antara dunia virtual dan implementasi nyata, sedangkan pengujian laboratorium menjadi sarana untuk mengukur performa aktual subsistem dan sistem terintegrasi secara objektif. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa validasi eksperimental adalah langkah mutlak untuk menjamin akurasi desain, keselamatan operasi, dan kesiapan prototipe menuju uji lapangan penuh.

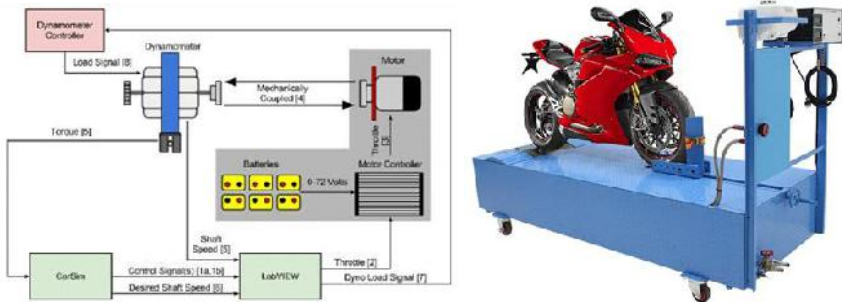
Secara umum, validasi model bertujuan membandingkan hasil simulasi dengan hasil pengukuran nyata pada parameter yang sama. Parameter tersebut meliputi konsumsi energi, SOC baterai, efisiensi motor listrik, suhu baterai, torsi motor, efisiensi regenerative braking, serta driving range. Jika hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan deviasi kecil dalam batas toleransi yang diterima, maka model dianggap valid. Sebaliknya, jika deviasi terlalu besar, model harus dikalibrasi ulang dengan memperbaiki asumsi matematis atau parameter input. Kalibrasi model berbasis data laboratorium mampu meningkatkan akurasi prediksi performa hybrid motorcycle hingga lebih dari 90% dibanding model tanpa validasi eksperimental.

Tahap pertama dalam validasi adalah **uji subsistem individual**, yaitu pengujian tiap komponen utama secara terpisah sebelum diuji sebagai sistem terintegrasi. Misalnya, baterai diuji pada battery cycler untuk mengetahui kurva charge-discharge, resistansi internal, efisiensi coulombic, dan perilaku termalnya. Motor listrik diuji pada dynamometer bench untuk mengukur torsi, efisiensi, dan karakteristik kecepatan. Inverter diuji untuk mengetahui switching losses, kestabilan tegangan, dan efisiensi konversi daya. Panel surya diuji menggunakan solar simulator atau outdoor test rig untuk memverifikasi output aktual terhadap model PV.

Tahap kedua adalah **uji integrasi subsistem**, di mana baterai, motor, inverter, EMS, dan regenerative braking dihubungkan dalam satu platform laboratorium. Pada tahap ini, sistem diuji menggunakan skenario operasi yang meniru driving cycle simulasi. Misalnya, kendaraan dijalankan pada roller dynamometer dengan profil kecepatan urban stop-and-go, sehingga konsumsi energi aktual dapat dibandingkan langsung dengan hasil simulasi driving cycle digital. Ini memungkinkan validasi sistem secara holistik.

Salah satu metode paling penting dalam pengujian laboratorium adalah **Hardware-in-the-Loop (HIL) Testing**, yaitu metode di mana sebagian komponen nyata dihubungkan dengan model simulasi real-time. Misalnya, battery pack nyata dihubungkan ke simulator motor virtual, atau controller EMS nyata diuji terhadap model kendaraan digital. Metode ini sangat efektif karena memungkinkan pengujian skenario ekstrem tanpa

risiko merusak seluruh prototipe fisik. HIL kini menjadi standar emas dalam validasi sistem hybrid modern.



Gambar 7.5. Skema Validasi Model dan Pengujian Laboratorium Hybrid Motorcycle

Dalam pengujian laboratorium, instrumen ukur memiliki peran sangat penting. Beberapa alat utama yang digunakan meliputi battery analyzer, thermal camera, torque sensor, data acquisition system (DAQ), oscilloscope daya, inverter analyzer, dan environmental chamber untuk simulasi suhu ekstrem. Penggunaan instrumen presisi tinggi diperlukan agar data hasil uji dapat dipercaya sebagai dasar validasi model matematis.

Selain performa energi, pengujian laboratorium juga mengevaluasi **safety validation**, terutama pada baterai dan sistem thermal management. Misalnya, baterai diuji terhadap overcharge, short circuit, dan thermal runaway simulation untuk memastikan sistem proteksi bekerja dengan benar. Sistem pendinginan diuji dalam berbagai temperatur lingkungan untuk memastikan suhu operasi tetap aman. Hal ini sangat penting karena kendaraan hybrid off-grid sering digunakan di wilayah tropis dengan suhu lingkungan tinggi.

Tabel 7.5. Parameter Utama dalam Validasi Model dan Pengujian Laboratorium

Parameter Uji	Tujuan Validasi
SOC Accuracy	Memverifikasi estimasi energi baterai
Konsumsi Energi/km	Membandingkan hasil simulasi dan nyata
Efisiensi Motor	Validasi model performa motor
Suhu Baterai	Evaluasi thermal model
Regenerative Recovery	Verifikasi energi hasil pengereman
Output PV Charging	Validasi model integrasi surya
Driving Range Aktual	Verifikasi prediksi simulasi

Setelah data laboratorium diperoleh, dilakukan proses **model calibration and error correction**. Pada tahap ini, deviasi antara simulasi dan eksperimen dianalisis menggunakan error metrics seperti RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error), atau percentage deviation. Jika misalnya simulasi memprediksi konsumsi energi 42 Wh/km tetapi hasil laboratorium menunjukkan 45 Wh/km, maka model dikalibrasi ulang hingga deviasi berada dalam batas toleransi, biasanya di bawah 5–10%.

Di Indonesia, pengujian laboratorium harus mempertimbangkan kondisi lokal seperti temperatur tinggi, kelembapan ekstrem, dan kualitas jalan yang kasar. Oleh karena itu, environmental chamber sebaiknya mampu mensimulasikan kondisi tropis nyata. Pengujian tambahan seperti vibration endurance test juga penting karena banyak jalan rural Indonesia memiliki permukaan tidak rata yang dapat memengaruhi koneksi listrik dan umur baterai.

Tantangan utama validasi model adalah biaya tinggi dan kebutuhan fasilitas laboratorium canggih. Dynamometer kendaraan, HIL simulator, dan battery test bench memerlukan investasi besar. Selain itu, sinkronisasi data antara sensor fisik dan model digital membutuhkan kalibrasi presisi tinggi. Karena itu, banyak institusi kini mengembangkan laboratorium modular berbasis shared research platform agar biaya pengujian lebih efisien.

Ke depan, validasi model akan berkembang menuju **digital twin validation loop**, di mana data kendaraan nyata terus mengalir ke model virtual secara real-time untuk memperbarui akurasi simulasi secara otomatis. Dengan pendekatan ini, model kendaraan tidak lagi statis setelah validasi awal, tetapi terus belajar dari data lapangan sepanjang umur kendaraan. Ini akan menciptakan sistem hybrid yang semakin akurat, adaptif, dan andal.

Secara keseluruhan, validasi model dan pengujian laboratorium adalah tahap pembuktian ilmiah bahwa desain hybrid motorcycle benar-benar layak diterapkan. Tanpa validasi yang kuat, simulasi hanyalah asumsi teoretis. Dengan validasi yang baik, kendaraan hybrid off-grid dapat memasuki tahap implementasi nyata dengan keyakinan tinggi terhadap performa, efisiensi, dan keselamatannya.

BAB 8

ANALISIS PERFORMA DAN EVALUASI SISTEM PROTOTIPE

8.1 Efisiensi Energi Sistem Hybrid

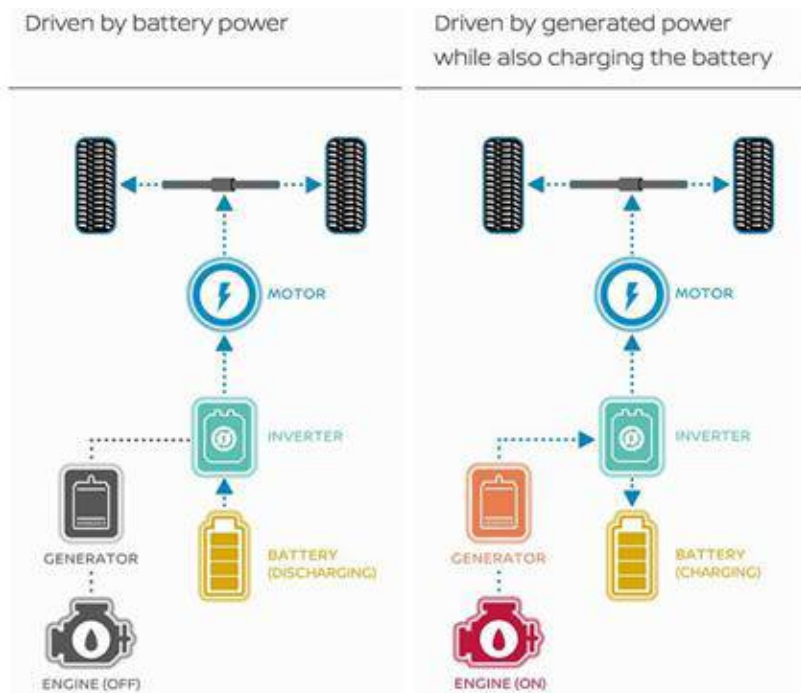
Efisiensi energi merupakan indikator utama keberhasilan desain sepeda motor listrik hybrid off-grid, karena seluruh tujuan pengembangan kendaraan ini—pengurangan konsumsi energi, peningkatan driving range, minimisasi emisi, dan optimalisasi pemanfaatan energi terbarukan—bermuara pada seberapa efisien sistem mengubah energi primer menjadi energi gerak. Dalam kendaraan hybrid, efisiensi tidak hanya bergantung pada satu komponen seperti motor listrik atau baterai, tetapi merupakan hasil interaksi kompleks seluruh subsistem: baterai, inverter, motor listrik, drivetrain, regenerative braking, energy management system (EMS), serta integrasi sumber energi terbarukan. Oleh sebab itu, analisis efisiensi energi sistem hybrid harus dilakukan secara terpadu, menyeluruh, dan berbasis data operasional nyata. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa evaluasi efisiensi energi terpadu adalah parameter kunci untuk menentukan apakah kendaraan hybrid off-grid benar-benar lebih unggul dibanding kendaraan listrik konvensional maupun kendaraan berbahan bakar fosil.

Secara konseptual, efisiensi energi sistem hybrid didefinisikan sebagai rasio antara energi berguna yang sampai ke roda kendaraan terhadap total energi yang masuk ke sistem. Energi masuk dapat berasal dari baterai, panel surya, regenerative braking recovery, atau sumber energi tambahan seperti ICE/generator. Energi berguna adalah energi mekanik efektif yang menghasilkan gerak kendaraan. Selisih antara energi masuk dan energi berguna merupakan losses, yang berasal dari rugi-rugi konversi inverter, resistansi baterai, losses motor listrik, panas drivetrain, serta kehilangan pada proses charging-discharge. Analisis efisiensi bertujuan mengidentifikasi titik losses terbesar agar dapat dilakukan optimasi lebih lanjut.

Pada hybrid motorcycle, efisiensi energi biasanya dianalisis dalam beberapa lapisan: efisiensi baterai, efisiensi power electronics, efisiensi motor listrik, efisiensi drivetrain, dan efisiensi sistem total. Efisiensi baterai mengukur seberapa besar energi yang benar-benar dapat digunakan dibanding energi tersimpan. Efisiensi inverter menunjukkan seberapa besar rugi switching saat konversi DC-AC. Efisiensi motor menggambarkan konversi listrik menjadi torsi mekanik. Sementara efisiensi sistem total

adalah indikator paling penting karena mencerminkan performa kendaraan secara keseluruhan dalam kondisi nyata. Hybrid motorcycle dengan integrasi EMS adaptif dan regenerative braking optimal mampu mencapai efisiensi sistem total hingga 84–89%, jauh lebih tinggi dibanding kendaraan ICE konvensional yang rata-rata hanya 25–35%.

Salah satu faktor terbesar yang memengaruhi efisiensi adalah pola penggunaan energi pada driving cycle. Pada kondisi urban stop-and-go, efisiensi dapat meningkat karena regenerative braking aktif lebih sering, memungkinkan pemulihan energi signifikan. Sebaliknya, pada highway cycle kecepatan tinggi, losses aerodinamika meningkat dan regenerative opportunity berkurang, sehingga efisiensi total cenderung turun. Oleh karena itu, evaluasi efisiensi harus selalu dikaitkan dengan skenario penggunaan kendaraan, bukan hanya nilai rata-rata statis.



Gambar 8.1. Diagram Aliran Energi dan Efisiensi Sistem Hybrid Motorcycle

Dalam analisis praktis, efisiensi energi kendaraan hybrid biasanya dinyatakan dalam satuan Wh/km (watt-hour per kilometer), yaitu jumlah energi yang dibutuhkan untuk menempuh satu kilometer perjalanan. Semakin kecil nilainya, semakin efisien kendaraan tersebut. Misalnya, hybrid motorcycle yang mengonsumsi 32 Wh/km lebih efisien dibanding

kendaraan sejenis dengan konsumsi 45 Wh/km. Parameter ini sangat berguna karena mudah dibandingkan lintas kendaraan dan relevan langsung terhadap biaya operasional pengguna.

Selain konsumsi energi per kilometer, indikator lain yang penting adalah **regenerative recovery efficiency**, yaitu persentase energi pengereman yang berhasil dikembalikan ke baterai. Pada sistem hybrid modern, angka recovery dapat mencapai 15–30% dari total energi kinetik deselerasi tergantung strategi kontrol dan kondisi jalan. Jika sistem regenerative braking tidak optimal, banyak energi terbuang sebagai panas pada rem mekanis. Karena itu, kontribusi regenerative recovery sangat menentukan efisiensi total kendaraan.

Tabel 8.1. Komponen Efisiensi Energi pada Sistem Hybrid Motorcycle

Komponen Sistem	Rentang Efisiensi Tipikal
Baterai Li-ion / LiFePO4	90–96%
Inverter / Converter	92–98%
Motor Listrik BLDC/PMSM	88–95%
Drivetrain Mekanis	90–97%
Regenerative Braking Recovery	15–30% energi balik
Efisiensi Sistem Total	84–89%

Dalam sistem off-grid, efisiensi energi tidak hanya ditentukan oleh kendaraan itu sendiri, tetapi juga oleh kualitas integrasi dengan sumber energi terbarukan. Misalnya, jika charging dari panel surya memiliki losses tinggi akibat MPPT yang tidak optimal, maka efisiensi total sistem kendaraan akan menurun. Oleh karena itu, analisis efisiensi hybrid motorcycle harus mencakup rantai energi penuh: dari matahari ke baterai, dari baterai ke roda, dan kembali ke baterai melalui regenerative braking. Pendekatan ini disebut **well-to-wheel renewable efficiency analysis**.

Di Indonesia, efisiensi energi sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan tropis seperti temperatur tinggi, kelembapan, dan kondisi jalan tidak rata. Suhu tinggi dapat meningkatkan resistansi internal baterai, menurunkan efisiensi charging, dan memperbesar thermal losses. Jalan rusak meningkatkan rolling resistance, yang langsung menaikkan konsumsi energi per kilometer. Karena itu, data efisiensi kendaraan hybrid di Indonesia harus dikumpulkan dalam kondisi lokal nyata, bukan sekadar mengacu pada standar laboratorium luar negeri.

Tantangan utama dalam meningkatkan efisiensi energi adalah trade-off dengan performa. Misalnya, motor daya tinggi memberi akselerasi lebih baik tetapi sering kurang efisien pada beban parsial. Demikian pula baterai besar memperpanjang driving range tetapi menambah berat kendaraan.

Karena itu, peningkatan efisiensi harus selalu diseimbangkan dengan kebutuhan performa, biaya, dan kenyamanan pengguna.

Perkembangan masa depan efisiensi energi mengarah pada **self-optimizing energy systems**, di mana kendaraan menggunakan AI untuk mempelajari pola berkendara pengguna dan menyesuaikan strategi distribusi energi secara otomatis. Sistem ini akan memilih mode energi paling efisien untuk setiap rute, kondisi cuaca, dan gaya berkendara. Dengan pendekatan ini, efisiensi kendaraan tidak lagi statis, tetapi terus meningkat seiring penggunaan.

Secara keseluruhan, efisiensi energi sistem hybrid adalah tolok ukur utama kualitas desain kendaraan hybrid off-grid. Ia mencerminkan keberhasilan integrasi teknologi baterai, motor listrik, kontrol cerdas, regenerative braking, dan energi terbarukan dalam satu sistem yang harmonis. Semakin tinggi efisiensi energi, semakin besar kontribusi kendaraan terhadap mobilitas bersih, penghematan biaya, dan keberlanjutan energi masa depan.

8.2 Analisis Konsumsi Energi per km

Analisis konsumsi energi per kilometer merupakan salah satu parameter paling fundamental dalam evaluasi performa sepeda motor listrik hybrid off-grid, karena indikator ini secara langsung mencerminkan tingkat efisiensi kendaraan dalam penggunaan energi selama operasi nyata. Berbeda dengan parameter efisiensi total sistem yang bersifat agregatif, konsumsi energi per km memberikan ukuran praktis dan mudah dipahami mengenai seberapa hemat energi kendaraan saat digunakan di lapangan. Nilai ini menjadi sangat penting bagi pengguna, operator armada, perancang sistem, maupun pembuat kebijakan, karena berkaitan langsung dengan biaya operasional, driving range, kapasitas baterai yang dibutuhkan, serta keekonomian kendaraan secara keseluruhan. Dalam naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa konsumsi energi per km adalah indikator performa operasional paling representatif untuk membandingkan berbagai desain hybrid motorcycle pada kondisi nyata penggunaan.

Secara definisi, konsumsi energi per km dinyatakan sebagai jumlah energi listrik yang digunakan kendaraan untuk menempuh satu kilometer perjalanan, biasanya dalam satuan watt-hour per kilometer (Wh/km). Perhitungan dasarnya diperoleh dengan membagi total energi yang dikonsumsi selama perjalanan dengan total jarak tempuh. Misalnya, jika kendaraan menghabiskan 1.800 Wh untuk perjalanan sejauh 50 km, maka konsumsi energinya adalah 36 Wh/km. Nilai yang lebih kecil menunjukkan kendaraan lebih efisien, karena membutuhkan energi lebih sedikit untuk menempuh jarak yang sama.

Dalam kendaraan hybrid off-grid, konsumsi energi per km tidak hanya bergantung pada kapasitas baterai atau efisiensi motor listrik, tetapi dipengaruhi oleh banyak faktor: berat kendaraan, aerodinamika, rolling resistance, topografi jalan, pola akselerasi, efisiensi drivetrain, performa EMS, suhu lingkungan, dan kontribusi regenerative braking. Pada kendaraan yang terintegrasi dengan energi terbarukan, tambahan variabel seperti kontribusi solar charging dan energi hasil regenerative recovery juga memengaruhi nilai akhir konsumsi energi. Hybrid motorcycle dengan adaptive EMS dan regenerative braking optimal mampu menurunkan konsumsi energi rata-rata hingga 18% dibanding kendaraan listrik murni tanpa strategi kontrol adaptif, terutama pada kondisi urban stop-and-go traffic .

Salah satu faktor dominan dalam konsumsi energi per km adalah driving cycle. Pada kondisi urban dengan banyak stop-and-go, konsumsi energi cenderung lebih tinggi karena akselerasi berulang membutuhkan arus besar dari baterai. Namun, sebagian energi dapat dipulihkan melalui regenerative braking. Sebaliknya, pada perjalanan kecepatan konstan di jalan datar, konsumsi energi cenderung lebih rendah karena motor bekerja dalam zona efisiensi optimal. Pada jalur menanjak, konsumsi energi meningkat tajam karena beban traksi bertambah signifikan. Oleh karena itu, analisis konsumsi energi harus selalu mempertimbangkan medan dan pola berkendara.



Gambar 8.2. Grafik Konsumsi Energi per km pada Berbagai Kondisi Berkendara

Dalam pengujian nyata, konsumsi energi per km biasanya diukur melalui data logger kendaraan yang merekam tegangan baterai, arus, jarak tempuh, kecepatan, dan durasi perjalanan secara real-time. Sistem IoT

monitoring modern memungkinkan data ini dikumpulkan otomatis dan dianalisis dalam cloud platform untuk mendapatkan profil konsumsi energi detail berdasarkan rute, waktu, dan gaya berkendara. Dengan pendekatan ini, pengguna maupun operator armada dapat mengetahui kapan dan di mana kendaraan paling boros energi.

Untuk kendaraan hybrid off-grid, konsumsi energi per km juga harus dianalisis dalam dua perspektif: **gross consumption** dan **net consumption**. Gross consumption adalah total energi yang digunakan kendaraan dari baterai, sedangkan net consumption adalah konsumsi bersih setelah dikurangi energi yang dipulihkan dari regenerative braking dan energi yang masuk dari PV charging selama operasi. Pendekatan net consumption lebih relevan untuk kendaraan hybrid renewable-integrated karena mencerminkan efisiensi riil sistem secara keseluruhan.

Tabel 8.2. Kisaran Konsumsi Energi per km Hybrid Motorcycle Berdasarkan Kondisi Operasi

Kondisi Berkendara	Konsumsi Energi Tipikal
Urban Stop-and-Go	35–50 Wh/km
Jalan Datar Stabil	25–35 Wh/km
Jalan Menanjak	45–70 Wh/km
Jalan Turunan dengan Regen	10–20 Wh/km
Mixed Rural Terrain	30–45 Wh/km

Salah satu manfaat utama analisis konsumsi energi per km adalah kemampuannya membantu optimasi desain kendaraan. Jika konsumsi energi terlalu tinggi, insinyur dapat menelusuri penyebabnya: apakah karena bobot kendaraan terlalu besar, rasio transmisi tidak sesuai, efisiensi motor rendah, atau EMS kurang optimal. Dengan demikian, parameter ini menjadi alat diagnosis penting dalam proses iterasi desain dan pengembangan prototipe.

Di Indonesia, analisis konsumsi energi per km sangat penting karena karakteristik jalan sangat beragam. Kendaraan yang beroperasi di kota besar seperti Jakarta menghadapi pola lalu lintas macet dengan akselerasi berulang, sedangkan kendaraan di pegunungan Papua menghadapi tanjakan curam yang membutuhkan energi besar. Sementara di pulau kecil terpencil, kendaraan mungkin harus menempuh jarak jauh dengan akses charging terbatas. Oleh karena itu, data konsumsi energi nasional harus dibangun berdasarkan regional driving profile Indonesia agar hasil evaluasi lebih realistis.

Faktor lingkungan tropis juga memengaruhi konsumsi energi. Temperatur tinggi meningkatkan resistansi internal baterai, menurunkan

efisiensi charge-discharge, dan memperbesar kebutuhan pendinginan. Selain itu, kelembapan tinggi dapat memengaruhi efisiensi sistem kelistrikan jika proteksi komponen tidak optimal. Dalam pengujian lapangan Indonesia, deviasi konsumsi energi akibat faktor iklim dapat mencapai 5–12% dibanding kondisi laboratorium standar.

Tantangan utama dalam analisis konsumsi energi adalah variasi perilaku pengendara. Dua pengguna dengan kendaraan identik dapat menghasilkan konsumsi energi berbeda signifikan hanya karena perbedaan gaya akselerasi dan pengereman. Karena itu, analisis modern sering menggabungkan machine learning untuk mengelompokkan driving behavior dan mengoreksi data konsumsi berdasarkan pola penggunaan. Ini memungkinkan evaluasi yang lebih adil dan presisi.

Ke depan, analisis konsumsi energi per km akan berkembang menuju **predictive consumption analytics**, yaitu sistem yang dapat memprediksi konsumsi energi perjalanan berikutnya berdasarkan rute, cuaca, topografi, dan gaya berkendara historis. Dengan teknologi ini, kendaraan hybrid dapat memberi tahu pengguna sebelum berangkat apakah energi yang tersedia cukup untuk menyelesaikan perjalanan tertentu.

