

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.



Sistem Energi Cerdas **KENDARAAN** **LISTRIK** **HIDROGEN**



ARSITEKTUR, INTEGRASI FUEL CELL DAN TEKNOLOGI IOT

SISTEM ENERGI CERDAS KENDARAAN LISTRIK HIDROGEN

Arsitektur, Integrasi Fuel Cell, dan Teknologi IoT

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

SISTEM ENERGI CERDAS KENDARAAN LISTRIK HIDROGEN

Arsitektur, Integrasi Fuel Cell, dan Teknologi IoT

*Copyright @2026 by Dr. Prof. Ir. Yusuf Dewantoro Herlambang, S.T., M.T.,
Ph.D., IPM., ASEAN Eng., dkk*

All rights reserved

PENERBIT KARYA BAKTI MAKMUR (KBM) INDONESIA

Anggota IKAPI (Ikatan Penerbit Indonesia)

NO. IKAPI 279/JTI/2021

Depok, Sleman-Jogjakarta (Kantor) **081357517526 (Tlpn/WA)**

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

Eca Art

Tata Letak

Anif Musyafa'ah H

Editor Naskah

Dr. Muhamad Husein Maruahey, Drs., M.Sc

15,5 x 23 cm, xii + 166 halaman

Cetakan ke-1, April 2026

ISBN: 978-634-278-226-2

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

Website

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

Instagram

@penerbit.kbmindonesi, @penerbitbukujogja

Email

naskah@penerbitkbm.com

Distributor

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

Youtube

Penerbit KBM Sastrabook

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- i. 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).
- ii. 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).
- iii. 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).
- iv. 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 kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas terselesaikannya monograf berjudul *Sistem Energi Cerdas Kendaraan Listrik Hidrogen: Arsitektur, Integrasi Fuel Cell, dan Teknologi IoT*. Karya ini disusun sebagai kontribusi ilmiah dalam merespons urgensi transisi energi global, khususnya pada sektor transportasi yang selama beberapa dekade menjadi kontributor signifikan emisi gas rumah kaca. Transformasi menuju sistem transportasi rendah emisi bukan lagi sekadar pilihan teknologi, melainkan kebutuhan strategis yang menuntut pendekatan rekayasa sistem yang komprehensif, terintegrasi, dan berbasis data.

Monograf ini menghadirkan kajian multidisipliner yang memadukan prinsip konversi energi elektrokimia, desain sistem kendaraan listrik, integrasi Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), serta implementasi Internet of Things (IoT) dalam manajemen energi adaptif. Pendekatan yang dikembangkan menempatkan fuel cell tidak hanya sebagai sumber energi alternatif, tetapi sebagai bagian integral dari arsitektur kendaraan plug-in hybrid berbasis hidrogen yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi, fleksibilitas operasional, dan keberlanjutan sistem.

Secara konseptual, buku ini dibangun atas landasan teori transisi energi dan rekayasa sistem (systems engineering), dengan penekanan pada integrasi antar-subsistem: penyimpanan hidrogen, stack fuel cell, konverter daya DC-DC, baterai utama, motor listrik, serta sistem kendali dan proteksi. Dimensi digital melalui IoT

memperkuat arsitektur tersebut dengan menghadirkan monitoring real-time, pengendalian adaptif, serta pengambilan keputusan berbasis data guna mengoptimalkan performa dan keselamatan operasi.

Kami menyadari bahwa pengembangan kendaraan listrik hidrogen bukan hanya persoalan teknologi, tetapi juga menyangkut kebijakan energi, kesiapan infrastruktur, aspek keselamatan, serta literasi masyarakat terhadap energi bersih. Oleh karena itu, monograf ini tidak hanya menyajikan hasil desain dan validasi eksperimental, tetapi juga membangun kerangka konseptual yang dapat menjadi pijakan bagi penelitian lanjutan, pengembangan prototipe, maupun formulasi kebijakan berbasis sains.

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan akademik, teknis, dan moral dalam proses penyusunan karya ini. Apresiasi juga kami berikan kepada penerbit yang telah memfasilitasi proses penerbitan sehingga monograf ini dapat hadir sebagai referensi ilmiah bagi mahasiswa, peneliti, akademisi, dan praktisi di bidang teknik elektro, teknik mesin, teknik energi terbarukan, serta sistem kendali cerdas.

Akhir kata, kami berharap monograf ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam memperkaya literatur energi baru terbarukan serta mendorong inovasi kendaraan listrik hidrogen yang lebih efisien, aman, dan berdaya saing. Semoga karya ini menjadi bagian dari ikhtiar kolektif menuju sistem transportasi berkelanjutan dan masa depan energi yang lebih bersih.

Yogyakarta, Februari 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....i

DAFTAR ISI..... iii

DAFTAR GAMBAR.....v

DAFTAR TABEL..... vii

DAFTAR LAMBANG..... ix

DAFTAR APENDIKS xi

OVERVIEW 1

BAB 1

LANDASAN KONSEPTUAL DAN URGENSI

TRANSISI ENERGI 7

 A. Landasan Konseptual 22

BAB 2

KERANGKA TEORI DAN ARSITEKTUR SISTEM 27

 A. Mobil Listrik..... 41

 B. *Fuel cell*..... 44

 C. Komponen Mobil Listrik *Fuel cell* 52

 D. *Internet of Things* (IoT)..... 64

 E. Perhitungan Kinerja *Fuel cell*..... 71

BAB 3

DESAIN DAN INTEGRASI SISTEM 75

 A. Tahapan Integrasi..... 88

 B. Studi Literatur 89

 C. Pemodelan Mobil Listrik 90

 D. Prinsip Kerja Alat 100

 E. Langkah Validasi Sistem 103

BAB 4

ANALISIS KINERJA DAN EVALUASI SISTEM 111

- A. Validasi Sistem Mobil Listrik Menggunakan PEM *Fuel cell* 123
- B. Perhitungan Data Hasil Validasi Sistem Pengisian Daya dengan PEM *Fuel Cell* 125
- C. Karakteristik Pengisian Daya dengan PEM *Fuel cell* 127
- D. Perbandingan Keunggulan Mobil 134

BAB 5

INTESIS DAN PROYEKSI PENGEMBANGAN 137

DAFTAR PUSTAKA 145

APENDIKS 147

PROFIL PENULIS 163

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Layout Battery Electric Vehicle (Sumber : Larminie, dkk.,2003)	42
Gambar 2. 2	Layout Hybrid Electric Vehicle	43
Gambar 2. 3	Alur Kerja Fuel cell	47
Gambar 2. 4	Proses Reaksi Kimia Pada Fuel cell	51
Gambar 2. 5	Fuel cell	53
Gambar 2. 6	Solenoid Valve	54
Gambar 2. 7	Baterai Lead Acid	55
Gambar 2. 8	Baterai Nickel Metal Hydride	56
Gambar 2. 9	ESP32	65
Gambar 2. 10	Shield	66
Gambar 2. 11	PZEM-017	67
Gambar 2. 12	RS485	68
Gambar 2. 13	Sensor Temperatur	69
Gambar 2. 14	Aplikasi Blynk	70
Gambar 3. 1	Flowchart Tahapan Implementasi pelaksanaan	88
Gambar 3. 2	Mobil listrik sebelum modifikasi	90
Gambar 3. 3	Mobil listrik setelah modifikasi	90
Gambar 3. 4	Rangkaian chasis	91
Gambar 3. 5	Desain Baterai LiFePO ₄	92
Gambar 3. 6	Baterai LiFePO ₄	92
Gambar 3. 7	Desain Baterai Lead Acid	93
Gambar 3. 8	Baterai Lead Acid	94
Gambar 3. 9	Desain Motor Listrik	95
Gambar 3. 10	Motor Listrik	95
Gambar 3. 11	Desain Charger	96
Gambar 3. 12	Charger	97
Gambar 3. 13	Desain Kontroler	98
Gambar 3. 14	Kontroler	98
Gambar 3. 15	Desain Fuel cell	99

Gambar 3. 16 Fuel cell.....	100
Gambar 3. 17 Skema Mobil Listrik	101
Gambar 3. 18 Layar Display Daya Baterai	104
Gambar 3. 19 Letak MCB dan display output fuel cell	104
Gambar 3. 20 Menu pada aplikasi IoT	105
Gambar 3. 21 Menu Control pada aplikasi IoT	106
Gambar 3. 22 Layar Display PZEM017.....	108
Gambar 3. 23 Gambar Display di Blynk	108
Gambar 4. 1 Karakteristik Hubungan Tegangan dan Arus PEM Fuel Cell	128
Gambar 4. 2 Karakteristik Hubungan Daya dan Arus PEM Fuel Cell	130
Gambar 4. 3 Karakteristik Hubungan Daya dan Efisiensi PEM Fuel Cell	131
Gambar 4. 4 Karakteristik Hubungan SFC dan Daya PEM Fuel Cell	133
Gambar 5. 1 Pengeboran Panel Box.....	153
Gambar 5. 2 Perangkaian Sistem IoT	153
Gambar 5. 3 Validasi Sistem Sistem IoT.....	154
Gambar 5. 4 Konfigurasi Sistem Hidrogen ke Mobil	154
Gambar 5. 5 Perakitan PEM Fuel Cell	155
Gambar 5. 6 Konfigurasi Sistem Hidrogen ke PEM Fuel Cell.....	155
Gambar 5. 7 Validasi Sistem Pengisian Daya Mobil dengan PEM Fuel Cell	156
Gambar 5. 8 Validasi Sistem Performa Mobil	157

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Spesifikasi Fuel cell.....	53
Tabel 2. 2 Spesifikasi Baterai LiFePO ₄	58
Tabel 2. 3 Spesifikasi Baterai Lead Acid	59
Tabel 2. 4 Spesifikasi Motor Listrik	62
Tabel 2. 5 Spesifikasi Pengisi Daya	62
Tabel 2. 6 Spesifikasi Kontroler	64
Tabel 4. 1 Validasi Sistem Pengisian Daya dengan PEM Fuel cell .	123
Tabel 4. 2 Pengisian Daya dengan Sumber Listrik Eksternal	124
Tabel 4. 3 Data Hasil Perhitungan Validasi Sistem Pengisian Daya dengan PEM Fuel cell.....	127

DAFTAR LAMBANG

CO ₂	:	Karbon Dioksida	
CO	:	Karbon Monoksida	
CH ₄	:	Metana	
H ₂ O	:	Air	
H ₂	:	Hidrogen	
CH ₃ OH	:	Metanol	
e ⁻	:	Elektron	
ṁ	:	Laju aliran massa	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
ρ	:	Massa jenis	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
Q	:	Debit	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$
P	:	Daya	[W]
LHV	:	<i>Low Heating Value</i>	$\left[\frac{\text{MJ}}{\text{s}}\right]$
V	:	Tegangan	[V]
I	:	Arus	[A]
η	:	Efisiensi	[%]
SFC	:	<i>Specific Fuel Consumption</i>	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}\right]$

DAFTAR APENDIKS

Apendiks 1 Data Validasi Sistem Performa Mobil Listrik	147
Apendiks 2 Rangkaian IoT	148
Apendiks 3 SOP Pengoperasian	150
Apendiks 4 Tabel Nilai LHV dan HHV	152
Apendiks 5 Dokumentasi Tahapan Implementasi	153
Apendiks 6 Komponen Mobil Listrik	159
Apendiks 7 Panel Box Fuel Cell.....	160
Apendiks 8 Panel IoT	161

OVERVIEW



Monograf ini disusun sebagai kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi kendaraan listrik berbasis hidrogen dengan sistem fuel cell yang terintegrasi dengan Internet of Things (IoT). Karya ini berangkat dari urgensi global terhadap dekarbonisasi sektor transportasi, yang selama beberapa dekade menjadi kontributor signifikan emisi gas rumah kaca, khususnya karbon dioksida (CO_2). Transformasi menuju sistem transportasi rendah emisi tidak hanya memerlukan elektrifikasi kendaraan, tetapi juga inovasi pada sumber energi, sistem manajemen daya, serta infrastruktur monitoring yang cerdas dan adaptif.

