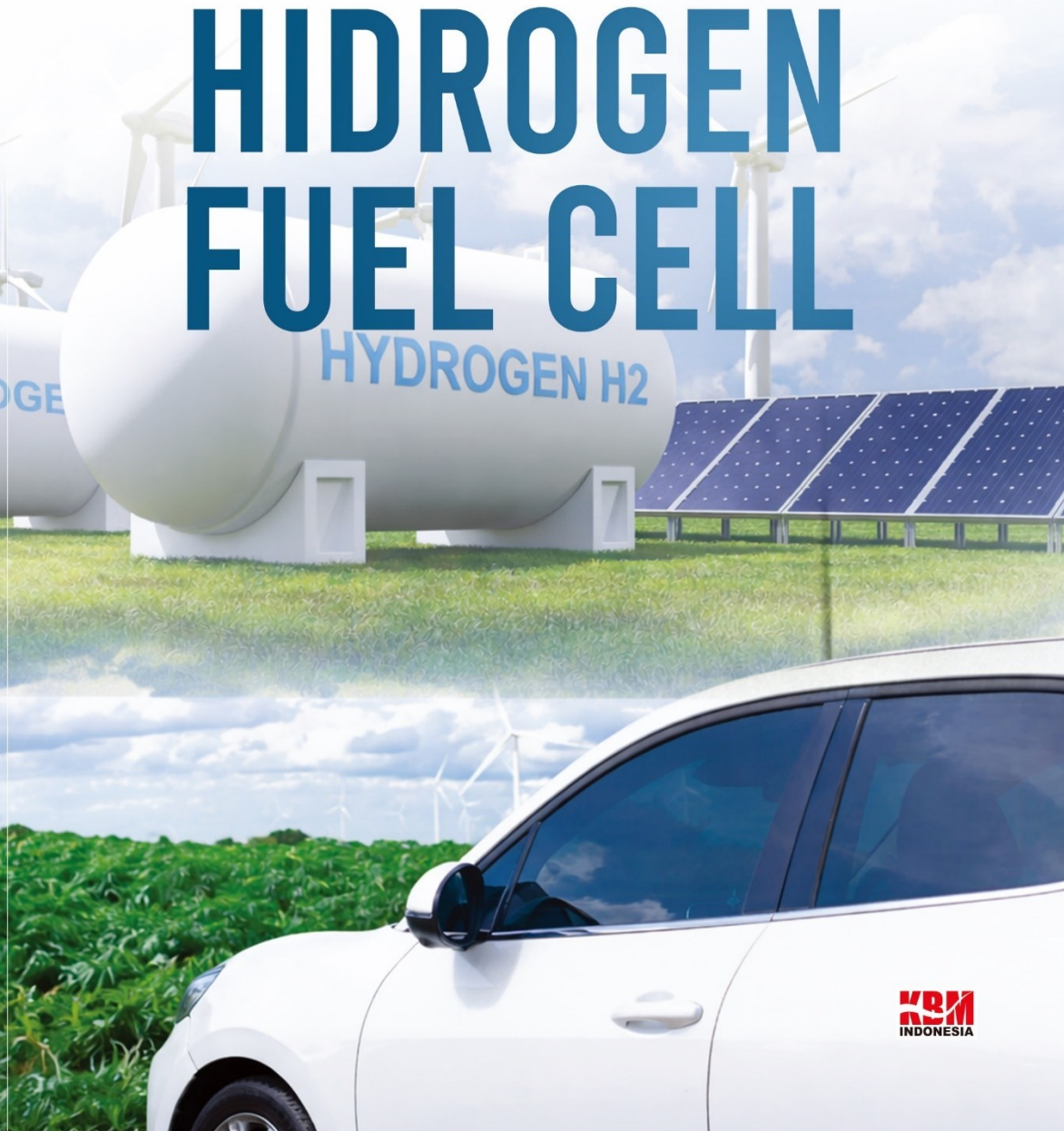


Prof. Ir. Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.
Dr. Eng. Ir. Irfan Mujahidin, S.T., M.T., M.Sc.
Nanang Apriandi MS, S.T., M.T.

REKAYASA SISTEM ENERGI PADA **MOBIL LISTRIK** **HIDROGEN** **FUEL CELL**



----- Rekayasa Sistem Energi *pada*
MOBIL LISTRIK
HIDROGEN FUEL CELL -----

OLEH:

Prof. Ir. Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.

Dr. Eng. Ir. Irfan Mujahidin., S.T., M.T., M.Sc.

Nanang Apriandi, S.T., M.T.

PENERBIT KBM INDONESIA

Adalah penerbit dengan misi memudahkan proses penerbitan buku buku penulis di tanah air Indonesia. Serta menjadi media sharing proses penerbitan buku.

REKAYASA SISTEM ENERGI PADA MOBIL LISTRIK HIDROGEN FUEL CELL

*Copyright @2026 By Prof. Ir. Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D., IPM.,
ASEAN Eng., dkk
All right reserved*

Penulis

Prof. Ir. Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.
Dr. Eng. Ir. Irfan Mujahidin., S.T., M.T., M.Sc.
Nanang Apriandi, S.T., M.T.

Desain Sampul

Aswan Kreatif

Tata Letak

Sofitahm

Editor

Dr. Muhamad Husein Maruapey, Drs., M.Sc.
Background isi buku di ambil dari <https://www.freepik.com/>

Official

Depok, Sleman-Jogjakarta (Kantor)
Penerbit Karya Bakti Makmur (KBM) Indonesia
Anggota IKAPI/No. IKAPI 279/JTI/2021
081357517526 (Tlpn/WA)

Website

<https://penerbitkbm.com>
www.penerbitbukumurah.com

Email

naskah@penerbitkbm.com

Distributor

<https://penerbitkbm.com/toko-buku/>

Youtube

Penerbit KBM Sastrabook

Instagram

@penerbit.kbmindonesia
@penerbitbukujogja

ISBN: 978-634-278-274-3

Cetakan ke-1, April 2026

15,5 x 23 cm, xiv + 170 halaman

Isi buku diluar tanggungjawab penerbit
Hak cipta merek KBM Indonesia sudah terdaftar di DJKI-Kemenkumham
dan isi buku dilindungi undang-undang.
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa seizin penerbit karena beresiko sengketa hukum

Sanksi Pelanggaran Pasal 113
Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas tersusunnya monograf berjudul *Rekayasa Sistem Energi pada Mobil Listrik Hidrogen Fuel Cell* ini. Buku ini lahir dari kebutuhan akademik dan rekayasa praktis untuk merespons dinamika transisi energi global yang semakin menuntut solusi transportasi rendah emisi, efisien, dan berkelanjutan. Transformasi sistem energi dalam sektor transportasi bukan lagi pilihan, melainkan keniscayaan ilmiah dan teknologis yang harus dijawab melalui pendekatan multidisipliner dan terintegrasi.

Perkembangan kendaraan listrik berbasis *hydrogen fuel cell* membuka horizon baru dalam arsitektur sistem energi modern. Namun demikian, tantangan utama tidak hanya terletak pada ketersediaan sumber energi alternatif, melainkan pada bagaimana sistem tersebut dikelola secara menyeluruh agar stabil, adaptif, dan optimal dalam berbagai kondisi operasi. Variasi beban, fluktuasi temperatur, serta interaksi kompleks antar subsistem energi menuntut pendekatan rekayasa sistem yang tidak parsial, melainkan komprehensif dan berbasis analisis ilmiah.

Monograf ini memusatkan perhatian pada perumusan kerangka konseptual manajemen energi terintegrasi, dengan menempatkan stabilitas termal dan distribusi energi sebagai parameter kunci optimasi performa kendaraan listrik hidrogen. Pendekatan ini menggabungkan aspek penyimpanan energi, konversi elektrokimia melalui *fuel cell*, pengendalian temperatur aktif, serta integrasi sumber energi tambahan berbasis energi terbarukan. Dengan demikian, efisiensi sistem dipahami sebagai hasil interaksi harmonis

antara variabel termal, elektrik, dan manajerial dalam satu arsitektur sistem terpadu.

Secara metodologis, buku ini disusun melalui tahapan identifikasi *problem knowledge*, penguatan kerangka teori, perumusan model dan pendekatan analitik, hingga sintesis konseptual berbasis hasil evaluasi performa sistem. Struktur pembahasan dirancang untuk membangun alur berpikir sistemik, dimulai dari urgensi transformasi energi, pendalaman teori komponen kendaraan listrik, integrasi multi-sumber energi, hingga analisis kinerja dan sintesis ilmiah yang relevan dengan pengembangan teknologi di masa depan.

Kami menyadari bahwa pengembangan teknologi kendaraan listrik hidrogen masih berada dalam fase dinamis dan terus berkembang. Oleh karena itu, monograf ini tidak dimaksudkan sebagai karya yang final, melainkan sebagai kontribusi ilmiah yang membuka ruang diskusi, pengembangan lanjutan, serta kolaborasi riset di bidang rekayasa sistem energi. Harapannya, buku ini dapat menjadi referensi akademik bagi mahasiswa, peneliti, praktisi teknik, serta pengambil kebijakan yang memiliki perhatian terhadap inovasi transportasi berkelanjutan.

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam proses penyusunan buku ini, baik melalui dukungan akademik, teknis, maupun moral. Semoga monograf ini memberikan manfaat ilmiah, memperkaya khasanah literatur rekayasa energi, serta menjadi bagian dari ikhtiar kolektif menuju sistem transportasi yang lebih bersih, efisien, dan berdaya saing tinggi.

Akhir kata, kami berharap karya ini dapat menjadi pijakan konseptual dalam pengembangan kendaraan listrik berbasis *hydrogen fuel cell* yang adaptif terhadap dinamika beban dan

lingkungan operasi, serta mampu menjawab tantangan keberlanjutan energi di masa depan.