Secara keseluruhan, konsumsi energi per km adalah indikator praktis paling penting dalam menilai efisiensi operasional hybrid motorcycle. Parameter ini menjembatani teori desain dengan kenyataan lapangan, memberikan gambaran langsung tentang performa kendaraan, biaya penggunaan, dan efektivitas sistem hybrid secara nyata. Semakin rendah konsumsi energi per km, semakin besar nilai ekonomis dan ekologis kendaraan dalam mendukung transisi energi bersih.

8.3 Analisis Emisi CO₂ Reduction

Salah satu alasan utama pengembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid adalah kontribusinya dalam menurunkan emisi karbon sektor transportasi, yang selama ini menjadi salah satu penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca global. Di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, kendaraan roda dua mendominasi jumlah armada transportasi harian, sehingga transformasi teknologi pada segmen ini memiliki dampak lingkungan yang sangat signifikan. Analisis reduksi emisi CO₂ menjadi indikator strategis untuk menilai sejauh mana sistem hybrid off-grid mampu menggantikan kendaraan berbahan bakar fosil dan mendukung target dekarbonisasi transportasi nasional maupun global. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa keberhasilan kendaraan hybrid motorcycle tidak hanya diukur dari efisiensi energi, tetapi juga dari besarnya penurunan emisi karbon sepanjang siklus operasinya .

Secara prinsip, reduksi emisi CO₂ pada hybrid motorcycle diperoleh dari tiga sumber utama: pengurangan konsumsi bahan bakar fosil, peningkatan efisiensi konversi energi, dan pemanfaatan energi terbarukan sebagai sumber pengisian daya. Berbeda dengan kendaraan ICE konvensional yang seluruh energinya berasal dari pembakaran bahan bakar dan menghasilkan emisi langsung (tailpipe emission), sepeda motor hybrid off-grid memanfaatkan kombinasi baterai, motor listrik, regenerative braking, dan renewable charging system sehingga kebutuhan bahan bakar dapat ditekan secara drastis, bahkan hingga nol pada mode full electric operation.

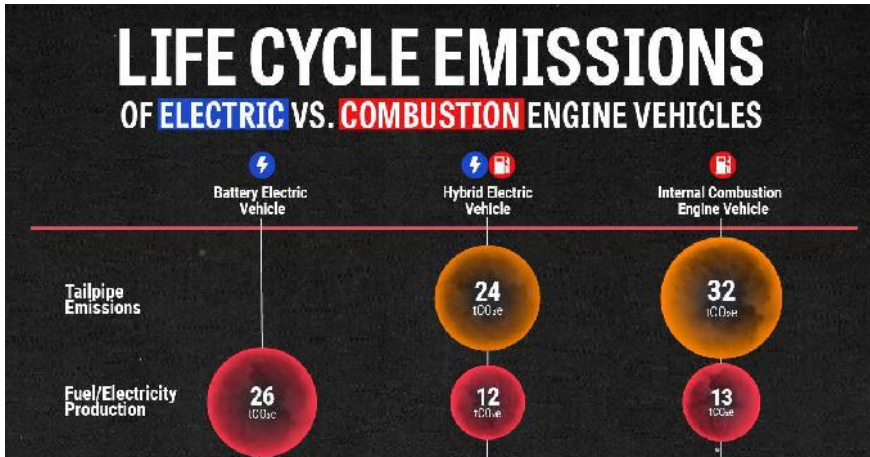
Analisis reduksi CO₂ biasanya dilakukan dengan pendekatan **tank-to-wheel (TTW)**, **well-to-wheel (WTW)**, dan **life cycle assessment (LCA)**. TTW menghitung emisi langsung saat kendaraan beroperasi. WTW memperhitungkan emisi dari produksi energi hingga digunakan kendaraan. LCA lebih komprehensif karena mencakup seluruh siklus hidup: produksi baterai, manufaktur kendaraan, operasi, perawatan, hingga daur ulang akhir masa pakai. Untuk kendaraan hybrid off-grid berbasis energi terbarukan, pendekatan WTW dan LCA sangat penting karena meskipun emisi operasional rendah, emisi produksi baterai tetap harus diperhitungkan. Hybrid motorcycle berbasis renewable charging mampu menurunkan emisi CO₂ operasional hingga 65–85% dibanding sepeda motor bensin konvensional, tergantung proporsi energi terbarukan yang digunakan dalam sistem charging.

Sebagai ilustrasi, sepeda motor bensin konvensional rata-rata menghasilkan sekitar 70–90 gram CO₂ per kilometer tergantung efisiensi mesin dan jenis bahan bakar. Sebaliknya, hybrid motorcycle dengan sistem baterai dan solar charging dapat menurunkan emisi hingga kisaran 10–30 gram CO₂ per kilometer pada skenario renewable-dominant charging. Jika kendaraan beroperasi penuh menggunakan solar charging off-grid, emisi operasional langsung mendekati nol, kecuali emisi tidak langsung dari produksi sistem energi dan komponen kendaraan.

Faktor penting lain dalam reduksi emisi adalah kontribusi regenerative braking. Dengan memulihkan sebagian energi kinetik saat deselerasi, sistem hybrid mengurangi kebutuhan energi baru dari baterai maupun bahan bakar. Meskipun tidak secara langsung menghilangkan emisi, regenerative braking meningkatkan efisiensi energi total, yang pada akhirnya menurunkan total CO₂ per km. Dalam sistem urban stop-and-go, kontribusi ini sangat signifikan karena frekuensi pengereman tinggi.

Dalam operasional tahunan, reduksi emisi menjadi semakin nyata. Misalnya, jika satu sepeda motor konvensional menempuh 12.000 km per tahun dengan emisi rata-rata 80 g CO₂/km, maka total emisinya mencapai

960 kg CO₂ per tahun. Jika digantikan hybrid motorcycle dengan emisi rata-rata 20 g CO₂/km, total emisi tahunan turun menjadi hanya 240 kg CO₂—pengurangan sebesar 720 kg CO₂ per kendaraan per tahun. Dalam skala armada 100.000 kendaraan, reduksi ini setara 72.000 ton CO₂ per tahun.



Gambar 8.3. Perbandingan Emisi CO₂ antara Sepeda Motor Konvensional dan Hybrid Off-Grid

Tabel 8.3. Estimasi Emisi CO₂ Berdasarkan Jenis Kendaraan Roda Dua

Jenis Kendaraan	Emisi CO ₂ (g/km)	Emisi Tahunan (12.000 km)
Sepeda Motor Bensin	80–90 g/km	960–1080 kg
Hybrid Grid-Based	30–45 g/km	360–540 kg
Hybrid Off-Grid Renewable	10–30 g/km	120–360 kg
Full Solar Off-Grid Electric	~0–10 g/km	0–120 kg

Di Indonesia, potensi reduksi emisi dari kendaraan hybrid off-grid sangat besar karena populasi sepeda motor melebihi 120 juta unit. Jika hanya 10% dari populasi tersebut digantikan oleh hybrid renewable motorcycle, potensi penurunan emisi tahunan dapat mencapai jutaan ton CO₂. Dampak ini akan sangat terasa terutama di kota-kota besar dengan kepadatan lalu lintas tinggi seperti Jakarta, Surabaya, Bandung, dan Medan, yang selama ini menjadi hotspot polusi transportasi.

Namun demikian, analisis CO₂ reduction juga harus mempertimbangkan sumber listrik charging. Jika kendaraan diisi dari grid listrik berbasis batu bara, reduksi emisi bisa jauh lebih kecil dibanding

charging berbasis solar PV atau microgrid renewable. Karena itu, integrasi energi terbarukan adalah faktor kunci yang menentukan seberapa “bersih” kendaraan hybrid sebenarnya. Hybrid off-grid memiliki keunggulan besar karena tidak bergantung pada grid fossil-intensive.

Selain emisi CO₂, transisi ke hybrid off-grid juga menurunkan emisi polutan lokal seperti NO_x, SO_x, HC, dan partikulat halus (PM_{2.5}), yang berdampak langsung pada kesehatan masyarakat. Dengan demikian, manfaat lingkungan kendaraan hybrid tidak hanya global dalam perubahan iklim, tetapi juga lokal dalam peningkatan kualitas udara perkotaan dan pedesaan.

Tantangan utama dalam menghitung reduksi CO₂ adalah akurasi data siklus hidup baterai. Produksi baterai lithium-ion masih memiliki jejak karbon tinggi, sehingga jika daur ulang baterai tidak optimal, keuntungan emisi total bisa berkurang. Oleh karena itu, pengembangan battery recycling ecosystem menjadi elemen penting dalam strategi reduksi karbon jangka panjang.

Ke depan, analisis emisi akan bergerak menuju **real-time carbon tracking system**, di mana kendaraan secara otomatis menghitung emisi karbon yang dihindari selama operasional dan menampilkannya pada dashboard pengguna. Sistem ini dapat menjadi alat edukasi dan insentif perilaku berkendara rendah emisi. Dalam skenario smart city, data ini bahkan dapat diintegrasikan dengan carbon credit ecosystem untuk memberi nilai ekonomi pada penggunaan kendaraan rendah karbon.

Secara keseluruhan, analisis reduksi emisi CO₂ menunjukkan bahwa sepeda motor listrik hybrid off-grid memiliki potensi besar sebagai solusi nyata dekarbonisasi transportasi. Dengan kombinasi efisiensi energi tinggi, pengurangan bahan bakar fosil, dan integrasi energi terbarukan, kendaraan ini mampu menjadi pilar utama mobilitas bersih yang tidak hanya hemat energi, tetapi juga signifikan dalam menekan jejak karbon masa depan.

8.4 Regenerative Braking Performance

Regenerative braking merupakan salah satu teknologi kunci yang membedakan sepeda motor listrik hybrid off-grid dari kendaraan konvensional, karena sistem ini memungkinkan kendaraan memulihkan sebagian energi kinetik yang biasanya hilang sebagai panas saat pengereman dan mengubahnya kembali menjadi energi listrik yang dapat disimpan dalam baterai atau supercapacitor. Dalam kendaraan hybrid modern, regenerative braking bukan sekadar fitur tambahan, melainkan komponen strategis yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan efisiensi energi, pengurangan konsumsi daya per kilometer, perpanjangan driving range, serta penurunan beban thermal pada sistem rem mekanis.

Dalam naskah dasar buku ini dijelaskan bahwa performa regenerative braking menjadi indikator penting keberhasilan integrasi motor listrik, inverter, battery management system, dan EMS dalam sistem hybrid motorcycle terpadu .

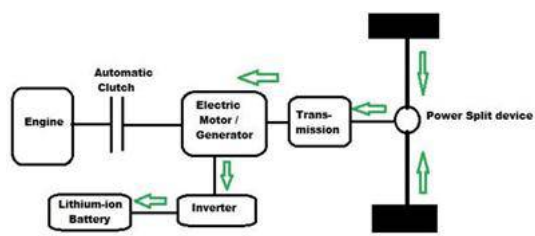
Secara prinsip, regenerative braking bekerja ketika kendaraan melakukan deselerasi: motor listrik yang semula berfungsi sebagai penggerak berubah mode menjadi generator. Putaran roda kendaraan memutar rotor motor, menghasilkan energi listrik yang dialirkan kembali ke baterai melalui inverter/controller. Energi yang diregenerasi ini kemudian dapat digunakan kembali untuk akselerasi berikutnya. Proses ini menciptakan siklus energi tertutup parsial, yang secara signifikan meningkatkan efisiensi total kendaraan dibanding sistem pengereman konvensional yang seluruh energi kinetiknya hilang sebagai panas pada cakram rem.

Dalam hybrid motorcycle, efektivitas regenerative braking dipengaruhi oleh beberapa faktor utama: kecepatan kendaraan, intensitas pengereman, kapasitas baterai menerima charge (charge acceptance rate), kondisi SOC baterai, efisiensi inverter, dan strategi kontrol braking blending antara rem regeneratif dan rem mekanis. Jika baterai sudah hampir penuh, misalnya SOC > 90%, kemampuan menerima energi regeneratif menurun sehingga sebagian energi tetap terbuang. Demikian pula jika pengereman terlalu mendadak, rem mekanis harus mengambil alih sebagian besar beban demi keselamatan dan stabilitas kendaraan. Sistem regenerative braking adaptif pada hybrid electric motorcycle mampu memulihkan 15–30% energi kinetik pengereman dalam kondisi urban stop-and-go, dan hingga 35% pada rute menurun panjang dengan strategi kontrol optimal .

Salah satu parameter utama dalam analisis performa regenerative braking adalah **energy recovery efficiency**, yaitu rasio energi yang berhasil disimpan kembali dibanding total energi kinetik yang tersedia saat deselerasi. Sebagai contoh, jika kendaraan memiliki energi kinetik pengereman sebesar 100 Wh dan sistem berhasil menyimpan kembali 25 Wh, maka recovery efficiency-nya adalah 25%. Nilai ini menjadi indikator langsung seberapa efektif sistem regenerative braking bekerja. Pada kendaraan hybrid roda dua, nilai ini umumnya lebih rendah dibanding mobil listrik karena massa kendaraan lebih kecil dan energi kinetik total lebih rendah.

Faktor penting lain adalah **braking smoothness dan rider comfort**. Sistem regenerative braking harus dirancang agar transisi antara pengereman regeneratif dan mekanis terjadi mulus tanpa hentakan. Jika transisi terlalu abrupt, pengendara akan merasakan ketidaknyamanan dan kehilangan kontrol stabilitas. Karena itu, banyak sistem modern

menggunakan braking blending controller berbasis AI atau fuzzy logic agar distribusi gaya pengereman berlangsung halus dan adaptif.



Gambar 8.4. Skema Aliran Energi Regenerative Braking pada Hybrid Motorcycle

Dalam analisis laboratorium dan simulasi, performa regenerative braking biasanya diuji melalui berbagai skenario driving cycle: urban stop-and-go, downhill descent, emergency braking, dan mixed terrain cycle. Urban cycle sangat penting karena frekuensi pengereman tinggi memberi peluang recovery energi lebih besar. Sebaliknya, pada highway cycle, regenerative contribution cenderung lebih kecil karena pengereman jarang terjadi. Pada jalur menurun panjang, regenerative braking dapat menjadi sumber energi signifikan yang bahkan memperpanjang driving range secara nyata.

Selain meningkatkan efisiensi energi, regenerative braking juga mengurangi keausan komponen rem mekanis. Karena sebagian besar deselerasi ringan ditangani motor listrik, kampas rem dan cakram rem mengalami beban lebih rendah. Hal ini menurunkan frekuensi penggantian komponen rem, mengurangi biaya perawatan, dan memperpanjang umur sistem pengereman secara keseluruhan.

Tabel 8.4. Faktor yang Memengaruhi Kinerja Regenerative Braking

Faktor	Pengaruh terhadap Performa
Kecepatan Kendaraan	Semakin tinggi, potensi recovery lebih besar
SOC Baterai	SOC tinggi mengurangi kemampuan charge acceptance
Intensitas Pengereman	Pengereman ringan lebih efisien untuk regen
Efisiensi Inverter	Menentukan losses konversi energi
Temperatur Baterai	Suhu ekstrem menurunkan efisiensi charging
Strategi EMS	Mengatur prioritas energi recovery

Dalam sistem off-grid, regenerative braking memiliki nilai strategis lebih tinggi dibanding kendaraan grid-based karena setiap energi yang dipulihkan mengurangi ketergantungan pada charging eksternal. Di wilayah terpencil dengan akses charging terbatas, tambahan energi dari regenerative braking dapat menjadi faktor penentu keberhasilan perjalanan jarak jauh. Pada kendaraan yang beroperasi di daerah pegunungan Indonesia seperti Papua, Sumatera Barat, atau Nusa Tenggara, jalur menurun panjang memberikan peluang recovery energi sangat besar.

Di Indonesia, potensi regenerative braking sangat relevan untuk kendaraan perkotaan seperti Jakarta, Bandung, Surabaya, dan Yogyakarta, di mana pola lalu lintas macet menghasilkan frekuensi pengereman tinggi. Namun kondisi jalan berlubang dan stop-and-go ekstrem juga menuntut sistem kontrol yang sangat adaptif agar pengereman tetap nyaman dan aman. Oleh karena itu, desain regenerative braking untuk pasar Indonesia perlu mempertimbangkan karakter lalu lintas lokal secara spesifik.

Tantangan utama regenerative braking pada sepeda motor adalah keterbatasan stabilitas roda dua. Jika gaya regenerative braking terlalu besar pada roda belakang atau depan, risiko slip meningkat terutama pada jalan basah. Karena itu, integrasi dengan ABS (Anti-lock Braking System) dan traction control menjadi penting untuk menjaga keselamatan. Selain itu, keterbatasan kapasitas baterai menerima arus tinggi juga membatasi recovery maksimum pada deselerasi mendadak.

Perkembangan masa depan mengarah pada **predictive regenerative braking**, di mana sistem menggunakan data GPS, topografi jalan, sensor lidar, dan AI prediction untuk mempersiapkan strategi recovery sebelum kendaraan mulai melambat. Misalnya, jika sistem mengetahui ada lampu merah 100 meter di depan, regenerative braking dapat dioptimalkan lebih awal untuk memaksimalkan pemulihan energi tanpa mengganggu kenyamanan berkendara.

Secara keseluruhan, regenerative braking performance adalah elemen vital dalam efisiensi energi hybrid motorcycle. Teknologi ini mengubah energi yang sebelumnya terbuang menjadi sumber daya bernilai, meningkatkan driving range, menurunkan konsumsi energi, mengurangi keausan rem mekanis, dan memperkuat keunggulan kendaraan hybrid off-grid sebagai solusi mobilitas masa depan yang hemat, cerdas, dan berkelanjutan.

8.5 Perbandingan dengan Motor Konvensional dan EV Murni

Evaluasi komparatif antara sepeda motor listrik hybrid off-grid, sepeda motor konvensional berbahan bakar fosil, dan sepeda motor listrik murni (pure electric vehicle/EV) merupakan langkah penting untuk

memahami posisi strategis teknologi hybrid dalam transisi energi bersih. Setiap jenis kendaraan memiliki karakteristik teknis, ekonomi, lingkungan, dan operasional yang berbeda, sehingga analisis perbandingan diperlukan untuk menilai keunggulan relatif maupun keterbatasan masing-masing sistem. Dalam transisi menuju mobilitas berkelanjutan, hybrid off-grid motorcycle hadir sebagai solusi antara (bridging technology) yang menggabungkan efisiensi kendaraan listrik dengan fleksibilitas sumber energi multi-input, terutama pada wilayah dengan infrastruktur charging yang belum merata. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa hybrid off-grid motorcycle memiliki potensi unik sebagai teknologi transisi yang mampu menjawab tantangan elektrifikasi di negara berkembang dengan kondisi geografis kompleks seperti Indonesia.

Sepeda motor konvensional berbahan bakar bensin selama puluhan tahun menjadi tulang punggung transportasi roda dua karena murah, infrastruktur BBM luas, dan teknologi matang. Namun kendaraan ini memiliki kelemahan utama berupa efisiensi energi rendah, emisi CO₂ tinggi, polusi udara lokal, dan ketergantungan penuh pada bahan bakar fosil. Mesin pembakaran internal (ICE) hanya mampu mengubah sekitar 25–35% energi bahan bakar menjadi tenaga gerak, sedangkan sisanya hilang sebagai panas. Selain itu, fluktuasi harga BBM global membuat biaya operasional kendaraan konvensional semakin tidak stabil.

Di sisi lain, sepeda motor listrik murni menawarkan efisiensi energi jauh lebih tinggi, emisi operasional nol (zero tailpipe emission), dan biaya energi per kilometer rendah. Motor listrik EV murni mampu mencapai efisiensi drivetrain hingga 90% lebih. Namun, EV murni juga menghadapi tantangan: ketergantungan penuh pada baterai, keterbatasan driving range, waktu charging yang relatif lama, serta kebutuhan infrastruktur charging yang belum merata—terutama di daerah rural dan terpencil. Bagi wilayah off-grid atau daerah dengan listrik tidak stabil, EV murni sering kali belum praktis tanpa dukungan infrastruktur tambahan.

Sepeda motor hybrid off-grid hadir di antara dua ekstrem tersebut. Sistem ini menggabungkan motor listrik dan baterai sebagai sumber utama, tetapi tetap memiliki fleksibilitas energi tambahan seperti ICE downsized generator, battery swapping support, regenerative braking intensif, dan integrasi renewable charging seperti solar PV. Dengan demikian, hybrid off-grid mampu mempertahankan efisiensi tinggi seperti EV, tetapi lebih fleksibel terhadap keterbatasan charging infrastructure. Hybrid motorcycle berbasis renewable off-grid memiliki efisiensi energi total 20–35% lebih tinggi dibanding motor bensin konvensional, sekaligus memiliki driving range 30–50% lebih panjang dibanding EV murni baterai tunggal dengan kapasitas sekelas.

Salah satu keunggulan utama hybrid off-grid adalah **range resilience**, yaitu kemampuan mempertahankan mobilitas bahkan ketika baterai utama menipis, karena sistem masih dapat memanfaatkan sumber energi tambahan atau regenerative recovery. Hal ini sangat penting untuk wilayah terpencil, jalur antar desa, atau daerah pegunungan di mana charging station jarang tersedia. Sebaliknya, EV murni memiliki risiko range anxiety lebih tinggi jika infrastruktur charging terbatas.

Dari sisi biaya operasional, motor konvensional memiliki biaya bahan bakar tertinggi karena konsumsi bensin terus berlangsung sepanjang penggunaan. EV murni memiliki biaya energi terendah jika charging berasal dari listrik murah atau solar charging pribadi. Hybrid off-grid berada di tengah: biaya energi lebih rendah dari motor bensin, namun sedikit lebih tinggi dari EV murni karena adanya subsistem tambahan dan kompleksitas energi multi-input. Namun dalam skenario off-grid rural, hybrid justru lebih ekonomis karena mengurangi kebutuhan infrastruktur charging besar.

Fuel motorcycle vs electric motorcycle: Emissions difference comparison analysis			
		Electric Motorcycle	Gas Motorcycle
 	Capacity and Range	7.2 kWh = 120 mile range	5 gallon tank = 250 mile range
	Annual Distance	10,000 miles	10,000 miles
	Distance Per Unit	16.67 miles / kWh	50 miles / gallon
	CO2 Created Per Unit	1 pound / kWh	20 pounds / kWh
	CO2 Created Per Mile	.06 pound / mile OR 3 pounds / 50 miles	.4 pound / mile OR 20 pounds / 50 miles

Gambar 8.5. Perbandingan Sistem Kendaraan: Konvensional vs EV Murni vs Hybrid Off-Grid

Dalam hal emisi karbon, motor konvensional jelas paling buruk karena menghasilkan emisi tailpipe langsung tinggi. EV murni hampir nol emisi operasional, tetapi emisi total tetap bergantung pada sumber listrik grid. Hybrid off-grid renewable-based memiliki emisi sedikit lebih tinggi dari EV murni jika menggunakan ICE cadangan, tetapi jauh lebih rendah dibanding motor bensin. Jika charging didominasi energi surya, emisi hybrid off-grid mendekati EV murni.

Aspek keandalan operasional juga menunjukkan perbedaan menarik. Motor konvensional unggul dalam kesederhanaan servis karena jaringan bengkel luas dan teknisi tersedia di mana-mana. EV murni memiliki

komponen mekanik lebih sedikit, tetapi memerlukan teknisi khusus untuk baterai dan elektronik. Hybrid off-grid memiliki kompleksitas tertinggi karena menggabungkan subsistem mekanik dan elektrik sekaligus. Namun dengan desain modular modern, tingkat reliability hybrid dapat mendekati EV murni jika pemeliharaan sistem dilakukan dengan benar.