Dalam konteks tersebut, monograf ini mengkaji secara komprehensif perancangan, modifikasi, Validasi Sistem, serta

analisis kinerja kendaraan listrik berbasis Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) yang dikonfigurasi sebagai sistem plug-in hybrid berbasis hidrogen. Kendaraan listrik murni berbasis baterai (Battery Electric Vehicle/BEV) memiliki keterbatasan pada aspek jarak tempuh dan waktu pengisian ulang. Oleh karena itu, integrasi fuel cell sebagai sistem pembangkit listrik tambahan menjadi solusi strategis untuk memperpanjang jarak tempuh sekaligus menjaga efisiensi energi.

Monograf ini mengembangkan pendekatan rekayasa sistem (systems engineering) dengan menempatkan fuel cell bukan sebagai penggerak langsung motor listrik, melainkan sebagai sistem pengisi ulang baterai utama berkapasitas 96V 50Ah berbasis LiFePO₄. Konfigurasi ini memungkinkan kendaraan tetap memperoleh suplai energi tambahan ketika daya baterai menurun, tanpa sepenuhnya bergantung pada infrastruktur pengisian eksternal. Strategi ini memperlihatkan model transisi teknologi dari BEV menuju konfigurasi plug-in hybrid fuel cell electric vehicle (PHEV-FCEV) yang lebih adaptif terhadap kondisi geografis dan infrastruktur energi di Indonesia.

Aspek fundamental yang dibahas dalam monograf ini mencakup teori dasar kendaraan listrik, klasifikasi kendaraan listrik (BEV, HEV, PHEV, dan FCEV), prinsip kerja fuel cell, klasifikasi jenis fuel cell berdasarkan elektrolit, hingga analisis proses reforming hidrogen. Fokus utama diarahkan pada PEMFC karena karakteristiknya yang sesuai untuk aplikasi kendaraan: temperatur operasi rendah (60–100°C), respons dinamis yang cepat, densitas daya tinggi, serta efisiensi konversi energi yang kompetitif.

Secara teknis, sistem yang dikembangkan terdiri atas beberapa subsistem utama, yaitu:

1. Sistem penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi (hingga 2000 psi).
2. Stack PEM fuel cell berdaya nominal 1000 W.
3. DC-DC converter step-up untuk mengoptimalkan tegangan keluaran fuel cell dari 36–60 V menjadi sekitar 100 V guna kompatibel dengan baterai 96 V.
4. Baterai utama LiFePO_4 sebagai penyimpan energi utama penggerak motor.
5. Baterai lead-acid 12 V sebagai sistem starting dan suplai aksesoris.
6. Motor induksi AC tiga fasa berdaya 10 kW.
7. Sistem kontroler daya dan kontaktor proteksi.
8. Sistem IoT berbasis ESP32 untuk monitoring parameter listrik dan termal secara real-time.

Pendekatan desain ini tidak hanya mempertimbangkan aspek performa energi, tetapi juga keamanan sistem, kestabilan termal, proteksi arus lebih, serta efisiensi konversi daya. Integrasi DC-DC converter menjadi elemen penting dalam memastikan kesesuaian tegangan antara fuel cell dan sistem baterai, sehingga tidak terjadi mismatch yang dapat menurunkan efisiensi atau memperpendek umur baterai.

Salah satu kontribusi utama monograf ini adalah integrasi sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Melalui pemanfaatan mikrokontroler ESP32, modul PZEM-017, komunikasi RS485, serta platform aplikasi seperti Blynk dan MIT App Inventor, sistem mampu memantau parameter berikut secara real-time:

- Tegangan baterai
- Arus pengisian dan pengosongan
- Daya keluaran fuel cell
- Temperatur baterai
- Laju aliran hidrogen

Monitoring ini memberikan keunggulan dalam manajemen energi adaptif, deteksi dini anomali, serta optimasi efisiensi operasional. Dengan sistem IoT, pengendalian katup solenoid hidrogen dapat dilaksanakan secara jarak jauh, dan parameter arus dapat dijaga agar tidak melebihi batas aman (misalnya ≤ 2 A pada kondisi Validasi Sistem tertentu). Integrasi digital ini memperlihatkan sinergi antara teknologi energi baru terbarukan dan sistem siber-fisik (cyber-physical systems).

Metodologi kajian buku yang diuraikan dalam monograf ini meliputi tahapan desain, perakitan, integrasi sistem, serta Validasi Sistem eksperimental. Validasi Sistem dilaksanakan dengan variasi debit hidrogen sebesar 1; 1,5; dan 2 liter/menit, dengan interval pengambilan data setiap satu menit sebanyak 15 kali untuk setiap variasi. Parameter yang dianalisis mencakup tegangan output, arus output, daya output, daya input hidrogen berdasarkan nilai Low Heating Value (LHV), efisiensi konversi energi, serta Specific Fuel Consumption (SFC).

Hasil Validasi Sistem menunjukkan bahwa peningkatan debit hidrogen berbanding lurus dengan peningkatan daya output dan efisiensi sistem. Pada debit 2 liter/menit terobservasi efisiensi rata-rata tertinggi sebesar 41,94% dengan daya output rata-rata 151 W dan daya input rata-rata 360,174 W. Sebaliknya, pada debit 1 liter/menit efisiensi rata-rata tercatat sebesar 35% dengan daya output rata-rata 63,06 W. Temuan ini menunjukkan bahwa manajemen aliran hidrogen merupakan faktor kritis dalam optimasi performa fuel cell.

Analisis karakteristik hubungan tegangan–arus, daya–arus, daya–efisiensi, serta SFC–daya menunjukkan pola yang konsisten dengan karakteristik kurva polarisasi fuel cell. Pada arus rendah, tegangan relatif stabil, sedangkan peningkatan arus menyebabkan

penurunan tegangan akibat rugi-rugi ohmik dan konsentrasi. Hal ini memberikan implikasi bahwa operasi fuel cell perlu dijaga pada titik kerja optimal untuk memaksimalkan efisiensi dan memperpanjang umur stack.

Selain analisis teknis, monograf ini juga menempatkan kajian buku dalam konteks kebijakan energi nasional dan transisi energi. Indonesia sebagai negara berkembang dengan target penurunan emisi karbon membutuhkan solusi teknologi yang realistis, terjangkau, dan adaptif terhadap kondisi lokal. Integrasi fuel cell dalam kendaraan listrik menjadi salah satu opsi strategis untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, terutama pada sektor transportasi logistik dan kendaraan niaga ringan.

Monograf ini tidak hanya menyajikan hasil eksperimental, tetapi juga membangun kerangka konseptual tentang arsitektur kendaraan listrik berbasis hidrogen. Pendekatan yang diimplementasikan menekankan pada:

- Rekayasa integratif antar subsistem energi.
- Optimasi konversi energi kimia ke energi listrik.
- Implementasi manajemen energi berbasis sensor dan komunikasi data.
- Evaluasi performa berbasis parameter kuantitatif.

Dari sisi akademik, monograf ini dapat menjadi referensi dalam bidang teknik elektro, teknik mesin, teknik energi terbarukan, serta sistem kendali cerdas. Dari sisi praktis, kajian ini membuka peluang pengembangan prototipe kendaraan listrik hidrogen skala kecil hingga menengah yang dapat diterapkan pada kendaraan niaga, kendaraan operasional kampus, maupun kendaraan khusus industri.

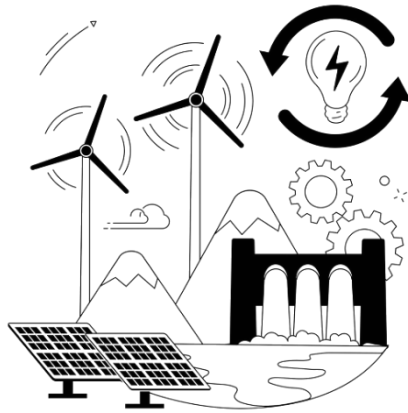
Keunggulan sistem yang dikembangkan terletak pada fleksibilitas pengisian daya (plug-in dan hidrogen), kemampuan

monitoring jarak jauh, serta pendekatan modular yang memungkinkan peningkatan kapasitas fuel cell di masa depan. Sistem ini juga memberikan peluang integrasi lebih lanjut dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya untuk produksi hidrogen hijau, sehingga menciptakan ekosistem energi bersih yang lebih berkelanjutan.

Secara keseluruhan, monograf ini menyajikan kajian komprehensif mengenai transformasi kendaraan listrik berbasis baterai menjadi kendaraan listrik berbasis fuel cell yang terintegrasi IoT. Karya ini menegaskan bahwa masa depan transportasi berkelanjutan tidak hanya bergantung pada elektrifikasi semata, tetapi pada integrasi cerdas antara sumber energi alternatif, sistem penyimpanan energi, konverter daya, serta teknologi digital untuk monitoring dan optimasi kinerja.

Dengan demikian, monograf ini diharapkan menjadi kontribusi ilmiah yang memperkaya literatur energi baru terbarukan serta menjadi pijakan bagi kajian buku lanjutan dalam pengembangan kendaraan listrik hidrogen yang lebih efisien, aman, dan berdaya saing tinggi di tingkat nasional maupun global

— BAB 1 —



LANDASAN KONSEPTUAL DAN URGENSI TRANSISI ENERGI

Overview

Bab ini menguraikan landasan konseptual dan urgensi transisi energi sebagai fondasi ilmiah bagi pengembangan kendaraan listrik berbasis hidrogen dengan integrasi sistem manajemen energi berbasis Internet of Things (IoT). Transformasi sistem transportasi global pada abad ke-21 tidak lagi dipandang sebagai pilihan inovatif semata, melainkan sebagai kebutuhan strategis yang didorong oleh krisis lingkungan, dinamika ekonomi energi, dan komitmen internasional terhadap pengurangan emisi karbon. Ketergantungan jangka panjang

terhadap bahan bakar fosil telah menghasilkan pertumbuhan ekonomi dan mobilitas modern, namun di sisi lain memicu akumulasi emisi gas rumah kaca yang signifikan, terutama karbon dioksida (CO₂), yang berkontribusi terhadap perubahan iklim global, peningkatan suhu rata-rata bumi, serta degradasi kualitas udara di wilayah perkotaan. Sektor transportasi menjadi salah satu penyumbang utama emisi tersebut karena dominasi kendaraan bermesin pembakaran internal yang mengandalkan bensin dan solar sebagai sumber energi primer.

