

**REKA BENTUK DAN PENILAIAN PRESTASI PLAT
DWIKUTUB LOGAM RINGAN DENGAN MEDAN
ALIRAN SELARI BERALUN BAGI SEL FUEL
MEMBRAN PENUKAR PROTON**

TEUKU MUHAMMMAD NAUFAL RAMADHAN

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

REKA BENTUK DAN PENILAIAN PRESTASI PLAT DWIKUTUB LOGAM
RINGAN DENGAN MEDAN ALIRAN SELARI BERALUN BAGI SEL FUEL
MEMBRAN PENUKAR PROTON

TEUKU MUHAMMAD NAUFAL RAMADHAN

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEHI IJAZAH
SARJANA SAINS

INSTITUT SEL FUEL
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA
BANGI

2026

	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

G. PERAKUAN TESIS/ DISERTASI SARJANA / DOKTOR FALSAFAH (CERTIFICATION OF MASTER'S / DOCTORAL THESIS / DISSERTATION)			
Nama penuh pengarang (Author's Full Name)	Teuku Muhammad Naufal Ramadhan		
No. Pendaftaran Pelajar (Student's Registration No.)	P129990	Sesi Akademik (Academic Session)	2026 / 2027
Tajuk Tesis / Disertasi (Thesis / Dissertation Title)	REKA BENTUK DAN PENILAIAN PRESTASI PLAT DWIKUTUB LOGAM RINGAN DENGAN MEDAN ALIRAN SELARI BERALUN BAGI SEL FUEL MEMBRAN PENUKAR PROTON		
Semua tesis/disertasi dan penerbitan berkaitan hasil penyelidikan pelajar adalah tertakluk kepada Dasar Harta Intelek Universiti Kebangsaan Malaysia. <i>All theses/ dissertations and publications relating to the research work of a student are subject to the Intellectual Property Policy of Universiti Kebangsaan Malaysia.</i> Saya mengaku bahawa tahap akses tesis/disertasi ini sebagai (*Tandakan ☒ dalam kotak bagi maklumat yang berkaitan; tandakan satu (1) kotak di bawah sahaja): <i>I hereby declare the level of access for this thesis/dissertation as follows (tick ☒ the relevant box below; tick only one option).</i>			
Pilihan Tahap Akses Access Level Selection		Tafsiran Tahap Akses Tesis/Disertasi Definition of Thesis/Dissertation Access Level	
☐	RAHSIA (CONFIDENTIAL)	Mengandungi maklumat rahsia sepertimana yang diperuntukan bawah Akta Rahsia Rasmi 1972. <i>Contains classified information as stipulated under the Official Secrets Act 1972.</i>	
☒	TERHAD (RESTRICTED)	Mengandungi maklumat yang hanya boleh diakses oleh pihak yang mempunyai kebenaran atau keperluan tertentu untuk mengetahuinya yang ditentukan oleh organisasi/ badan di mana penyelidikan dijalankan. <i>Contains information that may only be accessed by parties with specific authorization or a defined need to know, as determined by the organization or body where the research is conducted.</i>	
☐	AKSES TERBUKA (OPEN ACCESS)	Tesis/disertasi versi akhir dalam format PDF yang boleh diakses secara percuma secara dalam talian dan bebas dari isu hak cipta dan pelesenan <i>The final version of the thesis/dissertation in PDF format that is freely accessible online and free from copyright and licensing issues.</i> Kementerian Pendidikan Tinggi melalui surat bertarikh 27 Mac 2025 memutuskan bahawa kebenaran akses tesis / disertasi dalam borang serahan akses terbuka ditentukan oleh penyelia (bukan pelajar). <i>The Ministry of Higher Education, through a letter dated 27 March 2025, has decided that permission for thesis / dissertation access in the open access submission form shall be determined by the supervisor (not the student).</i>	
☐	EMBARGO	Tempoh masa di mana akses kepada tesis/disertasi disekat (ditutup) selama dua (2) tahun atas sebab-sebab tertentu sebagai contoh kerahsiaan atau hak cipta. Tesis/disertasi akan berstatus akses terbuka selepas tamat tempoh embargo. <i>The period during which access to the thesis/dissertation is restricted for two (2) years due to specific reasons, such as confidentiality or copyright. The thesis/dissertation will be granted open-access status upon the expiry of the embargo period.</i>	

 UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA <i>The National University of Malaysia</i>	UKM-SPKPPP-PT(PdP)-05-AK04-BO07	No. Semakan: 02	Tarikh Kuat Kuasa: 27/01/2026
	BORANG DAN SENARAI SEMAK PENYERAHAN TESIS/DISERTASI SELEPAS PEMBETULAN FORM AND CHECKLIST OF AMENDED THESIS/DISSERTATION SUBMISSION		

PENGESAHAN PELAJAR (STUDENT VERIFICATION)	PENGESAHAN PENYELIA (SUPERVISOR VERIFICATION)
 TANDATANGAN PELAJAR (STUDENT'S SIGNATURE)	 TANDATANGAN PENYELIA / Pengerusi JK SISWAZAH (SUPERVISOR'S / CHAIRPERSON SUPERVISION COMMITTEE SIGNATURE)
Nama Pelajar (<i>Student name</i>): Teuku M Naufal Ramadhan No. Pendaftaran Pelajar P129990 (<i>Student's Registration No.</i>) Tarikh: 16 / 7 / 2026 (<i>Date</i>)	Nama Penyelia / Pengerusi JK Siswazah : (<i>Supervisor's / Chairperson Supervision Committee Name</i>) Assoc. Prof. Dr. Mohd Shuhaidin Masar @ Masdar Associate Professor Research Centre for Sustainable Process Technology (CESPRO) Chemical Engineering Program Faculty of Engineering & Built Environment UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA 43600 UKM Bangi Selangor Tarikh: 16/07/2026 (<i>Date</i>)

PENGAKUAN

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

16 Julai 2026

TEUKU MUHAMMAD
NAUFAL RAMADHAN
P129990

PENGHARGAAN

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT, Tuhan Yang Maha Pemurah lagi Maha Mengasihani, atas limpah kurnia, kekuatan, dan petunjuk-Nya yang membolehkan saya menyempurnakan tesis ini dengan jayanya. Perjalanan ini tidak mungkin dapat diselesaikan tanpa kehendakNya.

Saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan dan ucapan terima kasih yang tulus ikhlas kepada penyelia saya, Profesor Madya Dr. Mohd Shahbudin bin Mastar @ Masdar, atas bimbingan yang tidak ternilai, kesabaran, dan dorongan berterusan sepanjang penyelidikan ini dijalankan. Panduan kepakaran, ulasan kritikal, dan cadangan bernas beliau amat penting dalam membentuk hala tuju dan kualiti kajian ini.

Jutaan terima kasih juga diucapkan kepada Institut Sel Fuel dan Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), kerana menyediakan kemudahan yang diperlukan serta persekitaran yang kondusif untuk menjalankan penyelidikan ini. Sokongan teknikal dan bantuan yang diberikan oleh kakitangan makmal semasa fasa eksperimen projek ini juga amat dihargai.

Akhir sekali, saya ingin menzahirkan rasa syukur yang mendalam kepada ibu bapa yang dikasihi, Teuku Husaini dan Titisari Dewi, serta ahli keluarga atas kasih sayang, doa, dan pengorbanan yang tidak berbelah bagi. Kepada rakan-rakan dan rakan seperjuangan, terima kasih atas sokongan padu, motivasi, dan persahabatan yang diberikan semasa mengharungi detik-detik mencabar dalam perjalanan ini.