Yogyakarta, Februari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR LAMBANG	xi
DAFTAR ISTILAH.....	xiii
DAFTAR APPENDIKS	xv

OVERVIEW BUKU	1
---------------------	---

BAB 1

PENDAHULUAN	3
1.1 <i>Problem Knowledge</i>	16

BAB 2

KERANGKA TEORI.....	19
2.1 Mobil Listrik.....	37
2.2 Baterai	42
2.3 <i>Battery Management System (BMS)</i>	46
2.4 Pengisi Daya (<i>Charger</i>)	47
2.5 <i>Internet of Things (IoT)</i>	48
2.6 <i>Fuel Cell</i>	54
2.7 Pendingin	59
2.8 Panel Surya	62
2.9 Solar Charge Controller	63

BAB 3

MODEL DAN PENDEKATAN ANALITIK	67
3.1 Tahap Pelaksanaan Kajian analitik	84

3.2	Integrasi Sistem -----	84
3.3	Variabel Kajian Kajian Ilmiah -----	87
3.4	Gambar Desain -----	88

BAB 4

ANALISIS DAN SINTESIS KONSEPTUAL..... 91

4.1	Analisis Mobil Listrik-----	108
4.2	Analisis Panel Surya -----	124
4.3	Biaya Investasi Awal Panel Surya-----	134
4.4	Analisis PLN dan PEM <i>Fuel cell</i> -----	137

BAB 5

SINTESIS ILMIAH 143

5.1	Sintesis Ilmiah -----	143
-----	-----------------------	-----

DAFTAR PUSTAKA..... 149

LAMPIRAN..... 153

PROFIL PENULIS..... 167

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Battery Electric Vehicle (BEV).....	38
Gambar 2. 2 Hybrid Electric Vehicles (HEV).....	39
Gambar 2. 3 Motor Listrik.....	40
Gambar 2. 4 Kontroler	41
Gambar 2. 5 Baterai 12 V 55 Ah.....	45
Gambar 2. 6 Baterai 96 V 50 Ah.....	45
Gambar 2. 7 <i>Battery Management System</i> (BMS).....	47
Gambar 2. 8 <i>Charger</i>	48
Gambar 2. 9 Diagram IoT Platform.....	49
Gambar 2. 10 ESP32	50
Gambar 2. 11 RS-485	51
Gambar 2. 12 PZEM-017	51
Gambar 2. 13 Logo MQTT.....	52
Gambar 2. 14 Konverter RTD Pt100.....	53
Gambar 2. 15 Desain Internet of Things (IoT).....	53
Gambar 2. 16 Bagian – bagian Fuel Cell	56
Gambar 2. 17 Tabung Hidrogen	57
Gambar 2. 18 <i>Fan</i>	60
Gambar 2. 19 Komponen-komponen thermostat yang dipisahkan secara umum	61
Gambar 2. 20 Prinsip Kerja Panel Surya	62
Gambar 2. 21 <i>Solar Charge Controller</i> (SCC)	65
Gambar 3. 1 Diagram Tulang Ikan	84
Gambar 3. 2 Modul Pendingin (Kipas).....	86
Gambar 3. 3 Desain Mobil Listrik Tampak Samping	88
Gambar 3. 4 Desain Mobil Listrik Tampak Belakang.....	88
Gambar 3. 5 Rangkaian Chasis	88

Gambar 3. 6 Desain Kelistrikan Mobil Listrik.....	89
Gambar 4. 1 Grafik Hubungan Konsumsi Daya tiap Meter terhadap Temperatur Kerja Motor.....	110
Gambar 4. 2 Grafik Hubungan antara Daya Motor dengan Kecepatan	113
Gambar 4. 3 Grafik Hubungan antara Torsi Motor dengan Kecepatan	114
Gambar 4. 4 Grafik Hubungan antara Konsumsi Daya dengan Temperatur Motor.....	116
Gambar 4. 5 Grafik Hubungan antara Daya dengan Kecepatan Motor.....	120
Gambar 4. 6 Grafik Hubungan antara Radiasi Matahari dengan Jam Analisis.....	131
Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Daya Panel Surya dengan Jam Analisis	132
Gambar 4. 8 Grafik Hubungan antara Efisiensi Panel Surya dengan Jam Analisis.....	133
Gambar 4. 9 Skema pergantian baterai 12 V 50 Ah.....	135
Gambar 4. 10 Grafik Hubungan Efisiensi PEM <i>Fuel Cell</i> terhadap Daya <i>Fuel Cell</i>	141

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi Motor Listrik.....	41
Tabel 2. 2 Spesifikasi Kontroler	41
Tabel 2. 3 Contoh data analisis mobil listrik.....	43
Tabel 2. 4 Contoh data aksesoris mobil listrik.....	44
Tabel 2. 5 Spesifikasi Baterai 12V	45
Tabel 2. 6 Spesifikasi <i>Battery Management System</i> (BMS).....	47
Tabel 2. 7 Spesifikasi Pengisi Daya	48
Tabel 2. 8 Spesifikasi <i>Fuel Cell</i>	56
Tabel 2. 9 Spesifikasi Tabung Hidrogen.....	57
Tabel 2. 10 Spesifikasi Kipas Pendingin	60
Tabel 2. 11 Spesifikasi Panel Surya	62
Tabel 2. 12 Spesifikasi <i>Solar Charge Controller</i> (SCC)	65
Tabel 3. 1 Keterangan Gambar	89
Tabel 4. 1 Analisis mobil listrik sebelum diterapkan pendingin dan panel surya	108
Tabel 4. 2 Analisis mobil listrik dalam kondisi baterai mobil dan kontroller sudah panas	109
Tabel 4. 3 Analisis Mobil Listrik Pada <i>Dyno Test</i>	112
Tabel 4. 4 Analisis mobil listrik menggunakan kipas 2.000 rpm....	115
Tabel 4. 5 Analisis mobil listrik menggunakan kipas 4.000 rpm....	115
Tabel 4. 6 Peluang penghematan konsumsi daya	118
Tabel 4. 7 Peluang penambahan durasi ketahanan baterai dan jarak tempuh mobil listrik.....	119
Tabel 4. 8 Analisis mobil pada kondisi jalan menanjak.....	121
Tabel 4. 9 Selisih konsumsi daya pada $\theta = 00$ dan $\theta = 50$	122
Tabel 4. 10 Perhitungan nilai koefisien gesek kendaraan listrik kondisi jalan mendatar dan jalan miring	123

Tabel 4. 11 Data analisis peforma mobil listrik.....	124
Tabel 4. 12 Daya aksesoris mobil listrik	125
Tabel 4. 13 Analisis Panel Surya Jumat, 18 Juli 2025.....	126
Tabel 4. 14 Analisis Panel Surya Sabtu, 19 Juli 2025	127
Tabel 4. 15 Analisis Panel Surya Minggu, 20 Juli 2025.....	129
Tabel 4. 16 Rata – rata daya output panel surya	134
Tabel 4. 17 Biaya investasi awal panel surya	134
Tabel 4. 18 Pengisian Daya baterai 96 V/50 Ah	137
Tabel 4. 19 Analisis Pengisian Daya PEM <i>Fuel cell</i>	138
Tabel 4. 20 Hasil perhitungan PEM <i>Fuel Cell</i>	140

DAFTAR LAMBANG

$\dot{m}$	: Laju aliran massa	[kg/s]
ρ	: Massa jenis	[kg/m ³]
Q	: Debit	[m ³ /s]
P	: Daya	[Watt]
LHV	: <i>Low Heating Value</i>	[MJ/kg]
V	: Tegangan	[V]
I	: Arus	[A]
η	: Efisiensi	[%]
SFC	: <i>Specific Fuel Consumption</i>	[kg/Ws]
H	: Ketinggian	[m]
p	: Panjang	[m]
l	: Lebar	[m]
A	: Luas	[m ²]
k_d	: Konsumsi daya	[W/m]
s	: Jarak tempuh	[m]

DAFTAR ISTILAH

CO ₂	: Karbon Dioksida
CO	: Karbon Monoksida
H ₂ O	: Air
H ₂	: Hidrogen
e ⁻	: Elektron
COP27	: Konferensi Partai oleh 27 Negara

DAFTAR APPENDIKS

Apendiks 1 Lembar Keaslian Data.....	153
Apendiks 2 Standar Operasional Prosedur (SOP)	
Pengoperasian	157
Apendiks 3 Dokumentasi.....	159
Apendiks 4 Kodingan Iot	160

OVERVIEW BUKU

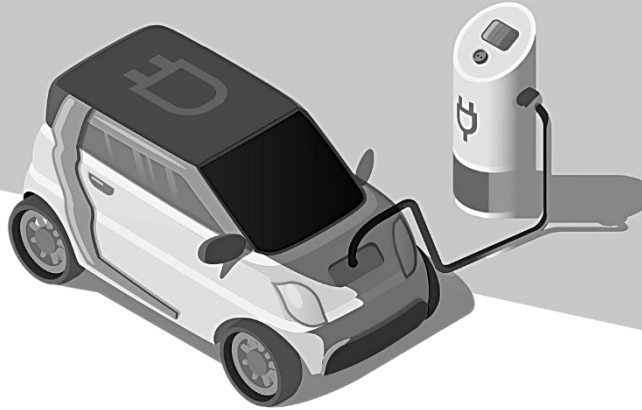
PERKEMBANGAN kendaraan listrik berbasis hidrogen fuel cell menjadi salah satu pendekatan penting dalam transisi menuju sistem transportasi rendah

emisi. Namun, keterbatasan utama teknologi ini tidak hanya terletak pada sumber energi, melainkan pada stabilitas operasi sistem energi kendaraan secara keseluruhan. Variasi temperatur komponen, ketergantungan pada satu sumber energi, serta fluktuasi beban listrik menyebabkan efisiensi sistem kendaraan listrik sering berada di bawah potensi optimalnya. Oleh karena itu diperlukan suatu pendekatan manajemen energi terintegrasi yang tidak hanya berfokus pada penyimpanan energi, tetapi juga pada stabilitas termal dan augmentasi energi tambahan.