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, kebutuhan untuk melakukan dekarbonisasi sektor transportasi menjadi semakin mendesak. Pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang pesat, khususnya di negara berkembang, menciptakan tekanan besar terhadap ketahanan energi nasional dan stabilitas lingkungan. Ketergantungan pada impor bahan bakar minyak juga menimbulkan risiko ekonomi yang tidak kecil, terutama ketika harga minyak dunia mengalami fluktuasi signifikan. Oleh karena itu, transisi menuju sistem transportasi rendah emisi tidak hanya merupakan agenda lingkungan, tetapi juga strategi penguatan ketahanan energi dan kemandirian nasional.

Elektrifikasi kendaraan muncul sebagai salah satu solusi utama dalam upaya tersebut. Kendaraan listrik menawarkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan kendaraan konvensional. Motor listrik mampu mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan efisiensi di atas 85%, jauh melampaui mesin pembakaran internal yang umumnya berada pada kisaran 30–35%. Selain itu, kendaraan listrik tidak menghasilkan emisi gas buang langsung pada titik penggunaan, sehingga berkontribusi terhadap perbaikan kualitas udara di kawasan padat penduduk. Namun demikian, implementasi kendaraan listrik

berbasis baterai murni masih menghadapi sejumlah tantangan teknis dan infrastruktur, seperti keterbatasan jarak tempuh akibat kapasitas baterai, waktu pengisian ulang yang relatif lama, serta kebutuhan jaringan pengisian yang luas dan andal.

Perkembangan teknologi baterai, khususnya berbasis lithium, telah meningkatkan densitas energi dan memperpanjang umur pakai sistem penyimpanan energi. Akan tetapi, isu keberlanjutan pasokan bahan baku seperti lithium, nikel, dan kobalt tetap menjadi perhatian global. Selain itu, proses produksi dan daur ulang baterai memerlukan pendekatan manajemen lingkungan yang ketat agar tidak menimbulkan dampak baru di masa depan. Dalam situasi ini, pendekatan komplementer melalui pemanfaatan hidrogen sebagai vektor energi menawarkan peluang strategis untuk memperluas jangkauan dan fleksibilitas kendaraan listrik.

Hidrogen memiliki karakteristik unik sebagai pembawa energi dengan densitas energi spesifik yang tinggi berdasarkan massa. Ketika digunakan dalam sistem fuel cell, hidrogen bereaksi secara elektrokimia dengan oksigen untuk menghasilkan listrik, panas, dan air sebagai produk sampingan. Proses ini tidak melibatkan pembakaran langsung, sehingga menghasilkan emisi yang sangat rendah. Teknologi Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) menjadi pilihan yang relevan untuk aplikasi kendaraan karena memiliki temperatur operasi relatif rendah, respons dinamis cepat terhadap perubahan beban, serta densitas daya yang memadai untuk kebutuhan mobilitas. Integrasi fuel cell dalam kendaraan listrik memungkinkan terbentuknya konfigurasi plug-in hybrid berbasis hidrogen, di mana baterai tetap menjadi sumber energi utama penggerak motor, sementara fuel cell berfungsi sebagai sistem pengisi ulang tambahan yang memperpanjang jarak tempuh.

Pendekatan ini merepresentasikan model transisi yang realistis, terutama bagi negara dengan infrastruktur pengisian listrik yang masih berkembang. Dengan sistem hibrida berbasis hidrogen, kendaraan dapat diisi melalui jaringan listrik eksternal maupun melalui suplai hidrogen, sehingga memberikan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi. Strategi tersebut juga mengurangi ketergantungan tunggal pada satu sumber energi, sekaligus membuka peluang integrasi dengan energi terbarukan melalui produksi hidrogen hijau berbasis tenaga surya atau angin.

Secara konseptual, pengembangan kendaraan listrik berbasis hidrogen memerlukan pendekatan rekayasa sistem yang komprehensif. Integrasi antara sistem penyimpanan hidrogen, stack fuel cell, konverter daya, baterai utama, motor listrik, serta sistem proteksi harus dirancang secara sinergis untuk memastikan kestabilan operasi dan efisiensi konversi energi. Ketidaksesuaian tegangan atau arus antara komponen dapat menyebabkan penurunan performa bahkan kerusakan sistem. Oleh karena itu, penggunaan konverter DC-DC step-up menjadi elemen penting dalam menjembatani perbedaan karakteristik keluaran fuel cell dengan kebutuhan pengisian baterai. Aspek keselamatan juga menjadi perhatian utama, mengingat hidrogen merupakan gas bertekanan tinggi yang memerlukan sistem penyimpanan dan distribusi yang aman serta terstandarisasi.

Selain aspek energi dan kelistrikan, perkembangan teknologi digital menghadirkan dimensi baru dalam manajemen kendaraan listrik modern. Internet of Things (IoT) memungkinkan integrasi sensor, aktuator, dan sistem komunikasi data dalam satu ekosistem siber-fisik yang adaptif. Melalui IoT, parameter penting seperti tegangan baterai, arus pengisian, daya keluaran fuel cell, temperatur sistem, serta laju aliran hidrogen dapat dipantau secara real-time.

Data yang diperoleh tidak hanya berfungsi sebagai informasi operasional, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan berbasis data untuk optimasi performa dan deteksi dini potensi gangguan.

Konsep kendaraan cerdas berbasis IoT merefleksikan transformasi industri menuju era digitalisasi dan otomasi. Monitoring jarak jauh, pencatatan data historis, serta analisis performa berbasis algoritma membuka peluang pengembangan sistem manajemen energi adaptif yang mampu menyesuaikan titik kerja fuel cell pada kondisi optimal. Dengan demikian, integrasi IoT bukan sekadar fitur tambahan, melainkan bagian integral dari desain kendaraan listrik masa depan yang efisien dan aman.

Urgensi transisi energi dalam sektor transportasi juga tidak terlepas dari kebijakan nasional dan komitmen internasional terhadap pengurangan emisi karbon. Banyak negara telah menetapkan target net-zero emission dalam beberapa dekade mendatang. Kebijakan percepatan kendaraan listrik, insentif fiskal, serta pengembangan infrastruktur pengisian menjadi instrumen penting dalam mendorong adopsi teknologi bersih. Dalam konteks tersebut, penelitian dan pengembangan kendaraan listrik berbasis hidrogen memberikan kontribusi ilmiah dan teknologis yang relevan dengan arah kebijakan nasional maupun global.

Bab ini menempatkan pengembangan kendaraan listrik berbasis hidrogen sebagai bagian dari ekosistem energi berkelanjutan yang lebih luas. Transformasi tidak hanya menyangkut perubahan teknologi penggerak kendaraan, tetapi juga restrukturisasi sistem energi secara keseluruhan. Produksi hidrogen, distribusi, penyimpanan, hingga integrasi dengan energi terbarukan harus dipertimbangkan dalam satu kerangka sistemik. Pendekatan ini menegaskan bahwa masa depan mobilitas berkelanjutan

memerlukan sinergi antara inovasi teknologi, kebijakan publik, kesiapan infrastruktur, serta literasi masyarakat terhadap energi bersih.

Dari perspektif akademik, landasan konseptual yang diuraikan dalam bab ini memperlihatkan keterkaitan multidisipliner antara teknik elektro, teknik mesin, teknik kimia, sistem kendali, serta teknologi informasi. Pengembangan kendaraan listrik hidrogen tidak dapat dipisahkan dari pemahaman mendalam mengenai konversi energi elektrokimia, karakteristik baterai, dinamika motor listrik, serta arsitektur komunikasi data. Kompleksitas ini menuntut pendekatan interdisipliner yang terstruktur dan berbasis analisis kuantitatif.

Secara keseluruhan, bab ini membangun argumentasi bahwa transisi energi dalam sektor transportasi merupakan kebutuhan mendesak yang memerlukan solusi inovatif dan adaptif. Kendaraan listrik berbasis hidrogen dengan integrasi IoT menawarkan pendekatan komprehensif yang menggabungkan efisiensi energi, fleksibilitas operasional, dan kecerdasan sistem. Integrasi antara sumber energi alternatif, sistem penyimpanan, konverter daya, serta monitoring digital menjadi fondasi transformasi menuju mobilitas rendah emisi yang berkelanjutan. Dengan kerangka konseptual ini, monograf selanjutnya akan menguraikan desain teknis, integrasi sistem, serta evaluasi kinerja kendaraan listrik hidrogen sebagai kontribusi ilmiah dalam mendukung agenda dekarbonisasi dan inovasi energi masa depan.

Kerangka Konseptual

Kerangka konseptual dalam bab ini dibangun atas pemahaman bahwa transformasi sistem transportasi modern tidak dapat dilepaskan dari dinamika transisi energi global, perkembangan teknologi konversi energi elektrokimia, serta

integrasi sistem digital berbasis Internet of Things (IoT). Dalam konteks tersebut, pengembangan kendaraan listrik berbasis hidrogen bukan sekadar inovasi teknis pada tingkat komponen, melainkan representasi perubahan paradigma dalam sistem energi dan mobilitas berkelanjutan. Kerangka ini memosisikan kendaraan listrik hidrogen sebagai simpul pertemuan antara teknologi energi bersih, sistem penyimpanan daya, rekayasa konversi energi, dan arsitektur kendali digital yang saling terintegrasi.

Secara epistemologis, kajian ini bertolak dari teori transisi energi (energy transition theory) yang menjelaskan pergeseran struktural dari sistem berbasis karbon menuju sistem energi rendah emisi. Transisi tersebut tidak berlangsung secara linier, melainkan melalui fase hibridisasi teknologi, di mana sistem lama dan sistem baru berinteraksi dalam periode adaptasi. Kendaraan listrik berbasis baterai (Battery Electric Vehicle/BEV) merupakan langkah awal elektrifikasi transportasi, namun keterbatasan densitas energi baterai dan infrastruktur pengisian mengindikasikan perlunya model komplementer. Di sinilah teknologi fuel cell berbasis hidrogen memainkan peran sebagai penguat sistem, bukan pengganti total, melalui konfigurasi plug-in hybrid berbasis hidrogen yang memungkinkan fleksibilitas pengisian ganda dan perpanjangan jarak tempuh.

Dalam kerangka konseptual ini, kendaraan listrik dipahami sebagai sistem konversi energi berlapis. Energi kimia dalam baterai dikonversi menjadi energi listrik, kemudian diubah menjadi energi mekanik melalui motor listrik. Ketika fuel cell ditambahkan, terjadi lapisan konversi tambahan di mana energi kimia hidrogen diubah secara elektrokimia menjadi energi listrik. Dengan demikian, sistem kendaraan menjadi jaringan konversi energi yang saling terhubung,

di mana efisiensi keseluruhan ditentukan oleh integrasi antarsubsistem, bukan hanya oleh performa individual komponen.