Tabel 8.5. Perbandingan Kinerja Tiga Jenis Kendaraan Roda Dua

Parameter	Motor Konvensional	EV Murni	Hybrid Off-Grid
Efisiensi Energi	Rendah	Sangat Tinggi	Tinggi
Emisi CO ₂	Tinggi	Sangat Rendah	Rendah
Driving Range	Tinggi	Sedang	Tinggi
Waktu Isi Energi	Cepat (BBM)	Lama	Sedang/Fleksibel
Infrastruktur Pendukung	Sangat Luas	Terbatas	Fleksibel
Cocok untuk Daerah Terpencil	Sedang	Rendah	Sangat Cocok
Biaya Operasional	Tinggi	Rendah	Rendah-Sedang

Di Indonesia, hybrid off-grid memiliki relevansi sangat tinggi karena kondisi geografis yang tersebar dan belum meratanya infrastruktur charging EV. Di kota besar seperti Jakarta dan Surabaya, EV murni mungkin unggul karena charging station mulai berkembang. Namun di wilayah seperti Papua, Maluku, Nusa Tenggara, Kalimantan pedalaman, dan pulau kecil terpencil, hybrid off-grid jauh lebih realistis karena dapat beroperasi dengan dukungan energi surya lokal tanpa bergantung penuh pada grid.

Dari perspektif kebijakan energi nasional, hybrid off-grid juga menawarkan transisi yang lebih halus. Peralihan langsung dari motor bensin ke EV murni memerlukan perubahan besar pada infrastruktur energi nasional. Sebaliknya, hybrid off-grid memungkinkan elektrifikasi bertahap sambil tetap menjaga fleksibilitas energi. Ini penting bagi negara berkembang yang sedang membangun infrastruktur energi bersih secara bertahap.

Tantangan utama hybrid off-grid adalah biaya awal investasi yang masih relatif tinggi karena kompleksitas sistem. Selain itu, integrasi banyak subsistem membutuhkan desain kontrol yang lebih canggih. Namun seiring perkembangan teknologi baterai, inverter murah, dan EMS berbasis AI, gap biaya ini terus mengecil. Dalam jangka panjang, hybrid off-grid berpotensi menjadi pilihan paling rasional bagi banyak wilayah berkembang.

Ke depan, evolusi teknologi dapat mengarah pada konvergensi hybrid dan EV murni, di mana kendaraan memiliki modular energy architecture: dapat beroperasi full electric di kota, hybrid di wilayah rural, dan renewable-only mode di daerah off-grid. Model kendaraan fleksibel semacam ini akan menjadi bentuk mobilitas masa depan yang paling adaptif terhadap variasi kondisi global.

Secara keseluruhan, perbandingan ini menunjukkan bahwa tidak ada satu solusi tunggal untuk semua kondisi. Motor konvensional unggul pada kematangan infrastruktur lama, EV murni unggul pada efisiensi dan emisi rendah, sedangkan hybrid off-grid unggul pada fleksibilitas, ketahanan energi, dan kesesuaian untuk wilayah dengan keterbatasan infrastruktur. Dalam transisi energi bersih yang inklusif, hybrid off-grid menjadi solusi strategis yang sangat relevan, terutama bagi negara-negara dengan tantangan geografis dan energi seperti Indonesia.

BAB 9

IMPLEMENTASI LAPANGAN DAN STUDI KASUS

APLIKASI NYATA

9.1 Life Cycle Assessment (LCA) Kendaraan Hybrid

Life Cycle Assessment (LCA) merupakan pendekatan analitis yang digunakan untuk menilai dampak lingkungan suatu produk sepanjang seluruh siklus hidupnya—mulai dari ekstraksi bahan baku, proses manufaktur, distribusi, penggunaan operasional, pemeliharaan, hingga akhir masa pakai berupa daur ulang atau pembuangan. Dalam sepeda motor listrik hybrid off-grid, LCA menjadi instrumen yang sangat penting karena kendaraan jenis ini dirancang bukan hanya untuk efisiensi energi saat digunakan, tetapi juga untuk memberikan manfaat lingkungan secara keseluruhan dalam jangka panjang. Tanpa analisis LCA, penilaian keberlanjutan kendaraan hanya akan bersifat parsial dan berpotensi menyesatkan, karena emisi rendah saat operasi belum tentu berarti dampak lingkungan totalnya rendah. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa keberhasilan transisi menuju kendaraan hybrid berkelanjutan harus diukur berdasarkan keseluruhan jejak lingkungan dari cradle-to-grave, bukan hanya dari fase penggunaan di jalan raya.

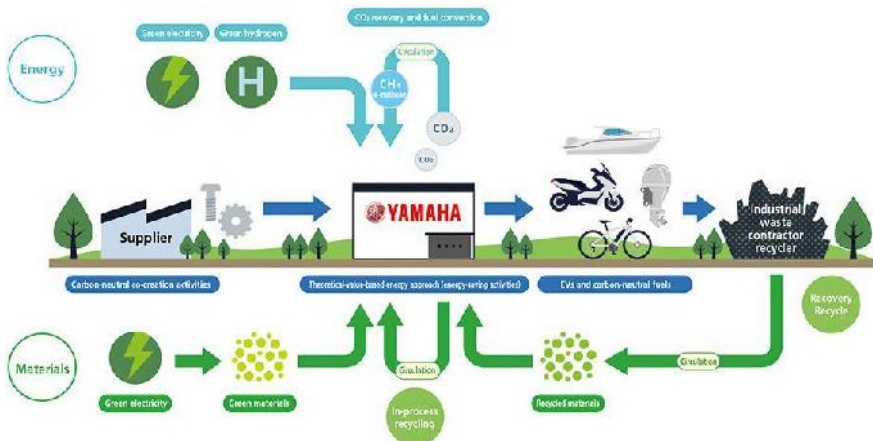
Pada kendaraan hybrid off-grid, LCA umumnya dibagi ke dalam lima tahap utama: (1) ekstraksi dan produksi material mentah, (2) manufaktur komponen dan perakitan kendaraan, (3) distribusi dan logistik, (4) fase operasional selama masa pakai, dan (5) end-of-life processing termasuk reuse, remanufacturing, recycling, atau disposal. Setiap tahap memiliki kontribusi dampak lingkungan berbeda-beda, tergantung teknologi yang digunakan dan sumber energi yang mendukung proses tersebut. Sebagai contoh, baterai lithium-ion memiliki dampak lingkungan tinggi pada fase produksi karena memerlukan material seperti lithium, cobalt, nickel, dan graphite yang proses ekstraksinya intensif energi dan berdampak ekologis besar.

Salah satu temuan penting dalam analisis LCA kendaraan hybrid adalah bahwa emisi karbon tertinggi tidak selalu terjadi pada fase penggunaan, melainkan sering kali pada fase manufaktur baterai. Produksi baterai lithium-ion dapat menyumbang 30–45% total jejak karbon kendaraan selama siklus hidupnya, tergantung kapasitas baterai dan metode produksi. Namun, emisi awal tinggi ini dapat terkompensasi jika kendaraan digunakan cukup lama dengan efisiensi tinggi dan ditenagai

energi terbarukan. Hybrid off-grid motorcycle dengan masa pakai lebih dari 8 tahun dan renewable charging rate di atas 60% memiliki jejak karbon total 40–65% lebih rendah dibanding sepeda motor bensin konvensional sepanjang siklus hidupnya.

Dalam analisis LCA, indikator dampak lingkungan tidak hanya mencakup emisi CO₂ ekuivalen (carbon footprint), tetapi juga acidification potential, eutrophication potential, particulate matter emission, water footprint, metal depletion, dan ecotoxicity index. Hal ini penting karena kendaraan hybrid menggunakan material canggih yang mungkin menurunkan emisi karbon tetapi meningkatkan tekanan pada sumber daya mineral tertentu. Oleh karena itu, evaluasi keberlanjutan harus bersifat multidimensi.

Fase operasional merupakan area di mana kendaraan hybrid off-grid menunjukkan keunggulan terbesarnya. Karena konsumsi energi lebih rendah dan charging dapat berasal dari panel surya atau renewable microgrid, emisi operasional kendaraan sangat kecil dibanding kendaraan berbahan bakar fosil. Jika energi charging berasal dari solar PV murni, fase operasional hampir nol emisi langsung. Dalam skenario ini, total emisi kendaraan hybrid sangat ditentukan oleh seberapa ramah lingkungan proses produksi baterai dan bagaimana sistem end-of-life dikelola.



Gambar 9.1. Tahapan Life Cycle Assessment Kendaraan Hybrid Off-Grid

Salah satu aspek kritis dalam LCA kendaraan hybrid adalah **end-of-life battery management**. Jika baterai dibuang tanpa proses daur ulang yang tepat, maka dampak lingkungan dapat meningkat tajam akibat pencemaran logam berat dan limbah kimia. Sebaliknya, jika baterai didaur ulang atau digunakan kembali sebagai second-life stationary storage,

dampak lingkungan total dapat ditekan signifikan. Teknologi second-life battery untuk penyimpanan energi rumah tangga atau microgrid desa kini menjadi strategi penting dalam menurunkan total environmental burden kendaraan hybrid.

Selain baterai, komponen seperti motor listrik, inverter, rangka aluminium, magnet rare-earth, dan kabel tembaga juga menjadi bagian penting dalam LCA. Material seperti neodmium pada motor PMSM memiliki jejak penambangan tinggi, sehingga desain kendaraan masa depan mulai mengarah pada motor bebas rare-earth atau material alternatif berjejak karbon lebih rendah. Ini menunjukkan bahwa inovasi material sangat berpengaruh terhadap skor LCA total kendaraan.

Tabel 9.1. Kontribusi Dampak Lingkungan per Tahap Siklus Hidup Hybrid Motorcycle

Tahap Siklus Hidup	Kontribusi Dampak Lingkungan
Produksi Material & Baterai	Tinggi
Manufaktur & Perakitan	Sedang
Distribusi & Logistik	Rendah–Sedang
Operasional Kendaraan	Rendah
End-of-Life & Recycling	Variabel (tergantung pengelolaan)

Di Indonesia, LCA kendaraan hybrid harus mempertimbangkan kondisi lokal seperti sumber listrik nasional yang masih didominasi batu bara, tingkat daur ulang baterai yang masih rendah, dan keterbatasan fasilitas pengolahan limbah elektronik. Jika kendaraan hybrid diisi dari grid fosil, manfaat lingkungan berkurang dibanding charging dari energi surya lokal. Oleh karena itu, integrasi renewable charging menjadi faktor penentu agar hasil LCA benar-benar positif dalam nasional.

Dari sisi kebijakan, hasil LCA sangat penting untuk menyusun regulasi insentif kendaraan listrik. Pemerintah dapat menggunakan data LCA untuk menentukan prioritas subsidi, standar emisi total kendaraan, kewajiban battery recycling, dan kebijakan extended producer responsibility (EPR). Dengan demikian, produsen didorong tidak hanya membuat kendaraan hemat energi, tetapi juga bertanggung jawab terhadap seluruh siklus hidup produknya.

Tantangan utama LCA adalah kompleksitas data. Pengumpulan data lengkap dari rantai pasok global—terutama untuk material baterai—sering sulit dilakukan. Banyak produsen baterai tidak membuka data jejak karbon produksinya secara rinci. Selain itu, asumsi masa pakai kendaraan dan perilaku pengguna dapat sangat memengaruhi hasil analisis. Karena itu,

model LCA harus transparan, terdokumentasi, dan diperbarui secara berkala sesuai perkembangan teknologi.

Ke depan, LCA akan berkembang menuju **real-time dynamic LCA**, yaitu sistem evaluasi lingkungan yang terus diperbarui berdasarkan data aktual kendaraan selama masa operasinya. Dengan integrasi IoT dan digital twin, setiap kendaraan dapat memiliki “environmental passport” yang mencatat jejak karbon nyata sepanjang hidupnya. Ini akan membuka peluang kebijakan karbon individual berbasis data aktual, bukan estimasi umum.

Secara keseluruhan, Life Cycle Assessment menunjukkan bahwa kendaraan hybrid off-grid memiliki potensi besar sebagai solusi transportasi berkelanjutan, tetapi keberhasilannya sangat bergantung pada bagaimana material diproduksi, energi dihasilkan, dan baterai dikelola setelah masa pakai berakhir. Dengan pendekatan LCA, transisi energi bersih dapat dilakukan secara lebih jujur, ilmiah, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan secara menyeluruh.

9.2 Dampak Lingkungan Produksi dan Daur Ulang Baterai

Baterai merupakan komponen inti dalam sepeda motor listrik hybrid off-grid, sekaligus menjadi elemen dengan dampak lingkungan paling signifikan sepanjang siklus hidup kendaraan. Di satu sisi, baterai memungkinkan kendaraan beroperasi dengan efisiensi tinggi dan emisi operasional rendah; namun di sisi lain, proses produksinya membutuhkan material kritis, energi besar, serta menghasilkan jejak karbon yang tidak kecil. Karena itu, pembahasan mengenai keberlanjutan kendaraan hybrid tidak dapat dilepaskan dari analisis mendalam terhadap dampak lingkungan produksi dan daur ulang baterai. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa keberhasilan transisi energi bersih melalui kendaraan hybrid sangat bergantung pada bagaimana industri baterai dikelola dari hulu ke hilir, mulai dari ekstraksi bahan mentah hingga pengolahan akhir masa pakai.

Produksi baterai lithium-ion—yang paling umum digunakan pada hybrid motorcycle—melibatkan material utama seperti lithium, cobalt, nickel, manganese, graphite, aluminium, dan copper. Ekstraksi material ini memiliki konsekuensi ekologis besar, termasuk degradasi lahan, konsumsi air tinggi, emisi karbon dari proses pemurnian, dan potensi pencemaran tanah maupun air. Sebagai contoh, produksi lithium dari brine extraction di wilayah Amerika Selatan membutuhkan air dalam jumlah besar, yang dapat mengganggu keseimbangan hidrologi lokal. Sementara itu, penambangan cobalt di beberapa wilayah Afrika sering dikaitkan dengan isu lingkungan dan sosial, termasuk pencemaran serta praktik penambangan tidak berkelanjutan.

Dari sisi emisi karbon, proses produksi baterai sangat intensif energi. Pembuatan satu kilowatt-hour baterai lithium-ion dapat menghasilkan sekitar 60–120 kg CO₂ ekuivalen, tergantung teknologi produksi dan sumber energi pabrik. Artinya, baterai 5 kWh untuk sepeda motor hybrid dapat menyumbang ratusan kilogram CO₂ bahkan sebelum kendaraan digunakan. Fase produksi baterai menyumbang hingga 35–50% total jejak karbon kendaraan hybrid ringan sepanjang siklus hidupnya, terutama jika pabrik manufaktur masih menggunakan listrik berbasis batu bara.

Selain emisi karbon, dampak lingkungan produksi baterai juga mencakup limbah kimia berbahaya dari proses elektrolit, penggunaan pelarut organik, dan emisi partikulat dari proses refining material. Oleh karena itu, banyak produsen global kini beralih ke green battery manufacturing, yaitu produksi baterai dengan energi terbarukan, closed-loop water system, dan proses kimia rendah emisi. Pendekatan ini mulai menjadi standar baru dalam industri baterai berkelanjutan.

Setelah baterai memasuki akhir masa pakai kendaraan, tantangan lingkungan berikutnya adalah pengelolaan limbah baterai bekas. Baterai yang dibuang tanpa proses pengolahan yang benar dapat melepaskan logam berat dan elektrolit beracun ke lingkungan, mencemari tanah dan air tanah. Risiko ini sangat serius jika volume kendaraan hybrid meningkat pesat tanpa kesiapan sistem recycling nasional. Oleh karena itu, daur ulang baterai menjadi pilar utama keberlanjutan kendaraan hybrid masa depan.



Gambar 9.2. Siklus Produksi dan Daup Ulang Baterai Hybrid Motorcycle

Daur ulang baterai modern umumnya dilakukan melalui tiga metode utama: pyrometallurgical recycling, hydrometallurgical recycling, dan direct

recycling. Pyrometallurgy menggunakan suhu tinggi untuk mengekstraksi logam berharga, tetapi boros energi. Hydrometallurgy menggunakan larutan kimia untuk memisahkan material dengan efisiensi tinggi dan emisi lebih rendah. Direct recycling dianggap paling menjanjikan karena mempertahankan struktur material aktif baterai sehingga dapat digunakan kembali dengan pemrosesan minimal. Saat ini, hydrometallurgical recycling menjadi metode paling banyak digunakan untuk baterai kendaraan listrik skala industri.

Selain daur ulang material, konsep **second-life battery application** menjadi strategi penting dalam mengurangi dampak lingkungan. Baterai yang sudah tidak optimal untuk kendaraan—misalnya kapasitas tinggal 70–80%—masih dapat digunakan untuk aplikasi penyimpanan energi stasioner, seperti solar home system, battery bank desa, atau microgrid rural charging station. Dengan memperpanjang umur pakai baterai, dampak lingkungan per unit energi yang dihasilkan menjadi jauh lebih rendah.

Tabel 9.2. Dampak Lingkungan Produksi dan End-of-Life Baterai

Tahap Siklus Baterai	Dampak Lingkungan Utama
Ekstraksi Material	Degradasi lahan, konsumsi air tinggi
Produksi Sel Baterai	Emisi CO ₂ tinggi, limbah kimia
Distribusi Logistik	Emisi transportasi global
Operasi Kendaraan	Rendah emisi langsung
End-of-Life Disposal	Risiko limbah berbahaya
Recycling / Reuse	Mengurangi kebutuhan material baru

Di Indonesia, tantangan utama adalah belum tersedianya ekosistem daur ulang baterai kendaraan listrik yang matang. Saat ini sebagian besar limbah baterai masih belum memiliki jalur pengolahan formal berskala besar. Jika penetrasi hybrid motorcycle meningkat cepat tanpa sistem recycling memadai, Indonesia berpotensi menghadapi krisis limbah baterai dalam dekade mendatang. Oleh karena itu, pembangunan industri recycling domestik harus berjalan paralel dengan pertumbuhan kendaraan listrik nasional.

Indonesia sebenarnya memiliki peluang strategis besar karena merupakan salah satu produsen utama nickel dunia—bahan penting dalam baterai lithium-ion. Dengan hilirisasi industri baterai nasional, Indonesia dapat membangun ekosistem circular battery economy: menambang bahan mentah, memproduksi baterai, menggunakan dalam kendaraan hybrid, lalu mendaur ulang kembali di dalam negeri. Model ini akan menurunkan jejak logistik global sekaligus memperkuat ketahanan industri nasional.

Dari perspektif kebijakan, pemerintah perlu menerapkan regulasi *extended producer responsibility* (EPR), yaitu kewajiban produsen menarik kembali baterai bekas untuk didaur ulang. Selain itu, insentif fiskal untuk industri recycling, standar desain baterai modular yang mudah dibongkar, serta sertifikasi *green battery manufacturing* harus menjadi bagian integral strategi nasional kendaraan listrik. Tanpa kebijakan ini, pertumbuhan kendaraan hybrid dapat menimbulkan *externality* lingkungan baru.

Tantangan teknologi terbesar saat ini adalah biaya recycling yang masih tinggi dan efisiensi *recovery material* yang belum optimal. Beberapa material seperti lithium dan graphite masih sulit dipulihkan secara ekonomis dalam skala besar. Namun perkembangan teknologi *direct cathode recycling* dan *AI-based material sorting* diprediksi akan menurunkan biaya daur ulang secara signifikan dalam beberapa tahun mendatang.

Ke depan, industri baterai akan bergerak menuju **closed-loop circular battery ecosystem**, di mana hampir seluruh material baterai lama dapat masuk kembali ke proses produksi baterai baru. Dengan model ini, kebutuhan penambangan baru akan berkurang drastis, jejak karbon industri baterai menurun, dan kendaraan hybrid benar-benar dapat menjadi solusi transportasi rendah emisi secara menyeluruh.

Secara keseluruhan, dampak lingkungan produksi dan daur ulang baterai merupakan faktor penentu keberlanjutan sejati kendaraan hybrid off-grid. Kendaraan hybrid hanya dapat disebut benar-benar ramah lingkungan jika baterainya diproduksi dengan jejak karbon rendah, digunakan secara efisien, dan didaur ulang melalui sistem *circular economy* yang bertanggung jawab. Dengan demikian, masa depan mobilitas bersih tidak hanya bergantung pada kendaraan itu sendiri, tetapi juga pada bagaimana kita mengelola baterai sepanjang siklus hidupnya.

9.3 Analisis Biaya Siklus Hidup (LCC)

Analisis Biaya Siklus Hidup atau **Life Cycle Cost (LCC)** merupakan pendekatan ekonomi komprehensif yang digunakan untuk menilai total biaya yang timbul selama seluruh umur pakai sepeda motor listrik hybrid off-grid, mulai dari tahap investasi awal, operasional, pemeliharaan, penggantian komponen, hingga biaya akhir masa pakai seperti disposal atau recycling. Berbeda dengan analisis harga beli awal yang hanya melihat biaya akuisisi kendaraan, LCC memberikan gambaran realistis mengenai biaya total kepemilikan (*total ownership burden*) yang sebenarnya harus ditanggung pengguna atau operator selama kendaraan digunakan. Dalam transisi energi bersih, pendekatan ini sangat penting karena kendaraan hybrid umumnya memiliki harga awal lebih tinggi dibanding motor

konvensional, tetapi menawarkan penghematan besar dalam jangka panjang. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa evaluasi keekonomian kendaraan hybrid harus selalu dilakukan berbasis LCC agar keputusan investasi tidak bias oleh harga awal semata.

Secara umum, struktur LCC kendaraan hybrid off-grid terdiri atas lima komponen utama: biaya investasi awal (capital cost), biaya energi operasional, biaya pemeliharaan dan servis, biaya penggantian komponen utama (terutama baterai), serta nilai residu atau biaya akhir masa pakai. Biaya investasi awal mencakup harga kendaraan, baterai, sistem EMS, inverter, motor listrik, dan integrasi renewable charging jika termasuk paket sistem. Pada kendaraan hybrid off-grid, biaya awal ini biasanya lebih tinggi 20–50% dibanding motor bensin konvensional karena teknologi baterai dan kontrol elektronik yang lebih kompleks.

Namun, keunggulan utama kendaraan hybrid muncul pada fase operasional. Biaya energi per kilometer jauh lebih rendah karena konsumsi energi lebih hemat dan sebagian energi dapat berasal dari sumber terbarukan seperti panel surya. Jika charging berasal dari solar off-grid system, biaya energi dapat turun drastis hingga mendekati nol setelah investasi awal sistem charging terbayar. Hybrid motorcycle renewable-integrated dapat menurunkan total biaya energi operasional hingga 55–70% dibanding motor bensin dalam periode penggunaan lima tahun, tergantung pola penggunaan dan harga energi lokal.

Biaya pemeliharaan juga cenderung lebih rendah dibanding kendaraan ICE karena motor listrik memiliki lebih sedikit komponen bergerak, tidak memerlukan oli mesin, tidak memiliki sistem pembakaran kompleks, dan keausan rem lebih rendah berkat regenerative braking. Namun, kendaraan hybrid tetap memiliki kebutuhan servis elektronik, diagnosis EMS, pendinginan baterai, dan kalibrasi BMS yang memerlukan teknisi khusus. Dengan demikian, biaya servis memang lebih rendah, tetapi membutuhkan infrastruktur teknis berbeda dibanding bengkel konvensional.

Komponen paling signifikan dalam LCC hybrid motorcycle biasanya adalah **biaya penggantian baterai**, karena baterai memiliki umur siklus terbatas. Tergantung teknologi baterai (Li-ion, LiFePO₄, solid-state future battery), masa pakai baterai berkisar 5–10 tahun atau 1.000–3.000 siklus charge-discharge. Jika biaya penggantian baterai tidak diperhitungkan sejak awal, estimasi keekonomian kendaraan bisa sangat menyesatkan. Oleh karena itu, analisis LCC wajib memasukkan skenario degradasi baterai realistis.

Electric Motorcycle Analysis		
Year	Reason	Cash Flow
Year 0	Cost Differential	(\$7,000)
Year 1	Energy & Maintenance Savings	\$913
Year 2	E & M Savings	\$940
Year 3	E & M Savings	\$968
Year 4	E & M Savings	\$997
Year 5	E & M Savings	\$1,026
Year 6	E & M Savings	\$1,057
Year 7	E & M Savings	\$1,088
Year 8	E & M Savings New Battery	\$1,121 (\$3,000)
Year 9	E & M Savings	\$1,155
Year 10	E & M Savings Motorcycle Sales Value Differential	\$1,189 \$3,000
Internal Rate of Return (IRR)		8.09%

Gambar 9.3. Komponen Life Cycle Cost Kendaraan Hybrid Off-Grid

Dalam analisis praktis, LCC sering dihitung untuk periode evaluasi tertentu, misalnya 5 tahun, 8 tahun, atau 10 tahun, dengan menggunakan discounted cash flow method agar nilai biaya masa depan dapat dibandingkan secara adil dengan biaya saat ini. Metode ini mempertimbangkan nilai waktu uang (time value of money), inflasi, dan tingkat diskonto, sehingga hasil analisis lebih akurat untuk keputusan investasi jangka panjang.