Monograf ini membahas suatu konsep integrasi multi-sumber energi pada kendaraan listrik hidrogen fuel cell melalui kombinasi pengendalian temperatur aktif dan suplai energi tambahan berbasis energi terbarukan. Sistem dirancang sebagai arsitektur energi hibrida yang menggabungkan baterai, fuel cell, dan sumber energi eksternal dalam satu mekanisme manajemen energi terpadu. Pendinginan aktif berperan dalam menjaga titik kerja optimal komponen listrik, sedangkan suplai energi tambahan berfungsi sebagai penyangga beban (load buffering) untuk mengurangi fluktuasi konsumsi daya pada baterai utama. Dengan pendekatan ini, efisiensi sistem tidak hanya ditentukan oleh karakteristik satu komponen, tetapi oleh keseimbangan termal dan distribusi energi antar subsistem.

Hasil analisis menunjukkan bahwa stabilitas temperatur memiliki korelasi langsung terhadap konsumsi energi spesifik sistem penggerak listrik. Penurunan temperatur operasi menghasilkan kondisi kerja yang lebih stabil dan menekan kebutuhan daya berlebih akibat losses termal. Sementara itu, integrasi sumber energi tambahan meningkatkan kontinuitas suplai energi dan memperpanjang utilisasi energi utama. Kombinasi kedua mekanisme tersebut membentuk model manajemen energi kendaraan yang lebih adaptif terhadap perubahan beban dan kondisi lingkungan.

Kontribusi utama monograf ini adalah perumusan kerangka konseptual manajemen energi terintegrasi pada kendaraan listrik hidrogen fuel cell, yang menempatkan stabilitas termal dan distribusi energi sebagai parameter utama optimasi performa sistem. Pendekatan ini memberikan perspektif baru bahwa peningkatan efisiensi kendaraan listrik tidak hanya dicapai melalui peningkatan kapasitas energi, tetapi melalui pengendalian keseimbangan energi dan temperatur secara simultan dalam satu arsitektur sistem. Kata-kata kunci: kipas pendingin, mobil listrik, panel surya



PENDAHULUAN

■ OVERVIEW

Transformasi sistem transportasi global menuju paradigma rendah emisi merupakan konsekuensi logis dari meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca dan urgensi mitigasi perubahan iklim. Sektor transportasi berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon dioksida, sehingga diperlukan inovasi rekayasa energi yang mampu menekan konsumsi bahan bakar fosil sekaligus mempertahankan kinerja kendaraan. Buku

menempatkan kendaraan listrik berbasis hydrogen fuel cell sebagai salah satu arsitektur sistem energi yang prospektif dalam menjawab tantangan tersebut. Namun, permasalahan utama tidak semata terletak pada ketersediaan sumber energi alternatif, melainkan pada bagaimana sistem energi kendaraan dikelola secara terintegrasi agar efisien, stabil, dan adaptif terhadap dinamika beban operasi.

Dalam konteks rekayasa sistem, kendaraan listrik hydrogen fuel cell merupakan sistem multi-komponen yang melibatkan interaksi kompleks antara baterai, fuel cell, motor listrik, kontroler, serta

subsistem pendukung lainnya. Setiap komponen memiliki karakteristik termal dan elektrik yang saling memengaruhi. Peningkatan temperatur akibat pembebanan berulang dapat menurunkan efisiensi konversi energi, meningkatkan losses, serta mempercepat degradasi material aktif baterai maupun komponen elektronik daya. Oleh karena itu, pendekatan manajemen energi yang hanya berorientasi pada kapasitas penyimpanan tanpa mempertimbangkan stabilitas termal dan distribusi beban tidak lagi memadai untuk mencapai performa optimal.

Bab ini mengawali pembahasan dengan menempatkan problem knowledge sebagai fondasi konseptual penelitian dan pengembangan sistem. Permasalahan jarak tempuh kendaraan listrik yang terbatas, fluktuasi daya akibat variasi kecepatan dan beban, serta potensi thermal runaway pada baterai menjadi indikator bahwa optimasi harus dilakukan secara sistemik. Rekayasa tidak hanya diarahkan pada peningkatan kapasitas energi, tetapi pada penciptaan keseimbangan antara suplai, distribusi, dan disipasi energi. Dalam kerangka tersebut, sistem pendingin aktif dan integrasi sumber energi tambahan seperti panel surya diposisikan sebagai bagian dari strategi augmentasi energi dan stabilisasi performa.

Lebih lanjut, kendaraan hydrogen fuel cell memiliki karakteristik unik dibandingkan Battery Electric Vehicle (BEV) murni, karena proses produksi listrik berlangsung melalui reaksi elektrokimia antara hidrogen dan oksigen. Efisiensi konversi energi, laju aliran massa hidrogen, serta stabilitas tegangan keluaran menjadi parameter penting yang harus dikelola secara presisi. Ketergantungan terhadap satu sumber energi berisiko menimbulkan ketidakseimbangan sistem ketika terjadi lonjakan beban. Oleh sebab itu, integrasi multi-sumber energi—baterai utama, fuel cell, dan energi surya—dirancang untuk membentuk arsitektur hibrida yang mampu

melakukan load buffering serta meningkatkan kontinuitas suplai daya.

Bab Pendahuluan ini menegaskan bahwa peningkatan performa kendaraan listrik tidak dapat dicapai melalui pendekatan parsial. Efisiensi sistem merupakan hasil dari interaksi harmonis antara kontrol termal, manajemen daya, dan optimasi distribusi energi. Dengan demikian, fokus kajian dalam monograf ini adalah merumuskan model manajemen energi terintegrasi yang menempatkan stabilitas temperatur dan keseimbangan energi sebagai parameter utama optimasi. Pendekatan ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah berupa kerangka konseptual yang sistematis, sekaligus kontribusi praktis dalam pengembangan kendaraan listrik hydrogen fuel cell yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, Bab I berfungsi sebagai landasan epistemologis dan teknis yang menjelaskan urgensi, ruang lingkup, serta arah pengembangan sistem energi kendaraan listrik berbasis fuel cell. Melalui pendekatan rekayasa yang komprehensif dan berbasis analisis performa, buku ini mengusulkan paradigma bahwa keberhasilan transisi energi pada sektor transportasi sangat ditentukan oleh kemampuan merancang sistem yang adaptif terhadap dinamika beban dan lingkungan operasi. Dengan fondasi tersebut, pembahasan pada bab-bab selanjutnya diarahkan pada pendalaman kerangka teori, model analitik, serta sintesis konseptual yang mendukung terwujudnya sistem kendaraan listrik rendah emisi yang optimal dan berdaya saing tinggi.

■ KERANGKA KONSEPTUAL

Kerangka konseptual pada Bab I dibangun atas pemahaman bahwa kendaraan listrik berbasis hydrogen fuel cell merupakan suatu sistem energi terintegrasi yang bekerja melalui interaksi simultan

antara subsistem penyimpanan energi, subsistem konversi energi, subsistem penggerak, serta subsistem pengendalian dan proteksi. Dalam perspektif rekayasa sistem, performa kendaraan tidak ditentukan oleh satu komponen tunggal, melainkan oleh keseimbangan dinamis antarvariabel energi, temperatur, dan beban kerja. Oleh karena itu, pendekatan konseptual dalam monograf ini menempatkan manajemen energi terintegrasi sebagai pusat analisis, dengan stabilitas termal dan distribusi daya sebagai variabel kunci optimasi.

Secara struktural, sistem kendaraan listrik hydrogen fuel cell terdiri atas tiga lapisan utama. Lapisan pertama adalah sumber dan penyimpanan energi, yang mencakup baterai utama bertegangan tinggi serta unit fuel cell sebagai penghasil energi listrik melalui reaksi elektrokimia hidrogen–oksigen. Lapisan kedua adalah lapisan konversi dan distribusi energi, yang melibatkan kontroler, sistem proteksi, serta mekanisme pengaturan arus dan tegangan untuk memastikan suplai daya sesuai kebutuhan beban. Lapisan ketiga adalah lapisan beban dan aktuasi, yakni motor listrik beserta sistem pendukung seperti sistem kontrol elektronik dan perangkat IoT. Ketiga lapisan tersebut berinteraksi dalam suatu siklus energi tertutup yang sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, kecepatan kendaraan, serta lingkungan termal.

Dalam kerangka konseptual ini, temperatur diposisikan sebagai variabel intervening yang memengaruhi efisiensi konversi energi dan konsumsi daya spesifik. Peningkatan temperatur pada motor listrik, kontroler, maupun baterai akan meningkatkan resistansi internal dan losses daya, sehingga berdampak langsung terhadap konsumsi energi per satuan jarak tempuh. Dengan demikian, stabilitas temperatur bukan sekadar aspek proteksi, tetapi menjadi faktor determinan dalam efisiensi sistem. Integrasi modul pendingin aktif dalam sistem bukan dipahami sebagai komponen tambahan,

melainkan sebagai bagian dari strategi pengendalian variabel termal untuk mempertahankan titik kerja optimal.

Di sisi lain, ketergantungan pada satu sumber energi utama berpotensi menimbulkan fluktuasi suplai daya ketika terjadi variasi beban mendadak. Oleh sebab itu, konsep augmentasi energi melalui integrasi sumber energi tambahan, seperti panel surya, ditempatkan sebagai mekanisme load buffering. Dalam kerangka ini, energi surya tidak dimaksudkan sebagai pengganti total sumber energi utama, tetapi sebagai penyangga yang membantu menstabilkan distribusi daya pada sistem kelistrikan sekunder, sehingga beban pada baterai utama dan fuel cell dapat ditekan. Integrasi multi-sumber energi ini membentuk arsitektur hibrida yang meningkatkan kontinuitas suplai dan memperpanjang umur operasional komponen.

Kerangka konseptual Bab I juga mengaitkan variabel-variabel utama dalam bentuk hubungan kausal: peningkatan beban → kenaikan temperatur → peningkatan konsumsi daya → penurunan efisiensi sistem. Intervensi berupa pendinginan aktif dan suplai energi tambahan dihipotesiskan mampu memutus rantai degradasi performa tersebut dengan menurunkan temperatur kerja serta mendistribusikan ulang beban energi. Dengan demikian, variabel efisiensi sistem menjadi outcome utama yang dipengaruhi oleh dua parameter kontrol, yaitu stabilitas termal dan strategi distribusi energi.