Fuel cell, khususnya Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), diposisikan sebagai teknologi kunci dalam arsitektur ini. Secara konseptual, PEMFC bekerja berdasarkan prinsip pemisahan proton dan elektron melalui membran elektrolit polimer, menghasilkan arus listrik tanpa proses pembakaran termal. Reaksi elektrokimia yang terjadi pada anoda dan katoda menghasilkan air sebagai produk sampingan, sehingga emisi langsung sistem mendekati nol. Namun demikian, performa fuel cell sangat dipengaruhi oleh variabel seperti laju aliran hidrogen, temperatur operasi, tekanan gas, serta kondisi beban listrik. Oleh karena itu, sistem manajemen energi yang adaptif menjadi prasyarat utama agar fuel cell dapat beroperasi pada titik kerja optimal.

Kerangka konseptual ini juga menempatkan baterai sebagai elemen sentral dalam stabilisasi daya. Baterai berbasis lithium iron phosphate (LiFePO_4) dipilih karena memiliki stabilitas termal yang baik, umur siklus panjang, serta tingkat keamanan tinggi. Baterai tidak hanya berfungsi sebagai penyimpan energi utama, tetapi juga sebagai buffer yang menyerap fluktuasi daya dari fuel cell maupun beban motor. Dengan demikian, konfigurasi sistem yang dikembangkan memisahkan fungsi pembangkitan tambahan (fuel cell) dari fungsi penggerak utama (motor listrik), sehingga meningkatkan stabilitas operasional dan memperpanjang umur stack fuel cell.

Pada level sistem, integrasi konverter DC-DC step-up menjadi komponen penting dalam kerangka ini. Output tegangan fuel cell yang relatif lebih rendah dibandingkan kebutuhan pengisian baterai menuntut adanya proses peningkatan tegangan agar kompatibel dengan sistem penyimpanan 96 V. Tanpa integrasi konverter yang

tepat, mismatch tegangan dapat menimbulkan rugi-rugi daya, overheating, bahkan kerusakan komponen. Oleh karena itu, konverter dipahami bukan sekadar alat penyesuai tegangan, melainkan bagian integral dari manajemen efisiensi sistem.

Selain aspek energi, kerangka konseptual ini memasukkan dimensi digital sebagai pilar utama kendaraan listrik modern. Internet of Things (IoT) diposisikan sebagai sistem penghubung antara sensor, aktuator, dan platform analitik data. Dalam pendekatan ini, kendaraan tidak lagi hanya entitas mekanis-elektrik, tetapi sistem siber-fisik (cyber-physical system) yang memadukan komponen fisik dan digital dalam satu arsitektur terpadu. Sensor tegangan, arus, temperatur, dan laju aliran gas terhubung dengan mikrokontroler yang memproses data secara real-time dan mengirimkannya ke platform monitoring berbasis jaringan. Integrasi ini memungkinkan pengawasan jarak jauh, pengendalian adaptif, serta pencatatan data performa yang dapat dianalisis untuk optimasi sistem.

Secara teoretis, manajemen energi berbasis IoT memperluas konsep kontrol klasik menjadi kontrol berbasis data (data-driven control). Sistem tidak hanya bereaksi terhadap perubahan beban secara lokal, tetapi juga mampu melakukan evaluasi historis dan prediktif terhadap pola operasi. Dalam konteks fuel cell, hal ini berarti bahwa laju aliran hidrogen dapat disesuaikan untuk mempertahankan efisiensi konversi optimal dan meminimalkan konsumsi bahan bakar spesifik (Specific Fuel Consumption/SFC). Dengan demikian, IoT berfungsi sebagai enabler dalam mencapai efisiensi sistemik, bukan sekadar alat monitoring pasif.

Kerangka konseptual ini juga mempertimbangkan aspek keselamatan dan keberlanjutan. Hidrogen sebagai gas bertekanan tinggi memerlukan sistem penyimpanan dan distribusi yang aman.

Integrasi regulator tekanan, solenoid valve, dan sistem proteksi arus menjadi bagian dari desain keseluruhan yang menjamin keamanan operasional. Keselamatan dipandang sebagai variabel inheren dalam desain sistem, bukan elemen tambahan yang bersifat opsional.

Dalam perspektif kebijakan energi, kerangka ini selaras dengan upaya dekarbonisasi sektor transportasi dan pengembangan energi baru terbarukan. Integrasi fuel cell dalam kendaraan listrik membuka peluang pemanfaatan hidrogen hijau yang diproduksi dari energi surya atau angin melalui proses elektrolisis air. Dengan demikian, sistem kendaraan dapat menjadi bagian dari ekosistem energi bersih yang lebih luas, menghubungkan sektor transportasi dengan sektor pembangkitan energi terbarukan.

Konseptualisasi dalam bab ini juga didasarkan pada pendekatan rekayasa sistem (systems engineering). Setiap subsistem—penyimpanan hidrogen, stack fuel cell, konverter daya, baterai, motor listrik, serta sistem IoT—dipandang sebagai komponen yang memiliki interaksi dinamis. Perubahan pada satu subsistem akan memengaruhi performa keseluruhan. Oleh karena itu, evaluasi kinerja tidak hanya dilakukan pada tingkat komponen, tetapi pada tingkat sistem terpadu melalui analisis daya input, daya output, efisiensi konversi, dan konsumsi bahan bakar spesifik.

Dalam kerangka metodologis, hubungan antara variabel-variabel utama dapat dirumuskan sebagai berikut: laju aliran hidrogen memengaruhi daya input kimia; daya input dikonversi menjadi daya listrik oleh fuel cell; daya listrik yang telah disesuaikan tegangannya disalurkan ke baterai; baterai menyuplai motor listrik; dan seluruh proses dimonitor serta dikendalikan oleh sistem IoT. Efisiensi sistem ditentukan oleh rasio daya output terhadap daya input, sementara keberlanjutan operasional dipengaruhi oleh stabilitas temperatur dan arus.

Secara konseptual, model ini membentuk siklus energi tertutup yang terkontrol secara digital. Data yang diperoleh dari sensor memungkinkan pengambilan keputusan berbasis parameter kuantitatif, sehingga sistem dapat beroperasi pada kondisi optimal. Integrasi antara energi kimia, energi listrik, energi mekanik, dan informasi digital menjadi ciri utama kendaraan listrik hidrogen yang dikembangkan dalam monograf ini.

Kerangka konseptual ini pada akhirnya menegaskan bahwa masa depan mobilitas berkelanjutan terletak pada integrasi multidisipliner antara teknologi energi bersih dan transformasi digital. Kendaraan listrik berbasis hidrogen dengan manajemen energi berbasis IoT merepresentasikan model konvergensi tersebut. Pendekatan ini tidak hanya menjawab tantangan teknis terkait jarak tempuh dan efisiensi, tetapi juga membangun fondasi bagi sistem transportasi cerdas yang adaptif terhadap dinamika beban, kondisi lingkungan, dan kebutuhan pengguna.

Dengan demikian, kerangka konseptual BAB I menempatkan penelitian dan pengembangan kendaraan listrik hidrogen sebagai bagian dari transformasi sistem energi global. Integrasi fuel cell, baterai, konverter daya, motor listrik, dan IoT membentuk arsitektur sistemik yang bertujuan mencapai efisiensi tinggi, emisi rendah, serta keamanan operasional yang terjaga. Kerangka ini menjadi pijakan teoretis dan analitis bagi pembahasan desain, integrasi, serta evaluasi kinerja pada bab-bab selanjutnya, sekaligus memperlihatkan bahwa inovasi teknologi transportasi harus dipahami dalam konteks ekosistem energi yang lebih luas dan berkelanjutan.

Ruang Lingkup Kajian

Ruang lingkup kajian dalam bab ini ditetapkan untuk memberikan batasan konseptual sekaligus arah analitis terhadap

pembahasan mengenai pengembangan kendaraan listrik berbasis hidrogen dengan integrasi sistem manajemen energi berbasis Internet of Things (IoT). Penetapan ruang lingkup menjadi penting dalam konteks monograf ilmiah karena memastikan bahwa pembahasan tidak melebar secara deskriptif tanpa struktur, melainkan terfokus pada dimensi-dimensi fundamental yang mendasari desain dan integrasi sistem pada bab-bab selanjutnya. Bab ini tidak hanya berfungsi sebagai pengantar tematik, tetapi sebagai fondasi teoritis yang menjelaskan hubungan antara transisi energi global, elektrifikasi transportasi, teknologi fuel cell, sistem penyimpanan energi, dan transformasi digital dalam ekosistem kendaraan modern.

Kajian dalam bab ini secara konseptual mencakup tiga domain utama yang saling terhubung, yaitu domain energi, domain teknologi kendaraan listrik, dan domain sistem digital berbasis IoT. Ketiga domain tersebut dipahami sebagai satu kesatuan sistemik yang membentuk kerangka transformasi mobilitas berkelanjutan. Dengan demikian, ruang lingkup pembahasan tidak terbatas pada aspek mekanis kendaraan semata, melainkan melibatkan dinamika konversi energi, stabilitas sistem kelistrikan, serta integrasi kontrol dan monitoring berbasis data.

Pada domain energi, kajian difokuskan pada urgensi transisi dari sistem berbasis bahan bakar fosil menuju sistem energi rendah emisi. Pembahasan mencakup analisis konseptual mengenai kontribusi sektor transportasi terhadap emisi gas rumah kaca, implikasi perubahan iklim terhadap keberlanjutan pembangunan, serta tantangan ketahanan energi nasional akibat ketergantungan pada bahan bakar minyak. Ruang lingkup ini membatasi kajian pada sektor transportasi darat sebagai kontributor signifikan emisi karbon, tanpa memperluas pembahasan ke sektor industri berat,

kelistrikan skala besar, atau penerbangan. Fokus diarahkan pada bagaimana transformasi teknologi kendaraan dapat berkontribusi terhadap target dekarbonisasi dan efisiensi energi secara sistemik.

Selain itu, ruang lingkup energi dalam bab ini juga mencakup pemahaman mengenai hidrogen sebagai vektor energi. Pembahasan dibatasi pada aspek konseptual mengenai sifat fisika dan kimia hidrogen, potensi densitas energi, serta prinsip konversi elektrokimia melalui fuel cell. Kajian tidak membahas secara mendalam rantai pasok global hidrogen, geopolitik distribusi energi, maupun analisis ekonomi makro produksi hidrogen, melainkan menitikberatkan pada relevansinya sebagai sumber energi tambahan dalam sistem kendaraan listrik hibrida berbasis fuel cell.

Pada domain teknologi kendaraan listrik, ruang lingkup kajian mencakup klasifikasi kendaraan listrik, meliputi Battery Electric Vehicle (BEV), Hybrid Electric Vehicle (HEV), Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), dan Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV). Pembahasan dibatasi pada aspek konseptual dan prinsip kerja masing-masing tipe kendaraan, dengan tujuan menempatkan konfigurasi yang dikembangkan dalam monograf ini pada spektrum teknologi yang relevan. Penjelasan difokuskan pada perbedaan sumber energi, mekanisme konversi daya, serta implikasi efisiensi operasional, tanpa melakukan komparasi komprehensif terhadap seluruh model komersial di pasar global.