ABSTRAK

Aplikasi sel fuel penukar proton (PEMFC) merupakan teknologi tenaga boleh baharu yang sangat berpotensi, namun penggunaan plat dwikutub (BP) konvensional berasaskan grafit yang berat dan rapuh menghalang keberkesanan sistem bagi aplikasi mudah alih ringan. Selain itu, reka bentuk medan aliran selari (PFF) sedia ada sering berdepan masalah taburan bahan tindak balas yang tidak sekata dan pengurusan air yang lemah, yang akhirnya mengehadkan ketumpatan kuasa sistem. Kajian ini menangani isu tersebut dengan mengintegrasikan pendekatan eksperimen dan simulasi bagi membangunkan BP logam ringan dengan reka bentuk medan aliran beralun (WPFF). Selain itu, beberapa model saluran tunggal WPFF dengan kedalaman 0.15 mm, 0.20 mm, 0.25 mm dan 0.35 mm turut dimodelkan bersama satu model saluran tunggal PFF dengan kedalaman 0.25 mm untuk tujuan simulasi dan perbandingan. Keputusan simulasi telah disahkan menggunakan data eksperimen bagi sel tunggal WPFF dengan kedalaman 0.25 mm. Petunjuk prestasi utama, iaitu taburan aliran bendalir, ketumpatan kuasa dan ketumpatan arus, telah dianalisis. Hasil kajian menunjukkan bahawa reka bentuk WPFF menghasilkan ketumpatan kuasa maksimum yang lebih tinggi berbanding reka bentuk PFF, di samping mengekalkan taburan aliran bendalir yang baik, di mana saluran tunggal WPFF dengan kedalaman 0.25 mm mencapai ketumpatan kuasa sebanyak 0.276 W/cm^2 berbanding 0.266 W/cm^2 bagi saluran tunggal PFF dan 0.210 W/cm^2 berbanding 0.190 W/cm^2 untuk sel tunggal WPFF dan PFF. Selain itu, perbandingan kedalaman saluran menunjukkan bahawa saluran tunggal WPFF dengan kedalaman 0.15 mm menghasilkan ketumpatan kuasa tertinggi iaitu 0.296 W/cm^2 , manakala kedalaman 0.35 mm menunjukkan ketumpatan kuasa terendah iaitu 0.262 W/cm^2 . Kajian ini menunjukkan potensi penggunaan reka bentuk medan aliran selari beralun untuk aplikasi PEMFC ringan dan kebolehlaksanaan penggunaan simulasi CFD untuk memodelkan prestasi sebenar BP ringan.

DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION OF LIGHTWEIGHT METALLIC BIPOLAR PLATES WITH WAVY PARALLEL FLOW FIELD FOR PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS

ABSTRACT

The application of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) has received significant attention globally as one of the most promising renewable energy technologies. The Bipolar Plate (BP) is a critical component of the PEMFC. BPs perform essential roles, including distributing reacting gases via flow channels, conducting generated electricity, and removing water produced by the reaction. To gain a deeper understanding of the factors affecting BP performance, this study combined experimental and simulation approaches. This research involved designing lightweight thin metallic BPs and evaluating their performance. Simulations were conducted using ANSYS Fluent Computational Fluid Dynamics (CFD) software to model fluid flow, heat transfer, and mass transfer within the PEMFC. Wavy parallel flow field (WPFF) and parallel flow field (PFF) BP's design are tested against each other to compare their performances. Furthermore, multiple single channel WPFF are modelled with depth of 0.15 mm, 0.20 mm, 0.25 mm and 0.35 mm alongside a 0.25 mm single channel PFF the model is simulated and compared. The simulation results were validated using experimental data of single cell WPFF against its simulation results. Key performance indicators, specifically fluid distribution power density and current density, were analysed. The results demonstrated that WPFF design has better max power density than PFF design while maintaining a good fluid distribution, where the 0.25 mm single channel WPFF has 0.276 W/cm² compared to the single channel PFF having 0.266 W/cm² maximum power density for single cell the max power density is 0.21 W/cm² and 0.19 W/cm² for WPFF and PFF. Also, the results for the depth comparison shows the single channel WPFF with depth of 0.15 mm has the best max power density of 0.296 W/cm² while the 0.35 mm has the lowest max power density of 0.262 W/cm². This study shows the potential of using WPFF design for lightweight PEMFC application and the viability of using CFD simulation to model real lightweight BP performance.

KANDUNGAN

	Halaman
PENGAKUAN	ii
PENGHARGAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KANDUNGAN	vi
SENARAI JADUAL	ix
SENARAI ILUSTRASI	x
SENARAI SIMBOL	xiii
SENARAI SINGKATAN	xv
SENARAI TATANAMA	xvi
BAB I PENGENALAN	
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Teknologi Sel Fuel	2
1.3 Pernyataan masalah	4
1.4 Objektif Kajian	5
1.5 Skop Kajian	6
1.6 Kepentingan Kajian	8
BAB II KAJIAN LITERATUR	
2.1 Pengenalan	12
2.2 Pengenalan PEMFC	13
2.2.1 Membran Pertukaran Proton (PEM)	22
2.2.2 Lapisan Mangkin (CL)	23
2.2.3 Lapisan Resapan Gas (GDL)	25
2.3 Aplikasi PEMFC Ringan	27
2.3.1 Sasaran untuk Aplikasi PEMFC	28
2.3.2 Aplikasi PEMFC Ringan pada Kenderaan Elektrik	29
2.3.3 Perkembangan PEMFC Ringan	30
2.4 Reka Bentuk BP	32
2.4.1 Impak BP Ringan pada PEMFC	33

2.4.2	BP Ringan dan Aplikasinya	38
2.4.3	Reka Bentuk FF	41
2.5	Fabrikasi BP Logam untuk PEMFC	48
2.5.1	Proses Pembentukan	48
2.5.2	Proses Penyalutan	51
2.5.3	Proses Penyambungan	52
2.6	Pemodelan dan Simulasi PEMFC	53
BAB III	METODOLOGI	
3.1	Pengenalan	58
3.2	Pemodelan dan Simulasi	60
3.2.1	Pemodelan Prestasi PEMFC	63
3.2.2	Penetapan dan Parameter CFD	65
3.3	Reka Bentuk BP	78
3.4	Sel Tunggal PEMFC dan Pengoperasian	86
3.4.1	Struktur Sel Tunggal PEMFC dan Spesifikasi Komponen	86
3.4.2	Pengoperasian PEMFC	90
BAB IV	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN	
4.1	Pendahuluan	97
4.2	Penilaian Jejaring	98
4.2.1	Penjanaan Jejaring	99
4.2.2	Analisis Kebebasan Jejaring	102
4.3	Kesan Kedalaman Saluran terhadap Prestasi PEMFC	104
4.4	Kesan Suhu Operasi terhadap Prestasi PEMFC	110
4.5	Simulasi Taburan Bendalir - Saluran Tunggal	115
4.5.1	Taburan Bendalir pada Keadaan Voltan Rendah	116
4.5.2	Taburan Bendalir pada Keadaan Voltan Tinggi	119
4.5.3	Prestasi PEMFC melalui Tindak Balas Elektrokimia	122
4.6	Perbandingan WPFF dan PFF dengan FF lengkap	127
4.6.1	Simulasi Taburan Bendalir	127
4.6.2	Prestasi PEMFC	132
4.7	Penentuan Simulasi CFD dengan Data Uji kaji	136
BAB V	KESIMPULAN	
5.1	Kesimpulan Kajian	140