Melalui kerangka ini, monograf menegaskan bahwa optimasi kendaraan listrik hydrogen fuel cell harus dipahami sebagai proses rekayasa multidimensi yang mengintegrasikan aspek termal, elektrik, dan manajerial dalam satu arsitektur sistem terpadu. Pendekatan konseptual ini menjadi dasar bagi analisis teoritik dan eksperimental pada bab-bab selanjutnya, sekaligus memberikan fondasi ilmiah bagi pengembangan model manajemen energi kendaraan listrik yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

■ RUANG LINGKUP KAJIAN

Bab I dalam monograf ini menempatkan rekayasa sistem energi pada kendaraan listrik berbasis hydrogen fuel cell sebagai objek kajian utama dalam kerangka transisi energi dan transportasi rendah emisi. Ruang lingkup kajian tidak dibatasi pada pembahasan komponen kendaraan secara parsial, melainkan difokuskan pada pendekatan sistemik yang menelaah interaksi multidisipliner antara subsistem penyimpanan energi, subsistem konversi energi, subsistem distribusi daya, serta subsistem pengendalian termal dan digital. Dengan demikian, Bab I berfungsi sebagai fondasi konseptual dan epistemologis yang mengarahkan pembahasan monograf secara komprehensif, sekaligus merumuskan batasan, asumsi, dan fokus analisis yang akan dikembangkan pada bab-bab selanjutnya.

Secara konseptual, ruang lingkup kajian Bab I mencakup telaah terhadap urgensi transformasi sistem transportasi global menuju paradigma rendah karbon. Kajian ini membahas konteks makro berupa peningkatan emisi gas rumah kaca sektor transportasi, implikasi kebijakan internasional seperti komitmen pengurangan emisi karbon, serta tantangan teknis dalam implementasi teknologi kendaraan listrik di negara berkembang. Dalam konteks tersebut, kendaraan listrik hydrogen fuel cell diposisikan sebagai salah satu arsitektur energi alternatif yang memiliki potensi signifikan dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus menekan emisi karbon dioksida. Namun, ruang lingkup Bab I tidak berhenti pada argumentasi normatif mengenai keberlanjutan lingkungan, melainkan mengerucut pada problem teknis yang melekat pada sistem energi kendaraan listrik itu sendiri.

Kajian dalam Bab I secara khusus membatasi fokus pada permasalahan stabilitas dan efisiensi sistem energi kendaraan hydrogen fuel cell. Permasalahan yang diangkat mencakup keterbatasan jarak

tempuh akibat kapasitas baterai yang terbatas, fluktuasi konsumsi daya akibat variasi beban dan kecepatan kendaraan, serta pengaruh temperatur terhadap degradasi performa komponen listrik dan elektrokimia. Dalam ruang lingkup ini, temperatur diperlakukan sebagai variabel kritis yang memengaruhi resistansi internal baterai, efisiensi motor listrik, serta stabilitas kontroler daya. Dengan demikian, aspek manajemen termal menjadi bagian integral dalam definisi ruang lingkup kajian Bab I.

Selain aspek termal, Bab I juga membatasi kajian pada strategi augmentasi energi melalui integrasi multi-sumber daya. Sistem yang dikaji meliputi kombinasi baterai utama bertegangan tinggi, unit fuel cell sebagai penghasil energi berbasis reaksi elektrokimia hidrogen–oksigen, serta sumber energi tambahan berupa panel surya yang berfungsi sebagai penyangga beban sistem kelistrikan sekunder. Ruang lingkup ini tidak membahas pengembangan material fuel cell secara kimiawi maupun desain mekanik kendaraan secara detail struktural, melainkan difokuskan pada rekayasa arsitektur sistem energi dan manajemen distribusi daya antar subsistem.

Dalam batasan kajian, Bab I menempatkan Battery Management System (BMS) sebagai elemen kontrol yang memastikan keamanan dan efisiensi operasi baterai. Namun pembahasan tidak mencakup desain elektronik BMS secara rinci, melainkan difokuskan pada fungsi konseptualnya dalam menjaga keseimbangan sel, proteksi terhadap overcharge dan overdischarge, serta pengendalian temperatur operasi. Demikian pula, sistem pendingin aktif yang dikaji dibatasi pada mekanisme konveksi paksa berbasis kipas dan pengendalian thermostat, tanpa memasuki analisis fluida komputasional (CFD) secara mendalam.

Ruang lingkup Bab I juga mencakup integrasi teknologi Internet of Things (IoT) sebagai sistem monitoring berbasis data real-time.

Namun, pembahasan pada bab ini terbatas pada peran konseptual IoT dalam manajemen energi adaptif dan tidak memasuki ranah pengembangan perangkat lunak atau keamanan siber secara spesifik. IoT diposisikan sebagai subsistem pendukung yang menyediakan data tegangan, arus, daya, dan temperatur untuk mendukung evaluasi performa sistem energi secara komprehensif.

Dari sisi metodologis, ruang lingkup Bab I membatasi pendekatan pada formulasi problem knowledge dan konstruksi kerangka konseptual. Bab ini tidak memuat perhitungan numerik rinci maupun hasil eksperimen, tetapi merumuskan hubungan kausal antar variabel utama, yaitu beban kerja, temperatur operasi, konsumsi daya, dan efisiensi sistem. Hubungan tersebut dirumuskan sebagai dasar hipotesis bahwa stabilitas termal dan distribusi energi terintegrasi mampu meningkatkan efisiensi kendaraan secara keseluruhan. Dengan demikian, Bab I berperan sebagai jembatan antara fenomena empiris dan model analitik yang akan dikembangkan dalam bab berikutnya.

Secara sistemik, ruang lingkup kajian Bab I mencakup tiga dimensi utama. Dimensi pertama adalah dimensi energi, yang meliputi produksi energi melalui fuel cell, penyimpanan energi dalam baterai, serta suplai tambahan dari panel surya. Dimensi kedua adalah dimensi termal, yang mencakup dinamika temperatur pada motor listrik, baterai, dan kontroler serta dampaknya terhadap losses energi. Dimensi ketiga adalah dimensi manajemen dan kontrol, yang melibatkan BMS, kontroler kendaraan, serta integrasi IoT sebagai sistem monitoring. Ketiga dimensi tersebut dipandang sebagai satu kesatuan arsitektur yang saling berinteraksi dalam menentukan performa kendaraan.

Bab I juga membatasi ruang lingkup geografis dan operasional pada konteks implementasi kendaraan listrik di wilayah dengan potensi energi surya tinggi, seperti kawasan tropis. Hal ini relevan dengan

pemanfaatan panel surya sebagai sumber energi tambahan. Namun kajian tidak mencakup analisis kebijakan energi nasional secara komprehensif, melainkan hanya menempatkan konteks kebijakan sebagai latar belakang urgensi penelitian.

Dalam hal batasan teknis, kendaraan yang dikaji merupakan kendaraan listrik dengan konfigurasi motor AC induksi atau BLDC berkapasitas sekitar 10 kW dan sistem baterai bertegangan 96 V, sebagaimana tercantum dalam spesifikasi teknis monograf. Kajian tidak membahas kendaraan berat skala industri maupun kendaraan komersial berskala besar, sehingga hasil analisis difokuskan pada skala kendaraan ringan hingga menengah.

Ruang lingkup Bab I juga menegaskan bahwa penelitian ini tidak mengkaji produksi hidrogen secara mendalam, baik melalui metode steam reforming maupun elektrolisis, melainkan mengasumsikan ketersediaan hidrogen dengan kemurnian sesuai spesifikasi fuel cell. Dengan demikian, fokus tetap berada pada integrasi dan manajemen energi dalam kendaraan, bukan pada rantai pasok hidrogen secara makro.

Secara ilmiah, Bab I membatasi kontribusi pada perumusan kerangka konseptual manajemen energi terintegrasi. Kontribusi yang diharapkan adalah model berpikir sistemik yang menempatkan stabilitas temperatur dan distribusi energi sebagai parameter utama optimasi. Bab ini tidak mengklaim inovasi material baru atau desain sel bahan bakar revolusioner, melainkan menawarkan pendekatan integratif terhadap sistem yang telah ada agar bekerja secara lebih efisien dan adaptif.

Dengan ruang lingkup tersebut, Bab I menjadi landasan konseptual yang memuat identifikasi masalah, batasan penelitian, asumsi dasar, serta arah pengembangan sistem energi kendaraan listrik hydrogen fuel cell. Bab ini memastikan bahwa pembahasan selanjutnya tetap

berada dalam koridor rekayasa sistem energi terintegrasi, dengan fokus pada peningkatan efisiensi, stabilitas termal, dan keberlanjutan operasional. Melalui pembatasan yang jelas dan argumentasi yang sistematis, ruang lingkup kajian Bab I membentuk fondasi ilmiah yang kokoh bagi pengembangan model analitik, evaluasi eksperimental, serta sintesis konseptual yang akan dibahas pada bab-bab berikutnya.

■ STRUKTUR BAB

Bab I dalam monograf ini disusun sebagai fondasi konseptual dan epistemologis yang menempatkan rekayasa sistem energi kendaraan listrik berbasis hydrogen fuel cell dalam konteks transformasi energi global dan dinamika teknologi transportasi rendah emisi. Struktur Bab I tidak hanya berfungsi sebagai pengantar, tetapi sebagai kerangka berpikir sistemik yang merumuskan masalah, batasan kajian, arah penelitian, serta kontribusi ilmiah yang hendak dicapai. Oleh karena itu, struktur bab ini dibangun secara berlapis dan logis, dimulai dari konteks makro global hingga perumusan fokus rekayasa sistem pada tingkat mikro kendaraan.