Ruang lingkup teknis dalam bab ini juga mencakup prinsip kerja Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) sebagai teknologi inti dalam sistem yang dikembangkan. Pembahasan meliputi reaksi elektrokimia pada anoda dan katoda, peran membran elektrolit, serta karakteristik operasi seperti temperatur kerja dan respons dinamis terhadap beban. Namun demikian, kajian

tidak memperluas pembahasan pada desain mikrostruktur katalis, rekayasa material membran tingkat molekuler, maupun simulasi numerik detail sel bahan bakar. Fokus diarahkan pada relevansi operasional PEMFC dalam konteks integrasi kendaraan listrik skala menengah.

Selanjutnya, ruang lingkup mencakup sistem penyimpanan energi berbasis baterai, khususnya baterai lithium iron phosphate (LiFePO_4) dan baterai pendukung berbasis lead-acid. Kajian dalam bab ini membatasi pembahasan pada karakteristik umum baterai, seperti kapasitas nominal, tegangan operasi, arus maksimum, stabilitas termal, dan umur siklus. Analisis mendalam mengenai kimia sel baterai, degradasi elektrokimia jangka panjang, serta model matematis aging baterai tidak dibahas pada tahap ini, melainkan menjadi konteks pendukung dalam memahami integrasi sistem energi secara keseluruhan.

Pada domain sistem digital, ruang lingkup kajian difokuskan pada integrasi Internet of Things (IoT) sebagai sistem monitoring dan manajemen energi. Pembahasan meliputi konsep dasar IoT, peran sensor dalam pengumpulan data, fungsi mikrokontroler sebagai pusat pemrosesan, serta komunikasi data berbasis jaringan nirkabel. Fokus diarahkan pada bagaimana sistem IoT memungkinkan monitoring real-time terhadap parameter kelistrikan dan termal kendaraan, serta bagaimana data tersebut mendukung pengambilan keputusan berbasis performa sistem. Bab ini tidak membahas secara mendalam algoritma kecerdasan buatan, machine learning, atau analisis big data skala industri, melainkan membatasi diri pada integrasi IoT sebagai sistem pengawasan dan kontrol adaptif tingkat kendaraan.

Ruang lingkup kajian juga mencakup pendekatan rekayasa sistem (systems engineering) dalam integrasi komponen.

Pembahasan dibatasi pada hubungan antar subsistem—fuel cell, konverter DC-DC, baterai, motor listrik, dan sistem kontrol—serta implikasi interaksi tersebut terhadap efisiensi dan keselamatan operasional. Aspek manufaktur massal, rantai pasok komponen, dan analisis biaya produksi tidak menjadi bagian utama dalam bab ini, karena fokus utama adalah pembentukan kerangka konseptual dan teknis sebagai dasar desain.

Selain batasan teknis, ruang lingkup kajian dalam bab ini juga menempatkan pembahasan dalam konteks kebijakan energi dan pembangunan berkelanjutan. Namun, analisis kebijakan dibatasi pada relevansi umum terhadap percepatan kendaraan listrik dan target pengurangan emisi, tanpa melakukan telaah hukum atau analisis regulasi secara rinci. Tujuan pembahasan kebijakan adalah untuk memberikan latar belakang normatif yang memperkuat urgensi pengembangan teknologi, bukan untuk melakukan evaluasi kebijakan publik secara komprehensif.

Dalam konteks metodologis, ruang lingkup bab ini tidak mencakup hasil eksperimen atau data kuantitatif performa sistem, karena aspek tersebut dibahas pada bab selanjutnya. Bab ini bersifat konseptual dan teoritis, membangun dasar pemahaman sebelum memasuki tahap desain, integrasi, dan evaluasi eksperimental. Oleh karena itu, pembahasan variabel seperti daya output, efisiensi konversi, dan Specific Fuel Consumption (SFC) hanya diperkenalkan sebagai kerangka analisis, bukan sebagai hasil penelitian.

Secara keseluruhan, ruang lingkup kajian BAB I dirancang untuk membangun fondasi yang komprehensif namun terfokus. Kajian mencakup urgensi transisi energi, paradigma kendaraan listrik, konsep fuel cell berbasis hidrogen, sistem penyimpanan energi, serta integrasi IoT sebagai sistem monitoring dan

manajemen. Pembahasan dibatasi pada tingkat konseptual dan sistemik, tanpa memperluas analisis pada detail mikrostruktur material atau skala industri makro. Dengan batasan ini, bab pertama berfungsi sebagai kerangka dasar yang sistematis dan koheren, yang akan mendukung pembahasan teknis dan eksperimental pada bab-bab berikutnya.

Ruang lingkup ini sekaligus menegaskan bahwa pengembangan kendaraan listrik berbasis hidrogen tidak dapat dipahami secara parsial. Ia merupakan hasil interaksi multidisipliner antara teknik elektro, teknik mesin, teknik kimia, dan teknologi informasi. Oleh karena itu, pembatasan kajian dilakukan bukan untuk menyederhanakan kompleksitas, melainkan untuk menjaga fokus analitis agar pembahasan tetap mendalam, terarah, dan relevan dengan tujuan monograf. Dengan ruang lingkup yang terdefinisi secara jelas, bab ini menjadi pijakan epistemologis yang kuat dalam memahami desain dan integrasi sistem kendaraan listrik hidrogen berbasis IoT sebagai bagian dari transformasi energi berkelanjutan.

A. LANDASAN KONSEPTUAL

Mobil listrik adalah kendaraan yang menggunakan motor listrik untuk bergerak dan memperoleh energi dari baterai atau sumber energi lain yang dapat disimpan. Mobil listrik menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan dengan kendaraan konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil. Salah satu keunggulan utamanya adalah minimnya emisi polusi udara, serta kontribusi dalam mengurangi dampak pemanasan global karena tidak memerlukan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utamanya[12]. Sumber energi utama mobil listrik adalah baterai yang dapat diisi ulang (*rechargeable*) melalui pengisian dari sumber listrik eksternal seperti *outlet* listrik rumah atau stasiun pengisian

khusus[19]. Jangkauan jarak tempuh mobil listrik masih terbatas oleh kapasitas baterai, namun terus mengalami peningkatan seiring perkembangan teknologi baterai[14].

Hidrogen menyimpan ion elektron yang dapat menghasilkan energi listrik ketika bereaksi dengan oksigen menggunakan alat *fuel cell*. Energi yang tersimpan dalam gas hidrogen dapat dimanfaatkan sebagai energi listrik. Dalam kajian ini, pemanfaatan gas hidrogen akan diterapkan untuk pengisian baterai. *Fuel cell* adalah alat elektrokimia yang dirancang untuk memisahkan ion hidrogen dan oksigen dengan bantuan katalis. Reaksi ini menghasilkan energi panas dan energi listrik. Energi panas perlu dibuang melalui pendinginan menggunakan blower, sedangkan energi listrik yang dihasilkan oleh *fuel cell* diimplementasikan sebagai sumber energi untuk menggerakkan kendaraan listrik atau kendaraan hibrida, yang diharapkan menjadi kendaraan masa depan[11].

Kendaraan dengan mesin berbahan bakar minyak (BBM) memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan, terutama melalui emisi gas rumah kaca yang merupakan kontributor utama perubahan iklim. Saat kendaraan ini beroperasi, mereka melepaskan sejumlah besar karbon dioksida (CO_2) ke atmosfer. Kendaraan listrik dapat sebagai solusi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta mengurangi emisi gas rumah kaca. Berdasarkan data laporan tahunan emisi CO_2 tahun 2022 oleh Dewan Energi Nasional (DEN) menunjukkan bahwa sektor transportasi merupakan salah satu kontributor utama emisi karbon di Indonesia[4].

Pengembangan inovasi pada mobil listrik menjadi penting dalam sektor transportasi untuk menawarkan solusi

ramah lingkungan dan efisien energi. Pemerintah Indonesia melalui Kementerian ESDM aktif mendorong penggunaan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Pemerintah Indonesia telah mengambil langkah-langkah untuk mendukung pengembangan infrastruktur kendaraan listrik yang menetapkan kebijakan percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai[13]. Kebijakan ini mencakup pemberian insentif untuk industri lokal dan pengembangan infrastruktur pengisian daya, yang diharapkan dapat mempercepat adopsi kendaraan listrik di Indonesia. Selain itu, pemerintah juga berencana untuk mengoptimalkan kerjasama dengan sektor swasta guna memperluas jaringan stasiun pengisian daya dan memastikan ketersediaan suku cadang serta layanan purna jual yang memadai. Dengan langkah-langkah ini, diharapkan akan tercipta ekosistem yang mendukung pertumbuhan pasar kendaraan listrik, yang pada akhirnya akan membantu mengurangi emisi karbon dan mengoptimalkan kualitas udara.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang baru dalam pengelolaan dan monitoring kinerja kendaraan listrik. Penggunaan IoT memungkinkan pengawasan langsung secara *real-time* terhadap sejumlah parameter seperti tegangan, arus, dan daya listrik kendaraan dengan memberikan akses instan ke data aktual. Selain itu, dengan sensor-sensor yang terhubung, teknologi ini juga dapat mendeteksi secara dini masalah teknis, mengidentifikasi potensi kerusakan besar sebelum terjadi, dan akhirnya

mengurangi waktu henti serta biaya perbaikan yang tak terduga. Maka dari itu berdasarkan permasalahan yang ada, buku ini menyajikan membuat monograf ini mengkaji dengan judul “**Monitoring Pengisian Hidrogen Pada *Fuel Cell* untuk Baterai Mobil Listrik Berbasis *Internet of Things* (IoT)**”.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali Express. n.d. “*Spesifikasi Kontroler.*” Retrieved (<https://id.aliexpress.com/i/1005005077269197.html>).
- Amazon.co.uk. n.d. “*Spesification AC Servo Motor.*” Retrieved (<https://www.amazon.co.uk/HLELU-18oST-M48o2o-Three-Phase-permanent-AASD-75A/dp/BoCSN3S24D>).
- Beat Solution Lithium Battery. 2022. “*Cara Menggunakan Dan Memasang Baterai Lithium Ion.*” Retrieved (<https://www.lifepo4battery-factory.com/product/96v-battery-100ah/>).
- DEN, Sekretariat Jenderal. 2023. *Outlook Energi Indonesia 2023*. Jakarta.
- Faudan, Agus. n.d. “*Mengenal Aplikasi BLYNK Untuk Fungsi IOT.*” Retrieved (<https://www.nyebarilmu.com/mengenal-aplikasi-blynk-untuk-fungsi-iot/>).
- Fulleady. n.d. “*Spesifikasi Pengisi Daya 96 V 100 Ah.*” Retrieved (<https://id.aliexpress.com/item/1005004883309317.html>).
- Hendrata, Suhada. 2001. “Fuel Cell Sebagai Penghasil Energi Abad 21.” *Jurnal Teknik Mesin* 3(2):92–100.
- Jamaludin, Helmi. 2020. “Designing ESP32 Base Shield Board for IoT Application Politeknik Designing ESP32 Base Shield Board for IoT Application.” *Politeknik & Kolej Komuniti Journal of Engineering and Technology* 5(1):128–2883.
- Jan, Axelsen. 2011. “*Rangkaian Repeater RS485.*” Retrieved (Rangkaian Repeater RS485 %7C DASAR KOMPUTER BUAT PEMULA (wordpress.com)).
- Larminie, James., and John Lowry. 2012. *Electric Vehicle Technology Explained: Second Edition*. J. Wiley.
- Ma’fur, HM, and Fa Widiharsa. 2016. “Fuel Cell Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif Pengisi Baterai Dengan Pengendali Panas.” *Transmisi* 12(1):45–54.
- Mulyadi, Rahmat, Kurnia Dwi Artika, and Muhammad Khalil. 2019. “Elektronik Pada Mobil Listrik.” *Jurnal Elemen* 6(1):7–12.