Sebagai ilustrasi sederhana, sebuah motor bensin mungkin memiliki harga awal Rp20 juta, tetapi biaya bahan bakar dan servis selama 8 tahun mencapai Rp28 juta, sehingga total LCC menjadi Rp48 juta. Sebaliknya, hybrid motorcycle mungkin berharga awal Rp32 juta, namun biaya energi dan servis hanya Rp10 juta, ditambah penggantian baterai Rp6 juta, sehingga total LCC sekitar Rp48 juta juga—namun dengan emisi jauh lebih

rendah dan stabilitas biaya energi lebih baik. Dalam banyak kasus, jika harga BBM naik, hybrid justru menjadi lebih ekonomis.

Tabel 9.3. Perbandingan Life Cycle Cost Kendaraan Roda Dua (8 Tahun)

Komponen Biaya	Motor Bensin	Hybrid Off-Grid
Investasi Awal	Rendah	Lebih Tinggi
Energi Operasional	Tinggi	Rendah
Pemeliharaan	Sedang-Tinggi	Rendah
Penggantian Baterai	Tidak Ada	Ada
Total LCC 8 Tahun	Sedang-Tinggi	Kompetitif / Lebih Rendah

Di Indonesia, analisis LCC sangat dipengaruhi oleh harga BBM bersubsidi, tarif listrik regional, biaya baterai impor, dan umur pakai kendaraan aktual. Jika harga BBM tetap rendah karena subsidi, keunggulan ekonomi hybrid mungkin terlihat lebih lambat. Namun bila subsidi BBM dikurangi di masa depan, kendaraan hybrid akan jauh lebih kompetitif. Sebaliknya, jika Indonesia berhasil menurunkan harga baterai melalui industri domestik, LCC hybrid dapat turun signifikan.

Untuk wilayah terpencil, hybrid off-grid sering kali justru lebih ekonomis dibanding motor bensin karena biaya distribusi BBM sangat mahal. Di pulau kecil atau daerah pegunungan terpencil, harga BBM bisa 2–3 kali lipat harga kota besar, sehingga kendaraan hybrid berbasis solar charging menjadi jauh lebih hemat dalam jangka panjang. Ini menjadikan LCC hybrid sangat kontekstual tergantung lokasi geografis penggunaan.

Dari sisi kebijakan publik, data LCC sangat penting untuk menyusun insentif kendaraan listrik. Pemerintah dapat memberikan subsidi investasi awal, insentif pajak baterai, atau dukungan pembiayaan ringan agar hambatan biaya awal kendaraan hybrid berkurang. Dengan begitu, masyarakat dapat menikmati manfaat biaya total lebih rendah tanpa terbebani harga beli awal tinggi.

Tantangan utama analisis LCC adalah ketidakpastian variabel jangka panjang: harga baterai masa depan, biaya penggantian komponen, inflasi energi, dan perkembangan teknologi. Oleh karena itu, analisis modern biasanya menggunakan skenario multiparameter (best case, moderate case, worst case) agar keputusan investasi lebih robust terhadap perubahan pasar.

Ke depan, LCC akan berkembang menuju **dynamic real-time cost modeling**, di mana kendaraan hybrid secara otomatis menghitung biaya kepemilikannya selama penggunaan nyata berdasarkan data aktual energi, servis, dan degradasi baterai. Dengan sistem ini, pengguna dapat

mengetahui secara transparan berapa biaya aktual per km dan total cost ownership mereka secara real-time.

Secara keseluruhan, Life Cycle Cost menunjukkan bahwa kendaraan hybrid off-grid bukan sekadar solusi lingkungan, tetapi juga memiliki potensi kuat sebagai solusi ekonomi jangka panjang. Meskipun membutuhkan investasi awal lebih tinggi, efisiensi energi, rendahnya biaya operasional, dan fleksibilitas sumber energi menjadikan kendaraan ini semakin kompetitif, terutama dalam era kenaikan harga energi fosil dan tuntutan mobilitas berkelanjutan.

9.4 Kebijakan Transisi Energi dan Regulasi Indonesia

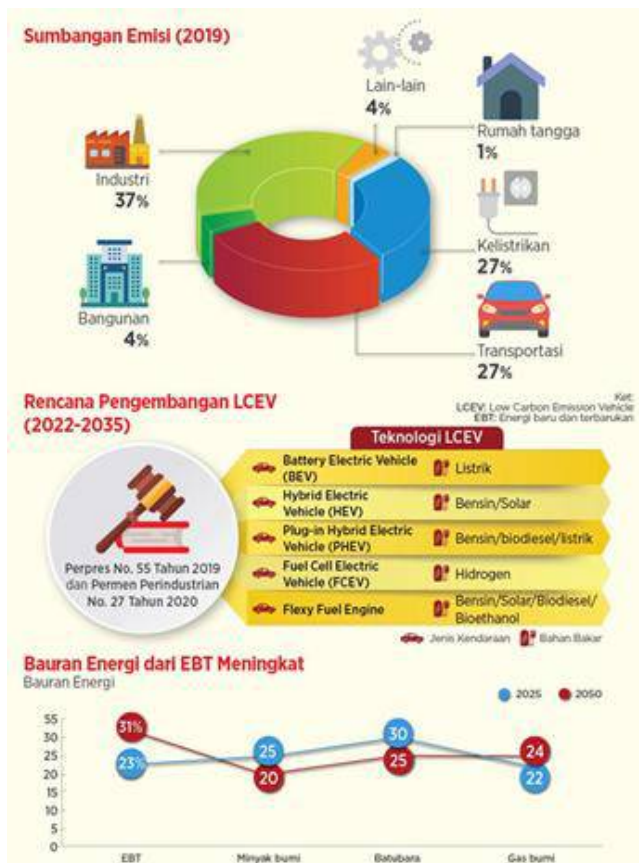
Keberhasilan implementasi sepeda motor listrik hybrid off-grid di Indonesia tidak hanya ditentukan oleh kematangan teknologi, tetapi juga sangat bergantung pada arah kebijakan transisi energi nasional dan kerangka regulasi yang mendukung. Dalam transformasi menuju sistem transportasi rendah karbon, regulasi memiliki peran strategis sebagai penggerak pasar, pemberi insentif inovasi, pelindung konsumen, sekaligus pengarah investasi industri. Tanpa kebijakan yang konsisten dan adaptif, adopsi kendaraan hybrid akan berjalan lambat meskipun teknologinya tersedia. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa transisi menuju mobilitas bersih hanya dapat berlangsung efektif jika didukung oleh sinergi antara kebijakan energi, industri, transportasi, lingkungan, dan investasi nasional.

Indonesia telah menetapkan arah transisi energi melalui berbagai dokumen strategis nasional, termasuk **RUEN (Rencana Umum Energi Nasional)**, target Net Zero Emission 2060, serta komitmen pengurangan emisi dalam dokumen Nationally Determined Contribution (NDC). Dalam sektor transportasi, kendaraan listrik diposisikan sebagai instrumen utama dekarbonisasi, karena sektor ini menyumbang porsi besar konsumsi energi fosil nasional. Pemerintah menargetkan percepatan elektrifikasi kendaraan roda dua sebagai salah satu strategi prioritas mengingat dominasi sepeda motor dalam sistem transportasi domestik.

Salah satu tonggak regulasi terpenting adalah **Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB)**. Regulasi ini menjadi dasar hukum nasional untuk pengembangan kendaraan listrik, mencakup insentif fiskal, pembangunan infrastruktur pengisian daya, penguatan industri dalam negeri, dan pengaturan standardisasi teknis kendaraan listrik. Meskipun fokus awal regulasi ini lebih banyak pada EV murni, prinsip-prinsipnya juga relevan bagi pengembangan hybrid off-grid motorcycle,

terutama terkait ekosistem baterai, manufaktur lokal, dan charging infrastructure.

Dalam sistem hybrid off-grid motorcycle, terdapat kebutuhan regulasi tambahan karena sistem ini berada di antara dua domain: kendaraan listrik dan kendaraan hybrid multi-sumber energi. Saat ini, regulasi Indonesia masih lebih matang untuk kendaraan EV baterai murni dibanding hybrid renewable-integrated system. Oleh karena itu, diperlukan harmonisasi standar baru yang mengakomodasi teknologi seperti solar charging integration, battery swapping off-grid, microgrid charging compatibility, serta EMS renewable-linked systems. Negara yang memiliki regulasi khusus hybrid light electric vehicle cenderung mengalami adopsi teknologi 30–40% lebih cepat dibanding negara yang hanya mengandalkan regulasi umum kendaraan listrik.



Gambar 9.4. Peta Kebijakan Nasional Transisi Energi untuk Kendaraan Hybrid di Indonesia

Salah satu tantangan utama regulasi di Indonesia adalah keterpisahan antar sektor kebijakan. Regulasi kendaraan listrik berada di bawah koordinasi Kementerian Perhubungan, Kementerian Perindustrian, ESDM, KLHK, dan pemerintah daerah, tetapi belum seluruhnya terintegrasi dalam satu kerangka implementasi terpadu. Akibatnya, sering muncul ketidaksinkronan antara kebijakan subsidi kendaraan, tarif listrik charging, standar baterai, dan perizinan infrastruktur charging. Untuk hybrid off-grid, tantangan ini lebih kompleks karena juga melibatkan regulasi energi terbarukan skala kecil dan microgrid lokal.

Dari sisi fiskal, pemerintah Indonesia telah mulai memberikan insentif bagi kendaraan listrik berupa PPN DTP, pengurangan bea masuk komponen, subsidi pembelian motor listrik, dan dukungan konversi motor BBM ke listrik. Namun untuk hybrid off-grid motorcycle, skema insentif masih belum spesifik. Padahal teknologi hybrid off-grid memiliki nilai strategis tinggi untuk daerah non-perkotaan yang belum memiliki charging infrastructure memadai. Oleh sebab itu, kebijakan subsidi berbasis wilayah sangat diperlukan, misalnya insentif khusus untuk kendaraan hybrid yang digunakan di pulau kecil atau daerah terpencil.

Aspek regulasi penting lainnya adalah standardisasi teknis dan keselamatan. Hybrid motorcycle membutuhkan standar nasional untuk baterai, konektor charging, interoperabilitas swapping system, EMS safety logic, proteksi thermal runaway, dan kompatibilitas renewable charging. Badan Standardisasi Nasional (BSN) dan Kementerian Perhubungan perlu mempercepat penyusunan SNI khusus kendaraan hybrid roda dua agar pasar memiliki kepastian standar teknis. Tanpa standardisasi, risiko ketidakseragaman produk akan menghambat pertumbuhan industri.

Tabel 9.4. Regulasi Utama Indonesia Terkait Kendaraan Hybrid dan Transisi Energi

Regulasi / Kebijakan	Ruang Lingkup
Perpres No. 55/2019	Percepatan kendaraan listrik nasional
RUEN	Arah transisi energi nasional
NDC Indonesia	Target pengurangan emisi karbon
Permen ESDM terkait KBLBB	Infrastruktur charging listrik
TKDN Kendaraan Listrik	Kandungan lokal industri nasional
SNI Baterai & Charging	Standar keselamatan teknis

Indonesia juga memiliki peluang besar melalui kebijakan hilirisasi industri baterai nasional. Sebagai salah satu produsen nickel terbesar dunia, Indonesia dapat menjadi pemain utama dalam rantai pasok baterai global. Jika kebijakan industrialisasi ini terintegrasi dengan program kendaraan

hybrid domestik, maka Indonesia tidak hanya menjadi pasar, tetapi juga produsen utama hybrid motorcycle dan komponennya. Ini akan menciptakan multiplier effect besar terhadap industri manufaktur nasional.

Dalam daerah terpencil, kebijakan energi desa dan elektrifikasi rural juga sangat relevan. Hybrid off-grid motorcycle dapat diintegrasikan ke program desa mandiri energi, di mana kendaraan tidak hanya menjadi alat transportasi, tetapi bagian dari ekosistem renewable microgrid desa. Untuk itu, regulasi energi desa perlu diperluas agar mendukung integrasi transportasi listrik berbasis energi lokal.

Tantangan regulasi terbesar ke depan adalah menjaga konsistensi kebijakan jangka panjang. Investasi industri kendaraan hybrid memerlukan kepastian regulasi minimal 10–20 tahun ke depan. Jika insentif berubah terlalu cepat atau aturan teknis tidak stabil, investor dan produsen akan menunda ekspansi. Oleh karena itu, roadmap regulasi harus jelas, bertahap, dan sinkron dengan target industrialisasi nasional.

Ke depan, Indonesia perlu bergerak menuju **integrated clean mobility policy framework**, yaitu kebijakan terpadu yang menyatukan transportasi, energi, industri, lingkungan, dan digitalisasi dalam satu sistem nasional. Dalam model ini, hybrid off-grid motorcycle dapat diposisikan sebagai solusi strategis untuk elektrifikasi inklusif, terutama di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur grid. Pendekatan ini akan membuat transisi energi tidak hanya bersifat urban-centric, tetapi menjangkau seluruh wilayah Nusantara.

Secara keseluruhan, kebijakan transisi energi dan regulasi Indonesia memainkan peran sentral dalam menentukan keberhasilan kendaraan hybrid off-grid. Dengan dukungan regulasi yang tepat—meliputi insentif fiskal, standarisasi teknis, integrasi energi terbarukan, dan kepastian industri—Indonesia memiliki peluang besar menjadi pemimpin regional dalam pengembangan mobilitas roda dua berkelanjutan berbasis energi bersih.

9.5 Strategi Komersialisasi dan Adopsi Pasar

Keberhasilan sepeda motor listrik hybrid off-grid sebagai inovasi teknologi tidak hanya ditentukan oleh keunggulan desain teknik dan efisiensi energi, tetapi juga oleh kemampuan teknologi tersebut menembus pasar secara luas, diterima konsumen, dan berkembang menjadi ekosistem bisnis yang berkelanjutan. Dalam transisi energi bersih, komersialisasi bukan sekadar proses menjual produk, melainkan transformasi inovasi menjadi solusi nyata yang dapat diakses masyarakat, didukung industri, dan diterima pasar dalam skala besar. Oleh karena itu, strategi komersialisasi dan adopsi pasar merupakan tahap kritis yang menentukan apakah

kendaraan hybrid off-grid akan menjadi niche technology terbatas atau berkembang menjadi arus utama transportasi masa depan. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa keberhasilan komersialisasi hybrid motorcycle bergantung pada integrasi antara strategi teknologi, model bisnis, kebijakan insentif, dan edukasi konsumen secara simultan .

Salah satu tantangan terbesar dalam komersialisasi kendaraan hybrid off-grid adalah persepsi harga awal yang tinggi. Dibanding sepeda motor bensin konvensional, kendaraan hybrid memiliki biaya produksi lebih mahal karena melibatkan baterai, motor listrik, inverter, EMS, dan integrasi renewable-compatible system. Meskipun total biaya siklus hidupnya lebih rendah, banyak konsumen tetap menilai kendaraan berdasarkan harga beli awal. Karena itu, strategi pasar harus mampu mengubah paradigma dari “harga beli” menjadi “nilai total kepemilikan” (total cost of ownership value proposition). Edukasi ekonomi jangka panjang menjadi sangat penting dalam tahap awal penetrasi pasar.

Pendekatan komersialisasi paling efektif biasanya dimulai dari **segmen pasar prioritas (early adopter segment)**. Untuk hybrid off-grid motorcycle, segmen awal yang potensial meliputi: armada logistik last-mile delivery, kendaraan operasional desa terpencil, ojek daring perkotaan, sektor pariwisata ramah lingkungan, serta armada pemerintahan untuk transportasi lokal. Segmen ini dipilih karena memiliki pola penggunaan intensif, sensitivitas tinggi terhadap biaya operasional, dan manfaat langsung dari efisiensi energi. Penetrasi kendaraan hybrid roda dua paling berhasil jika dimulai dari sektor armada komersial sebelum memasuki pasar ritel individu, karena efek demonstrasi dan volume utilisasi lebih tinggi .

Model bisnis juga menjadi faktor penentu keberhasilan pasar. Penjualan langsung kendaraan bukan satu-satunya opsi. Banyak produsen kini mengembangkan model **vehicle-as-a-service (Vaas)**, leasing baterai, battery subscription system, battery swapping membership, hingga pay-per-use mobility schemes. Untuk wilayah rural dan daerah terpencil Indonesia, model berbasis komunitas seperti koperasi kendaraan hybrid atau skema kepemilikan kolektif desa dapat menjadi solusi efektif untuk menurunkan hambatan investasi awal masyarakat.

Strategi pricing harus fleksibel dan adaptif. Salah satu pendekatan yang terbukti efektif adalah **low upfront cost + service subscription model**, di mana harga kendaraan ditekan serendah mungkin, sementara pendapatan produsen diperoleh dari layanan purna jual, battery service contract, software EMS update, dan renewable charging ecosystem subscription. Model ini membuat kendaraan lebih terjangkau bagi konsumen awal tanpa mengurangi profitabilitas jangka panjang perusahaan.



Gambar 9.5. Model Strategi Komersialisasi Hybrid Motorcycle dari Inovasi ke Pasar Massal

Dalam adopsi pasar, faktor kepercayaan konsumen sangat penting. Karena teknologi hybrid off-grid masih relatif baru, calon pengguna sering memiliki kekhawatiran terkait umur baterai, keandalan sistem elektronik, biaya perawatan, dan ketersediaan suku cadang. Oleh sebab itu, strategi pasar harus dilengkapi dengan garansi baterai jangka panjang, jaringan servis tersertifikasi, pusat layanan digital, dan ketersediaan spare part nasional. Kepercayaan adalah fondasi utama adopsi teknologi baru.

Aspek infrastruktur juga sangat memengaruhi kecepatan penetrasi pasar. Hybrid off-grid memang lebih fleksibel dibanding EV murni karena tidak sepenuhnya bergantung pada charging station publik, tetapi keberadaan solar charging hubs, battery swapping stations, dan rural microgrid charging centers tetap menjadi faktor penting untuk mempercepat penerimaan pasar. Oleh karena itu, strategi komersialisasi harus terintegrasi dengan pengembangan ekosistem energi pendukung.

Tabel 9.5. Faktor Kunci Keberhasilan Adopsi Pasar Hybrid Motorcycle

Faktor Strategis	Peran dalam Komersialisasi
Harga Awal Kompetitif	Menurunkan hambatan pembelian
Garansi Baterai	Meningkatkan kepercayaan konsumen
Infrastruktur Charging	Mendukung kenyamanan penggunaan
Jaringan Servis	Menjamin after-sales reliability
Edukasi Konsumen	Mengubah persepsi teknologi baru
Dukungan Insentif Pemerintah	Mempercepat penetrasi pasar

Di Indonesia, strategi komersialisasi harus mempertimbangkan keragaman geografis dan sosial-ekonomi masyarakat. Pasar urban seperti Jakarta, Bandung, dan Surabaya cenderung responsif terhadap inovasi teknologi dan layanan digital, sementara pasar rural membutuhkan

pendekatan berbasis manfaat praktis dan keekonomian langsung. Di daerah terpencil, kendaraan hybrid off-grid justru dapat diposisikan bukan sebagai teknologi premium, tetapi sebagai solusi mobilitas hemat energi yang paling relevan.

Kolaborasi multipihak menjadi strategi penting. Produsen kendaraan, perusahaan energi terbarukan, operator logistik, pemerintah daerah, koperasi desa, dan lembaga pembiayaan harus bekerja dalam satu ekosistem pasar. Misalnya, sebuah desa dapat memperoleh paket lengkap: hybrid motorcycles + solar charging station + battery maintenance service + skema cicilan koperasi. Pendekatan ekosistem seperti ini jauh lebih efektif dibanding penjualan unit kendaraan secara terpisah.

Dari sisi industri, strategi komersialisasi juga harus memperkuat kandungan lokal (TKDN). Semakin banyak komponen hybrid motorcycle diproduksi dalam negeri, semakin rendah biaya produksi, semakin kompetitif harga jual, dan semakin besar nilai tambah ekonomi nasional. Industri baterai, motor listrik, EMS controller, dan inverter lokal akan menjadi tulang punggung daya saing nasional.

Tantangan utama komersialisasi adalah fase “market transition gap”, yaitu periode ketika teknologi sudah siap tetapi pasar belum matang sepenuhnya. Pada fase ini, dukungan pemerintah berupa subsidi adopsi awal, tax holiday industri, dan pembiayaan hijau sangat penting untuk menjembatani kesenjangan antara inovasi dan pasar massal. Tanpa dukungan fase transisi ini, banyak teknologi unggul gagal berkembang secara komersial.

Ke depan, adopsi pasar akan bergerak menuju **smart connected mobility ecosystem**, di mana hybrid motorcycle tidak lagi dijual sekadar sebagai kendaraan, tetapi sebagai bagian dari platform mobilitas digital terintegrasi. Pengguna dapat mengakses kendaraan, charging, battery swapping, maintenance, dan energy analytics melalui satu aplikasi terpadu. Model ini akan mempercepat adopsi generasi muda yang semakin terbiasa dengan layanan berbasis digital.

Secara keseluruhan, strategi komersialisasi dan adopsi pasar hybrid off-grid motorcycle harus dibangun di atas empat pilar utama: harga terjangkau, model bisnis inovatif, kepercayaan konsumen, dan ekosistem pendukung yang kuat. Dengan pendekatan ini, kendaraan hybrid off-grid tidak hanya berpotensi sukses secara teknologi, tetapi juga menjadi kekuatan pasar nyata yang mendorong transformasi mobilitas Indonesia menuju era energi bersih dan berkelanjutan.

BAB 10

MASA DEPAN INOVASI DAN ARAH PENGEMBANGAN TEKNOLOGI HYBRID MOTORCYCLE

10.1 Emerging Technologies dalam Hybrid Motorcycle

Perkembangan teknologi sepeda motor listrik hybrid off-grid memasuki fase baru yang ditandai oleh lahirnya berbagai inovasi disruptif yang mengubah paradigma desain, operasi, dan integrasi kendaraan masa depan. Jika generasi awal hybrid motorcycle berfokus pada elektrifikasi dasar dan efisiensi energi, maka generasi berikutnya bergerak menuju kendaraan cerdas, adaptif, terhubung, modular, dan semakin terintegrasi dengan ekosistem energi terbarukan. Emerging technologies dalam hybrid motorcycle bukan sekadar peningkatan komponen individual, tetapi transformasi menyeluruh terhadap arsitektur kendaraan, sumber energi, kecerdasan kontrol, material konstruksi, hingga hubungan kendaraan dengan jaringan energi dan data digital. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa masa depan hybrid motorcycle akan ditentukan oleh kemampuan integrasi lintas teknologi—baterai generasi baru, AI control, smart materials, IoT mobility, dan renewable energy intelligence—ke dalam satu sistem mobilitas cerdas terpadu.

Salah satu inovasi paling revolusioner adalah hadirnya **solid-state battery technology**, yang diproyeksikan menggantikan dominasi lithium-ion konvensional dalam dekade mendatang. Solid-state battery menawarkan densitas energi lebih tinggi, waktu pengisian lebih cepat, umur pakai lebih panjang, dan risiko thermal runaway jauh lebih rendah. Untuk hybrid motorcycle, teknologi ini sangat penting karena keterbatasan ruang baterai pada kendaraan roda dua menuntut solusi penyimpanan energi yang padat namun ringan. Solid-state battery generasi prototipe telah mencapai peningkatan energy density hingga 2 kali lipat dibanding Li-ion konvensional, dengan pengurangan berat sistem hingga 30%.