Struktur Bab I diawali dengan **Latar Belakang Ilmiah dan Kontekstual**, yang menjelaskan urgensi transisi energi dalam sektor transportasi. Bagian ini menguraikan hubungan antara peningkatan emisi gas rumah kaca, komitmen internasional terhadap pengurangan karbon, serta tuntutan inovasi teknologi kendaraan ramah lingkungan. Pembahasan diarahkan pada realitas bahwa kendaraan berbahan bakar fosil masih menjadi kontributor signifikan terhadap emisi karbon dioksida, sehingga diperlukan alternatif sistem energi yang lebih bersih dan efisien. Dalam konteks tersebut, kendaraan listrik berbasis hydrogen fuel cell diposisikan sebagai salah satu solusi yang memiliki potensi tinggi dalam

menjawab tantangan keberlanjutan lingkungan. Namun, latar belakang tidak berhenti pada aspek normatif lingkungan, melainkan berkembang pada persoalan teknis dan rekayasa sistem yang menentukan keberhasilan implementasi teknologi tersebut.

Setelah latar belakang, struktur Bab I dilanjutkan dengan **Identifikasi dan Formulasi Permasalahan (Problem Knowledge)**. Bagian ini berfungsi untuk menguraikan kesenjangan antara potensi teknologi dan realitas operasional kendaraan listrik. Permasalahan utama yang dirumuskan mencakup keterbatasan jarak tempuh akibat kapasitas baterai, fluktuasi konsumsi daya akibat variasi beban dan kecepatan, serta dampak temperatur terhadap efisiensi dan umur pakai komponen. Struktur penulisan dalam bagian ini menekankan pendekatan analitis yang menunjukkan hubungan kausal antara peningkatan beban, kenaikan temperatur, peningkatan losses energi, dan penurunan efisiensi sistem. Dengan demikian, Bab I tidak hanya mendeskripsikan masalah, tetapi merumuskan problem knowledge sebagai dasar rasional bagi pengembangan model manajemen energi terintegrasi.

Struktur berikutnya adalah **Tujuan dan Arah Rekayasa Sistem Energi**, yang menjelaskan secara eksplisit sasaran ilmiah monograf. Tujuan utama dirumuskan sebagai pengembangan kerangka konseptual manajemen energi terintegrasi yang mampu meningkatkan efisiensi kendaraan melalui stabilisasi temperatur dan distribusi daya antar subsistem. Dalam bagian ini, ditegaskan bahwa pendekatan yang digunakan bukanlah pendekatan parsial berbasis peningkatan kapasitas komponen semata, melainkan pendekatan sistemik yang mengintegrasikan baterai, fuel cell, panel surya, sistem pendingin, dan sistem kontrol dalam satu arsitektur terpadu. Arah rekayasa sistem ini menjadi landasan bagi bab-bab selanjutnya yang membahas teori, model analitik, serta sintesis ilmiah.

Selanjutnya, struktur Bab I mencakup **Batasan dan Ruang Lingkup Kajian**. Bagian ini penting untuk menjaga fokus ilmiah dan mencegah perluasan pembahasan yang tidak relevan. Ruang lingkup dibatasi pada rekayasa arsitektur sistem energi kendaraan listrik hydrogen fuel cell dengan konfigurasi baterai tegangan tinggi, fuel cell sebagai konverter energi, serta panel surya sebagai sumber energi tambahan untuk sistem kelistrikan sekunder. Kajian tidak mencakup pengembangan material fuel cell secara kimiawi, desain struktur mekanik kendaraan secara rinci, maupun produksi hidrogen secara industri. Batasan ini memastikan bahwa pembahasan tetap terfokus pada manajemen energi, stabilitas termal, dan optimasi distribusi daya.

Struktur Bab I juga memuat **Kerangka Konseptual dan Paradigma Sistemik**. Bagian ini membangun model berpikir yang menempatkan kendaraan listrik sebagai sistem energi multidimensi yang terdiri atas lapisan sumber energi, lapisan konversi dan distribusi daya, serta lapisan beban dan aktuasi. Kerangka konseptual ini menegaskan bahwa efisiensi sistem merupakan hasil interaksi harmonis antara produksi energi, penyimpanan energi, pengendalian temperatur, dan manajemen beban. Temperatur diposisikan sebagai variabel intervening yang memengaruhi resistansi internal dan losses daya, sedangkan distribusi energi dipandang sebagai variabel kontrol yang menentukan stabilitas suplai. Struktur ini memberikan fondasi teoretis yang akan dikembangkan lebih lanjut pada Bab II dan Bab III.

Bagian berikutnya dalam struktur Bab I adalah **Signifikansi dan Kontribusi Ilmiah**. Dalam bagian ini dijelaskan kontribusi monograf terhadap pengembangan ilmu rekayasa sistem energi. Kontribusi tersebut terletak pada perumusan model manajemen energi terintegrasi yang menggabungkan stabilitas termal dan augmentasi energi sebagai parameter optimasi performa kendaraan.

Pendekatan ini memberikan perspektif baru bahwa peningkatan efisiensi tidak hanya bergantung pada kapasitas baterai atau efisiensi fuel cell semata, tetapi pada keseimbangan dinamis antar subsistem. Dengan demikian, monograf ini memberikan nilai tambah baik secara teoretis maupun praktis.

Struktur Bab I juga mencakup **Relevansi Teknologi Digital dan Integrasi IoT** dalam sistem kendaraan. IoT diposisikan sebagai sistem monitoring real-time yang memungkinkan pengumpulan data tegangan, arus, daya, dan temperatur untuk mendukung manajemen energi adaptif. Walaupun pembahasan teknis IoT akan dikembangkan pada bab berikutnya, struktur Bab I telah menempatkan integrasi digital sebagai bagian tak terpisahkan dari rekayasa sistem energi modern. Hal ini menunjukkan bahwa kendaraan listrik masa depan merupakan sistem siber-fisik yang mengintegrasikan aspek fisik dan digital dalam satu ekosistem.

Bagian penutup dari struktur Bab I adalah **Sistematika Penulisan Monograf**, yang menjelaskan hubungan antar bab secara runtut. Bab II akan membahas landasan teori dan karakteristik teknis komponen, Bab III menyajikan model dan pendekatan analitik, Bab IV menguraikan analisis dan sintesis konseptual, dan Bab V menyimpulkan serta memproyeksikan pengembangan lebih lanjut. Sistematika ini menunjukkan bahwa Bab I bukanlah bagian yang berdiri sendiri, melainkan fondasi yang mengarahkan alur logis keseluruhan monograf.

Secara keseluruhan, struktur Bab I dirancang sebagai arsitektur konseptual yang menyatukan konteks global, problem teknis, tujuan rekayasa, batasan kajian, serta kerangka konseptual dalam satu kesatuan narasi ilmiah yang koheren. Struktur ini memastikan bahwa pembaca memahami tidak hanya apa yang dikaji, tetapi mengapa kajian tersebut penting dan bagaimana arah pengembangannya. Dengan fondasi tersebut, Bab I berfungsi sebagai titik tolak bagi

pembahasan mendalam mengenai rekayasa sistem energi kendaraan listrik hydrogen fuel cell yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

1.1 PROBLEM KNOWLEDGE

Conference of the Parties (COP27) yang dilakukan oleh *United Nation Framework Convention on Climate Change* banyak negara yang menyepakati untuk memprioritaskan kebutuhan transportasi dan logistik rendah karbon. Hal ini sesuai dengan *Paris Agreement* pada tahun 2015 mengenai pembatasan emisi karbon dioksida dan gas rumah kaca yang berimbas pada pemanasan global. Di Indonesia, menurut data yang telah diambil oleh *Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)* tren peningkatan gas karbon yang dihasilkan oleh kendaraan berbahan bakar yang semula 459,1 juta ton CO₂ pada tahun 2015 menjadi 496,4 juta ton CO₂ pada tahun 2017 (International Energy Agency, 2019). Tren ini meningkat sebanyak 108% pada kurun waktu kurang dari 5 tahun. Oleh sebab itu, pengembangan energi terbarukan pada kendaraan untuk moda transportasi dan logistik diperlukan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar yang menghasilkan gas karbon (Alaswad *et al.*, 2016).

Mobil hibrid hidrogen *fuel cell* dan mobil listrik kini sedang ramai diperbincangkan sebagai solusi masalah lingkungan yang dihasilkan transportasi konvensional. Energi hidrogen digunakan beriringan dengan penggunaan baterai. Hal ini dapat ditemukan pada kendaraan hidrogen atau *Hydrogen Fuel Cell Vehicles (HFCVs)* dan kendaraan listrik atau *Electric Vehicles (EVs)*. Dengan meningkatnya tren yang konsisten terhadap kendaraan listrik, kebutuhan akan baterai yang efisien dengan tingkat energi tinggi akan meningkat pesat. Terdapat beberapa metode penyimpanan (*energy storage*) yang dapat diaplikasikan pada EVs dan HFCVs. Namun dalam

perkembangannya terdapat beberapa tantangan yang dianggap masih membatasi terhadap sistem mobil listrik, salah satunya adalah terkait jarak tempuh kendaraan listrik yang masih terbatas. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan optimasi terhadap kinerja komponen mobil listrik, dengan memasang sistem pendingin pada komponen elektronik dan penambahan cadangan energi seperti cara kerja alternator.

Performance pada komponen elektronik turun karena timbulnya panas (Prima Dewi, 2023). Melalui sistem pendingin dan penambahan cadangan energi pada mobil listrik. Tingkat pelepasan energi yang rendah dan masa pakai yang relatif lebih lama menjadikan baterai memiliki nilai lebih (Van-Thanh, 2020). Meskipun demikian, kinerja baterai dikondisikan pada suhu 20 °C hingga 50 °C dan idealnya baterai untuk menyimpan energi berada suhu optimal 45 °C (Sanguesa *et al.*, 2021). Karena akan berdampak pada pengurangan kapasitas baterai dan menyebabkan *thermal runaway*. Menerapkan sistem manajemen baterai (BMS) untuk optimasi sangat diperlukan guna menjaga kinerja baterai, mencegah *overheating* dan memastikan komponen beroperasi pada suhu optimal.