- Perpres. 2019. *Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (Battery) Electric Vehicle) Untuk Transportasi Jalan.*
- Prasetijo, Soelami, and Soeparman. 2012. "Studi Awal Pengembangan Kendaraan Listrik Di Indonesia." *Jurnal Teknik Pomits* 1(1):1-6.
- Prasetyo, Elga Aris. 2023. "Sensor Suhu : Pengertian Dan Jenis-Jenisnya." Retrieved (<https://www.arduinoindonesia.id/2022/11/sensor-suhu-pengertian-dan-jenis-jenisnya.html?m=1>).
- PT Arita Prima Indonesia. n.d. "Solenoid Valve: Definisi, Fungsi, Jenis Dan Spesifikasinya."
- Solarduino. 2020. "PZEM-017 DC Energy Meter with Arduino." Retrieved (<https://solarduino.com/pzem-017-dc-energi-meter-with-arduino/>).
- Sulistio. 2021. "Mikrokontroler ESP32." Retrieved (<https://raharja.ac.id/2021/11/16/mikrokontroler-esp32-3/>).
- Sulistyo, H., and K. Dewi. 2015. "Pengembangan Teknologi Mobil Listrik Di Indonesia." *Jurnal Teknik* 36(1):11-19.
- Susanto, Fredy, Ni Komang Prasiani, and Putu Darmawan. 2022. *Implementasi Internet of Thing Dalam Kehidupan Sehari-Hari*. Vol. 2. Online.
- Tianneng, Grup. 2016. "Baterai Skuter Listrik." Retrieved (<https://id.chilweebattery.com/motive-power-battery/vrla-battery-12v-20ah-chilwee-brand.html>).
- Wagya, Agus, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Jl GA Siwabessy, and Kampus UI Depok. 2019. "Prototipe Modul Praktik Untuk Pengembangan Aplikasi Internet of Things (IoT)." *Jurnal Ilmiah Setrum Article In Press* 8(2):238-47.

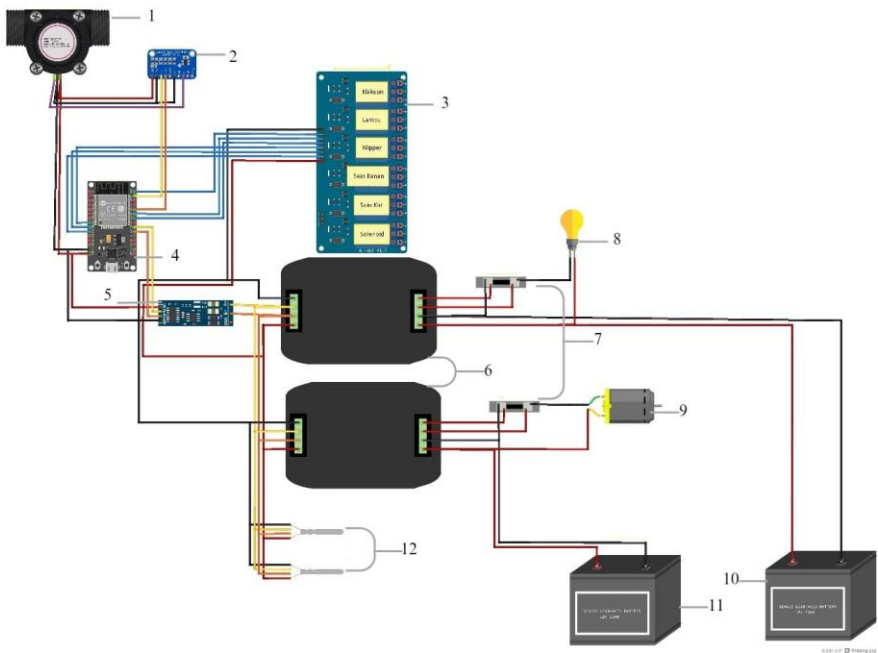
APENDIKS

Apendiks 1 Data Validasi Sistem Performa Mobil Listrik

NO	Kecepatan (km/jam)	Jarak (m)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Listrik (W)	Waktu (s)
1	10	100	97,5	29	2,827	36
2		100	96,8	28,7	2,778	32,73
3		100	95,7	28	2,679	36
4		100	95,4	27,9	2,661	30
5		100	95,0	25,5	2,422	27,69
6		100	94,4	24	2,265	30
7		100	94,3	22,2	2,093	36
8		100	93,6	21	1,965	27,69
9		100	93,0	20	1,86	36
10		100	92,7	22	2,039	36
Rata-rata	10	100	94,8	24,83	2,358	32,81
1	20	100	97,1	30,4	2,951	18
2		100	96,7	30,1	2,91	17,14
3		100	96,5	29,8	2,875	18
4		100	96	29,7	2,851	15,65
5		100	95,6	29,6	2,829	14,4
6		100	95,4	29,5	2,814	15
7		100	95,4	27,8	2,652	18
8		100	95,3	25	2,382	18
9		100	94,4	22,5	2,124	17,14
10		100	94	22,4	2,105	15,65
Rata-rata	20	100	95,6	27,68	2,649	16,70
1	30	100	95,8	32,9	3,151	12
2		100	95,5	32,5	3,103	11,61
3		100	95,2	31,9	3,036	10,29
4		100	95,1	30,9	2,938	11,25
5		100	94,9	30,9	2,932	12
6		100	94,3	30,8	2,904	10,59
7		100	94,3	30,2	2,847	12
8		100	94,2	29,7	2,797	11,25
9		100	94	29,1	2,735	12
10		100	94	29	2,726	12
Rata-rata	30	100	94,7	30,79	2,916	11,50

NO	Kecepatan (km/jam)	Jarak (m)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Listrik (W)	Waktu (s)
1	40	100	94,8	35,9	3,403	9
2		100	94,7	36,5	3,456	8,57
3		100	94,3	35	3,3	8,78
4		100	93,9	35,6	3,342	8
5		100	93,8	36,9	3,461	9
6		100	93,8	35,9	3,367	9
7		100	93,5	35,6	3,328	8,37
8		100	93,4	35,2	3,278	8,78
9		100	92,1	28,1	2,588	9
10		100	92	28	2,576	9
Rata-rata	40	100	93,6	34,27	3,366	8,75

Apendiks 2 Rangkaian IoT



Keterangan :

- 1 = Sensor *flow*
- 2 = ADS1115
- 3 = *Relay Channel*
- 4 = ESP32
- 5 = RS485

- 6 = PZEM017
- 7 = Shunt
- 8 = Lampu lead
- 9 = Load Motor DC
- 10 = Baterai 12V 20A
- 11 = Baterai 96V 50A
- 12 = Sensor suhu

Penjelasan :

Rangkaian IoT ini memantau daya listrik dari beberapa sumber menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung ke internet. Flow sensor mengukur laju aliran fluida, mengirimkan sinyal analog ke modul ADC ADS1115, yang kemudian mengonversi sinyal menjadi data digital untuk ESP32. ESP32 juga menerima data dari 2 modul PZEM-017 yang mengukur tegangan, arus, dan daya dari baterai 12V 120Ah dan 96V 50Ah, dengan arus diukur melalui shunt. ESP32 mengendalikan modul relay 8 channel untuk mengaktifkan atau mematikan beban listrik seperti lampu, dengan kontrol terpisah untuk setiap beban. Modul RS485 diimplementasikan untuk komunikasi serial jarak jauh yang andal. Dengan konektivitas Wi-Fi, ESP32 mengirimkan data pengukuran dan status beban ke server atau aplikasi pengguna, memungkinkan pemantauan dan kontrol jarak jauh.

Apendiks 3 SOP Pengoperasian

SOP PENGOPERASIAN

“MONITORING PENGISIAN HIDROGEN PADA FUEL CELL UNTUK BATERAI MOBIL LISTRIK MENGGUNAKAN INTERNET OF THINGS (IOT)”

Standar Operasional Prosedur (SOP) ini berisi langkah-langkah untuk mengoperasikan mobil listrik yang dilengkapi dengan teknologi IoT untuk pemantauan kinerja. Tujuannya adalah untuk memastikan kendaraan berfungsi dengan aman, efisien, dan optimal

Persiapan Awal

1. Pemeriksaan Kendaraan:
 - Lakukan inspeksi fisik pada kendaraan.
 - Pastikan baterai dalam kondisi penuh dan sistem *fuel cell* berfungsi dengan baik.

2. Perangkat IoT:

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

Pengoperasian Kendaraan

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

2. Pengisian Daya:

- Untuk pengisian baterai dengan listrik: sambungkan kabel pengisian daya ke stasiun pengisian listrik dan port kendaraan.
- Untuk pengisian hidrogen apabila hidrogen telah habis lakukan 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.

SOP ini harus diikuti oleh semua pengguna dan teknisi untuk memastikan pengoperasian mobil listrik berjalan lancar dan aman. Perangkat IoT harus diimplementasikan secara optimal untuk pemantauan kinerja dan mendukung perawatan preventif.

Apendiks 4 Tabel Nilai LHV dan HHV

Section: Appendix A
Lower and Higher Heating Values of Gas, Liquid and Solid Fuels