Selain baterai, teknologi **supercapacitor hybrid energy buffer system** juga berkembang pesat. Dalam sistem ini, supercapacitor digunakan bersama baterai untuk menangani lonjakan daya tinggi saat akselerasi dan regenerative braking. Hasilnya adalah umur baterai lebih panjang, efisiensi charge-discharge meningkat, dan performa kendaraan lebih responsif. Integrasi hybrid battery-supercapacitor kini menjadi tren utama untuk kendaraan roda dua performa tinggi dan armada logistik urban.

Di bidang motor penggerak, muncul inovasi **axial flux motor generasi baru**, yang menawarkan torque density jauh lebih tinggi dibanding motor radial konvensional. Motor jenis ini lebih ringkas, ringan, dan efisien, sehingga sangat cocok untuk kendaraan roda dua yang membutuhkan rasio daya terhadap berat tinggi. Beberapa produsen global mulai mengembangkan motor axial flux ultra-thin untuk kendaraan urban hybrid dengan desain compact drivetrain architecture.

Transformasi besar juga terjadi pada sistem kontrol kendaraan melalui penerapan **Artificial Intelligence-Based Energy Management System (AI-EMS)**. Jika generasi sebelumnya menggunakan rule-based EMS atau ECMS statis, sistem AI terbaru mampu mempelajari pola berkendara pengguna, memprediksi kebutuhan energi rute, menyesuaikan strategi distribusi daya real-time, dan mengoptimalkan efisiensi berdasarkan data historis serta kondisi lingkungan. AI-EMS menjadikan kendaraan hybrid semakin adaptif dan personal.



Gambar 10.1. Emerging Technologies Roadmap pada Hybrid Motorcycle Masa Depan

Di bidang konektivitas, teknologi **Vehicle-to-Everything (V2X)** mulai diadaptasi untuk kendaraan roda dua. Dengan V2X, hybrid motorcycle dapat berkomunikasi dengan charging station, microgrid renewable, kendaraan lain, infrastruktur jalan, hingga sistem manajemen lalu lintas kota. Hal ini memungkinkan optimasi rute berbasis energi, reservasi charging otomatis, prediksi kemacetan, dan distribusi daya pintar di jaringan energi lokal.

Emerging technology lain yang sangat menjanjikan adalah **wireless charging dynamic pad systems**, yaitu pengisian daya nirkabel tanpa kabel

fisik. Pada tahap awal, teknologi ini akan diterapkan di parking dock atau battery swap hub, tetapi ke depan berpotensi memungkinkan charging saat kendaraan berhenti di lampu merah atau parkir singkat. Bagi hybrid off-grid systems, wireless charging berbasis solar microgrid akan menjadi revolusi besar dalam kenyamanan pengguna.

Di sektor material, inovasi **lightweight smart composite materials** semakin penting. Material komposit berbasis carbon fiber hybrid polymer, graphene-reinforced thermoplastic, dan bio-composite structural panels memungkinkan kendaraan menjadi lebih ringan namun tetap kuat. Pengurangan berat 10–15% secara langsung meningkatkan efisiensi energi dan driving range. Bahkan beberapa material baru memiliki kemampuan self-healing micro-crack, memperpanjang umur rangka kendaraan.

Tabel 10.1. Teknologi Masa Depan Utama pada Hybrid Motorcycle

Teknologi Baru	Dampak terhadap Sistem Hybrid
Solid-State Battery	Kapasitas tinggi, aman, ringan
Supercapacitor Buffer	Regenerative braking lebih efisien
Axial Flux Motor	Torsi tinggi, motor lebih ringkas
AI-Based EMS	Kontrol energi adaptif real-time
Wireless Charging	Pengisian lebih praktis dan fleksibel
Smart Composite Material	Bobot ringan, efisiensi meningkat
V2X Connectivity	Integrasi kendaraan dengan ekosistem digital

Emerging technologies juga membuka jalan menuju konsep **vehicle-integrated renewable harvesting**, yaitu kendaraan yang mampu menghasilkan sebagian energinya sendiri melalui panel surya fleksibel bodi kendaraan, regenerative suspension harvesting, dan thermoelectric waste heat recovery. Walaupun kontribusi energinya masih kecil saat ini, tren ini akan menjadi penting untuk kendaraan off-grid di masa depan.

Di Indonesia, emerging technologies harus disesuaikan dengan kebutuhan lokal. Teknologi canggih tidak cukup hanya maju secara teknis, tetapi harus tahan iklim tropis, adaptif terhadap jalan rural, hemat biaya, dan mudah dipelihara. Misalnya, solid-state battery tropical-grade thermal stability sangat penting untuk suhu tinggi Indonesia. Demikian pula AI-EMS perlu dilatih dengan driving pattern khas Indonesia, bukan sekadar data Eropa atau Jepang.

Dari perspektif industri nasional, peluang terbesar Indonesia terletak pada pengembangan baterai generasi baru, AI mobility software, dan sistem renewable charging modular. Dengan kekuatan sumber daya nickel domestik dan pertumbuhan startup digital yang pesat, Indonesia memiliki

potensi menjadi pusat inovasi hybrid motorcycle Asia Tenggara jika roadmap riset nasional diarahkan dengan tepat.

Tantangan utama emerging technologies adalah biaya adopsi awal tinggi, kesiapan industri manufaktur, dan keterbatasan infrastruktur pengujian. Banyak teknologi baru masih berada pada tahap pilot-scale dan belum ekonomis untuk produksi massal. Oleh karena itu, sinergi antara universitas, industri, pemerintah, dan startup sangat diperlukan untuk mempercepat transisi dari laboratorium ke pasar.

Ke depan, seluruh inovasi ini akan mengarah pada lahirnya **autonomous adaptive hybrid motorcycle ecosystem**, yaitu kendaraan roda dua yang tidak hanya hemat energi, tetapi mampu berpikir, belajar, berkomunikasi, dan beradaptasi secara mandiri dengan lingkungan. Dalam ekosistem ini, kendaraan hybrid tidak lagi sekadar alat transportasi, melainkan node cerdas dalam jaringan energi dan mobilitas masa depan.

Secara keseluruhan, emerging technologies membuka era baru bagi hybrid motorcycle—era di mana kendaraan menjadi lebih aman, lebih pintar, lebih efisien, lebih ringan, dan lebih terhubung. Inovasi-inovasi ini akan menjadi fondasi utama transformasi transportasi roda dua menuju sistem mobilitas bersih dan cerdas yang akan mendukung visi Indonesia Emas 2045.

10.2 AI-Driven Autonomous Energy Management

Perkembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid generasi masa depan sangat ditentukan oleh kecanggihan sistem manajemen energi yang mengendalikan aliran daya antar subsistem kendaraan. Jika pada generasi awal hybrid motorcycle distribusi energi dilakukan melalui rule-based control atau algoritma statis seperti ECMS, maka generasi berikutnya bergerak menuju **AI-Driven Autonomous Energy Management System (AI-AEMS)**, yaitu sistem cerdas yang mampu mengambil keputusan energi secara mandiri, adaptif, prediktif, dan real-time berdasarkan kondisi kendaraan, pola berkendara, lingkungan jalan, serta data historis pengguna. Teknologi ini merupakan lompatan besar dari sekadar kendaraan hemat energi menuju kendaraan yang mampu “berpikir” dan mengoptimalkan dirinya sendiri secara berkelanjutan. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa AI-AEMS akan menjadi inti kecerdasan kendaraan hybrid masa depan, karena efisiensi tertinggi hanya dapat dicapai melalui sistem kontrol yang belajar dari pengalaman nyata operasi kendaraan.

Pada sistem hybrid konvensional, distribusi energi biasanya diatur berdasarkan ambang batas tetap: misalnya motor listrik aktif pada kecepatan rendah, ICE pendukung aktif saat SOC baterai turun di bawah batas tertentu, dan regenerative braking bekerja saat deselerasi.

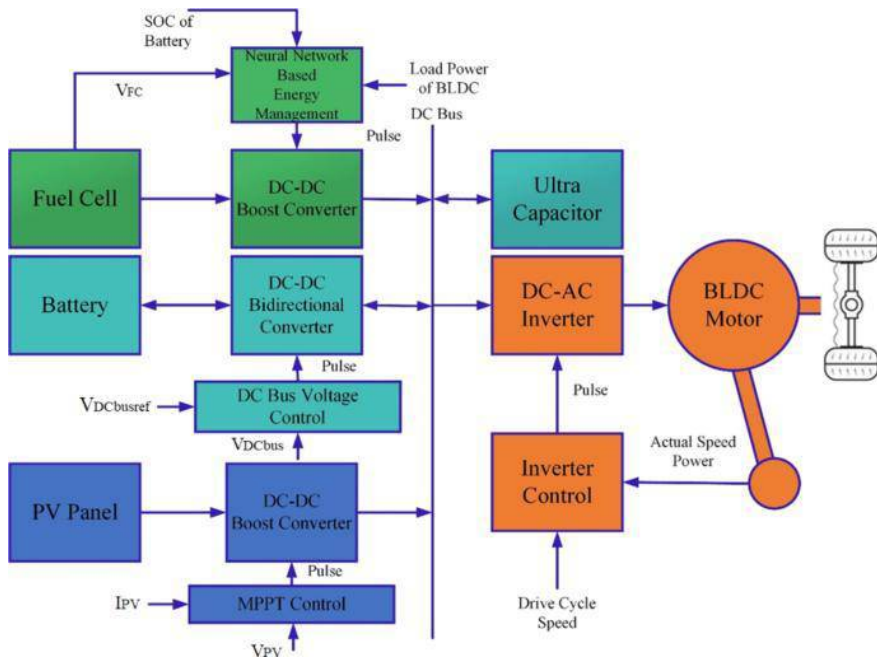
Pendekatan ini cukup efektif tetapi tidak fleksibel terhadap variasi kondisi nyata. Sebaliknya, AI-AEMS menggunakan machine learning, deep learning, reinforcement learning, dan predictive analytics untuk membuat keputusan energi yang lebih kompleks dan adaptif. Sistem ini tidak hanya merespons kondisi saat ini, tetapi juga memprediksi kondisi beberapa menit atau bahkan beberapa kilometer ke depan.

Sebagai contoh, jika AI mendeteksi bahwa kendaraan akan memasuki jalur menanjak berdasarkan GPS topography data, sistem dapat lebih awal mengalihkan distribusi energi untuk menyiapkan daya tambahan dari supercapacitor dan mempertahankan SOC baterai optimal. Jika sistem mengetahui akan ada turunan panjang setelah tanjakan, AI dapat menahan penggunaan baterai karena memperkirakan regenerative recovery tinggi akan segera tersedia. Pendekatan prediktif semacam ini tidak mungkin dilakukan oleh EMS konvensional berbasis aturan statis. Reinforcement learning-based EMS mampu meningkatkan efisiensi energi hybrid motorcycle hingga 12–18% dibanding rule-based EMS dalam skenario driving cycle dinamis perkotaan dan mixed terrain .

Salah satu komponen utama AI-AEMS adalah **data fusion intelligence layer**, yaitu modul yang menggabungkan data dari berbagai sensor: SOC baterai, suhu baterai, kecepatan kendaraan, torsi motor, kondisi jalan, GPS elevation map, cuaca, beban kendaraan, serta pola historis pengendara. Data ini diproses secara simultan untuk menghasilkan keputusan energi paling optimal setiap detik. Dengan data fusion, kendaraan dapat memahami kondisi operasional secara lebih komprehensif dibanding sistem kontrol tradisional.

Model AI yang paling banyak dikembangkan saat ini untuk EMS adalah deep neural network predictor, fuzzy-neuro hybrid controller, reinforcement learning policy optimizer, dan model predictive control berbasis AI. Reinforcement learning sangat menjanjikan karena sistem belajar melalui trial-and-error virtual simulation hingga menemukan strategi energi terbaik dalam berbagai kondisi. Seiring waktu, kendaraan dapat menjadi semakin efisien karena algoritmanya terus belajar dari pengalaman penggunaan nyata.

AI-AEMS juga memungkinkan munculnya konsep **self-learning rider personalization**, yaitu kendaraan yang mempelajari gaya berkendara tiap pengguna. Pengendara agresif dengan akselerasi tinggi akan mendapatkan strategi distribusi energi berbeda dibanding pengendara konservatif yang berkendara halus. Dengan demikian, kendaraan menyesuaikan karakter kontrol energi secara individual, menciptakan pengalaman berkendara yang lebih efisien dan personal.



Gambar 10.2. Arsitektur AI-Driven Autonomous Energy Management System pada Hybrid Motorcycle

Dalam sistem off-grid system, AI-AEMS memiliki peran tambahan yang sangat penting: mengelola interaksi antara kendaraan dan sumber energi terbarukan. Sistem dapat memprediksi intensitas radiasi surya, mengoptimalkan jadwal charging dari solar PV, memilih waktu terbaik untuk battery swapping, serta mengatur prioritas penggunaan energi berdasarkan ketersediaan renewable power. Ini menjadikan hybrid motorcycle benar-benar adaptif terhadap ekosistem energi lokal.

Keunggulan lain AI-AEMS adalah kemampuan **battery degradation-aware control**, yaitu strategi distribusi energi yang mempertimbangkan kesehatan baterai jangka panjang. Sistem AI dapat memilih pola charge-discharge yang meminimalkan stres termal dan elektro-kimia, sehingga umur baterai bertambah signifikan. Ini sangat penting karena baterai adalah komponen termahal dalam hybrid motorcycle.

Di Indonesia, AI-AEMS sangat relevan karena kondisi geografis dan pola berkendara sangat beragam. Sistem AI dapat dilatih khusus menggunakan data Indonesia: pola lalu lintas Jakarta, jalur pegunungan Papua, rute pedesaan Kalimantan, hingga kondisi pulau kecil Nusa Tenggara. Dengan local-trained AI models, kendaraan hybrid nasional akan jauh lebih adaptif dibanding sistem impor berbasis data luar negeri.

Tabel 10.2. Fungsi Utama AI-AEMS pada Hybrid Motorcycle Masa Depan

Fungsi AI-AEMS	Dampak pada Sistem
Predictive Energy Allocation	Distribusi energi lebih efisien
Route-Aware Energy Forecasting	Optimasi energi berbasis rute
Rider Behavior Learning	Adaptasi ke gaya berkendara pengguna
Battery Health Prediction	Memperpanjang umur baterai
Renewable Charging Optimization	Maksimalkan energi surya
Real-Time Fault Detection	Meningkatkan keamanan sistem

Tantangan utama implementasi AI-AEMS adalah kebutuhan komputasi real-time tinggi, kualitas data sensor, keamanan siber, dan reliabilitas algoritma dalam kondisi ekstrem. Sistem AI harus tetap stabil meskipun sensor gagal sebagian, jaringan komunikasi terputus, atau data input tidak sempurna. Karena itu, hybrid fail-safe architecture wajib diterapkan agar kendaraan tetap aman meskipun AI mengalami gangguan.

Dari perspektif industri, AI-AEMS membuka peluang besar bagi Indonesia dalam pengembangan software mobility ecosystem. Jika baterai dan motor adalah jantung fisik kendaraan, maka AI-AEMS adalah otak digitalnya. Negara yang menguasai software EMS cerdas akan memiliki keunggulan strategis besar dalam industri kendaraan masa depan. Startup lokal, universitas, dan pusat riset AI nasional memiliki peluang besar memasuki sektor ini.

Ke depan, AI-AEMS akan berkembang menuju **collective swarm learning mobility intelligence**, di mana ribuan kendaraan hybrid saling berbagi data anonim melalui cloud platform. Setiap kendaraan belajar dari pengalaman kendaraan lain, sehingga seluruh armada menjadi semakin pintar secara kolektif. Ini akan menciptakan ekosistem kendaraan hybrid yang terus berevolusi tanpa harus mengganti hardware fisik.

Secara keseluruhan, AI-Driven Autonomous Energy Management merupakan fondasi utama generasi berikutnya hybrid motorcycle. Teknologi ini mentransformasi kendaraan dari mesin hemat energi menjadi sistem cerdas yang mampu berpikir, belajar, memprediksi, dan beradaptasi. Dalam visi Indonesia 2045, AI-AEMS akan menjadi tulang punggung mobilitas roda dua cerdas yang efisien, rendah emisi, dan terintegrasi penuh dengan sistem energi terbarukan nasional.

10.3 Smart Grid Integration dan V2G Potential

Perkembangan sepeda motor listrik hybrid off-grid generasi masa depan tidak lagi memosisikan kendaraan hanya sebagai konsumen energi, tetapi sebagai entitas aktif dalam ekosistem energi cerdas yang mampu berinteraksi dua arah dengan jaringan listrik. Paradigma ini dikenal sebagai **Smart Grid Integration**, di mana kendaraan hybrid menjadi bagian dari sistem energi terdistribusi yang saling terhubung dengan sumber energi terbarukan, microgrid lokal, battery storage network, dan infrastruktur digital. Dalam kerangka ini, konsep **Vehicle-to-Grid (V2G)** menjadi salah satu inovasi paling revolusioner karena memungkinkan kendaraan tidak hanya menerima energi, tetapi juga mengirimkan kembali energi ke jaringan saat diperlukan. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa integrasi smart grid dan V2G akan mentransformasi hybrid motorcycle dari alat transportasi menjadi node energi bergerak yang strategis dalam sistem kelistrikan masa depan.

Secara sederhana, V2G adalah mekanisme di mana baterai kendaraan dapat berfungsi sebagai penyimpan energi sementara yang terhubung dengan grid atau microgrid, lalu menyalurkan listrik kembali ke jaringan saat beban puncak terjadi. Pada kendaraan hybrid off-grid, potensi ini menjadi lebih menarik karena sistem baterainya terintegrasi dengan renewable charging seperti solar PV, sehingga kendaraan dapat menjadi penyimpan energi surya bergerak. Jika ribuan hybrid motorcycles terhubung ke jaringan, total kapasitas penyimpanan kolektifnya dapat menjadi sumber stabilisasi grid yang sangat besar.

Dalam sistem smart grid modern, kendaraan hybrid dapat menjalankan beberapa mode operasi energi:

Grid Charging Mode – kendaraan menerima energi dari jaringan saat beban rendah.

Renewable Charging Mode – kendaraan mengisi daya dari solar/wind microgrid lokal.

Vehicle-to-Home (V2H) – kendaraan memasok energi ke rumah saat listrik padam.

Vehicle-to-Building (V2B) – kendaraan menyuplai energi ke fasilitas komersial kecil.

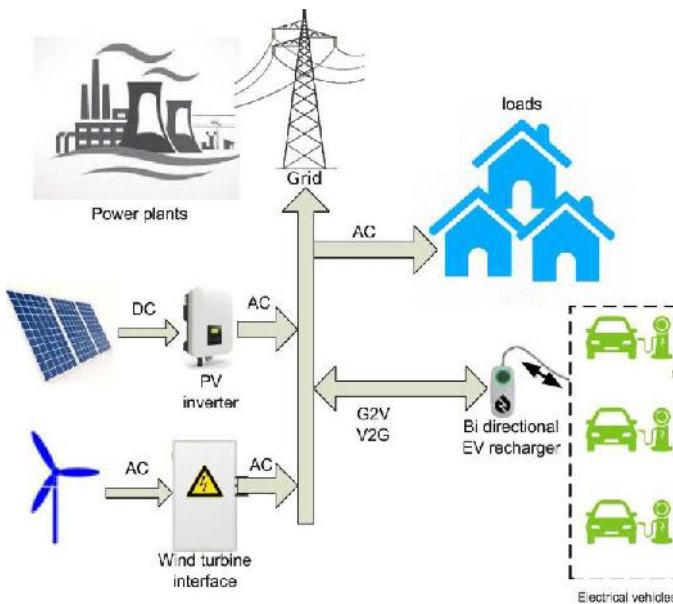
Vehicle-to-Grid (V2G) – kendaraan menyalurkan energi kembali ke jaringan nasional/lokal.

Untuk sepeda motor hybrid off-grid, model paling realistis pada tahap awal adalah V2H dan V2Microgrid, karena kapasitas baterainya relatif kecil dibanding mobil listrik. Namun dalam skala populasi besar, jutaan unit kendaraan roda dua di Indonesia, akumulasi kapasitasnya menjadi sangat

signifikan. Armada 1 juta sepeda motor hybrid dengan kapasitas rata-rata 4 kWh dapat menyediakan potensi distributed storage sebesar 4 GWh, cukup untuk menopang stabilitas microgrid regional skala besar.

Salah satu manfaat utama smart grid integration adalah **load balancing capability**. Pada jam siang hari, ketika produksi energi surya tinggi tetapi konsumsi rendah, kendaraan hybrid dapat mengisi daya. Pada malam hari saat beban puncak meningkat, sebagian energi dapat dikembalikan ke grid. Mekanisme ini membantu meratakan beban sistem listrik nasional dan mengurangi kebutuhan pembangkit cadangan berbasis fosil.

Teknologi inti yang memungkinkan V2G adalah **bidirectional charger system**, yaitu charger yang mampu mengalirkan listrik dua arah dengan kontrol sinkronisasi frekuensi dan tegangan grid. Sistem ini harus dilengkapi smart inverter, communication protocol secure gateway, dan AI-based grid response controller agar aliran energi aman dan stabil. Pada hybrid motorcycle generasi depan, charger dua arah diprediksi akan menjadi fitur standar untuk kendaraan premium dan armada komersial.



Gambar 10.3. Konsep Integrasi Smart Grid dan Vehicle-to-Grid pada Hybrid Motorcycle

Dalam sistem off-grid rural Indonesia, smart grid integration memiliki dimensi sosial yang sangat penting. Di desa terpencil yang menggunakan solar microgrid, kendaraan hybrid dapat menjadi cadangan energi bergerak

untuk rumah tangga, klinik desa, sekolah, atau fasilitas darurat saat listrik lokal terganggu. Artinya, kendaraan tidak hanya menjadi alat mobilitas, tetapi juga aset energi komunitas. Ini sangat relevan untuk wilayah kepulauan dan daerah rawan bencana.

Selain stabilisasi grid, V2G juga membuka peluang ekonomi baru melalui **energy trading ecosystem**. Pemilik kendaraan dapat memperoleh insentif finansial dengan menjual listrik kembali ke jaringan saat harga energi tinggi. Model ini menciptakan konsep prosumer mobility, yaitu pengguna kendaraan sekaligus produsen energi. Dalam masa depan, kendaraan hybrid dapat menjadi sumber pendapatan pasif tambahan bagi pemiliknya.

Tabel 10.3. Manfaat Smart Grid Integration dan V2G Hybrid Motorcycle

Fungsi Smart Grid	Dampak Positif
Peak Load Support	Mengurangi tekanan beban puncak listrik
Renewable Buffering	Menyimpan surplus energi surya
Emergency Backup Supply	Cadangan listrik saat padam
Grid Stabilization	Menjaga frekuensi dan tegangan sistem
Energy Trading	Potensi pendapatan bagi pengguna
Rural Microgrid Support	Mendukung elektrifikasi desa terpencil

Indonesia memiliki potensi sangat besar dalam penerapan smart grid kendaraan roda dua karena populasi sepeda motor yang sangat tinggi. Jika hanya 5% dari total populasi sepeda motor nasional terhubung ke sistem V2G, kapasitas distributed storage nasional dapat melampaui beberapa pembangkit listrik skala menengah. Ini menjadikan Indonesia kandidat ideal untuk menjadi pionir V2G roda dua di dunia.

Namun, tantangan implementasi masih besar. Infrastruktur smart grid nasional Indonesia belum sepenuhnya siap untuk komunikasi dua arah skala besar. Standar interoperabilitas charger, protokol komunikasi kendaraan-grid, keamanan siber energi, serta sistem tarif energi dinamis masih perlu dikembangkan. Tanpa fondasi digital grid yang matang, V2G sulit diterapkan secara luas.

Tantangan teknis lain adalah dampak V2G terhadap degradasi baterai. Siklus charge-discharge tambahan akibat V2G dapat mempercepat penuaan baterai jika tidak dikelola dengan AI battery health protection system. Karena itu, algoritma V2G masa depan harus mampu menyeimbangkan manfaat grid support dengan umur baterai kendaraan.

Ke depan, sistem ini akan berkembang menuju **Autonomous Energy Swarm Network**, yaitu jaringan kendaraan hybrid yang secara otomatis berkoordinasi satu sama lain dan dengan grid nasional untuk menyalurkan

energi sesuai kebutuhan tanpa intervensi manual. Dalam sistem ini, kendaraan hybrid menjadi elemen aktif dari internet of energy ecosystem nasional.