Performa kendaraan listrik dapat ditingkatkan dengan upaya lain yaitu dengan pemasangan sumber energi tambahan pada mobil listrik untuk mendukung sistem kelistrikan properti tambahan, seperti lampu aksesori, IoT, dan *fuel cell*. Namun, adanya motor listrik pada kendaraan listrik menyebabkan alternator tidak dapat bekerja layaknya kendaraan konvensional. Hal ini disebabkan karena konfigurasi dari motor listrik tidak sama seperti mesin kendaraan konvensional. Oleh sebab itu, dibutuhkan sebuah alat untuk menggantikan alternator. Panel surya dapat menjadi salah satu alat yang dapat dipilih sebagai pengganti alternator. Meskipun tidak

sama cara kerja alternator, pengisian daya baterai masih dapat dilakukan dengan memanfaatkan energi dari luar kendaraan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alaswad, A. *et al.* (2016) 'Developments in fuel cell technologies in the transport sector', *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(37), pp. 16499–16508. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.164>.
- Albatayneh, A. *et al.* (2020) 'Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles', *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), pp. 669–680. Available at: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0041>.
- Armenta-Déu, C. and Cattin, E. (2021) 'Real driving range in electric vehicles: Influence on fuel consumption and carbon emissions', *World Electric Vehicle Journal*, 12(4), pp. 1–21. Available at: <https://doi.org/10.3390/wevj12040166>.
- Asy'ari, H., Jatmiko and Angga (2012) 'Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Sel Surya', *Symposium Nasional RAPI XI FT UMS*, pp. 52–57.
- Dallaev, R. *et al.* (2023) 'Overview of the Current State of Flexible Solar Panels and Photovoltaic Materials', *Materials*, 16(17). Available at: <https://doi.org/10.3390/ma16175839>.
- Elizabeth Connelly, Michael Penev, Amgad Elgowainy, C.H. (2019) 'DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record', 25, pp. 61–62.
- Fan, Y. *et al.* (2021) 'Optimization of cooling strategies for an electric vehicle in high-temperature environment', *Applied Thermal Engineering*, 195(May), p. 117088. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117088>.
- Inertial, M. and System, N. (2023) 'Implementasi sensor'.
- International Energy Agency (2019) 'CO₂ emission from fuel

- and combustion: Overview', *International Energy Agency*, pp. 1–514. Available at: www.iea.org.
- Manoharan, Y. *et al.* (2019) 'Hydrogen fuel cell vehicles; Current status and future prospect', *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(11). Available at: <https://doi.org/10.3390/app9112296>.
- Marom, R. *et al.* (2011) 'A review of advanced and practical lithium battery materials', *Journal of Materials Chemistry*, 21(27), pp. 9938–9954. Available at: <https://doi.org/10.1039/c0jm04225k>.
- Martins, J. and Brito, F.P. (2020) 'Alternative fuels for internal combustion engines', *Energies*, 13(15). Available at: <https://doi.org/10.3390/en13164086>.
- Motlagh, N.H. *et al.* (2020) 'Internet of things (IoT) and the energy sector', *Energies*, 13(2), pp. 1–27. Available at: <https://doi.org/10.3390/en13020494>.
- Muthukumar, M. *et al.* (2021) 'The development of fuel cell electric vehicles - A review', *Materials Today: Proceedings*, 45(xxxx), pp. 1181–1187. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.679>.
- Nizam, M.N., Haris Yuana and Zunita Wulansari (2022) 'MIKROKONTROLER ESP 32 Sebagai Alat Monitoring Pintu Berbasis Web', *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 6(2), pp. 767–772. Available at: <https://doi.org/10.36040/jati.v6i2.5713>.
- Offer, G.J. *et al.* (2010) 'Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system', *Energy Policy*, 38(1), pp. 24–29. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.040>.
- Poetro, J.E. and Rahmat, M.B. (2012) 'Konservasi Energi Pada Bts (Base Transceiver Station) Menggunakan Sistem Pendingin Arus Searah (Dc Cooler)', (2), pp. 30–41. Available at: <https://www.simbase.com/iot-glossary-dictionary/mobile-switching-center>.

- Prima Dewi, R. (2023) 'Sistem Pendingin Panel Surya Otomatis Untuk Meningkatkan Daya Keluaran Panel Surya', *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, 14(1), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.24176/simet.v14i1.8901>.
- Qahtan, M.H., Mohammed, E.A. and Ali, A.J. (2022) 'IoT-Based Electrical Vehicle's Energy Management and Monitoring System', *OALib*, 09(07), pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.4236/oalib.1109072>.
- Robert, K. (2006) 'The History and Use of Our Earth's Chemical Elements: A Reference Guide Second Edition', *The History and Use of Our Earth's Chemical Elements: A Reference Guide Second Edition*, 84(11), pp. 1–424. Available at: <https://doi.org/10.1108/09504120710744565>.
- Sanguesa, J.A. *et al.* (2021) 'Kampman', *Smart Cities*, 4(1), pp. 372–404.
- Soori, M., Arezoo, B. and Dastres, R. (2023a) 'Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review', *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3(April), pp. 192–204. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>.
- Soori, M., Arezoo, B. and Dastres, R. (2023b) 'Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review', *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3(March), pp. 192–204. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>.
- Van-Thanh, H. (2020) 'Transient Thermal Analysis of a Li-Ion Van-Thanh, Ho; Khoungsik, Chang; Sang Wook, Lee; Sung Han, Kim. 2020. "Transient Thermal Analysis of a Li-Ion Battery." Battery', *Energies*, 13(May), p. 2387. Available at: [doi:10.3390/en13092387](https://doi.org/10.3390/en13092387).
- Wang, X. *et al.* (2022) 'A critical review on thermal management technologies for motors in electric cars', *Applied Thermal Engineering*, 201. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117758>.

Wilberforce, T. *et al.* (2017) 'Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars', *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(40), pp. 25695–25734. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.054>.

LAMPIRAN

APENDIKS 1 LEMBAR KEASLIAN DATA

1. Hasil Analisis Implementasi Panel Surya

Data Analisis Implementasi Panel Surya 1

Jam	Panel Surya				
	Temperatur Atmosfer (°C)	Radiasi Matahari (W/m ²)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)
08.00	32	753,66	3,33	13,5	44,955
08.15	29,9	765,589	2,53	13,57	48,2
08.30	30,2	917,98	3,79	13,43	51,1
08.45	30	971,7	3,91	13,52	52,9
09.00	30,8	1.150,24	4,02	13,54	54,4
09.15	31,2	1.145,5	4,22	13,55	57,3
09.30	31,9	1.203,17	4,13	13,55	56
09.45	32,9	1.261,63	4,35	13,61	59,2
10.00	32,9	1.331,15	4,35	13,59	59,5
10.15	33	1.343,79	4,54	13,61	61,8
10.30	32,7	1.301,13	4,27	13,61	59,2
10.45	35,3	1.158,93	4,52	13,62	61,6
11.00	34,5	985,13	4,15	13,61	57,1
11.15	33,2	1.201,59	4,49	13,62	60,6
11.30	34,2	1.001,72	4,12	13,61	56,5
11.45	35,1	910,08	4,05	13,53	54,7
12.00	37,8	813,7	3,77	13,43	50,1
12.15	37	1.118,64	3,79	13,62	51,5
12.30	37,6	337,883	1,58	13,61	21,2
12.45	36	1.123,38	3,5	13,89	48,6

Jam	Panel Surya				
	Temperatur Atmosfer (°C)	Radiasi Matahari (W/m ²)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)
13.00	35,9	1.069,66	3,06	13,52	41,8
13.15	34,9	266,072	0,89	13,55	12,21
13.30	34,2	204,215	1,03	13,41	14,1
13.45	35,6	745,365	2,24	13,36	25,1
14.00	36,1	299,41	1,84	13,38	23,7
14.15	34,9	229,1	1,21	13,34	14,5
14.30	33,7	325,559	1,41	13,27	18,29
14.45	33,3	432,604	3,36	13,48	34,3
15.00	34,2	424,072	2,72	13,4	30,9

Data Analisis Implementasi Panel Surya 2

Jam	Panel Surya				
	Temperatur Atmosfer (°C)	Radiasi Matahari (W/m ²)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)
08.00	31,5	556,239	2,73	13,36	36,5
08.15	31,8	650,644	3,02	13,43	40,9
08.30	32,1	745,602	3,32	13,61	45,4
08.45	32,6	801,85	3,57	13,54	48,4
09.00	33,5	1.056,23	3,99	13,55	54
09.15	34,2	1.192,9	4,17	13,57	56,4
09.30	31,6	1.049,91	3,95	13,54	53,6
09.45	33,9	1.175,52	4,22	13,56	54,1
10.00	35	1.132,07	4,17	13,54	56,7
10.15	36,9	1.214,23	4,16	13,54	57,7
10.30	35,9	1.177,1	4,13	13,52	56
10.45	35,5	1.216,6	4,2	13,55	57,3
11.00	36,4	1.283,75	4,26	13,55	58
11.15	37	1.149,45	4,07	13,5	55,1

Jam	Panel Surya				
	Temperatur Atmosfer (°C)	Radiasi Matahari (W/m ²)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)
11.30	37	1.216,6	4,09	13,55	55,5
11.45	37,4	1.135,23	3,91	13,55	53,1
12.00	37,7	1.170,78	4,76	13,61	64,9
12.15	37,7	1.284,54	4,74	13,51	64,5
12.30	37,3	1.224,5	4,67	13,59	63,4
12.45	37,7	1.136,81	4,25	13,57	57,7
13.00	38,2	1.122,59	4,17	13,57	56
13.15	37,6	1.220,55	4,35	13,57	59,3
13.30	37,2	1.066,5	3,97	13,55	53,1
13.45	38,9	994,61	4,05	13,57	55,7
14.00	38,4	894,28	3,9	13,57	52,4
14.15	38,6	881,64	3,96	13,59	53,9
14.30	39,2	928,25	3,95	13,62	53,7
14.45	39,3	907,71	3,8	13,66	51,7
15.00	39,8	763,851	3,61	13,84	49,9