Fuels	Lower Heating Value (LHV) [1]			Higher Heating Value (HHV) [1]			Density
	Btu/lb [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	Btu/lb [2]	Btu/lb [3]	MJ/kg [4]	grams/lb
Gaseous Fuels @ 32 F and 1 atm							
Natural gas	983	20,267	47.141	1089	22,453	52.225	22.0
Hydrogen	290	51,682	120.21	343	61,127	142.18	2.55
Still gas (in refineries)	1458	20,163	46.898	1,584	21,905	50.951	32.8
Liquid Fuels							
Crude oil	129,670	18,352	42.686	138,350	19,580	45.543	3.205
Conventional gasoline	116,090	18,679	43.448	124,340	20,007	46.536	2.819
Reformulated or low-sulfur gasoline	113,602	18,211	42.358	121,848	19,533	45.433	2.830
CA reformulated gasoline	113,927	18,272	42.500	122,174	19,595	45.577	2.828
U.S. conventional diesel	128,450	18,397	42.791	137,380	19,676	45.766	3.167
Low-sulfur diesel	129,488	18,320	42.612	138,490	19,594	45.575	3.206
Petroleum naphtha	116,920	19,320	44.938	125,080	20,669	48.075	2.745
NG-based FT naphtha	111,520	19,081	44.383	119,740	20,488	47.654	2.651
Residual oil	140,353	16,968	39.466	150,110	18,147	42.210	3.752
Methanol	57,250	8,639	20.094	65,200	9,838	22.884	3.006
Ethanol	76,330	11,587	26.952	84,530	12,832	29.847	2.988
Butanol	99,837	14,775	34.366	108,458	16,051	37.334	3.065
Acetone	83,127	12,721	29.589	89,511	13,698	31.862	2.964
E-Diesel Additives	116,090	18,679	43.448	124,340	20,007	46.536	2.819
Liquefied petroleum gas (LPG)	84,950	20,038	46.607	91,410	21,561	50.152	1.923
Liquefied natural gas (LNG)	74,720	20,908	48.632	84,820	23,734	55.206	1.621
Dimethyl ether (DME)	68,930	12,417	28.882	75,610	13,620	31.681	2.518
Dimethoxy methane (DMM)	72,200	10,061	23.402	79,197	11,036	25.670	3.255
Methyl ester (biodiesel, BD)	119,550	16,134	37.528	127,960	17,269	40.168	3.361
Fischer-Tropsch diesel (FTD)	123,670	18,593	43.247	130,030	19,549	45.471	3.017
Renewable Diesel I (SuperCetane)	117,059	18,729	43.563	125,294	20,047	46.628	2.835
Renewable Diesel II (UOP-HDO)	122,887	18,908	43.979	130,817	20,128	46.817	2.948
Renewable Gasoline	115,983	18,590	43.239	124,230	19,911	46.314	2.830
Liquid Hydrogen	30,500	51,621	120.07	36,020	60,964	141.80	2.68
Methyl tertiary butyl ether (MTBE)	93,540	15,094	35.108	101,130	16,319	37.957	2.811
Ethyl tertiary butyl ether (ETBE)	96,720	15,613	36.315	104,530	16,873	39.247	2.810
Tertiary amyl methyl ether (TAME)	100,480	15,646	36.392	108,570	16,906	39.322	2.913
Butane	94,970	19,466	45.277	103,220	21,157	49.210	2.213
Isobutane	90,060	19,287	44.862	98,560	21,108	49.096	2.118
Isobutylene	95,720	19,271	44.824	103,010	20,739	48.238	2.253
Propane	84,250	19,904	46.296	91,420	21,597	50.235	1.920
Solid Fuels							
Coal (wet basis) [6]	19,546,300	9,773	22.732	20,608,570	10,304	23.968	
Bituminous coal (wet basis) [7]	22,460,600	11,230	26.122	23,445,900	11,723	27.267	
Coking coal (wet basis)	24,600,497	12,300	28.610	25,679,670	12,840	29.865	
Farmed trees (dry basis)	16,811,000	8,406	19.551	17,703,170	8,852	20.589	
Herbaceous biomass (dry basis)	14,797,555	7,399	17.209	15,582,870	7,791	18.123	
Corn stover (dry basis)	14,075,990	7,038	16.370	14,974,460	7,487	17.415	
Forest residue (dry basis)	13,243,490	6,622	15.402	14,164,160	7,082	16.473	
Sugar cane bagasse	12,947,318	6,474	15.058	14,062,678	7,031	16.355	
Petroleum coke	25,370,000	12,685	29.505	26,920,000	13,460	31.308	

Source:

GREET, The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use In Transportation Model, GREET 1.8d.1, developed by Argonne National Laboratory, Argonne, IL, released August 26, 2010.
<http://greet.es.anl.gov/>

Notes:

[1] The **lower heating value** (also known as net calorific value) of a fuel is defined as the amount of heat released by combusting a specified quantity (initially at 25°C) and returning the temperature of the combustion products to 150°C, which assumes the latent heat of vaporization of water in the reaction products is not recovered. The LHV are the useful calorific values in boiler combustion plants and are frequently used in Europe.

The **higher heating value** (also known as gross calorific value or gross energy) of a fuel is defined as the amount of heat released by a specified quantity (initially at 25°C) once it is combusted and the products have returned to a temperature of 25°C, which takes into account the latent heat of vaporization of water in the combustion products. The HHV are derived only under laboratory conditions, and are frequently used in the US for solid fuels.

[2] Btu = British thermal unit.

[3] The heating values for gaseous fuels in units of Btu/lb are calculated based on the heating values in units of Btu/ft³ and the corresponding

[4] The heating values in units of MJ/kg, are converted from the heating values in units of Btu/lb.

[5] For solid fuels, the heating values in units of Btu/lb are converted from the heating values in units of Btu/ton.

[6] Coal characteristics assumed by GREET for electric power production.

[7] Coal characteristics assumed by GREET for hydrogen and Fischer-Tropsch diesel production.

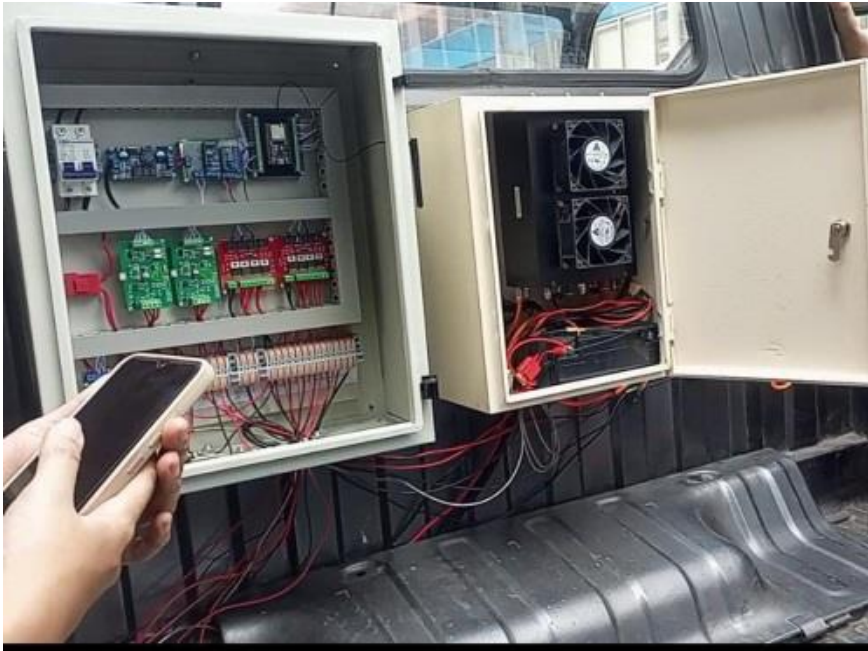
Apendiks 5 Dokumentasi Tahapan Implementasi



Gambar 5. 1 Pengeboran Panel Box



Gambar 5. 2 Perangkaian Sistem IoT



Gambar 5. 3 Validasi Sistem Sistem IoT



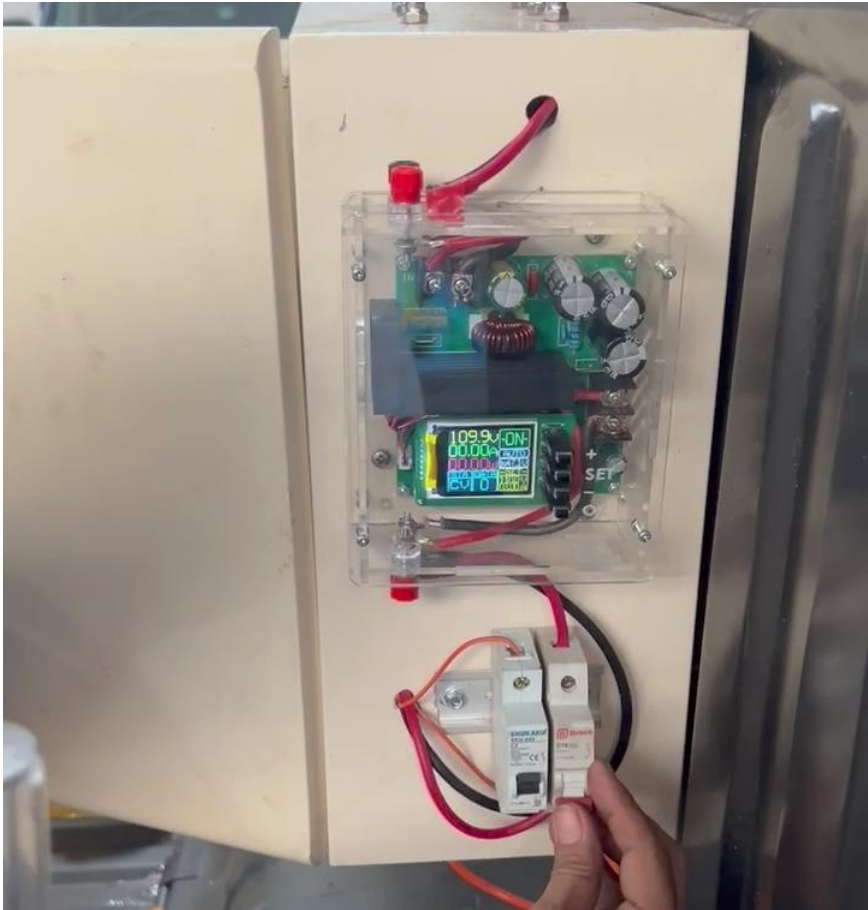
Gambar 5. 4 Konfigurasi Sistem Hidrogen ke Mobil



Gambar 5. 5 Perakitan PEM Fuel Cell



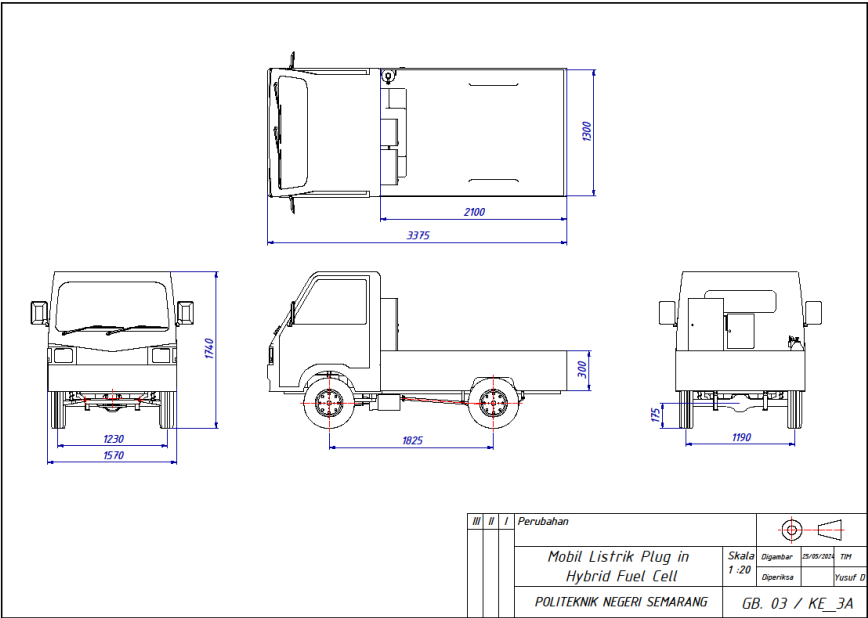
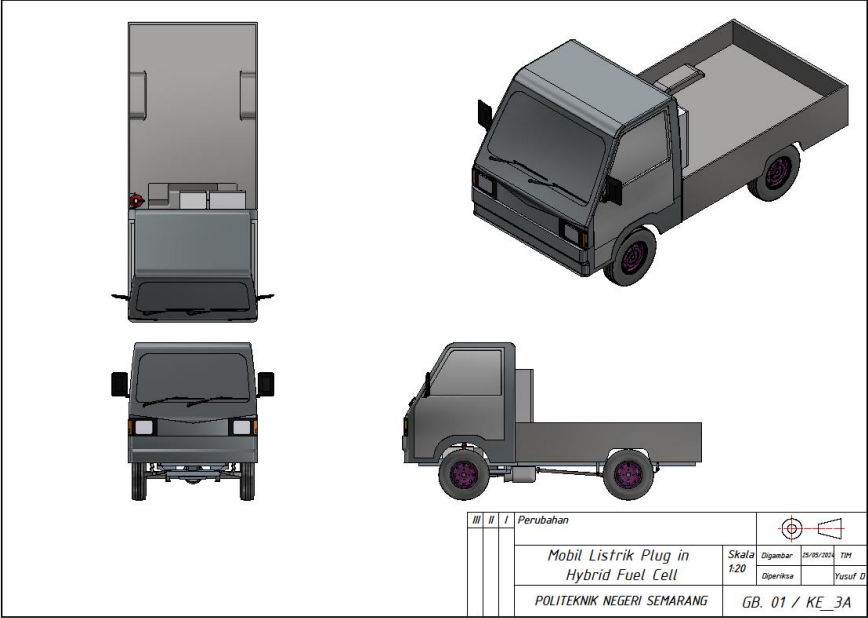
Gambar 5. 6 Konfigurasi Sistem Hidrogen ke PEM Fuel Cell