5.2	Cadangan dan Penambahbaikan	143
RUJUKAN		147
SENARAI PENERBITAN		158
LAMPIRAN		159



SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
Jadual 1.1	Jenis-jenis sel fuel dan aplikasinya	3
Jadual 2.1	Sasaran teknikal utama US DOE bagi sistem dan tindanan sel fuel kenderaan ringan menjelang 2025	28
Jadual 2.2	Prestasi dan model FCEV	29
Jadual 2.3	Pengaruh berat BP terhadap prestasi PEMFC ringan	34
Jadual 2.4	Kajian penyelidikan terdahulu berkaitan simulasi PEMFC	55
Jadual 3.1	Geometri model saluran tunggal	67
Jadual 3.2	Parameter dan keadaan saluran tunggal	67
Jadual 3.3	Geometri model sel tunggal	72
Jadual 3.4	Parameter model sel tunggal dan keadaan operasi	73
Jadual 3.5	Sifat fizikal dan mekanikal Titanium Gred 1 sebagai bahan substrat plat dwikutub	86
Jadual 3.6	Spesifikasi MEA	90
Jadual 3.7	Ringkasan spesifikasi sel fuel dan peralatan utama sistem uji kaji PEMFC	95
Jadual 4.1	Konfigurasi jejaring yang digunakan pada saluran tunggal	100
Jadual 4.2	Perbandingan ketumpatan arus bagi setiap tahap jejaring	102
Jadual 4.3	Kejatuhan tekanan pada saluran kedalaman 0.15 mm berbanding kedalaman 0.35 mm	109
Jadual 4.4	Parameter gas pada saluran katod dan anod	110

SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah		Halaman
Rajah 2.1	Skematik PEMFC	17
Rajah 2.2	Komponen PEMFC	18
Rajah 2.3	Skematik tindakan PEMFC	22
Rajah 2.4	Skematik PEMFC dengan (a) katod tertutup dan (b) katod terbuka	27
Rajah 2.5	FCEV dalam projek MobyPost	32
Rajah 2.6	Evolusi bahan BP digunakan pada PEMFC ringan	35
Rajah 2.7	Konfigurasi FF konvensional: (a) Ularan, (b) Selari, (c) Pin, (d) <i>Interdigitated</i>	42
Rajah 2.8	Konfigurasi FF (a) WPFF dan (b) PFF	45
Rajah 2.9	Reka bentuk FF yang bukan lazim	47
Rajah 2.10	Ilustrasi proses penghentakan BP	49
Rajah 2.11	Ilustrasi proses penghentakan BP	50
Rajah 3.1	Carta alir metodologi kajian penyelidikan keseluruhan	60
Rajah 3.2	Tipikal lengkung polarisasi	64
Rajah 3.3	Ilustrasi model saluran tunggal PEMFC dengan (a) keratan rentas hadapan, (b) keratan sisi, dan (c) pandangan isometrik.	66
Rajah 3.4	Ilustrasi jejaring saluran PEMFC tunggal jejaring, dengan (a) dan (b) paparan keratan rentas hadapan, (c) dan (d) pandangan isometrik, (e) dan (f) pembesaran (zoom) keratan rentas ortogon, (g) dan (h) pembesaran pandangan atas masing-masing bagi WPFF dan PFF saluran tunggal.	71
Rajah 3.5	Ilustrasi model PEMFC sel tunggal dengan (a) keratan rentas hadapan, (b) keratan rentas sisi, dan (c) pandangan isometrik.	72
Rajah 3.6	Ilustrasi jejaring WPFF PEMFC sel tunggal dengan (a) pandangan atas saluran, (b) pandangan atas dinding dan saluran, (c) pandangan isometrik, (d) pembesaran pandangan atas dinding dan (d) saluran, serta (e) pembesaran pandangan ortogonal	76

Rajah 3.7	Ilustrasi jejaring PFF PEMFC sel tunggal dengan (a) pandangan atas saluran, (b) pandangan isometrik, (c) pandangan atas dinding dan saluran diperbesar (<i>zoom in</i>)	78
Rajah 3.8	Lukisan CAD (a) pandangan atas keseluruhan, (b) pandangan atas diperbesar (<i>zoom in</i>) bahagian atas, (c) pandangan atas diperbesar (<i>zoom in</i>) pada saluran dan rusuk dan (d) pandangan isometrik diperbesar (<i>zoom in</i>) pada saluran dan rusuk untuk BP WFFF, unit panjang mm.	84
Rajah 3.9	PEMFC yang digunakan dalam kajian ini (a) Sel tunggal PEMFC yang lengkap (b) dan (c) BP dengan bentuk aliran selari beralun (d) MEA dengan lapisan filem	89
Rajah 3.10	Konfigurasi uji makmal yang dilaksanakan dalam pengoperasian PEMFC (a) foto sebenar pengoperasian (b) skematik pengoperasian	91
Rajah 3.11	Foto beberapa unit utama dalam persediaan uji kaji makmal ini (a) beban elektronik DC (b) Penghembus udara elektrik (c) Unit penyejuk air (d) Pengawal aliran jisim hidrogen	96
Rajah 4.1	Ilustrasi jejaring saluran PEMFC tunggal (a) mesh dengan paparan keratan rentas hadapan tahap <i>mesh</i> kasar (c) sederhana dan (e) halus, serta pembesaran (<i>zoom</i>) keratan atas <i>mesh</i> (b) kasar, (d) sederhana dan (f) halus.	101
Rajah 4.2	Kontur (a) taburan suhu, dan (b) ketumpatan arus untuk jejaring halus.	103
Rajah 4.3	Keratan rentas profil (a) vektor halaju salur katod dan MEA dan (b) keratan rentas profil vektor halaju salur katod dan MEA diperbesar. Anak panah menunjukkan vektor halaju dengan saiz anak panah mewakili nilai halaju	106
Rajah 4.4	Lengkung polarisasi bagi (a) kesan kedalaman saluran terhadap ketumpatan arus dan (b) lengkung ketumpatan kuasa bagi kesan kedalaman saluran terhadap ketumpatan arus	107
Rajah 4.5	Kesan suhu operasi terhadap prestasi PEMFC (a) Lengkung polarisasi, (b) Lengkung ketumpatan kuasa terhadap ketumpatan arus	113
Rajah 4.6	Taburan tekanan pada (a) anod dan (b) katod, (c) taburan pecahan hidrogen pada anod, serta (d) taburan pecahan oksigen pada katod di sepanjang saluran tengah bagi voltan 0.25 V untuk WFFF dan PFF saluran tunggal.	118
Rajah 4.7	Taburan tekanan pada (a) anod dan (b) katod, (c) taburan pecahan hidrogen pada anod, (d) serta taburan pecahan oksigen	

	pada katod di sepanjang saluran tengah bagi voltan 0.80 V untuk WPFF dan PFF saluran tunggal.	121
Rajah 4.8	Lengkung polarisasi dan ketumpatan kuasa bagi perbandingan WPFF dan PFF bagi saluran tunggal.	123
Rajah 4.9	Keratan rentas profil vektor halaju untuk (a) WPFF dan (b) PFF pada 0.35V saluran tunggal	125
Rajah 4.10	Taburan tekanan pada (a) anod dan (b) katod, (c) taburan pecahan hidrogen, (d) taburan pecahan oksigen, serta taburan ketumpatan arus pada (e) anod dan (f) katod di sepanjang saluran tengah bagi konfigurasi FF lengkap 200 cm ² pada voltan 0.58 V untuk WPFF sel tunggal. Anak panah mewakili arah aliran.	130
Rajah 4.11	Lengkung polarisasi dan ketumpatan kuasa bagi perbandingan WPFF dan PFF bagi medan aliran lengkap 200 cm ²	133
Rajah 4.12	Penentuan simulasi CFD sel tunggal dengan data uji kaji makmal berdasarkan lengkung polarisasi dan ketumpatan kuasa	137