Data Analisis Implementasi Panel Surya 3

Jam	Panel Surya				
	Temperatur Atmosfer (°C)	Radiasi Matahari (W/m ²)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)
08.00	32,7	790,79	3,27	13,41	44,1
08.15	32,6	963,8	3,64	13,47	49,1
08.30	33,2	1.074,4	3,87	13,52	52,4
08.45	34,2	1.099,68	3,99	13,52	54,3
09.00	34,9	1.207,12	4,19	13,55	56,7
09.15	37,7	1.281,38	4,3	13,55	58,3
09.30	38,7	1.308,24	4,39	13,57	59,7

Jam	Panel Surya				
	Temperatur Atmosfer (°C)	Radiasi Matahari (W/m ²)	Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)
09.45	42,5	1.329,57	4,5	13,57	61,4
10.00	37	1.298,76	4,43	13,62	60,3
10.15	37,8	1.327,99	4,4	13,61	60
10.30	36,4	1.286,12	4,38	13,59	59,5
10.45	35,7	1.386,45	4,45	13,8	61,5
11.00	35,9	1.369,07	4,59	14,24	61,2
11.15	37	1.341,42	4,11	13,91	57,4
11.30	38,5	1.312,98	4,7	13,77	56,3
11.45	39,6	1.384,08	3,93	13,6	53,5
12.00	41	1.348,53	3,74	14,19	53,2
12.15	38,1	1.248,99	4,5	14,56	66
12.30	37,9	1.267,95	4,6	14,05	64,7
12.45	37,7	1.264	4,5	13,94	63,8
13.00	37,2	1.320,09	4,58	13,8	63,3
13.15	37,9	1.314,56	4,55	13,75	63,6
13.30	41,5	1.106	4,28	13,7	57,1
13.45	43,2	1.109,16	4,11	13,61	55,9
14.00	47,3	1.050,7	4,01	14,15	56
14.15	40,5	856,36	4,31	13,73	58,3
14.30	40	825,55	3,85	13,91	55,8
14.45	39,6	842,14	3,76	14,05	49,9
15.00	39,3	286,533	1,13	13,61	15,5

APENDIKS 2 STANDAR OPERASIONAL PROSEDUR (SOP) PENGOPERASIAN

SOP PENGOPERASIAN PENINGKATAN PERFORMA MOBIL LISTRIK HIDROGEN *FUEL CELL* DENGAN PENAMBAHAN PENDINGIN DAN PANEL SURYA UNTUK SISTEM MANAJEMEN BATERAI

Standar Operasional Prosedur (SOP) ini berisi langkah-langkah untuk mengoperasikan kendaraan listrik berbasis *plug-in hybrid fuel cell* yang dilengkapi dengan teknologi IoT untuk pemantauan kinerja. Tujuannya adalah untuk memastikan kendaraan berfungsi dengan aman, efisien, dan optimal.

Persiapan Awal

1. Pemeriksaan Kendaraan:

- Melakukan inspeksi fisik pada kendaraan.
- Memastikan baterai dalam kondisi penuh dan sistem *fuel cell* berfungsi dengan baik.

2. Perangkat IoT:

- Memastikan perangkat IoT terhubung dengan benar dan dapat mengirim data ke server pusat.

Pengoperasian Kendaraan

1. *Starting*

- Menghidukan kontaktor dengan cara memindahkan posisi saklar ke arah *ON*.
- Menghidukan kendaraan dengan cara memutar kunci kontak ke arah kanan hingga mesin pada obil menyala, apabila belum menyala maka ulangi langkah memutar kunci ke arah kanan.
- Memastikan semua indikator baterai mobil diatas 40% apabila kurang segera lakukan pengisian daya.

2. Pengisian Daya

- Untuk pengisian baterai dengan listrik : menyambungkan kabel pengisian daya ke stasiun pengisian listrik dan port kendaraan, apabila tegangan baterai sudah 92 V, maka mobil harus diisi daya (*dicharger*).
- Untuk pengisian hidrogen apabila hidrogen telah habis melakukan penggantian tabung hidrogen

3. Menjalankan Kendaraan

- Menekan pedal gas yang berada di sebelah kanan secara perlahan sehingga mobil mulai berjalan.

4. *Turning Off* :

- Menurunkan laju kecepatan mobil
- Menghentikan mobil dengan menginjak rem pedal yang ada di sebelah kiri.
- Setelah mobil berhenti, mematikan mobil dengan cara memutar kunci ke arah kiri sehingga mesin pada mobil berhenti.
- Setelah mobil listrik dipastikan sudah berhenti dan mati, maka matikan kontaktor dengan cara memindahkan sakelar ke arah *OFF*.

Pengoperasian IoT

1. Menghidupkan MCB
2. Menethering ESP32 menggunakan *Handphone* yang sudah diatur kata sandinya dengan program IoT, yang hanya bisa terhubung pada jarak 5 m.
3. Apabila Analisis sudah selesai kemudian meng-*off*-kan MCB.

SOP ini harus diikuti oleh semua pengguna dan teknisi untuk memastikan pengoperasian kendaraan listrik berbasis *plug-in hybrid fuel cell* berjalan lancar dan aman. Perangkat IoT harus digunakan secara optimal untuk pemantauan kinerja dan mendukung perawatan *preventif*.

APENDIKS 3 DOKUMENTASI



Gambar Dokumentasi Mobil Listrik

APENDIKS 4 KODINGAN IOT

```
#include <ModbusMaster.h>
#include <SoftwareSerial.h>
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>

// ===== WIFI CONFIG =====
const char* ssid = "m23";
const char* password = "qwerty123";

// ===== RS485 via SoftwareSerial (RX=16, TX=17) =====
SoftwareSerial rs485Serial(16, 17);

// ===== Alamat Slave Modbus =====
#define ADDR_PZEM1      0x01
#define ADDR_PZEM2      0x02
#define ADDR_PTD100_1   0x03
#define ADDR_PTD100_2   0x04

// ===== Modbus Master untuk Setiap Slave =====
ModbusMaster nodePZEM1, nodePZEM2, nodePTD100_1,
nodePTD100_2;

// ===== Data Sensor =====
float voltage1 = 0, current1 = 0, power1 = 0,
energy1 = 0;
float voltage2 = 0, current2 = 0, power2 = 0,
energy2 = 0;
float temp1 = 0, temp2 = 0;

// ===== Web Server =====
WebServer server(80);

// ===== Fungsi Membaca PZEM =====
bool readPZEM(ModbusMaster &node, float &volt,
float &curr, float &pow, float &ener) {
```

```

uint8_t r = node.readInputRegisters(0x0000, 6);
if (r == node.ku8MBSuccess) {
    uint32_t val;
    volt = node.getResponseBuffer(0) / 100.0;
    curr = node.getResponseBuffer(1) / 100.0;
    val = ((uint32_t)node.getResponseBuffer(3) <<
16) | node.getResponseBuffer(2);
    pow = val / 10.0;
    val = ((uint32_t)node.getResponseBuffer(5) <<
16) | node.getResponseBuffer(4);
    ener = val;
    return true;
}
return false;
}

// ===== Fungsinya Membaca PTD100 =====
bool readPTD100(ModbusMaster &node, float
&temperature) {
    uint8_t r = node.readHoldingRegisters(0x00, 2);
    if (r == node.ku8MBSuccess) {
        temperature = node.getResponseBuffer(0) /
10.0;
        return true;
    }
    return false;
}

// ===== Halaman HTML + AJAX =====
void handleRoot() {
    String html = R"rawliteral(
<!DOCTYPE html>
<html>
<head>
    <meta name="viewport" content="width=device-
width, initial-scale=1">
    <title>Monitoring Sensor</title>
    <style>

```

```

        body { font-family: Arial; background:
#f0f0f0; padding: 20px; }
        .card { background: #fff; padding: 15px;
margin: 10px auto; border-radius: 10px; max-
width: 500px; box-shadow: 0 0 10px
rgba(0,0,0,0.1); }
        h2 { text-align: center; }
        .label { font-weight: bold; }
    </style>
</head>
<body>
    <h2>Dashboard Sensor Realtime</h2>
    <div class="card">
        <h3>PZEM 1</h3>
        <div><span class="label">Voltage:</span>
<span id="v1">...</span> V</div>
        <div><span class="label">Current:</span>
<span id="c1">...</span> A</div>
        <div><span class="label">Power:</span>
<span id="p1">...</span> W</div>
        <div><span class="label">Energy:</span>
<span id="e1">...</span> Wh</div>
    </div>

    <div class="card">
        <h3>PZEM 2</h3>
        <div><span class="label">Voltage:</span>
<span id="v2">...</span> V</div>
        <div><span class="label">Current:</span>
<span id="c2">...</span> A</div>
        <div><span class="label">Power:</span>
<span id="p2">...</span> W</div>
        <div><span class="label">Energy:</span>
<span id="e2">...</span> Wh</div>
    </div>

    <div class="card">
        <h3>Temperatur</h3>

```

```

        <div><span class="label">Temp
Baterai:</span> <span id="t1">...</span>
&deg;C</div>
        <div><span class="label">Temp Motor:</span>
<span id="t2">...</span> &deg;C</div>
    </div>

    <script>
        function updateData() {
            fetch("/data")
                .then(response => response.json())
                .then(data => {
                    document.getElementById("v1").innerText
= data.v1;
                    document.getElementById("c1").innerText
= data.c1;
                    document.getElementById("p1").innerText
= data.p1;
                    document.getElementById("e1").innerText
= data.e1;

                    document.getElementById("v2").innerText
= data.v2;
                    document.getElementById("c2").innerText
= data.c2;
                    document.getElementById("p2").innerText
= data.p2;
                    document.getElementById("e2").innerText
= data.e2;

                    document.getElementById("t1").innerText
= data.t1;
                    document.getElementById("t2").innerText
= data.t2;
                });
        }
        setInterval(updateData, 1000); // update
tiap 1 detik
        updateData();
    </script>