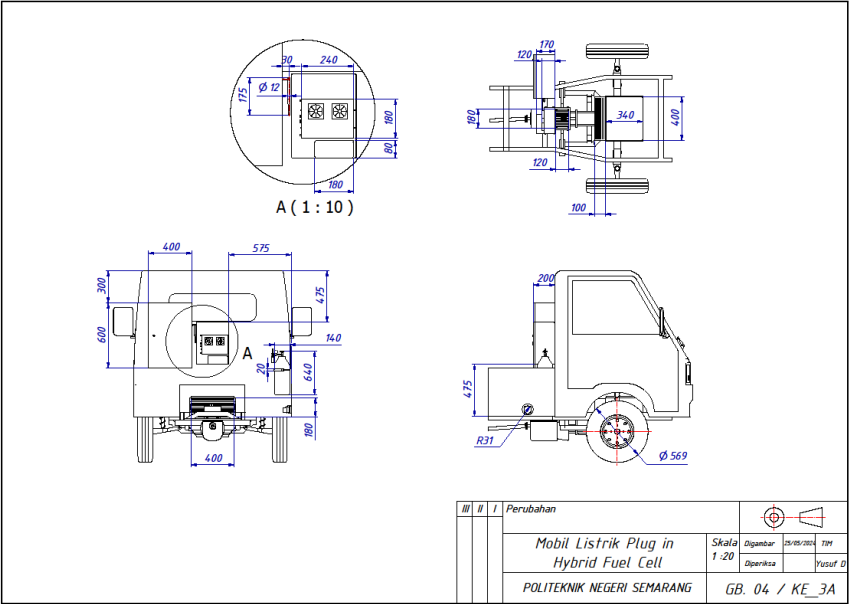
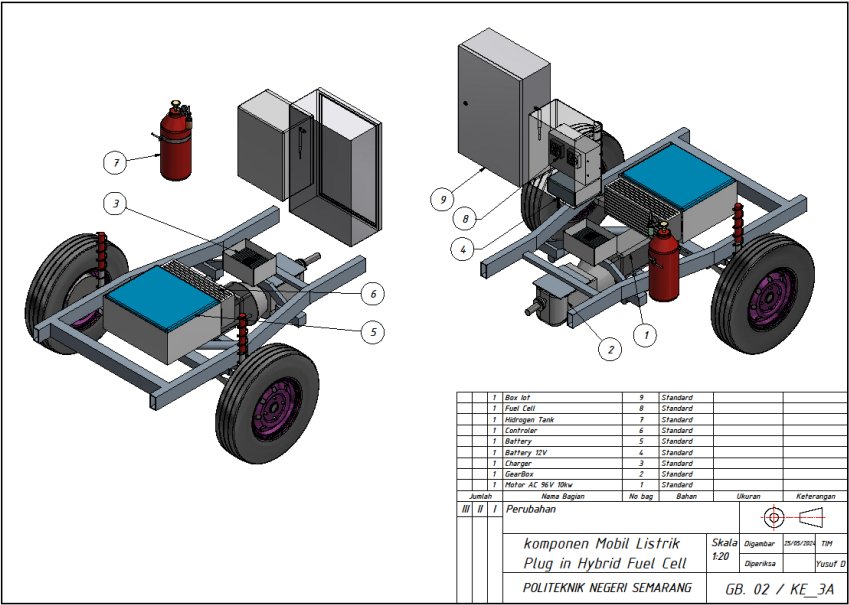
Gambar 5. 7 Validasi Sistem Pengisian Daya Mobil dengan PEM *Fuel Cell*



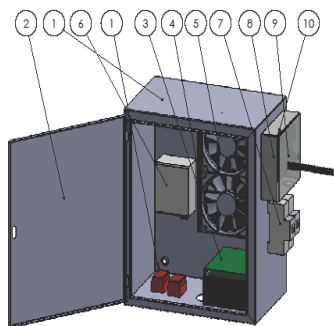
Gambar 5. 8 Validasi Sistem Performa Mobil



Apendiks 6 Komponen Mobil Listrik

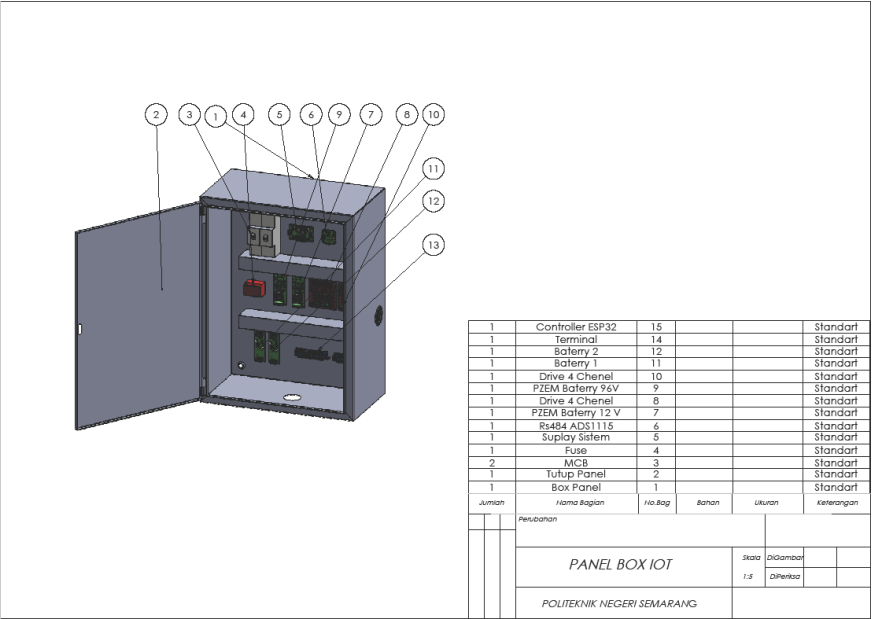


Apendiks 7 Panel Box Fuel Cell



1	Controll	10				Standart
1	Tutup Box Controll	9				Standart
1	Box Controll	8				Standart
2	MCB	7				Standart
1	Controller	6				Standart
2	Velintador	5				Standart
1	Fuel cell	4				Standart
1	Battery 12V	3				Standart
1	Tutup Panel Box	2				Standart
1	Panel Box	1				Standart
Jumlah	Nama bagian	No.Bag	Bahan	ukuran	keterangan	
	Perubahan					
	FUEL CELL					
	POLITEKNIK NEGERI SEMARANG					

Apendiks 8 Panel IoT



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,  4028CH8AAAAJ,

 57163783300,  AAM-4798-2020.

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



Nanang Apriandi Ms, 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 Doktoral (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

Monograf berjudul *Sistem Energi Cerdas Kendaraan Listrik Hidrogen: Arsitektur, Integrasi Fuel Cell, dan Teknologi IoT* menghadirkan kajian komprehensif mengenai transformasi sistem transportasi menuju mobilitas rendah emisi melalui integrasi teknologi hidrogen, kendaraan listrik, dan sistem digital cerdas. Buku ini disusun sebagai respons ilmiah terhadap urgensi dekarbonisasi sektor transportasi yang selama ini menjadi kontributor signifikan emisi gas rumah kaca. Dengan pendekatan rekayasa sistem yang terstruktur, karya ini tidak hanya membahas kendaraan listrik sebagai entitas mekanis-elektrik, tetapi sebagai sistem energi terintegrasi yang menggabungkan konversi elektrokimia, penyimpanan daya, konverter energi, serta monitoring berbasis Internet of Things (IoT).

Pembahasan dimulai dari landasan konseptual transisi energi, klasifikasi kendaraan listrik (BEV, HEV, PHEV, dan FCEV), hingga prinsip kerja Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) sebagai teknologi inti dalam sistem kendaraan berbasis hidrogen. Buku ini menguraikan secara sistematis arsitektur kendaraan listrik plug-in hybrid berbasis fuel cell, di mana fuel cell tidak berperan sebagai penggerak langsung, melainkan sebagai sistem pengisian tambahan bagi baterai utama. Konfigurasi ini memungkinkan peningkatan jarak tempuh, stabilitas suplai energi, serta fleksibilitas pengisian melalui listrik eksternal maupun hidrogen.

Secara teknis, monograf ini membahas integrasi subsistem utama meliputi tabung penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi, stack PEM fuel cell, konverter DC-DC step-up, baterai LiFePO_4 96 V, motor induksi AC tiga fasa, serta sistem proteksi dan kontrol daya. Dimensi inovatif buku ini terletak pada integrasi IoT berbasis mikrokontroler untuk monitoring real-time parameter kelistrikan dan termal, termasuk tegangan, arus, daya, temperatur, dan laju aliran hidrogen. Pendekatan ini menjadikan kendaraan sebagai sistem siber-fisik adaptif yang mampu mengoptimalkan efisiensi dan meningkatkan keselamatan operasional.

Monograf ini juga menyajikan formulasi matematis dan analisis kinerja sistem melalui evaluasi daya input hidrogen, daya output listrik, efisiensi konversi, serta Specific Fuel Consumption (SFC). Dengan sintesis teoritis dan eksperimental yang mendalam, buku ini menjadi referensi akademik bagi bidang teknik elektro, teknik mesin, energi terbarukan, dan sistem kendali cerdas. Lebih jauh, karya ini menawarkan model arsitektur kendaraan listrik hidrogen yang relevan bagi pengembangan teknologi energi bersih di tingkat nasional maupun global, sekaligus menegaskan bahwa masa depan mobilitas berkelanjutan bertumpu pada integrasi cerdas antara energi alternatif dan transformasi digital.



PENERBIT KBM INDONESIA
Anggota IKAPI
0813 5751 7526 / (0353) 3234874
Kantor : Maguwoharjo, Depok, Sleman-Yogyakarta
@penerbitbukujogja
@penerbit.kbm

ISBN 978-634-278-226-2