SENARAI SIMBOL

%	Peratus
°C	Suhu, Celcius
A cm ⁻²	Ketumpatan arus, Ampere per sentimeter persegi
cm ²	Kawasan aktif / Luas permukaan, sentimeter persegi
Dh	Diameter hidraulik, milimeter
e ⁻	Elektron
g	Jisim, gram
H ⁺	Proton
kg	Jisim, kilogram
kW	Kuasa, kilowatt
kW kg ⁻¹	Ketumpatan kuasa spesifik (gravimetrik), kilowatt per kilogram
kW L ⁻¹	Ketumpatan kuasa volumetrik, kilowatt per liter
mm	Panjang, milimeter
MPa	Tekanan, Megapascal
mΩ cm ²	Rintangan sentuhan antara muka, miliohm sentimeter persegi
mW/cm ²	Ketumpatan kuasa, miliwatt per sentimeter persegi
Q	Kadar aliran volumetrik
Re	Nombor Reynolds
S/m	Kekonduksian elektrik, Siemens per meter
v	Halaju / halaju purata
V	Voltan / Potensi elektrik, Volt
W/cm ²	Ketumpatan kuasa, Watt per sentimeter persegi
W/m·K	Kekonduksian termal, Watt per meter Kelvin
wt%	Peratusan berat
λ	Nisbah stoikiometri

μ	Kelikatan dinamik, Pascal saat
ρ	Ketumpatan, kilogram per meter kubik
ΔG	Perubahan tenaga bebas Gibbs, kilojoule per mol



SENARAI SINGKATAN

atm	Atmosfera Piawai
BP	Plat Dwikutub
CAD	Reka bentuk Berbantu Komputer
CFD	Dinamik Bendalir Berkomputer
CL	Lapisan Pemangkin
FC	Sel Fuel
FCEV	Kenderaan Elektrik Sel Fuel
FF	Medan Aliran
GDL	Lapisan Resapan Gas
MEA	Himpunan Elektrod Membran
MPL	Lapisan Mikropori
PEMFC	Sel Fuel Penukar Proton
PFF	Medan Aliran Selari
UAV	Pesawat Udara Tanpa Pemandu
UKM	Universiti Kebangsaan Malaysia
WPFF	Medan Aliran Selari Beralun

SENARAI TATANAMA

CO₂ Karbon dioksida

H₂ Hidrogen

H₂O Air

O₂ Oksigen

Pt Platinum

TiN Titanium nitrida



BAB I

PENGENALAN

1.1 PENDAHULUAN

Sel fuel merupakan peranti elektrokimia yang menukarkan tenaga kimia secara langsung kepada tenaga elektrik melalui tindak balas antara bahan api seperti hidrogen dan agen pengoksida seperti oksigen (Gong et al. 2023). Dalam kalangan pelbagai teknologi sel fuel, sel fuel membran penukar proton (PEMFC) telah menerima perhatian yang signifikan berikutan ketumpatan kuasa yang tinggi, suhu operasi yang rendah, keupayaan permulaan pantas, serta pelepasan hampir sifar (Parekh 2022). Ciri-ciri ini menjadikan PEMFC amat sesuai untuk aplikasi mudah alih dan mudah alih ringan seperti kenderaan udara tanpa pemandu (UAV), kenderaan elektrik, dan sistem kuasa bersaiz kompak (Xu et al. 2020).

Penggunaan tenaga global terus meningkat akibat pertumbuhan populasi, perindustrian dan pembangunan ekonomi, namun sistem tenaga dunia masih bergantung secara dominan kepada bahan api fosil seperti petroleum, arang batu dan gas asli. Pergantungan ini menyumbang kepada pelepasan gas rumah hijau yang tinggi, khususnya karbon dioksida (CO_2), sekali gus mempercepatkan perubahan iklim global. Di samping isu alam sekitar, turun naik harga bahan api fosil dan ketidakstabilan geopolitik turut menimbulkan kebimbangan terhadap keselamatan dan keterjaminan bekalan tenaga jangka panjang (International Energy Agency 2023).

Sehubungan itu, peralihan ke arah tenaga boleh diperbaharui seperti solar, angin dan hidro semakin dipergiatkan bagi mengurangkan jejak karbon serta meningkatkan kelestarian sistem tenaga. Walau bagaimanapun, sifat tenaga boleh diperbaharui yang tidak menentu menuntut penyelesaian penyimpanan tenaga yang cekap dan fleksibel.

Dalam konteks ini, hidrogen muncul sebagai pembawa tenaga yang berpotensi tinggi kerana ia boleh dihasilkan melalui pelbagai teknologi termasuk elektrolisis air menggunakan sumber boleh diperbaharui dan ditukarkan semula kepada elektrik tanpa pelepasan karbon di titik penggunaan (Staffell et al. 2019).

PEMFC merupakan salah satu teknologi utama dalam merealisasikan ekonomi hidrogen. PEMFC menawarkan ketumpatan kuasa yang tinggi, operasi suhu rendah dan masa tindak balas pantas, menjadikannya sesuai untuk aplikasi pengangkutan, kenderaan elektrik berasaskan sel fuel dan sistem kuasa mudah alih. Oleh itu, penyelidikan terhadap peningkatan prestasi, pengurangan kos dan pengoptimuman reka bentuk komponen seperti BP dan FF adalah penting bagi mempercepatkan penerimaan teknologi PEMFC sebagai penyelesaian tenaga bersih masa hadapan (Xu et al. 2020).

1.2 TEKNOLOGI SEL FUEL

Sel fuel merupakan peranti penukaran tenaga elektrokimia yang menukarkan tenaga kimia bahan api secara terus kepada tenaga elektrik tanpa melalui proses pembakaran. Tidak seperti enjin pembakaran dalaman atau turbin gas, sel fuel tidak terhad oleh kecekapan kitaran Carnot kerana prosesnya tidak melibatkan penukaran tenaga haba kepada kerja mekanikal terlebih dahulu.

Secara asasnya, sel fuel terdiri daripada anod, katod dan elektrolit. Bahan api (kebiasaannya hidrogen) dibekalkan ke anod, manakala oksigen atau udara dibekalkan ke katod. Di anod, tindak balas pengoksidaan menghasilkan proton dan elektron; proton bergerak melalui elektrolit manakala elektron mengalir melalui litar luaran untuk menghasilkan arus elektrik. Di katod, proton dan elektron bergabung dengan oksigen untuk membentuk air sebagai hasil sampingan utama. Keupayaan sel fuel menghasilkan tenaga secara senyap, cekap dan dengan pelepasan karbon rendah menjadikannya teknologi utama dalam pembangunan ekonomi hidrogen global.