Bagi visi Indonesia 2045, smart grid integration dan V2G memiliki makna strategis lebih dari sekadar inovasi teknologi. Ini adalah fondasi bagi terciptanya sistem energi nasional yang terdesentralisasi, resilien, rendah karbon, dan inklusif. Hybrid motorcycle dapat menjadi jembatan antara sektor transportasi dan sektor energi, menciptakan simbiosis baru antara mobilitas dan ketahanan energi bangsa.

Secara keseluruhan, Smart Grid Integration dan V2G Potential menandai transformasi mendasar peran kendaraan hybrid: dari pengguna energi pasif menjadi aktor aktif dalam sistem energi masa depan. Dengan integrasi ini, sepeda motor hybrid off-grid akan menjadi bagian penting dari infrastruktur energi cerdas Indonesia, memperkuat transisi menuju ekosistem transportasi dan energi yang benar-benar berkelanjutan.

10.4 Riset Masa Depan dan Tantangan Teknologi

Perjalanan menuju masa depan sepeda motor listrik hybrid off-grid yang sepenuhnya cerdas, efisien, rendah emisi, dan terintegrasi dengan energi terbarukan masih menghadapi berbagai tantangan ilmiah dan teknologis yang kompleks. Meskipun perkembangan teknologi hybrid motorcycle telah menunjukkan kemajuan pesat dalam satu dekade terakhir, banyak aspek fundamental masih membutuhkan riset lanjutan agar sistem ini benar-benar matang untuk adopsi massal global. Masa depan kendaraan hybrid tidak hanya bergantung pada penyempurnaan komponen yang sudah ada, tetapi juga pada terobosan teknologi baru yang mampu menjawab keterbatasan saat ini—mulai dari baterai, sistem kontrol AI, material kendaraan, integrasi grid, hingga keberlanjutan rantai pasok industri. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa riset masa depan harus diarahkan pada inovasi lintas disiplin, karena tantangan hybrid motorcycle masa depan tidak lagi bersifat sektoral, melainkan sistemik dan multidimensional.

Salah satu bidang riset paling kritis adalah **teknologi baterai generasi berikutnya**. Saat ini, lithium-ion masih menjadi tulang punggung penyimpanan energi, tetapi teknologi ini menghadapi keterbatasan densitas energi, umur siklus, kecepatan charging, biaya material kritis, dan risiko thermal runaway. Solid-state battery, sodium-ion battery, lithium-sulfur battery, dan metal-air battery menjadi kandidat utama riset masa depan. Namun masing-masing masih memiliki tantangan teknis serius, seperti stabilitas elektrolit padat, degradasi siklus cepat, serta biaya manufaktur tinggi. Untuk hybrid motorcycle, tantangan ini semakin besar karena

kebutuhan desain harus memenuhi standar bobot ringan, ukuran kompak, dan keamanan tinggi.

Bidang riset kedua yang sangat penting adalah **AI energy intelligence and autonomous control robustness**. Meskipun AI-AEMS telah menunjukkan hasil menjanjikan, masih terdapat masalah pada reliability under uncertainty, explainability AI decisions, dan cybersecurity resilience. Sistem AI harus mampu membuat keputusan energi yang aman bahkan dalam kondisi sensor error, data tidak lengkap, atau gangguan jaringan komunikasi. Penelitian frontier kini berfokus pada trustworthy AI for mobility systems, yaitu AI yang transparan, dapat diverifikasi, dan memiliki fail-safe behavior untuk kendaraan publik. Lebih dari 60% penelitian hybrid EMS generasi baru kini bergeser dari sekadar optimasi efisiensi menuju resilience-aware intelligent control systems.

Tantangan berikutnya adalah **thermal management under extreme climate condition**. Pada negara tropis seperti Indonesia, suhu lingkungan tinggi mempercepat degradasi baterai, menurunkan efisiensi motor listrik, dan meningkatkan losses inverter. Sistem pendinginan masa depan harus lebih ringan, hemat energi, dan adaptif. Riset terbaru mengarah pada phase-change material cooling, liquid microchannel battery cooling, serta nano-fluid thermal interface systems untuk kendaraan ringan.

Selain itu, terdapat kebutuhan besar akan riset **lightweight sustainable materials**. Material kendaraan masa depan harus ringan, kuat, tahan korosi tropis, murah diproduksi, dan ramah lingkungan. Tantangannya adalah menemukan keseimbangan antara performa mekanik tinggi dengan jejak karbon rendah. Material berbasis graphene composite, bio-based polymer composite, dan recyclable structural thermoplastics menjadi frontier material research untuk hybrid motorcycle generasi mendatang.

Salah satu frontier research yang sedang berkembang pesat adalah **digital twin hybrid motorcycle systems**. Digital twin adalah replika virtual real-time kendaraan yang terus diperbarui berdasarkan data aktual operasional. Teknologi ini memungkinkan prediksi kegagalan komponen sebelum terjadi, optimasi strategi energi personal, simulasi kondisi ekstrem, dan maintenance berbasis prediksi. Tantangan risetnya terletak pada integrasi data real-time skala besar dengan model fisika kendaraan yang akurat namun ringan secara komputasi.



Gambar 10.4. Peta Tantangan Teknologi dan Frontier Research Hybrid Motorcycle Masa Depan

Di sisi energi, tantangan besar lainnya adalah **renewable integration variability problem**. Karena hybrid off-grid bergantung pada energi surya atau sumber terbarukan lain, fluktuasi cuaca menyebabkan ketidakstabilan pasokan energi. Penelitian masa depan difokuskan pada predictive renewable forecasting AI, adaptive charging scheduling, dan distributed storage balancing agar kendaraan tetap andal meskipun energi renewable berubah-ubah.

Tabel 10.4. Bidang Riset Masa Depan Utama dan Tantangan Teknologinya

Bidang Riset	Tantangan Utama
Baterai Generasi Baru	Densitas energi vs keamanan
AI Autonomous EMS	Keandalan dan transparansi AI
Thermal Management	Pendinginan efisien di iklim tropis
Material Ringan	Kekuatan tinggi + ramah lingkungan
V2G Integration	Interoperabilitas grid dan keamanan data
Digital Twin Vehicle	Sinkronisasi real-time model fisik-digital
Renewable Forecasting	Variabilitas energi surya dan cuaca

Di Indonesia, tantangan riset memiliki dimensi tambahan: adaptasi teknologi terhadap kondisi geografis kepulauan, infrastruktur energi tidak merata, iklim tropis lembap, dan variasi kualitas jalan ekstrem. Oleh karena itu, Indonesia memerlukan agenda riset nasional yang spesifik lokal, bukan hanya mengadopsi model penelitian dari negara empat musim atau negara dengan infrastruktur listrik matang. Hybrid motorcycle untuk Indonesia harus dirancang berdasarkan realitas Nusantara.

Riset masa depan juga harus menjawab tantangan **circular economy engineering**, terutama terkait daur ulang baterai, pemulihan material langka, dan desain kendaraan modular yang mudah dibongkar. Teknologi masa depan tidak lagi cukup efisien secara energi; ia harus juga efisien secara material dan bertanggung jawab secara ekologis.

Dari sisi industri, salah satu tantangan besar adalah gap antara laboratorium dan manufaktur massal. Banyak inovasi baterai, AI controller, atau material baru berhasil di laboratorium tetapi gagal saat scale-up produksi. Oleh sebab itu, riset masa depan harus lebih banyak melibatkan pilot-scale demonstration dan industrial co-development agar inovasi tidak berhenti pada publikasi ilmiah saja.

Tantangan lain yang semakin penting adalah **cybersecurity in connected mobility systems**. Semakin cerdas dan terhubung kendaraan hybrid, semakin besar risiko serangan siber terhadap sistem energi, kontrol kendaraan, atau data pengguna. Maka riset masa depan harus memasukkan cybersecurity-by-design sebagai bagian integral desain hybrid motorcycle, bukan tambahan belakangan.

Ke depan, salah satu arah paling ambisius adalah pengembangan **self-evolving hybrid mobility platforms**, yaitu kendaraan yang tidak hanya belajar dari data, tetapi mampu memperbarui algoritma kontrol, optimasi energi, dan diagnostik sistem secara mandiri selama masa operasional. Ini akan menjadikan kendaraan hybrid masa depan sebagai sistem hidup digital yang terus berkembang.

Bagi Indonesia menuju 2045, keberhasilan riset masa depan sangat bergantung pada sinergi triple helix: universitas, industri, dan pemerintah. Tanpa kolaborasi ini, Indonesia berisiko hanya menjadi pasar pengguna teknologi asing. Sebaliknya, dengan investasi riset strategis yang tepat, Indonesia dapat menjadi pusat inovasi hybrid motorcycle tropis dunia.

Secara keseluruhan, riset masa depan dan tantangan teknologi adalah fondasi penentu apakah hybrid motorcycle akan berhenti sebagai inovasi transisi atau berkembang menjadi tulang punggung mobilitas global abad ke-21. Tantangan yang ada memang besar, tetapi justru di situlah ruang inovasi terbesar terbuka. Masa depan hybrid motorcycle akan ditentukan oleh keberanian menjawab pertanyaan ilmiah yang belum terpecahkan hari ini.

10.5 Roadmap Implementasi Nasional Menuju Net Zero Transport

Roadmap implementasi nasional menuju Net Zero Transport merupakan tahap strategis terakhir yang menentukan bagaimana seluruh inovasi teknologi, hasil riset, kebijakan energi, dan kesiapan industri dapat diwujudkan menjadi transformasi nyata sistem transportasi Indonesia.

Dalam sepeda motor listrik hybrid off-grid, roadmap ini berfungsi sebagai peta jalan integratif yang menghubungkan visi teknologi masa depan dengan langkah implementasi konkret hingga tahun 2045. Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan populasi sepeda motor terbesar di Asia Tenggara, memiliki tantangan sekaligus peluang unik untuk menjadikan hybrid motorcycle sebagai tulang punggung transisi transportasi rendah karbon. Dalam naskah dasar buku ini ditegaskan bahwa pencapaian Net Zero Transport tidak dapat dicapai hanya melalui inovasi teknologi, tetapi memerlukan sinkronisasi jangka panjang antara kebijakan nasional, investasi industri, infrastruktur energi, dan perubahan perilaku masyarakat

Net Zero Transport sendiri adalah kondisi ketika total emisi karbon dari sektor transportasi ditekan seminimal mungkin dan sisanya diimbangi melalui offset atau penyerapan karbon, sehingga emisi bersih mendekati nol. Untuk Indonesia, sektor transportasi merupakan salah satu penyumbang emisi terbesar setelah energi dan industri, dengan dominasi signifikan berasal dari kendaraan roda dua berbahan bakar fosil. Oleh karena itu, transformasi kendaraan roda dua menjadi hybrid renewable-integrated system merupakan strategi dengan dampak paling luas dan cepat terhadap pengurangan emisi nasional.

Roadmap menuju 2045 harus dibangun dalam beberapa fase bertahap. **Fase pertama (2025–2030)** adalah fase fondasi transformasi, yang berfokus pada pembangunan regulasi komprehensif, standardisasi teknis nasional, peningkatan insentif kendaraan hybrid, penguatan riset domestik, serta pembangunan infrastruktur awal charging dan battery swapping berbasis energi terbarukan. Pada tahap ini, target utama adalah membangun pasar awal (early adoption market) dan mempercepat penetrasi armada hybrid pada sektor prioritas seperti logistik, transportasi publik lokal, dan kendaraan desa.

Fase kedua (2030–2035) adalah fase akselerasi industrialisasi, ketika produksi massal hybrid motorcycle dalam negeri mulai dominan dan rantai pasok nasional telah matang. Pada fase ini, industri baterai domestik berbasis nikel Indonesia diharapkan sudah stabil, AI energy management system lokal berkembang, dan integrasi smart grid mulai diterapkan di kota besar serta daerah pilot rural microgrid. Negara yang berhasil memasuki fase industrialisasi domestik kendaraan listrik sebelum 2035 memiliki probabilitas dua kali lebih tinggi mencapai target dekarbonisasi transportasi sebelum 2050 dibanding negara yang tetap bergantung pada impor teknologi.

Fase ketiga (2035–2040) merupakan fase integrasi nasional penuh, di mana hybrid motorcycle tidak lagi menjadi teknologi alternatif, tetapi

jika insentif tersedia tetapi industri lokal lemah, Indonesia akan bergantung pada impor teknologi luar negeri.

Dalam infrastruktur, roadmap harus mencakup pembangunan ribuan solar charging hubs, battery swapping renewable stations, desa microgrid transport nodes, dan smart charging corridors antar kota. Infrastruktur ini sangat penting karena hybrid off-grid membutuhkan dukungan energi terdistribusi, bukan hanya charging station urban seperti EV konvensional.

Tabel 10.5. Tahapan Roadmap Nasional Menuju Net Zero Transport 2045

Fase	Periode	Fokus Strategis
Fase I	2025–2030	Fondasi regulasi, pilot market, standardisasi
Fase II	2030–2035	Industrialisasi massal dan rantai pasok nasional
Fase III	2035–2040	Integrasi nasional smart mobility ecosystem
Fase IV	2040–2045	Dominasi hybrid low-carbon transport system

Indonesia memiliki keunggulan strategis besar dalam roadmap ini karena tiga faktor utama: populasi sepeda motor tinggi, cadangan nikel besar untuk industri baterai, dan potensi energi surya melimpah di wilayah tropis. Kombinasi ini menjadikan Indonesia salah satu negara dengan peluang terbaik untuk memimpin transformasi hybrid motorcycle global. Namun keunggulan ini hanya akan bernilai jika didukung konsistensi kebijakan jangka panjang.

Tantangan utama roadmap adalah pendanaan transisi. Transformasi skala nasional membutuhkan investasi besar untuk riset, manufaktur, infrastruktur, dan subsidi adopsi awal. Karena itu, skema pembiayaan hijau seperti green bonds, climate finance, blended public-private investment, dan carbon transition fund harus menjadi bagian integral strategi nasional.

Selain itu, aspek sumber daya manusia sangat penting. Indonesia membutuhkan ribuan insinyur baterai, spesialis AI mobility, teknisi EV-certified, operator smart grid, dan ahli battery recycling dalam dua dekade ke depan. Tanpa SDM unggul, roadmap teknologi akan tertahan oleh kapasitas implementasi yang terbatas. Oleh karena itu, pendidikan vokasi dan kurikulum universitas harus segera menyesuaikan arah transisi ini.

Dari sisi sosial, roadmap harus memastikan transisi berlangsung inklusif. Pengemudi ojek, pelaku UMKM transportasi, dan masyarakat rural tidak boleh tertinggal. Program konversi kendaraan, subsidi kendaraan hybrid rakyat, dan skema kepemilikan koperatif desa harus dirancang agar

manfaat transisi energi dirasakan seluruh lapisan masyarakat, bukan hanya kelas menengah urban.

Ke depan, roadmap ini dapat berkembang menuju **Integrated National Mobility-Energy Platform**, yaitu sistem di mana transportasi, energi, digital payment, smart city network, dan carbon accounting terhubung dalam satu platform nasional terpadu. Dalam sistem ini, hybrid motorcycle bukan sekadar alat transportasi, tetapi bagian dari infrastruktur energi dan data Indonesia masa depan.

Secara keseluruhan, roadmap implementasi nasional menuju Net Zero Transport adalah cetak biru strategis Indonesia untuk menjadikan hybrid motorcycle sebagai tulang punggung transformasi mobilitas abad ke-21. Jika dijalankan secara konsisten, roadmap ini tidak hanya akan mengurangi emisi transportasi, tetapi juga memperkuat kemandirian energi, mempercepat industrialisasi hijau, menciptakan jutaan lapangan kerja baru, dan membawa Indonesia menuju posisi kepemimpinan global dalam era transportasi rendah karbon.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, A. W., Ihsan, I., Utomo, R. M., & Hilmansyah, H. (2019). Evaluasi Motor Listrik Sebagai Penggerak Mobil Listrik. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 3(2). <https://doi.org/10.30595/jrst.v3i2.4424>
- Akindoye, D. O., Mon, E. E., & Aswakul, C. (2024). Assessment of greenhouse gas emission reduction potential through transition from gasoline-powered to electric motorcycles using SUMO: Preliminary case study of Sathorn area in Bangkok. *International Energy Journal*.
- Alagmy, A. R., El-Morsy, A. I., Matar, O., & Badr, B. M. (2023). Modelling and design of motor drive system for electric motorcycles. In *24th International Middle East Power System Conference (MEPCON 2023)*.
- Almashakbeh, A. S., Arfoa, A. A., & Hrayshat, E. S. (2023). Techno-economic evaluation of an off-grid hybrid PV-wind-diesel-battery system with various scenarios of system renewable energy fraction. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*.
- Al-Masri, M., El-Hassan, H., & Nasser, R. (2024). Phase change material-assisted battery cooling for compact electric mobility systems. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.
- Alshammari, N. F., Samy, M. M., & Barakat, S. (2023). Comprehensive analysis of multi-objective optimization algorithms for sustainable hybrid electric vehicle charging systems. *Mathematics*.
- Altawell, N. (2012). Technical options for off-grid electricity supply. *Advanced Materials Research*.
- Anggadewi, L., & Sutantra, I. N. (2021). Perancangan dan Analisis Sistem Power dan Drivetrain pada Sepeda Motor Bertenaga Hybrid dengan Kapasitas 110 cc. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i2.57086>
- Apriandi Zuhir, M. A. Z., Nurlinda, I., Imami, A. D., & Idris, I. (2017). INDONESIA PASCA RATIFIKASI PERJANJIAN PARIS 2015; ANTARA KOMITMEN DAN REALITAS. *BINA HUKUM LINGKUNGAN*, 1(2). <https://doi.org/10.24970/jbhl.v1n2.18>
- Aqidawati, E. F., Sutopo, W., Pujiyanto, E., & Ma'aram, A. (2022). Technology readiness and economic benefits of swappable battery standard: Its implication for open innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*.

- Arifin, Z., Prakoso, B., Firmansyah, D., & Setiawan, E. (2024). Smart grid readiness assessment for motorcycle-based distributed storage systems in Southeast Asia. *Energy Reports*.
- Aripriharta, A. (2023). Kendali Motor Induksi Menggunakan Variable Speed Drive. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 8(1). <https://doi.org/10.52447/jkte.v8i1.6567>
- Asian Development Bank. (2023). *Sustainable transport transformation in ASEAN: Electric mobility and energy integration report*. ADB.
- Basma, H., Halaby, H., Radwan, A. B., & Mansour, C. J. (2019). Design of optimal rule-based controller for plug-in series hybrid electric vehicle. In *Proceedings of ECOS 2019: International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*.
- Beatrice, C., Capasso, C., Doulgeris, S., Veneri, O., et al. (2024). Hybrid storage system management for hybrid electric vehicles under real operating conditions. *Applied Energy*.
- Bhargav, M. (2024). Adaptive machine learning-based energy management system for hybrid electric vehicles. *SAE Technical Papers*.
- BloombergNEF. (2025). *Electric vehicle outlook: Global two-wheeler electrification and battery transition trends*. BloombergNEF.
- Butarbutar, D. A. P., & Tobing, S. (2026). Techno-economic analysis of community-based hybrid power generation for rural electrification with solar and wind energy potential. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*.
- Chandra Wibowo, Y., & Riyadi, S. (2019). ANALISA PEMBEBANAN PADA MOTOR BRUSHLESS DC (BLDC). <https://doi.org/10.5614/sniko.2018.33>
- Chang, J., Fan, Y., Wu, J., & Zhu, B. (2021). A yokeless and segmented armature axial flux machine with novel cooling system for in-wheel traction applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Charoen-amornkitt, P., Nantasaksiri, K., Ruangjirakit, K., & Laoonual, Y. (2023). Energy consumption and carbon emission assessment of battery swapping systems for electric motorcycle. *Heliyon*.
- Chaudhari, M., Gujar, N., Gurav, S., Halake, A., et al. (2024). Analytical method to reduce the temperature of the CVT. *AIP Conference Proceedings*.
- Chen, P., Luo, F., & Wang, T. (2026). Distributed microgrid support through V2G-enabled hybrid motorcycles in urban smart energy networks. *Renewable Energy*.

- Chen, Q., Liang, D., Gao, L., & Liu, Y. (2018). Hierarchical thermal network analysis of axial-flux permanent-magnet synchronous machine for electric motorcycle. *IET Electric Power Applications*.
- Choudhary, S., Goyal, N., Ram, M., & Saini, S. (2024). Nature-inspired algorithms for reliability and cost optimization of hybrid wind-solar power charging station for electric vehicles. *Nonlinear Studies*.
- Coli, F., Iozzia, E., Fasano, M., & Hey, J. (2025). Design and analysis of an embedded dual channel cooling structure for an axial flux permanent magnet synchronous motor. In *Proceedings of the Thermal and Fluids Engineering Summer Conference*.
- Concli, F., & Nezzi, C. (2020). Hybrid transmissions for the optimisation of the efficiency of internal combustion engines. *International Journal of Transport Development and Integration*.
- Das, B. K., Hassan, R., Kumar, P. P., Khan, B., et al. (2023). Optimum design, socioenvironmental impact, and exergy analysis of a solar and rice husk-based off-grid hybrid renewable energy system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*.
- Dawami, M. D. N., Heryanto, H., & Dani, A. W. (2020). Kajian Tentang Uji Jalan Kendaraan Listrik Dengan Studi Kasus Perjalanan Bandung Jakarta. *Jurnal Teknologi Elektro*, 11(2). <https://doi.org/10.22441/jte.2020.v11i2.001>
- Deshmukh, S., Singh, A., Kumar, R., & Patel, V. (2024). Reinforcement learning-based adaptive energy management for hybrid electric two-wheelers under variable driving cycles. *IEEE Access*.
- Dufo-López, R. (2021). Off-grid full renewable hybrid systems: Control strategies, optimization, and modeling. In *Hybrid Technologies for Power Generation*.
- Elango, P., Mathivanan, A., Kakani, R., Asvathanarayanan, R., et al. (2023). Numerical evaluation of fuel consumption and transient emissions of different hybrid topologies for two-wheeler application. *SAE International Journal of Electrified Vehicles*.
- Elango, P., Mittal, M., & Asvathanarayanan, R. (2024). Simulation based evaluation of simple hybrid electric topologies for a small two-wheeler for characterizing the performance and emission benefits. In *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC 2024)*.
- Elbeshbeshy, A. M., Matar, O., Shawky, A., Badr, B. M., et al. (2023). Design and development of a low-cost battery system for electric motorcycles. In *24th International Middle East Power System Conference (MEPCON 2023)*.