```

```

        </script>
    </body>
</html>
)rawliteral";

    server.send(200, "text/html", html);
}

// ===== Endpoint JSON untuk AJAX =====
void handleData() {
    String json = "{";
    json += "\"v1\":" + String(voltage1, 2) + ",";
    json += "\"c1\":" + String(current1, 2) + ",";
    json += "\"p1\":" + String(power1, 2) + ",";
    json += "\"e1\":" + String(energy1, 0) + ",";
    json += "\"v2\":" + String(voltage2, 2) + ",";
    json += "\"c2\":" + String(current2, 2) + ",";
    json += "\"p2\":" + String(power2, 2) + ",";
    json += "\"e2\":" + String(energy2, 0) + ",";
    json += "\"t1\":" + String(temp1 + 2.5, 2) +
    ",";
    json += "\"t2\":" + String(temp2, 2);
    json += "}";
    server.send(200, "application/json", json);
}

// ===== SETUP =====
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    delay(1000);
    WiFi.begin(ssid, password);

    // Tunggu koneksi WiFi
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("\nWiFi connected. IP: " +
    WiFi.localIP().toString());
}

```

```

rs485Serial.begin(9600);

nodePZEM1.begin(ADDR_PZEM1, rs485Serial);
nodePZEM2.begin(ADDR_PZEM2, rs485Serial);
nodePTD100_1.begin(ADDR_PTD100_1, rs485Serial);
nodePTD100_2.begin(ADDR_PTD100_2, rs485Serial);

server.on("/", handleRoot);
server.on("/data", handleData);
server.begin();
}

// ===== LOOP =====
unsigned long lastRead = 0;
const unsigned long interval = 1000; // 1 detik

void loop() {
    server.handleClient();

    if (millis() - lastRead >= interval) {
        lastRead = millis();

        readPZEM(nodePZEM1, voltage1, current1,
power1, energy1);
        delay(50);
        readPZEM(nodePZEM2, voltage2, current2,
power2, energy2);
        delay(50);
        readPTD100(nodePTD100_1, temp1);
        delay(50);
        readPTD100(nodePTD100_2, temp2);
    }
}

```


PROFIL PENULIS



**Prof. Ir. Yusuf Dewantoro Herlambang,
S.T., M.T., Ph.D., IPM., ASEAN Eng,**

Penulis adalah tenaga pengajar di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang, Lahir di Klaten 1978. Pendidikan S1 di Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada diselesaikan tahun 2001 dan Insinyur (Ir) di Universitas Gadjah Mada tahun 2023. Pascasarjana S2 juga diselesaikan di Universitas Gadjah Mada pada tahun 2006 di bidang Teknik Elektro. Pendidikan terakhir S3 Teknik Mesin bidang Renewable Energy diselesaikan pada tahun 2017 di National Kaohsiung University of Applied Sciences, Taiwan Republic of China melalui Beasiswa Program Pascasarjana (BPPS) skema 3+1 Indonesia-Taiwan ROC, Direktorat Pendidik dan Tenaga Kependidikan Kemenristekdikti tahun 2013. Penulis bergabung di Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang sejak tahun 2001 yang mengajar dalam beberapa mata kuliah antara lain Pembangkit Tenaga Alternatif, Termodinamika, Neraca Massa dan Energi, Audit Energi, Manajemen Energi, Praktikum Mesin Konversi Energi, dan Praktikum Termodinamika & Perpindahan Panas. Penulis juga aktif dalam Seminar Nasional dan Seminar Internasional serta menulis karya ilmiah di Jurnal Nasional Terakreditasi dan Jurnal Internasional Bereputasi terindeks Scopus dan Web of Science. Penulis menjabat sebagai Lektor Kepala sejak tahun 2012 dan menjabat sebagai Kepala Laboratorium Mesin Fluida sejak tahun 2018 sampai dengan 2020 dan sekarang menjabat sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang periode 2020-2024. Saat ini

penulis bekerja sebagai asesor BANPT dan asesor LAM Teknik. Selain itu, aktif dalam kegiatan organisasi Ikatan Cendekiawan Muslim Indonesia (ICMI), Dewan Dakwah Islam Indonesia (DDII) Kota Semarang, Indonesia Fuel Cell Hydrogen Energy (IFHE).

Lebih lengkap bisa di telusuri melalui akun repositori publikasi berikut:

 0000-0002-6838-2055,  TTi5IpQAAAAJ,  57194209980,  CAF-7021-2022.

Penulis dapat dihubungi di email: masyusufdh@polines.ac.id



**Dr. Eng, Ir. Irfan Mujahidin., S.T., M.T.,
M.Sc.,**

Penulis adalah seorang dosen program studi Teknik telekomunikasi, Politeknik Negeri Semarang. Penulis lahir di Banyuwangi, Jawa Timur, Indonesia, pada tahun 1992. Latar Pendidikan penulis adalah memperoleh gelar doctoral di Teknik Elektro dan Ilmu Komputer di Universitas Kanazawa, Jepang, pada tahun 2022. Penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro dari Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia, pada tahun 2015. Master of Science dari Institut Teknik Komunikasi, National Sun Yat-sen University, Kaohsiung, Taiwan, Republik Tiongkok, pada tahun 2018 dan gelar profesi insinyur pada tahun 2021 sebagai praktisi dan peneliti bidang antenna dan propagasi. Minat penelitiannya saat ini meliputi desain antenna pada pemanenan energi RF, jaringan sensor nirkabel, aplikasi Internet-of-Things, transmisi daya nirkabel, dan desain sirkuit RF. Lebih lengkap bisa di telusuri melalui akun repositori publikasi berikut:

 0000-0002-5451-941X,  4O28CH8AAAAJ,  57163783300, 
AAM-4798-2020.

Penulis dapat dihubungi di email: irfan.mujahidin@polines.ac.id



Nanang Apriandi, S.T., M.T.

Penulis adalah tenaga pengajar di Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang, Jawa Tengah. Lahir di Rensing, Lombok Timur - Nusa Tenggara Barat, pada tanggal 9 April 1985. Pendidikan S1 dan S2 diselesaikan masing-masing pada tahun 2008 dan 2013, mengambil Jurusan Teknik Mesin di Universitas Udayana, dengan minat pada bidang Konversi Energi. Saat ini, penulis sedang menempuh studi Doktorat (S3) Jurusan Teknik Mesin dengan bidang minat yang sama (Konversi Energi) di Universitas Diponegoro sejak tahun 2024. Sebagai informasi tambahan, penulis bergabung di Jurusan Teknik Mesin - Politeknik Negeri Semarang sejak tahun 2019, dengan mengampu beberapa mata kuliah antara lain: Termodinamika, Neraca Massa dan Energi, Manajemen Energi, Praktikum Mesin Konversi Energi, dan Praktikum Termodinamika & Perpindahan Panas. Penulis juga aktif menulis karya ilmiah, baik di Jurnal Nasional Terakreditasi maupun Jurnal Internasional Bereputasi, dengan berbagai area seperti Energi Terbarukan, Alat Penukar Kalor, Teknologi Pengering, Penyimpanan Energi, dan Teknologi Desalinasi.

Lebih lengkap bisa di telusuri melalui akun repositori publikasi berikut:

 0000-0002-5404-8419,  58563183600.

Penulis dapat dihubungi di email: nanang.apriandi@polines.ac.id

Buku *Rekayasa Sistem Energi pada Mobil Listrik Hidrogen Fuel Cell* menghadirkan kajian komprehensif mengenai perancangan dan optimasi arsitektur energi kendaraan listrik berbasis hydrogen fuel cell dalam konteks transisi menuju sistem transportasi rendah emisi. Di tengah meningkatnya urgensi mitigasi perubahan iklim dan kebutuhan akan teknologi berkelanjutan, kendaraan listrik tidak lagi dipahami sekadar sebagai substitusi mesin pembakaran dalam, melainkan sebagai sistem energi terintegrasi yang menuntut pendekatan rekayasa multidisipliner.

Monograf ini mengembangkan perspektif bahwa tantangan utama kendaraan listrik fuel cell tidak hanya terletak pada ketersediaan sumber energi alternatif, tetapi pada bagaimana energi diproduksi, disimpan, didistribusikan, dan dikendalikan secara simultan dalam satu arsitektur sistem yang stabil dan adaptif. Pembahasan difokuskan pada integrasi baterai, fuel cell tipe Proton Exchange Membrane (PEM), sistem manajemen baterai (BMS), kontroler daya, sistem pendingin aktif, serta augmentasi energi berbasis panel surya. Setiap subsistem dianalisis secara teoritik dan konseptual untuk menunjukkan keterkaitan antara stabilitas termal, efisiensi konversi energi, dan performa kendaraan secara keseluruhan.

Buku ini menegaskan bahwa temperatur operasi merupakan variabel kritis yang memengaruhi resistansi internal, losses daya, dan degradasi komponen. Oleh karena itu, manajemen termal diposisikan sebagai strategi optimasi energi, bukan sekadar sistem proteksi. Selain itu, integrasi sumber energi tambahan melalui panel surya diperkenalkan sebagai mekanisme *load buffering* untuk meningkatkan kontinuitas suplai daya dan memperpanjang umur operasional sistem utama.

Melalui pendekatan analitik dan sintesis konseptual, monograf ini merumuskan model manajemen energi terintegrasi yang menempatkan keseimbangan energi dan stabilitas temperatur sebagai parameter utama optimasi performa. Buku ini tidak hanya memberikan kontribusi teoretis dalam bidang rekayasa sistem energi, tetapi juga menawarkan implikasi praktis bagi pengembangan kendaraan listrik fuel cell yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan. Dengan konstruksi ilmiah yang sistematis, karya ini menjadi referensi strategis bagi akademisi, peneliti, dan praktisi yang berfokus pada inovasi teknologi transportasi masa depan.