Teknologi sel fuel boleh diklasifikasikan berdasarkan jenis elektrolit dan suhu operasi. Setiap jenis mempunyai kelebihan dan aplikasi tersendiri bergantung kepada keperluan kuasa, suhu dan jenis bahan api. Secara umum, sel fuel suhu tinggi seperti Sel Fuel Oksida Pepejal (*Solid Oxide Fuel Cell*, SOFC) dan Sel Fuel Karbonat Lebur

(*Molten Carbonate Fuel Cell*, MCFC) sesuai untuk penjanaan kuasa pegun berskala besar kerana mempunyai toleransi bahan api yang lebih luas serta kecekapan penukaran tenaga yang tinggi.

Sebaliknya, sel fuel suhu rendah seperti Sel Fuel Membran Pertukaran Proton (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, PEMFC) dan Sel Fuel Metanol Langsung (*Direct Methanol Fuel Cell*, DMFC) lebih sesuai untuk aplikasi mudah alih kerana mempunyai masa tindak balas yang pantas, suhu operasi yang lebih rendah, serta reka bentuk yang lebih padat dan ringan (Schumm 2024).

Jadual 1.1 Jenis-jenis sel fuel dan aplikasinya

Jenis Sel Fuel	Elektrolit	Suhu Operasi	Bahan Api	Aplikasi Utama
PEMFC	Membran polimer	60–80°C	Hidrogen	Kenderaan, UAV, kuasa mudah alih
SOFC	Elektrolit seramik pepejal	600–1000°C	Hidrogen atau gas asli	Penjanaan kuasa pegun
AFC	Larutan alkali	60–90°C	Hidrogen	Aplikasi angkasa
PAFC	Asid fosforik	~200°C	Hidrogen	Penjanaan kuasa komersial
MCFC	Karbonat lebur	600–700°C	Gas asli atau biogas	Loji kuasa skala besar
DMFC	Membran polimer	50–120°C	Metanol	Peranti elektronik kecil

Komponen utama PEMFC merangkumi himpunan elektrod membran (MEA) yang terdiri daripada membran penukar proton yang diapit oleh lapisan pemangkin (CL), lapisan mikro berliang (MPL), dan lapisan resapan gas (GDL), serta plat dwikutub (BP) yang memisahkan sel-sel individu dalam susunan tindanan. Disebabkan oleh strukturnya yang padat serta ketumpatan kuasa yang tinggi, PEMFC amat sesuai digunakan dalam aplikasi penjana elektrik yang ringan dan mudah alih. Namun begitu, penggunaan PEMFC secara meluas masih berdepan beberapa kekangan, khususnya dari segi kos sistem yang tinggi, isu ketahanan jangka panjang, serta berat keseluruhan sistem yang masih memerlukan penambahbaikan (Xu et al. 2020).

1.3 PERNYATAAN MASALAH

Dalam sistem PEMFC, plat dwikutub atau plat bipolar (BP) merupakan salah satu komponen utama yang memainkan peranan struktur dan fungsi yang sangat kritikal. Komponen ini bukan sahaja berfungsi sebagai medium pengagihan gas bahan tindak balas dan pengalir arus elektrik, malah turut memberikan sokongan mekanikal kepada tindanan sel fuel. Selain itu, BP menyumbang secara signifikan terhadap jumlah berat, isipadu serta kos keseluruhan tindanan sel fuel (Choi et al. 2021).

Secara umumnya, BP dalam sistem PEMFC boleh diklasifikasikan kepada dua kategori utama, iaitu bahan berasaskan karbon dan bahan berasaskan logam. BP berasaskan karbon, seperti grafit, mempunyai rintangan kakisan yang tinggi serta kekonduksian elektrik yang baik. Walau bagaimanapun, bahan ini bersifat rapuh, sukar dimesin, dan lazimnya memerlukan ketebalan yang lebih besar bagi memastikan kekuatan mekanikal yang mencukupi. Keadaan ini secara langsung meningkatkan berat dan isipadu tindanan sel fuel (Gautam et al. 2015). Kekangan tersebut sekali gus menghadkan kesesuaian BP berasaskan karbon untuk aplikasi PEMFC mudah alih dan ringan yang menuntut reka bentuk yang kompak serta berketumpatan kuasa tinggi.

Bagi memaksimumkan prestasi pada BP logam ringan, reka bentuk medan aliran (FF) yang dioptimumkan adalah sangat penting. Reka bentuk medan aliran selari (PFF) konvensional menawarkan kejatuhan tekanan yang rendah dan lebih mudah difabrikasi, namun ia sering terdedah kepada masalah ketidakseragaman taburan bahan tindak balas dan risiko banjir air terutamanya pada tahap ketumpatan arus yang tinggi. Pengubahsuaian geometri melalui reka bentuk medan aliran selari beralun (WPFF) dilihat berpotensi mengatasi masalah ini dengan menghasilkan gangguan mikro-aliran yang meningkatkan keseragaman bendalir tanpa menyebabkan penalti tekanan yang melampau. Walau bagaimanapun, mengoptimumkan parameter geometri saluran WPFF secara serentak dengan mengambil kira had kebolehlaksanaan pembuatan plat logam nipis merupakan satu cabaran kejuruteraan yang sangat kompleks.

Menyelesaikan kerumitan mengoptimumkan reka bentuk geometri ini secara eksperimen fizikal sepenuhnya adalah tidak kos efektif dan memakan masa yang

panjang. Oleh itu, pendekatan berasaskan simulasi seperti Dinamik Bendalir Berkomputer (CFD) amat diperlukan bagi meramalkan tingkah laku dalaman sel fuel. Namun begitu, wujud isu dan cabaran besar yang melibatkan pemodelan CFD bagi menyokong penilaian reka bentuk ini. Simulasi ruang dalaman PEMFC menuntut penyelesaian pelbagai fizik (*multiphysics*) yang amat rumit kerana ia melibatkan dinamik bendalir, pemindahan haba, pengangkutan jisim, dan kinetik tindak balas elektrokimia yang berlaku secara serentak. Selain itu, pemodelan yang tepat memerlukan strategi penjanaan jejaring yang sangat halus (*fine meshing*) merentasi lapisan-lapisan nipis komponen sel fuel bagi mengelakkan ralat komputasi, terutamanya dalam meramal pengurusan air dua fasa dan taburan arus setempat secara tepat.

Berdasarkan sorotan kajian, masih terdapat jurang yang ketara terhadap pembangunan PEMFC menggunakan BP logam nipis yang mengintegrasikan reka bentuk WPFF dengan pendekatan pemodelan CFD dan pengesahan eksperimen secara sistematik. Kesukaran dalam mengimbangi ciri ringan bahan, integriti struktur saluran beralun, dan kerumitan ketepatan model simulasi menuntut satu penilaian menyeluruh. Oleh itu, kajian ini dilaksanakan bagi membuktikan keberkesanan sebenar WPFF pada BP logam ringan dalam meningkatkan ketumpatan kuasa sel fuel melalui penyepaduan model berangka yang sah dan data uji kaji makmal.