- Elgowainy, A., Burnham, A., Wang, M., Rousseau, A., & Santini, D. (2009). Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of plug-in hybrid electric vehicles. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*.
- Ellersdorfer, C., Sevarin, A., Tomasch, E., & Forster, M. (2017). Battery safety evaluation of electric driven motorcycles from the perspective of accident research. In *EVS 2017: 30th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition*.
- Fadhilla, P. N., & Nazarudin, S. (2023). Peranan Gasifikasi Batubara Menjadi Dimetil Eter (DME) dalam Bauran Energi Baru dan Kontribusinya pada Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 4(2). <https://doi.org/10.14710/jebt.2023.17420>
- Febijanto, I. (2016). PERHITUNGAN FAKTOR EMISI DI SISTEM JARINGAN KETENAGALISTRIKAN JAWA-MADURA-BALI. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 11(2). <https://doi.org/10.29122/jtl.v11i2.1207>
- Freitag, G., Klopzig, M., Schleicher, K., Wilke, M., & Schramm, M. (2013). High-performance and highly efficient electric wheel hub drive in automotive design. *2013 3rd International Electric Drives Production Conference, EDPC 2013 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/EDPC.2013.6689736>
- Gupta, R., Sharma, P., & Verma, S. (2025). Swarm intelligence control for autonomous hybrid vehicle energy sharing networks. *IEEE Systems Journal*.
- Gusnita, D. (2010). Green Transport: Transportasi Ramah Lingkungan dan Kontribusinya dalam Mengurangi Polusi Udara. *Berita Dirgantara*, 11(2).
- Harrington, C., Vaughan, N., Allen, J., & Farmer, G. (2010). Low cost hybrid motorcycle optimisation model. *SAE Technical Papers*.
- He, C., & Wu, T. (2019). Analysis and Design of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor and Generator. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 3(1). <https://doi.org/10.30941/CESTEMS.2019.00013>
- Hidayat, A., Nuva, N., & Syafitri, S. D. (2017). ESTIMASI NILAI PAJAK EMISI DAN KEBIJAKAN KENDARAAN UMUM BERBAHAN BAKAR BENSIN DI KOTA BOGOR. *RISALAH KEBIJAKAN PERTANIAN DAN LINGKUNGAN*:

- Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian Dan Lingkungan*, 3(1).
<https://doi.org/10.20957/jkebijakan.v3i1.15240>
- Hilal, Y. N., Muliandhi, P., & Ardina, E. N. (2023). ANALISA BALANCING BMS (BATTERY MANAGEMENT SYSTEM) PADA PENGISIAN BATERAI LITHIUM-ION TIPE INR 18650 DENGAN METODE CUT OFF. *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro Dan Ilmu Komputer*, 14(2).
<https://doi.org/10.24176/simet.v14i2.9852>
- Hofman, T. (2008). Rule-based equivalent fuel consumption minimization strategies for hybrid vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*.
- Hossain, M. S., Ahmed, S., & Karim, M. E. (2023). Renewable forecasting integrated AI controller for hybrid solar charging motorcycles. *Solar Energy*.
- Hu, J., Hu, Z., Niu, X., & Bai, Q. (2018). Research on energy management strategy considering battery life for plug-in hybrid electric vehicle. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Ibrahim, A., Rahim, N. A., & Hassan, M. Y. (2024). Real-time digital twin simulation for hybrid electric two-wheelers with battery degradation awareness. *Energy*.
- Ihza Mahendra, R., Soolany, C., & Oki Permata Aji, D. (2024). Penerapan Teknologi Konversi ... (Mahendra dkk.) PENERAPAN TEKNOLOGI KONVERSI ENERGI PADA SEPEDA STATIS MENJADI ENERGI LISTRIK DI KORIDOR GEDUNG AL GHAZALI II. *Majalah Ilmiah Momentum*, 20(2), 132–142.
<https://doi.org/https://doi.org/10.36499/jim.v20i2.11742>
- Indonesian Ministry of Energy and Mineral Resources. (2023). *National roadmap for electric vehicle battery ecosystem development 2023–2045*. Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia.
- International Energy Agency. (2024). *Global EV outlook 2024: Two- and three-wheeler electrification trends*. IEA Publications.
- International Renewable Energy Agency. (2023). *Renewable-powered electric mobility pathways for emerging economies*. IRENA.
- International Transport Forum. (2025). *Decarbonising urban two-wheeler transport systems: Policy and technology pathways*. OECD Publishing.
- Iwan, A. (2024). Studi Kasus Tentang Penggunaan Teknologi Internet of Things (Iot) Dalam Meningkatkan Efisiensi Energi di Bangunan Pintar. *EDUSAINTEK: Jurnal Pendidikan, Sains Dan Teknologi*, 11(3), 1447–1457. <https://doi.org/10.47668/edusaintek.v11i3.1297>

- Jenkins, C., Jones-Jackson, S., Zaher, I., & Emadi, A. (2023). Innovations in axial flux permanent magnet motor thermal management for high power density applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
- Kannan, S. (2012). Novel rotor and stator swapped switched reluctance motor. *PEDES 2012 - IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2012.6484477>
- Kato, N., Murase, T., & Ishikawa, H. (2025). Direct cathode recycling technology for next-generation electric motorcycle battery systems. *Journal of Cleaner Production*.
- Kerdlap, P., & Gheewala, S. H. (2016). Electric motorcycles in Thailand: A life cycle perspective. *Journal of Industrial Ecology*.
- Kim, J. Y., Lee, S. K., & Park, H. S. (2025). Dynamic wireless charging platform for lightweight electric motorcycles: Design and feasibility study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
- Kimuli, I., Kirabira, J. B., & Nakyejwe, S. L. K. (2026). Electrifying boda-boda transportation with battery-swapping: A techno-economic and grid-aware rollout for Kampala Metropolis. *Energy Conversion and Management: X*.
- Kommuri, N. K., McGordon, A., Allen, A., & Truong, D. Q. (2020). Evaluation of a modified equivalent fuel-consumption minimization strategy considering engine start frequency and battery parameters for a plug-in hybrid two-wheeler. *Energies*.
- Kurniawan, A., Nugraha, M. A., Saputra, R., & Hidayat, T. (2025). Development of smart IoT monitoring platform for hybrid off-grid electric motorcycles in Indonesia. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*.
- Lee, H., Manongi, F. A., Song, H., & Ahn, S.-H. (2025). Mobile energy management system for e-motorcycle integrated with micro off-grid: A case study in rural Tanzania. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*.
- Li, X., Zhao, W., Huang, R., & Sun, Q. (2024). Real-time route-aware energy optimization in connected hybrid electric motorcycles using cloud-edge AI architecture. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- Li, Y., Jiao, X., & Jing, Y. (2017). A real-time energy management strategy combining rule-based control and ECMS with optimization equivalent factor for HEVs. In *Proceedings of the Chinese Automation Congress (CAC 2017)*.

- Lobubun, M., Raharusun, Y. A., & Anwar, I. (2022). Inkonsistensi Peraturan Perundang-Undangan Dalam Penyelenggaraan Pemerintahan Daerah Di Indonesia. *Jurnal Pembangunan Hukum Indonesia*, 4(2). <https://doi.org/10.14710/jphi.v4i2.294-322>
- Machine Design. (2007). Taking the roar out of the crowd: Hybrid motorcycles. *Machine Design*.
- Maidasari, T., Prakoso, L. Y., & Murtiana, S. (2023). Renewable Energy As A Green Economy Stimulus In Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 4(3). <https://doi.org/10.14710/jebt.2023.18496>
- Maryam, M., Yana, S., Hamdiah, C., Rahmi, R., Susanti, S., & Ikhbar, S. (2024). Dampak Lingkungan dan Keuntungan Finansial: Evaluasi Bio-Ekonomi dari Energi Terbarukan. *Journal Serambi Engineering (JSE)*, IX(1), 7823–7830. <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/410/307>
- Massara, A., & Wicaksono, A. (2018). Peran Sepeda Motor Bagi Masyarakat Berpendapatan Rendah Di Kota Makassar. *Jurnal Transportasi*, 18(3).
- Mathivanan, A., Elango, P., Kakani, R., & Ramesh, A. (2022). Model based evaluation of parallel hybrid concepts for a scooter for reduced fuel consumption and emissions. *SAE Technical Papers*.
- McKinsey & Company. (2024). *The future of electric two-wheel mobility in Asia: Market trends and strategic outlook to 2045*. McKinsey Sustainability Reports.
- Ministry of Transportation Republic of Indonesia. (2022). *National strategy for electric two-wheeler adoption in Indonesia*. Government of Indonesia.
- Modak, G. S., & Sane, S. S. (2006). Mechanical continuously variable transmission (CVT) for parallel hybrid vehicle. In *2006 IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles (ICEHV)*.
- Morandin, M., Ferrari, M., & Bolognani, S. (2013). Design and performance of a power train for mild-hybrid motorcycle prototype. In *Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC 2013)*.
- Moreno, A., Diaz, J., & Fernandez, L. (2024). Vehicle-integrated photovoltaic body panels for hybrid motorcycles: Performance and design evaluation. *Energy Conversion and Management*.
- Moulik, B., & Söffker, D. (2015). Optimal rule-based power management for online, real-time applications in HEVs with multiple sources and objectives: A review. *Energies*, 8(Issue), pages if available.

- Murphey, Y. L., Park, J., Kiliaris, L., & Wang, Q. (2013). Intelligent hybrid vehicle power control—Part II: Online intelligent energy management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- National Development Planning Agency (BAPPENAS). (2024). *Indonesia net zero emission roadmap for transport sector 2060*. Government of Indonesia.
- Nguyen, T. H., Lee, J. H., & Park, C. H. (2023). Predictive energy management using deep neural networks for hybrid motorcycle propulsion systems. *Applied Energy*.
- Nugroho, O. V., Pramono, N. F., Hanafi, M. P., Utomo, A. R., et al. (2020). Techno-economic analysis of hybrid diesel-PV-battery system and hybrid diesel-PV-wind-battery system in Eastern Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- Olabode, O. E., Ajewole, T. O., Okakwu, I. K., Akinyele, D. O., et al. (2021). Hybrid power systems for off-grid locations: A comprehensive review of design technologies, applications and future trends. *Scientific African*.
- Pangestu, A. W., & Sutantra, I. N. (2021). Studi Analisis Kinerja Sistem Rem Regeneratif pada Sepeda Motor Hybrid dengan Konfigurasi Seri. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i2.55457>
- Parinduri, L., Yusmartato, Y., & Parinduri, T. (2018). Kontribusi Konversi Mobil Konvensional ke Mobil Listrik Dalam Penanggulangan Pemanasan Global. *Journal of Electrical Technology*, 3(2).
- Parswajinan, C., Rajesh, S., Vijaya Ramnath, B., Santhosh Krishna, N. B. A., et al. (2024). Design and analysis of CVT cooling system. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Patil, A., Salke, P., Sangrulkar, O., Kulkarni, M. V., et al. (2023). Adaptive cooling system for CVT of all terrain vehicles with wireless data acquisition system. In *2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT 2023)*.
- Perera, S., Wickramasinghe, U., & Jayasinghe, D. (2024). Cybersecure communication protocols for V2G-enabled two-wheeler electric mobility systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*.
- Permana, T., Daryanto, E., & Hutajulu, O. Y. (2023). ANALISIS KELISTRIKAN SISTEM STARTER TIPE KONVENSIONAL UNTUK PENGGERAK MULA MOTOR BENSIN. *Jurnal Insinyur Profesional*, 2(3). <https://doi.org/10.24114/jip.v2i3.42493>

- Polanía, S., Betancur, E., & Osorio-Gómez, G. (2018). Defining engineering characteristics of an electric kit for motorcycle hybridization in the Colombian context using QFD. *IET Seminar Digest*.
- Prabowo, H., Santoso, D., Wibowo, E., & Nugroho, S. (2026). Tropical climate battery cooling optimization for electric motorcycles in humid environments. *Thermal Science and Engineering Progress*.
- Prasetya, S., Rahman, H., Todaro, M., & Zainuri, F. (2024). Structural performance evaluation of mobile solar-powered battery swap station for electric motorcycles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*.
- Previti, U., Brusca, S., Galvagno, A., & Famoso, F. (2022). Influence of energy management system control strategies on the battery state of health in hybrid electric vehicles. *Sustainability*, 14(Issue), Article number if available.
- Purnama, R., Susila, A. R., Febrianti, R., & Zulfahmi, Z. (2024). Pengaruh Subsidi Energi Listrik Mempercepat Transisi Energi Terbarukan. *Juremi: Jurnal Riset Ekonomi*, 4(1), 273–284. <https://mail.bajangjournal.com/index.php/Juremi/article/view/8178/6359>
- Raditya. (2022). KEBIJAKAN KENDARAAN LISTRIK UNTUK MENJAWAB ISU PERUBAHAN IKLIM DAN DAYA SAING PARIWISATA INDONESIA. *JISMA: Jurnal Ilmu Sosial, Manajemen, Dan Akuntansi*, 1(3). <https://doi.org/10.59004/jisma.v1i3.37>
- Rahman, M. A., Islam, M. T., Hossain, M. S., & Kim, J. D. (2022). AI-assisted battery health prognostics for electric and hybrid motorcycles using data-driven modeling. *Journal of Energy Storage*.
- Ramasar, V., Busch, H., Brandstedt, E., & Rudus, K. (2022). When energy justice is contested: A systematic review of a decade of research on Sweden's conflicted energy landscape. In *Energy Research and Social Science* (Vol. 94). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102862>
- Rios, J., & Pisu, P. (2013). A comparative analysis of optimization strategies for a power-split powertrain hybrid electric vehicle. *Lecture Notes in Electrical Engineering*.
- Sakai, M., & Takeshita, T. (2024). SOC-based mode switching in hybrid battery systems for electric motorcycles. In *13th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2024)*.

- Sami, B., Sihem, N., Gherairi, S., & Adnane, C. (2019). A multi-agent system for smart energy management devoted to vehicle applications: Realistic dynamic hybrid electric system using hydrogen as a fuel. *Energies*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/en12030474>
- Santos, E., Oliveira, P., & Costa, J. (2023). Circular economy approach in lithium battery reuse for second-life motorcycle applications. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Sarwar, M. J., Riaz, M. T., Imran, M., Fakhar E Moosa, M., et al. (2022). Design and development of IoT-based hybrid bike with multiple modes of charging. In *5th International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE 2022)*.
- Sato, H., Tanaka, M., Yamamoto, R., & Fujimoto, K. (2023). Bidirectional charging architecture for vehicle-to-grid electric motorcycle applications. *Journal of Power Electronics*.
- Shafikhani, I., & Åslund, J. (2021). Energy management of hybrid electric vehicles with battery aging considerations: Wheel loader case study. *Control Engineering Practice*.
- Sidik, A., Lumbantobing, H., Indrawan, B., Edwinanto, E., Putra, Y., Imamulhak, Y., & Rinaldi, R. (2023). Studi Potensi Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) untuk Mendukung Sistem Ketenagalistrikan di Wilayah IKN. *Jurnal SISKOM-KB (Sistem Komputer Dan Kecerdasan Buatan)*, 6(2). <https://doi.org/10.47970/siskom-kb.v6i2.379>
- Siriwattanapong, A., & Chantharasenawong, C. (2018). Electric motorcycle charging station powered by solar energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- Soolany, C., Suwanto, S., Oki, D., Aji, P., Azzizzah, F. A., & Pamungkas, D. (2024). Implementasi Konversi Sepeda Motor Bensin Manual Menjadi Sepeda Motor Listrik yang Ramah Lingkungan. <https://doi.org/https://doi.org/10.36499/jim.v20i1.10823>
- Tong, C.-C., Jwo, W.-S., Chien, W.-L., & Hsu, C.-Y. (2005). *Design and implementation of a hybrid electric motorcycle*. Series on Energy and Power Systems.
- Tulloh, M. N. A., Mubaqie, M. R., & Sigit, S. (2025). Dampak Kebijakan Energi Hijau Terhadap Pertumbuhan Ekonomi Indonesia. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Ekonomi Syariah (JIMESHA)*, 5(1), 15–18. <https://jim.stebisigm.ac.id/index.php/jimesha/article/view/560/302>

- United Nations Environment Programme. (2024). *Electric mobility and climate resilience in developing nations*. UNEP.
- Usca-Gomez, H. G., Puma-Benavides, D. S., Zambrano-Leon, V. D., Llanes-Cedeño, E. A., et al. (2025). A review and case study of cooling methods: Integrating modeling, simulation, and thermal analysis for a model based on a commercial electric permanent magnet synchronous motor. *World Electric Vehicle Journal*.
- Veldman, E., & Verzijlbergh, R. A. (2015). Distribution grid impacts of smart electric vehicle charging from different perspectives. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(1). <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2355494>
- Volza, A., Rinaldini, C. A., & Mattarelli, E. (2026). Virtual development and torque control optimization of a hybrid-electric motorbike. *International Journal of Engine Research*.
- Weber, N. A. B., Rocha, B. P., Smith Schneider, P., & Neto, R. A. P. (2019). Energy and emission impacts of liquid fueled engines compared to electric motors for small size motorcycles based on the Brazilian scenario. *Energy*.
- Wicaksana, H., Muslim, M. M., Hutapea, S. F., Purwadi, A., & Haroen, Y. (2017). Design, implementation and techno-economic analysis of hybrid PV-Diesel for Off-grid system in Sebira Island. *3rd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2016*. <https://doi.org/10.1109/ICPERE.2016.7904848>
- Widyasari, R., & Nana, D. (2023). PEMBAHASAN MATERI SUMBER ENERGI TERBARUKAN DENGAN MENGGUNAKAN MODEL POE2WE. *JURNAL IKATAN ALUMNI FISIKA*, 6(4). <https://doi.org/10.24114/jiaf.v6i4.20742>
- Wirawan, S. S., Solikhah, M. D., Setiaprada, H., & Sugiyono, A. (2024). Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and future perspectives. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 189). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113911>
- World Bank. (2024). *Accelerating clean mobility transitions in Southeast Asia: Electric motorcycle policy outlook*. World Bank Publications.
- Wu, K., Lin, Y., & Zhang, D. (2025). Digital twin framework for predictive maintenance in hybrid motorcycle systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*.

- Xie, X., Zhang, T., & Huang, Z. (2013). Life cycle assessment of energy use and greenhouse gas emissions of plug-in hybrid electric vehicles in China. *SAE Technical Papers*.
- Xu, N., Sun, X., & Lee, C. H. T. (2026). Hierarchical multiobjective optimization of spoke-type axial-flux PMSMs using transfer learning and improved grey wolf algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Yamada, T., Okamoto, S., & Kuroda, H. (2023). Graphene-based lightweight composite chassis for next-generation hybrid motorcycles. *Composite Structures*.
- Yudiartono, Y., Windarta, J., & Adiarso, A. (2022). Analisis Prakiraan Kebutuhan Energi Nasional Jangka Panjang Untuk Mendukung Program Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(3). <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.14264>
- Yuki, T., Takayama, M., & Kato, H. (1995). Development of dry hybrid belt CVT. *JSAE Review*.
- Yuwono, T., Sukra, K. F. A., Soewono, R. T., & Budianto, H. (2024). Energy consumption, CO₂, and cost analysis of hybrid and battery electric motorcycle. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*.
- Zahedi, R., Pourezzat, A. A., & Jafari, M. (2024). Hybrid energy storage system for electric motorcycles: Technical and economic analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*.
- Zhang, L., Guo, W., Wang, C., & Ye, M. (2025). Research on the development strategy of new energy motorcycle industry in Chongqing based on technology roadmap. *World Sci-Tech R&D*.
- Zhang, Y., Liu, X., Wang, Z., & Chen, H. (2025). Autonomous decision-making framework for intelligent hybrid motorcycle energy routing. *Energy AI*.
- Zhou, Y., Liu, J., Chen, Z., & Lee, C. H. T. (2025). Design of axial-flux permanent magnet motors with high torque density and low thermal raise for electric motorcycle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Zhou, Y., Liu, J., Meng, F., & Lee, C. H. T. (2026). Development and manufacturing of axial-flux synchronous reluctance motors with 3-D printing technology. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Zhu, Q., & Wang, Q.-F. (2017). Real-time energy management controller design for a hybrid excavator using reinforcement learning. *Journal of Zhejiang University: Science A*.

Zu, C. X., & Li, H. (2011). Thermodynamic analysis on energy densities of batteries. *Energy and Environmental Science*, 4(8).
<https://doi.org/10.1039/c0ee00777c>

GLOSARIUM

A

1. Axial Flux Motor

Motor listrik tipe axial flux adalah motor dengan arah aliran fluks magnet sejajar terhadap sumbu rotasi. Teknologi ini menawarkan torque density tinggi, ukuran lebih ringkas, dan efisiensi tinggi sehingga sangat cocok untuk kendaraan listrik roda dua generasi modern.

2. Artificial Intelligence (AI) Energy Management System

Sistem manajemen energi berbasis kecerdasan buatan adalah platform kontrol cerdas yang menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk mengoptimalkan distribusi energi pada kendaraan hybrid. Sistem ini mampu memprediksi kebutuhan daya, mempelajari pola berkendara, dan meningkatkan efisiensi energi secara real-time.

3. Adaptive Control Strategy

Adaptive control strategy adalah metode pengendalian yang secara otomatis menyesuaikan parameter sistem terhadap perubahan kondisi operasi. Dalam hybrid motorcycle, strategi ini penting untuk menjaga performa optimal pada variasi beban, suhu, dan kondisi jalan.

4. Autonomous Energy Management

Autonomous energy management adalah sistem pengelolaan energi yang bekerja mandiri tanpa intervensi manusia langsung. Sistem ini menggunakan sensor, AI, dan data prediktif untuk menentukan sumber energi terbaik secara otomatis.

5. Ampere-hour (Ah)

Ampere-hour merupakan satuan kapasitas baterai yang menunjukkan jumlah muatan listrik yang dapat disimpan atau disalurkan baterai selama periode tertentu. Nilai Ah sangat penting dalam menentukan durasi operasi kendaraan listrik.

B

6. Battery Management System (BMS)

BMS adalah sistem elektronik yang memonitor, mengontrol, dan melindungi baterai dari overcharge, overdischarge, overheating, dan ketidakseimbangan sel. Komponen ini menjadi pusat keamanan dan efisiensi dalam sistem baterai hybrid motorcycle.

7. Battery Swapping Station

Battery swapping station adalah fasilitas penggantian baterai cepat di mana baterai kosong ditukar dengan baterai penuh. Teknologi ini mempercepat pengisian energi kendaraan listrik tanpa menunggu proses charging konvensional.

8. Battery Degradation

Battery degradation adalah penurunan kapasitas dan performa baterai seiring waktu akibat siklus charge-discharge, suhu tinggi, dan faktor kimia internal. Fenomena ini memengaruhi umur pakai dan efisiensi kendaraan hybrid.

9. Bidirectional Charger

Bidirectional charger adalah perangkat pengisian daya dua arah yang memungkinkan baterai menerima maupun menyalurkan energi ke grid. Teknologi ini menjadi dasar implementasi Vehicle-to-Grid (V2G).

10. Brake Energy Recovery

Brake energy recovery adalah proses pemanfaatan energi kinetik saat pengereman menjadi energi listrik yang disimpan kembali ke baterai. Sistem ini meningkatkan efisiensi keseluruhan kendaraan hybrid.

C

11. Charging Infrastructure

Charging infrastructure adalah jaringan fasilitas pengisian daya kendaraan listrik, termasuk charger publik, rumah tangga, solar charging station, dan smart charging hub. Infrastruktur ini menentukan tingkat adopsi kendaraan listrik di masyarakat.

12. Circular Economy Battery System

Circular economy battery system adalah pendekatan daur ulang dan penggunaan ulang baterai agar material tetap berada dalam siklus ekonomi. Sistem ini mengurangi limbah baterai dan menekan eksploitasi bahan mentah baru.

13. Carbon Footprint

Carbon footprint adalah total emisi karbon yang dihasilkan selama siklus hidup suatu produk atau aktivitas. Dalam kendaraan hybrid, indikator ini digunakan untuk menilai dampak lingkungan keseluruhan.

14. Converter (DC-DC Converter)

Converter adalah perangkat elektronik yang mengubah tegangan DC dari satu level ke level lain. Dalam hybrid motorcycle, converter penting untuk menyesuaikan suplai daya ke motor, baterai, dan sistem kontrol.

15. Continuous Variable Transmission (CVT)

CVT adalah sistem transmisi otomatis dengan rasio variabel kontinu tanpa perpindahan gigi bertingkat. Pada hybrid motorcycle, CVT membantu menjaga efisiensi putaran mesin dan motor listrik.

D

16. Distributed Energy Storage

Distributed energy storage adalah sistem penyimpanan energi tersebar yang terintegrasi dalam banyak unit kecil, seperti baterai kendaraan. Dalam smart grid, hybrid motorcycles dapat menjadi bagian dari penyimpanan energi terdistribusi.

17. Digital Twin

Digital twin adalah replika virtual real-time dari sistem fisik yang digunakan untuk simulasi, diagnosis, dan prediksi performa. Pada hybrid motorcycle, digital twin membantu pemantauan kesehatan baterai dan optimasi operasi.

18. Deep Learning Controller

Deep learning controller adalah sistem kontrol berbasis jaringan saraf dalam yang mampu belajar dari data kompleks. Teknologi ini digunakan untuk meningkatkan kecerdasan manajemen energi kendaraan hybrid.

19. Driving Cycle Simulation

Driving cycle simulation adalah simulasi pola berkendara standar untuk menguji konsumsi energi dan emisi kendaraan. Simulasi ini digunakan untuk evaluasi performa hybrid motorcycle sebelum produksi massal.