1.4 OBJEKTIF KAJIAN

Objektif utama kajian ini adalah seperti berikut:

- a. Membangunkan reka bentuk FF bagi BP logam ringan PEMFC terhadap tingkah laku mekanik bendalir dan tindak balas elektrokimia.
- b. Mensimulasi model reka bentuk FF bagi BP logam ringan PEMFC terhadap tingkah laku mekanik bendalir dan tindak balas elektrokimia menggunakan perisian ANSYS Fluent.
- c. Mengoperasi dan menilai prestasi sebenar unit PEMFC menggunakan BP logam ringan dan menentusahkan hasil simulasi model reka bentuk FF.

1.5 SKOP KAJIAN

Kajian ini memfokuskan kepada pembangunan, pemodelan, simulasi dan uji kaji makmal reka bentuk FF bagi BP logam ringan dalam unit PEMFC. Secara khususnya, kajian ini menumpukan kepada reka bentuk medan aliran selari beralun (*Wavy Parallel Flow Field*, WPFF) sebagai penambahbaikan kepada reka bentuk medan aliran selari (*Parallel Flow Field*, PFF) konvensional, dengan menilai pengaruh geometri saluran terhadap tingkah laku mekanik bendalir, pengangkutan spesies dan tindak balas elektrokimia dalam sel fuel. Skop kajian dirangka selaras dengan pendekatan bersepadu yang menggabungkan pembangunan model matematik, simulasi berangka tiga dimensi (3D-CFD) dan penilaian prestasi secara eksperimen sebagaimana dilaporkan dalam kajian terdahulu

Bagi objektif pertama, kajian ini merangkumi pembangunan dan pemodelan reka bentuk WPFF pada BP logam ringan bagi aplikasi PEMFC ringan. Pembangunan model melibatkan pembinaan geometri tiga dimensi bagi satu saluran (*single-channel model*) dan satu sel penuh (*single-cell model*) yang mengandungi komponen utama iaitu GDL, MPL, CL dan membran elektrolit. Variasi kedalaman saluran antara 0.15 mm hingga 0.35 mm dianalisis bagi menilai kesan perubahan parameter geometri terhadap prestasi sel. Model matematik yang dibangunkan berasaskan persamaan imbalan jisim, momentum, tenaga dan spesies bagi menggambarkan tingkah laku aliran gas hidrogen dan oksigen/ udara di dalam saluran serta medium berliang. Di samping itu, model elektrokimia digabungkan melalui persamaan Butler–Volmer bagi menerangkan kinetik tindak balas anod dan katod serta penghasilan ketumpatan arus setempat. Dalam pemodelan ini, beberapa andaian digunakan termasuk aliran laminar, keadaan mantap (*steady-state*), gas ideal, serta sifat medium berliang yang homogen dan isotropik. Skop ini terhad kepada analisis prestasi serta taburan medan aliran dan tidak melibatkan kajian degradasi jangka panjang atau kesan operasi tak mantap.

Bagi objektif kedua, kajian ini melibatkan pelaksanaan simulasi berangka menggunakan perisian ANSYS Fluent dengan modul PEMFC untuk menyelesaikan model yang telah dibangunkan. Simulasi dijalankan dalam bentuk tiga dimensi bagi kedua-dua konfigurasi WPFF dan PFF untuk tujuan perbandingan prestasi. Proses

simulasi merangkumi pembinaan geometri, penjanaan jejaring heksaedral berlapis bagi setiap komponen sel serta penetapan keadaan sempadan seperti kadar aliran jisim hidrogen dan udara, suhu operasi, tekanan atmosfera dan julat voltan operasi antara 0.95 V hingga 0.25 V. Analisis jejaring dilaksanakan bagi memastikan ketepatan dan kestabilan keputusan simulasi. Analisis yang dijalankan termasuk penjanaan lengkung polarisasi (I–V), lengkung ketumpatan kuasa, taburan tekanan sepanjang saluran anod dan katod, serta profil kepekatan hidrogen dan oksigen pada pelbagai voltan operasi. Perbandingan antara WPFF dan PFF dijalankan pada kedalaman saluran optimum bagi menilai kelebihan geometri beralun dalam meningkatkan pengagihan bahan tindak balas dan pengurusan air. Walau bagaimanapun, simulasi ini dihadkan kepada keadaan mantap dan tidak merangkumi pemodelan dua fasa air cecair secara terperinci atau analisis dinamik masa nyata.

Bagi objektif ketiga, kajian ini merangkumi mengoperasikan dan penilaian prestasi sebenar unit PEMFC menggunakan BP logam ringan dengan reka bentuk WPFF serta proses penentusahan keputusan simulasi. Sel tunggal dengan keluasan aktif 200 cm² dibangunkan selaras dengan konfigurasi model CFD. Sistem ujian merangkumi bekalan hidrogen tulen pada anod, bekalan udara pada katod, unit penyejukan berasaskan radiator, serta beban elektronik DC bagi mengawal arus yang dihasilkan. Ujian prestasi dijalankan melalui penghasilan lengkung polarisasi dengan variasi arus sehingga had tertentu bagi menentukan hubungan antara voltan dan ketumpatan arus serta mengenal pasti ketumpatan kuasa maksimum. Data eksperimen yang diperoleh kemudiannya dibandingkan dengan keputusan simulasi CFD untuk menilai tahap kesepadanan model dari segi bentuk lengkung, nilai voltan dan kuasa pada julat arus tertentu. Sebarang perbezaan yang diperhatikan dianalisis berdasarkan kemungkinan faktor seperti rintangan sentuhan, variasi pemampatan GDL, serta fenomena pengangkutan air yang sukar dimodelkan sepenuhnya dalam simulasi mantap.

Batas penentu ukuran bagi kajian ini dihadkan sehingga fasa penentusahan (*validation*) model komputasi CFD dengan keputusan empirikal sel tunggal fizikal. Keputusan untuk tidak memanjangkan simulasi ini kepada kajian parametrik lanjutan (*extended case studies*) dalam lingkungan kajian ini adalah didorong oleh fokus utama

penyelidikan yang bertumpu kepada kerumitan mengintegrasikan kekangan pembuatan penghentakan (*stamping*) ke dalam model hidrodinamik. Pembuktian dan pengesahan bahawa model komputasi WPF berupaya meniru kelakuan fizikal sebenar pada substrat logam ringan yang sangat nipis merupakan satu metodologi teras yang melengkapkan objektif penyelidikan tahap Sarjana ini. Model hibrid pembuatan-komputasi yang telah disahkan ini seterusnya akan bertindak sebagai platform asas yang teguh bagi peluasan skop kajian profil pengoperasian ekstrem pada penyelidikan lanjutan masa hadapan

Secara keseluruhannya, skop kajian ini tertumpu kepada penilaian menyeluruh reka bentuk WPF bagi BP logam ringan melalui pendekatan integrasi pemodelan, simulasi dan eksperimen. Kajian ini memfokuskan kepada pengaruh parameter geometri saluran terhadap taburan aliran, pengangkutan spesies dan prestasi elektrokimia sel PEMFC ringan. Walau bagaimanapun, kajian ini tidak merangkumi analisis kos pembuatan berskala industri, kajian kebolehpercayaan dan kemerosotan jangka panjang, pemodelan pelbagai sel dalam satu tindanan (*stack-level analysis*), atau simulasi keadaan tak mantap dan dua fasa lanjutan. Dengan keterbatasan skop tersebut, kajian ini diharapkan dapat menyediakan asas saintifik yang kukuh dalam pembangunan dan pengoptimuman reka bentuk saluran aliran bagi aplikasi PEMFC logam ringan berprestasi tinggi.

1.6 KEPENTINGAN KAJIAN

Kajian terhadap BP ringan bagi sistem PEMFC adalah amat penting dalam mempercepat kemajuan teknologi tenaga bersih, khususnya dalam usaha meningkatkan kebolegunaan dan daya saing teknologi sel fuel di pasaran global. Secara teknikalnya, BP menyumbang sebahagian besar kepada berat, isipadu dan kos keseluruhan sistem PEMFC. Oleh itu, penggunaan bahan logam ringan yang mempunyai kekonduksian elektrik dan terma yang baik berpotensi mengurangkan berat sistem tanpa menjejaskan prestasi elektrokimia. Pengurangan berat dan saiz sistem adalah faktor kritikal dalam membolehkan pengeluaran berskala besar serta penerimaan meluas teknologi ini, terutamanya bagi aplikasi mudah alih seperti kenderaan elektrik sel fuel, dron, sistem kuasa sandaran mudah alih dan peranti tenaga luar grid. Dalam aplikasi tersebut, nisbah

kuasa kepada berat (*power to mass ratio*) menjadi penentu utama keberkesanan dan kecekapan sistem.

Selain aspek pengurangan berat, kajian ini turut menyumbang kepada pemahaman saintifik tentang bagaimana gabungan bahan ringan dan reka bentuk medan aliran yang dioptimumkan mempengaruhi prestasi serta ketahanan PEMFC. Reka bentuk medan aliran yang cekap memainkan peranan penting dalam memastikan pengagihan bahan tindak balas yang seragam, pengurusan air yang efektif serta pengurangan kehilangan tekanan yang berlebihan. Sekiranya reka bentuk saluran tidak dioptimumkan, penggunaan bahan ringan sahaja tidak mencukupi untuk menjamin peningkatan prestasi sistem secara menyeluruh. Oleh itu, pendekatan bersepadu yang menggabungkan inovasi bahan dan mengoptimumkan geometri saluran adalah penting bagi mencapai keseimbangan antara ketumpatan kuasa tinggi, kestabilan operasi dan jangka hayat yang panjang. Pemahaman ini bukan sahaja memberi implikasi terhadap prestasi segera sel fuel, malah terhadap isu kemerosotan seperti kakisan, rintangan sentuhan dan ketahanan mekanikal dalam operasi jangka panjang.

Tambahan pula, integrasi pendekatan simulasi berangka dan pengesahan sebenar melalui uji kaji makmal dalam kajian ini memberikan sumbangan metodologi yang signifikan kepada bidang teknologi sel fuel. Pendekatan simulasi membolehkan analisis terperinci terhadap fenomena dalaman seperti taburan tekanan, kepekatan bahan tindak balas dan ketumpatan arus yang sukar diukur secara langsung melalui eksperimen. Pada masa yang sama, pengesahan eksperimen memastikan model yang dibangunkan adalah realistik dan boleh dipercayai. Gabungan kedua-dua pendekatan ini mempercepatkan proses inovasi kerana ia membolehkan penilaian pelbagai konfigurasi reka bentuk dilakukan secara maya sebelum pembangunan prototaip fizikal, sekali gus menjimatkan masa dan kos penyelidikan. Strategi ini amat penting dalam konteks pembangunan teknologi baharu yang memerlukan kitaran reka bentuk ujian penambahbaikan yang pantas bagi memenuhi keperluan industri.

Kajian ini memberikan nilai tambah yang praktikal dan anjakan paradigma yang bermakna kepada dimensi teknologi reka bentuk PEMFC. Novelty utama kajian ini berbanding dengan kajian-kajian terdahulu terletak pada geometri kompleks WPPF

dengan jumlah saluran yang banyak ke atas substrat plat dwikutub logam ringan yang sangat nipis (Titanium Gred 1 berskala 0.15-0.25 mm), satu pendekatan perintis yang secara fundamentalnya berbeza daripada norma literatur sedia ada. Berdasarkan kajian kepustakaan, majoriti penyelidik terdahulu hanya memfokuskan kepada kelebihan teoretikal reka bentuk WPF pada plat grafit tebal dengan geometri berfokus kepada penyelidikan kurang kepada geometri BP ringan yang realistik.

Oleh yang demikian, kepentingan kajian ini bukan sahaja terletak pada peningkatan prestasi teknikal PEMFC, tetapi juga pada sumbangannya dalam memperkukuh asas saintifik dan kejuruteraan bagi pembangunan sistem sel fuel yang lebih ringan, cekap dan berdaya tahan. Dengan memfokuskan kepada interaksi antara bahan BP ringan dan reka bentuk medan aliran yang dioptimumkan, kajian ini menyediakan asas penting untuk menyokong pengeluaran berskala besar dan penerimaan teknologi PEMFC secara meluas di Malaysia dan di peringkat antarabangsa. Selain itu, nilai tambah teknologi yang signifikan dalam kajian ini adalah penjelmaan model komputasi yang secara langsung mengikat parameter dinamik bendalir dengan kekangan kebolehbentukan fizikal. Penemuan kajian ini menterjemahkan reka bentuk CFD yang dahulunya hanya bersifat 'ideal secara teori' kepada satu rangka tindakan (*blueprint*) teknologi yang sedia dikilangkan secara besar-besaran.

Sebagai contoh, di peringkat nasional, kepentingan kajian ini amat relevan dengan aspirasi Malaysia untuk membangunkan ekonomi hidrogen sebagai pemacu pertumbuhan baharu negara. Melalui pelancaran Pelan Hala Tuju Ekonomi dan Teknologi Hidrogen (*Hydrogen Economy and Technology Roadmap*, HETR) Malaysia oleh Kementerian Sains, Teknologi dan Inovasi (MOSTI), negara telah menetapkan hala tuju strategik bagi menjadikan hidrogen sebagai salah satu sumber tenaga utama menjelang tahun 2050. HETR menekankan pembangunan rantai nilai hidrogen secara menyeluruh, termasuk pengeluaran, penyimpanan, pengangkutan dan penggunaan akhir seperti sel fuel. Dalam konteks ini, pembangunan dan pengoptimuman teknologi PEMFC adalah selari dengan teras utama HETR yang memberi penekanan kepada inovasi teknologi tempatan, pembangunan bakat serta pengukuhan keupayaan penyelidikan dan pembangunan (R&D).

Tambahan pula, kajian ini menyokong komitmen Malaysia terhadap agenda perubahan iklim global dan sasaran pelepasan karbon rendah seperti yang digariskan dalam Rancangan Malaysia Ke-12 (RMKe-12) dan komitmen negara untuk mencapai neutraliti karbon seawal tahun 2050. Pembangunan BP logam ringan dengan reka bentuk saluran inovatif berpotensi menghasilkan sistem PEMFC yang lebih ringan, padat dan cekap, sesuai untuk aplikasi mudah alih, sektor pengangkutan, sistem kuasa luar grid serta sokongan kepada integrasi tenaga boleh baharu. Ini sejajar dengan keperluan Malaysia untuk mempelbagaikan campuran tenaga negara dan mengurangkan kebergantungan kepada bahan api fosil.