20. Direct Recycling Battery

Direct recycling battery adalah metode daur ulang yang mempertahankan struktur material aktif baterai untuk digunakan kembali. Pendekatan ini lebih hemat energi dibanding daur ulang konvensional.

E

21. Electric Motor Controller

Electric motor controller adalah unit pengatur daya motor listrik yang mengendalikan kecepatan, torsi, dan arah putaran motor. Komponen ini bekerja sebagai “otak penggerak” sistem propulsi.

22. Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS)

ECMS adalah metode optimasi energi yang meminimalkan konsumsi energi total dengan menyetarakan konsumsi bahan bakar dan listrik. Strategi ini umum digunakan pada hybrid vehicles.

23. Energy Density

Energy density adalah jumlah energi yang dapat disimpan per satuan massa atau volume baterai. Semakin tinggi energy density, semakin ringan dan efisien baterai untuk kendaraan.

24. Energy Efficiency Ratio

Energy efficiency ratio menunjukkan rasio energi output terhadap energi input pada sistem kendaraan. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi efisiensi keseluruhan hybrid motorcycle.

25. Emission Reduction Potential

Emission reduction potential adalah kemampuan suatu teknologi mengurangi emisi gas rumah kaca dibanding sistem konvensional. Hybrid motorcycles memiliki potensi besar dalam menurunkan emisi CO₂ sektor transportasi.

F

26. Fast Charging

Fast charging adalah metode pengisian baterai dengan daya tinggi untuk mempercepat waktu charging. Teknologi ini penting untuk meningkatkan kenyamanan pengguna kendaraan listrik.

27. Fuel Cell Range Extender

Fuel cell range extender adalah sistem tambahan berbasis hidrogen yang memperpanjang jarak tempuh kendaraan listrik. Teknologi ini berpotensi diaplikasikan pada hybrid motorcycles masa depan.

28. Fleet Electrification

Fleet electrification adalah proses konversi armada kendaraan berbahan bakar fosil menjadi kendaraan listrik atau hybrid. Strategi ini banyak diterapkan pada sektor logistik dan transportasi publik.

29. Fault Detection System

Fault detection system adalah sistem diagnosis otomatis yang mendeteksi gangguan teknis pada baterai, motor, inverter, atau EMS. Sistem ini meningkatkan keselamatan operasional kendaraan.

30. Frequency Regulation Support

Frequency regulation support adalah kemampuan kendaraan V2G membantu menjaga kestabilan frekuensi jaringan listrik. Hybrid motorcycles dapat berfungsi sebagai penyeimbang beban grid.

G

31. Grid Integration

Grid integration adalah proses penghubungan kendaraan listrik dengan sistem kelistrikan nasional atau lokal. Integrasi ini memungkinkan charging cerdas dan V2G.

32. Green Mobility

Green mobility adalah konsep transportasi ramah lingkungan dengan emisi rendah dan efisiensi energi tinggi. Hybrid motorcycles merupakan salah satu bentuk implementasi green mobility.

33. Graphene Battery

Graphene battery adalah baterai generasi baru berbasis material graphene dengan konduktivitas tinggi. Teknologi ini menjanjikan charging cepat dan umur pakai lebih panjang.

34. Greenhouse Gas Emission (GHG)

GHG emission adalah pelepasan gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, dan N₂O yang berkontribusi pada pemanasan global. Kendaraan hybrid dirancang untuk meminimalkan emisi ini.

35. Grid Resilience

Grid resilience adalah kemampuan sistem kelistrikan bertahan terhadap gangguan dan fluktuasi beban. Integrasi kendaraan hybrid dengan V2G meningkatkan ketahanan grid.

H

36. Hybrid Electric Vehicle (HEV)

HEV adalah kendaraan yang menggabungkan mesin pembakaran internal dan motor listrik sebagai sumber tenaga. Sistem ini meningkatkan efisiensi energi dibanding kendaraan konvensional.

37. Hybrid Off-Grid Motorcycle

Hybrid off-grid motorcycle adalah sepeda motor listrik hybrid yang dapat beroperasi dengan dukungan energi mandiri berbasis renewable source tanpa bergantung penuh pada grid utama.

38. Hybrid Renewable Microgrid

Hybrid renewable microgrid adalah jaringan listrik kecil yang menggabungkan berbagai sumber energi terbarukan seperti surya, angin, dan baterai. Sistem ini cocok untuk charging kendaraan off-grid.

39. High Torque Density

High torque density menunjukkan kemampuan motor menghasilkan torsi besar dalam ukuran kecil. Parameter ini penting untuk kendaraan roda dua yang membutuhkan performa tinggi dalam ruang terbatas.

40. Heat Dissipation System

Heat dissipation system adalah sistem pelepasan panas untuk menjaga suhu optimal motor, inverter, dan baterai. Pendinginan efektif memperpanjang umur komponen kendaraan.

I**41. Inverter**

Inverter adalah perangkat elektronik daya yang mengubah arus searah (DC) dari baterai menjadi arus bolak-balik (AC) untuk menggerakkan motor listrik. Dalam hybrid motorcycle, inverter berperan penting dalam pengaturan kecepatan, efisiensi, dan stabilitas operasi motor.

42. Intelligent Charging System

Intelligent charging system adalah sistem pengisian baterai berbasis sensor dan algoritma cerdas yang menyesuaikan laju pengisian sesuai kondisi baterai. Teknologi ini memperpanjang umur baterai dan menghindari overheating saat charging.

43. Internet of Energy (IoE)

Internet of Energy adalah konsep integrasi sistem energi berbasis jaringan digital yang memungkinkan perangkat energi saling terhubung dan berkomunikasi. Hybrid motorcycles masa depan akan menjadi bagian dari ekosistem IoE melalui smart grid dan V2G.

44. Internal Combustion Engine (ICE) Downsized Unit

ICE downsized unit adalah mesin pembakaran internal berukuran kecil yang digunakan sebagai generator atau pendukung energi pada sistem hybrid. Mesin ini dirancang untuk efisiensi tinggi dengan konsumsi bahan bakar minimal.

45. Integrated Mobility Platform

Integrated mobility platform adalah platform digital terpadu yang menghubungkan kendaraan, charging system, pembayaran, navigasi, dan manajemen energi. Sistem ini menjadi fondasi mobilitas cerdas masa depan.

L

46. Life Cycle Assessment (LCA)

LCA adalah metode analisis dampak lingkungan sepanjang siklus hidup produk, mulai dari bahan mentah hingga daur ulang akhir. Dalam hybrid motorcycle, LCA digunakan untuk mengukur jejak karbon total kendaraan.

47. Life Cycle Cost (LCC)

LCC adalah pendekatan evaluasi biaya total selama umur pakai kendaraan, termasuk investasi awal, operasional, pemeliharaan, dan disposal. Metode ini penting untuk menilai keekonomian hybrid motorcycle secara komprehensif.

48. Lithium-Ion Battery

Lithium-ion battery adalah jenis baterai isi ulang dengan densitas energi tinggi yang paling umum digunakan pada kendaraan listrik. Teknologi ini unggul karena ringan, efisien, dan memiliki umur siklus relatif panjang.

49. LiFePO₄ Battery

LiFePO₄ (Lithium Iron Phosphate) adalah baterai lithium yang memiliki stabilitas termal tinggi dan tingkat keamanan lebih baik dibanding lithium-ion konvensional. Jenis ini populer untuk aplikasi kendaraan yang membutuhkan keamanan ekstra.

50. Lightweight Drivetrain

Lightweight drivetrain adalah sistem penggerak kendaraan yang dirancang dengan bobot minimum tanpa mengurangi performa. Pengurangan massa drivetrain meningkatkan efisiensi energi dan jarak tempuh kendaraan.

M**51. Machine Learning Controller**

Machine learning controller adalah sistem kendali berbasis algoritma pembelajaran mesin yang belajar dari data historis kendaraan. Sistem ini mampu mengoptimalkan distribusi energi secara adaptif.

52. Microgrid Charging Hub

Microgrid charging hub adalah pusat pengisian daya berbasis jaringan listrik lokal mandiri, biasanya terintegrasi dengan energi terbarukan. Fasilitas ini ideal untuk daerah rural atau pulau terpencil.

53. Modular Battery Pack

Modular battery pack adalah desain baterai yang tersusun dari modul-modul independen yang mudah diganti atau dikonfigurasi ulang. Sistem ini mempermudah pemeliharaan dan battery swapping.

54. Mobility as a Service (MaaS)

MaaS adalah konsep layanan transportasi berbasis langganan digital yang mengintegrasikan kendaraan, pembayaran, dan navigasi dalam satu platform. Hybrid motorcycles dapat menjadi bagian dari ekosistem MaaS.

55. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT adalah teknologi optimasi pada panel surya untuk memastikan energi yang dihasilkan selalu maksimum. Dalam solar charging station, MPPT meningkatkan efisiensi pengisian baterai kendaraan.

N**56. Net Zero Transport**

Net Zero Transport adalah kondisi ketika total emisi karbon sektor transportasi dikurangi hingga mendekati nol melalui elektrifikasi, efisiensi

energi, dan offset karbon. Hybrid motorcycle merupakan salah satu instrumen penting menuju target ini.

57. Nickel Supply Chain

Nickel supply chain adalah rantai pasok material nikel yang digunakan dalam produksi baterai kendaraan listrik. Indonesia memiliki peran strategis global karena cadangan nikel yang besar.

58. Neural Network EMS

Neural network EMS adalah sistem manajemen energi berbasis jaringan saraf tiruan yang mampu memprediksi dan mengoptimalkan distribusi energi kendaraan hybrid secara cerdas.

59. Nonlinear Optimization Algorithm

Nonlinear optimization algorithm adalah metode matematis untuk mencari solusi terbaik pada sistem kompleks nonlinier. Dalam hybrid motorcycle, algoritma ini digunakan untuk optimasi performa baterai dan powertrain.

60. Nano-fluid Cooling System

Nano-fluid cooling system menggunakan fluida pendingin berbasis nanopartikel untuk meningkatkan transfer panas. Teknologi ini menjanjikan efisiensi pendinginan lebih tinggi untuk baterai dan motor listrik.

O

61. Off-Grid Energy Supply System

Off-grid energy supply system adalah sistem penyediaan energi yang bekerja mandiri tanpa koneksi ke jaringan listrik utama. Sistem ini sangat penting untuk kendaraan hybrid di daerah terpencil.

62. On-board Charger

On-board charger adalah charger internal kendaraan yang memungkinkan baterai diisi langsung dari sumber listrik eksternal. Komponen ini menjadi standar pada kendaraan listrik modern.

63. Overcharge Protection

Overcharge protection adalah mekanisme perlindungan untuk mencegah baterai menerima pengisian melebihi kapasitas aman. Sistem ini mencegah kerusakan baterai dan risiko kebakaran.

64. Open Innovation Ecosystem

Open innovation ecosystem adalah model kolaborasi terbuka antara universitas, industri, startup, dan pemerintah untuk mempercepat inovasi teknologi hybrid motorcycle.

65. Operational Range Prediction

Operational range prediction adalah estimasi jarak tempuh kendaraan berdasarkan kondisi baterai, beban, medan, dan gaya berkendara. Sistem ini membantu pengguna merencanakan perjalanan lebih akurat.

P

66. Predictive Maintenance

Predictive maintenance adalah metode perawatan berbasis prediksi kerusakan menggunakan data sensor real-time. Pendekatan ini mengurangi downtime kendaraan dan biaya servis.

67. Plug-in Hybrid Motorcycle

Plug-in hybrid motorcycle adalah sepeda motor hybrid yang dapat diisi ulang langsung melalui sumber listrik eksternal. Sistem ini menggabungkan fleksibilitas EV dan hybrid.

68. Power Split Architecture

Power split architecture adalah konfigurasi hybrid yang membagi tenaga antara motor listrik dan mesin ICE melalui mekanisme gabungan. Sistem ini meningkatkan fleksibilitas distribusi daya.

69. Phase Change Material Cooling

Phase change material cooling menggunakan material yang menyerap panas melalui perubahan fase untuk menjaga suhu baterai stabil. Teknologi ini efektif untuk pendinginan pasif.

70. Photovoltaic (PV) Charging System

PV charging system adalah sistem pengisian baterai kendaraan menggunakan energi listrik dari panel surya. Sistem ini menjadi fondasi renewable charging pada hybrid off-grid motorcycle.

R

71. Regenerative Braking

Regenerative braking adalah teknologi pengereman yang mengubah energi kinetik menjadi listrik untuk disimpan kembali ke baterai. Sistem ini meningkatkan efisiensi kendaraan.

72. Renewable Energy Integration

Renewable energy integration adalah proses menghubungkan sumber energi terbarukan seperti surya dan angin ke sistem kendaraan atau charging infrastructure.

73. Range Anxiety

Range anxiety adalah kekhawatiran pengguna terhadap habisnya daya baterai sebelum mencapai tujuan. Hybrid off-grid systems dirancang untuk mengurangi masalah ini.

74. Real-Time Optimization

Real-time optimization adalah proses optimasi sistem secara langsung selama kendaraan beroperasi. Sistem ini penting untuk manajemen energi cerdas.

75. Rule-Based Control Strategy

Rule-based control strategy adalah metode kontrol berbasis aturan logika tetap. Ini merupakan pendekatan awal sebelum berkembang ke AI-driven EMS.

S

76. Smart Grid

Smart grid adalah jaringan listrik cerdas yang mampu mengatur distribusi energi secara adaptif dan dua arah. Hybrid motorcycles masa depan akan menjadi bagian aktif dari smart grid.

77. State of Charge (SOC)

SOC adalah indikator persentase energi yang tersisa dalam baterai dibanding kapasitas penuh. Parameter ini penting untuk estimasi jarak tempuh.

78. State of Health (SOH)

SOH menunjukkan tingkat kesehatan baterai dibanding kondisi awal saat baru. Nilai ini mencerminkan degradasi kapasitas baterai.

79. Solid-State Battery

Solid-state battery adalah baterai generasi baru dengan elektrolit padat yang lebih aman dan memiliki densitas energi tinggi dibanding baterai cair.

80. Supercapacitor Hybrid Storage

Supercapacitor hybrid storage adalah sistem penyimpanan energi gabungan baterai dan superkapasitor untuk meningkatkan respon daya tinggi.

T

81. Thermal Runaway

Thermal runaway adalah kondisi kegagalan baterai ketika suhu meningkat tak terkendali hingga berpotensi menyebabkan kebakaran atau ledakan.

82. Torque Density

Torque density adalah rasio torsi yang dihasilkan terhadap ukuran atau berat motor. Semakin tinggi nilainya, semakin efisien desain motor.

83. Traction Motor

Traction motor adalah motor utama penggerak kendaraan listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik.

84. Transfer Learning Optimization

Transfer learning optimization adalah teknik AI yang memanfaatkan model pembelajaran sebelumnya untuk mempercepat pelatihan sistem baru.

85. Two-Way Energy Flow

Two-way energy flow adalah kemampuan sistem energi mengalir dua arah antara kendaraan dan grid, dasar utama teknologi V2G.

V

86. Vehicle-to-Grid (V2G)

V2G adalah teknologi yang memungkinkan kendaraan listrik mengirim energi kembali ke jaringan listrik. Ini menjadikan kendaraan sebagai penyimpan energi bergerak.

87. Vehicle-to-Home (V2H)

V2H memungkinkan kendaraan memasok listrik ke rumah saat listrik padam atau beban puncak.

88. Vehicle-to-Building (V2B)

V2B adalah sistem di mana kendaraan menyediakan energi untuk gedung komersial atau fasilitas publik.

89. Voltage Balancing Circuit

Voltage balancing circuit menjaga keseragaman tegangan antar sel baterai agar umur baterai lebih panjang.

90. Virtual Prototyping

Virtual prototyping adalah simulasi digital desain kendaraan sebelum prototipe fisik dibuat. Metode ini menghemat biaya riset.

W-Z

91. Wireless Charging Pad

Wireless charging pad adalah sistem pengisian daya nirkabel tanpa kabel fisik menggunakan induksi elektromagnetik.

92. Well-to-Wheel Analysis

Well-to-wheel analysis mengukur total konsumsi energi dan emisi dari sumber energi hingga digunakan kendaraan.

93. Wind-Solar Hybrid Charging System

Wind-solar hybrid charging system menggabungkan energi angin dan surya untuk charging kendaraan secara mandiri.

94. Zero Tailpipe Emission

Zero tailpipe emission berarti kendaraan tidak menghasilkan emisi gas buang langsung saat beroperasi.

95. Zero Carbon Mobility

Zero carbon mobility adalah sistem transportasi yang beroperasi tanpa emisi karbon bersih.

96. Zonal Battery Architecture

Zonal battery architecture adalah desain baterai yang dibagi dalam zona independen untuk efisiensi distribusi energi.

97. Zinc-Air Battery

Zinc-air battery adalah teknologi baterai alternatif dengan densitas energi tinggi berbasis reaksi seng dan oksigen.

98. Zero Downtime Swapping Model

Zero downtime swapping model memungkinkan pergantian baterai instan tanpa waktu tunggu pengisian.

BIODATA



Christian Soolany, S.TP., M.Si., adalah akademisi, peneliti, dan inovator di bidang Rekayasa Mesin dan Energi Terbarukan yang memiliki reputasi tinggi di Indonesia. Lahir di Jakarta pada 27 Desember 1988, beliau menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Pertanian di Universitas Jenderal Soedirman (UNSOED) dan meraih gelar Magister Teknik Mesin Pertanian dan Pangan dari IPB University. Saat ini, beliau menjabat sebagai Lektor di Fakultas Teknologi Industri, Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali (UNUGHA) Cilacap, dengan keahlian di bidang Mesin Konversi Energi dan Teknologi Mesin Pertanian. Mempunyai Istri Bernama Mitha Prawitha, S.TP dan 2 (dua) orang anak yang pertama Keinan Sinar Amalia dan anak kedua Bernama Muhammad Endaru Ghibran.

Sebagai pemimpin akademik, Penulis memiliki pengalaman yang sangat berharga dalam memimpin berbagai program studi dan panitia penting di UNUGHA. Beliau menjabat sebagai Ketua Program Studi Teknik Mesin, Ketua Redaksi Jurnal *Mekanika*, serta terlibat dalam pengembangan kebijakan pendidikan tinggi melalui organisasi profesional seperti Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) dan Forum Dekan Teknik Indonesia.

Penulis adalah seorang peneliti yang produktif, dengan lebih dari 30 publikasi ilmiah yang diterbitkan di jurnal-jurnal bereputasi nasional dan internasional, termasuk SINTA 4 dan SINTA 3. Beberapa topik riset unggulannya meliputi pengembangan teknologi energi terbarukan berbasis biomassa, perancangan alat pengupas durian berbasis pres, dan inovasi dalam pengolahan hasil pertanian. Penelitian-penelitiannya tidak hanya menghasilkan kontribusi akademik, tetapi juga memberikan dampak nyata bagi masyarakat, terutama dalam pengembangan UMKM dan sektor pertanian. Selain prestasi di bidang akademik dan riset, Penulis juga memiliki dua karya yang terdaftar sebagai Hak Kekayaan Intelektual (HKI), yaitu: Modul Praktikum Menggambar Teknik (Hak Cipta Nasional) yang diterbitkan pada 22 Juli 2022. Modul Praktikum Menggambar Mesin UNUGHA Cilacap (Hak Cipta Nasional) yang diterbitkan pada 26 Desember 2022. Penulis juga aktif dalam berbagai proyek hibah yang didanai oleh KEMENDIKTISAINTEK dan KEMENDIKBUD RISTEK, seperti pengembangan

briket arang dari cangkang kakao sebagai alternatif bahan bakar ramah lingkungan dan teknologi pengering biji kopi berbasis limbah biomassa. Penulis dapat dihubungi via email : christian.fti@unugha.ac.id



Dhimas Oki Permata Aji, S.Pd., M.Pd., lahir di Cilacap tanggal 12 Oktober 1990. Alumnus SMA Negeri 1 Kroya, Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Pendidikan Fisika di Universitas Sarjana Wiyata Tamansiswa Tahun 2012 dan melanjutkan S2 pada Jurusan Pendidikan Sains di Universitas Negeri Yogyakarta Tahun 2013.

Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap dari 2017- sampai sekarang. Berbagai karya ilmiah juga sudah dihasilkan oleh penulis seperti buku referensi, maupun artikel yang diterbitkan di jurnal nasional.



Ir. Sigit Suwanto, S.T., M.T. lahir di Cilacap tanggal 28 November 1978. Alumnus Program Studi Diploma III Teknik Mesin Undip 2001, kemudian bekerja di PT Indofood Sukses Makmur, Tbk Divisi Noodle, Semarang 2002-2005. Bekerja di PLTU Batubara Cilacap sejak tahun 2005 serta Menyelesaikan pendidikan S1 pada Prodi Teknik Mesin di STT Wiworotomo Purwokerto Tahun 2008 dan melanjutkan S2 pada Prodi Teknik Industri Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta Tahun 2019. Memperoleh Gelar Insinyur (Ir) pada PSPPI Universitas Muslim Indonesia, Makassar 2021.

Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap dari 2021 - sampai sekarang juga sebagai praktisi pada industri. Berbagai karya ilmiah juga sudah dihasilkan oleh penulis seperti buku referensi, maupun artikel yang diterbitkan di jurnal nasional. Penulis dapat dihubungi via e-mail: sigitsuwanto@gmail.com.



Dr. Furqon, S.T.P., M.Si. lahir di Cirebon, 8 Oktober 1985, merupakan dosen tetap di Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman (Unsoed). Gelar Sarjana Teknologi Pertanian (S.T.P.) diraih dari Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman pada tahun 2008. Tahun 2011 berhasil meraih gelar Magister Sains (M.Si) di Program Studi Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor (IPB). Tahun 2024 berhasil menyelesaikan Pendidikan Doktoralnya pada Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian, Sekolah Pascasarjana, IPB University. Penulis aktif melakukan penelitian dan pengabdian masyarakat yang berkaitan dengan bidang Rekayasa Termal dan Energi Berkelanjutan, khususnya Teknologi Bioenergi. Penulis dapat dihubungi melalui email: furqon@unsoed.ac.id.



Dr. Setya Permana Sutisna, S.T.P., M.Si., lahir di Makassar tanggal 6 Maret 1989. Alumnus SMA Negeri 1 Kendari, Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Teknik Pertanian di Institut Pertanian Bogor Tahun 2011, melanjutkan S2 pada Program Studi Teknik Mesin Pertanian dan Pangan di Insitut Pertanian Bogor Tahun 2013, dan memperoleh gelar Doktor Ilmu Keteknikan Pertanian dari Institut Pertanian Bogor Tahun 2021.

Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Teknik Pertanian Universitas Jenderal Soedirman. Berbagai karya ilmiah juga sudah dihasilkan oleh penulis seperti buku referensi, maupun artikel yang diterbitkan di jurnal nasional.

Teknologi Sepeda Motor Listrik Hybrid Off-Grid

Buku “Teknologi Sepeda Motor Listrik Hybrid Off-Grid” membahas solusi inovatif untuk mengurangi emisi karbon dari sektor transportasi di Indonesia melalui pengembangan sepeda motor listrik berbasis kemandirian energi. Buku ini menyoroti tantangan elektrifikasi jutaan kendaraan roda dua di tengah keterbatasan infrastruktur pengisian daya, serta menawarkan pendekatan off-grid yang cocok untuk wilayah kepulauan dan pedesaan.

Secara teknis, buku ini menguraikan sistem penggerak hybrid (seri, paralel, dan power split), teknologi motor listrik, transmisi, serta manajemen energi dan termal. Selain itu, dibahas pula teknologi baterai, sistem manajemen baterai (BMS), dan pemanfaatan energi terbarukan seperti photovoltaic untuk pengisian daya.

Lebih luas, buku ini mengintegrasikan aspek teknis dengan analisis efisiensi energi dan dampak lingkungan, sehingga menjadi panduan strategis bagi akademisi dan praktisi dalam mendukung pengembangan mobilitas berkelanjutan dan pencapaian target Net Zero Emission 2060.



**BORNEO
NOVELTY**
Publishing



borneonovelty.com



borneonoveltypublishing@gmail.com



Balikpapan, 76126, Kalimantan Timur, Indonesia



IKAPI
IKATAN PENERBIT INDONESIA

ISBN 978-634-7220-23-3 (PDF)



9

786347

220233