Dari sudut pembangunan industri, penguasaan teknologi reka bentuk dan pemodelan saluran aliran BP berpotensi membuka ruang kepada pembangunan industri pembuatan komponen sel fuel tempatan. Pada masa ini, kebanyakan komponen kritikal sel fuel masih bergantung kepada teknologi luar negara. Melalui kajian ini, kepakaran dalam reka bentuk, simulasi dan pengujian prestasi dapat dibangunkan secara tempatan, seterusnya mengurangkan jurang teknologi dan meningkatkan daya saing industri negara dalam pasaran teknologi hijau global. Ini juga berpotensi menggalakkan kolaborasi strategik antara universiti, industri dan agensi kerajaan dalam mempercepat pemindahan teknologi serta pengkomersialan inovasi.

Secara keseluruhannya, kepentingan kajian ini boleh dilihat daripada tiga dimensi utama. Pertama, dari perspektif saintifik, ia menyumbang kepada pemahaman mendalam tentang interaksi antara geometri saluran aliran, mekanik bendalir dan tindak balas elektrokimia dalam sistem PEMFC logam ringan. Kedua, dari perspektif teknologi, ia berpotensi menghasilkan reka bentuk BP yang lebih optimum dan berprestasi tinggi. Ketiga, dari perspektif strategik nasional, ia menyokong pelaksanaan HETR, agenda peralihan tenaga negara dan komitmen Malaysia terhadap pembangunan ekonomi rendah karbon. Dengan itu, kajian ini bukan sahaja relevan dari sudut akademik, malah mempunyai implikasi praktikal dan strategik yang luas di Malaysia dan peringkat antarabangsa.

RUJUKAN

- Abdulrahman, G. A. Q. & Qasem, N. A. A. 2024. Optimizing Endurance and Power Consumption of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles Powered by Proton-Exchange Membrane Fuel Cells. *Arabian Journal for Science and Engineering* 49: 2605–2623.
- Abe, J.O., Popoola, A.P.I., Ajenifuja, E. & Popoola, O.M. 2019. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy* 44(29): 15072–15086.
- Afshari, E., Jahantigh, N. & Atyabi, S. A. 2022. Chapter 16 - Configuration of proton exchange membrane fuel cell gas and cooling flow fields. In G. Kaur (pnyt.), *PEM Fuel Cells*, hlm. 429–463. Elsevier.
- Agarwal, H., Thosar, A. U., Bhat, S. D. & Lele, A. K. 2022. Interdigitated flow field impact on mass transport and electrochemical reaction in high-temperature polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources* 532: 231319.
- Albert, A., Anders, A., Psyk, V., Kräusel, V. & Dix, M. 2022. Sealing Technologies for the Manufacturing of Bipolar Plates via Active and Passive Hydroforming. *Engineering Proceedings* 26: 1.
- Alejandro A. Franco. 2013. *Polymer Electrolyte Fuel Cells*. (A. A. Franco, Ed.) *Science, Applications, and Challenges*. 1st Ed. New York: Jenny Stanford Publishing.
- Alo, O. A., Otunniyi, I. O. & Pienaar, Hc. Z. 2019. Manufacturing methods for metallic bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell. *Materials and Manufacturing Processes* 34: 927–955.
- Aminudin, M.A., Kamarudin, S.K., Lim, B.H., Majilan, E.H., Masdar, M.S. & Shaari, N. 2023. An overview: Current progress on hydrogen fuel cell vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(11): 4371–4388.
- ANSYS Inc. 2009. ANSYS, Inc. Fluent Fuel Cell Module User's Guide. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/fuelcells/node13.htm>. [5 Januari 2026].
- Asadi, M.R., Ghasabehi, M., Ghanbari, S. & Shams, M. 2024. The optimization of an innovative interdigitated flow field proton exchange membrane fuel cell by using artificial intelligence. *Energy* 290: 130131.
- Athanasaki, G., Jayakumar, A. & Kannan, A.M. 2023. Gas diffusion layers for PEM fuel cells: Materials, properties and manufacturing – A review. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(6): 2294–2313.
- Bairagi, H., Vashishth, P., Gopal, J., Shukla, S. K., Ebenso, E. E. & Mangla, B. 2024. Polymers and their composites for corrosion inhibition application:

Development, Advancement, and Future Scope – a critical review. *Corrosion Communications*: 15: 79–94.

- Baz, F.B., Elzohary, R.M., Osman, S., Marzouk, S.A. & Ahmed, M. 2024. A review of water management methods in proton exchange membrane fuel cells. *Energy Conversion and Management* 302: 118150.
- Bazylak, A. 2021. Transport phenomena in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering* 12: 419–443.
- Boddu, R., Marupakula, U. K., Summers, B. & Majumdar, P. 2009. Development of bipolar plates with different flow channel configurations for fuel cells. *Journal of Power Sources* 189: 1083–1092.
- Bozorgnezhad, A., Shams, M., Kanani, H., Hasheminasab, M. & Ahmadi, G. 2015. The experimental study of water management in the cathode channel of single-serpentine transparent proton exchange membrane fuel cell by direct visualization. *International Journal of Hydrogen Energy* 40.
- Carcadea, E., Ismail, M.S., Ingham, D. Bin, Patularu, L., Schitea, D., Marinioiu, A., Ion-Ebrasu, D., Mocanu, D. & Varlam, M. 2021. Effects of geometrical dimensions of flow channels of a large-active-area PEM fuel cell: A CFD study. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(25): 13572–13582.
- Chakraborty, C. S., Elangovan, D., Palaniswamy, K., Fly, A., Ravi, D., Ashok, D., Seelan, S., Karuppa, T. & Rajagopal, R. t.th. Flow Field Design of PEMFC. <https://encyclopedia.pub/entry/49632>. [6 Februari 2026].
- Chang, D.-H. & Wu, S.-Y. 2015. The effects of channel depth on the performance of miniature proton exchange membrane fuel cells with serpentine-type flow fields. *International Journal of Hydrogen Energy* 40(35): 11659–11667.
- Chen, K., Laghrouche, S. & Djerdir, A. 2021. Performance analysis of PEM fuel cell in mobile application under real traffic and environmental conditions. *Energy Conversion and Management* 227: 113602.
- Chen, X., Chen, Y., Liu, Q., Xu, J., Liu, Q., Li, W., Zhang, Y., Wan, Z. & Wang, X. 2021. Performance study on a stepped flow field design for bipolar plate in PEMFC. *Energy Reports* 7: 336–347.
- Chen, X., Li, Y. & Zhang, H. 2022. Flow field design optimization in PEM fuel cells. *Energy Conversion and Management* 276: 116509.
- Chen, X., Yu, Z., Wang, X., Li, W., Chen, Y., Jin, C., Gong, G. & Wan, Z. 2021. Influence of Wave Parallel Flow Field Design on the Performance of PEMFC. *Journal of Energy Engineering* 147: 1–12.
- Choi, S., Park, J. & Kim, K. 2021. Effects of sinusoidal flow channels on transport phenomena in PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 482: 228939.

- Chu, H., Chen, Y. & Zhang, J. 2020. Metallic bipolar plate design for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 450: 227695.
- Chung, T. T., Lin, C. Te, Shiu, H. R., Jheng, Y. T., Chen, C. C. & Yan, Y. Y. 2008. Analysis and Design of a Pem Fuel Cell Structure. *ASME 2008 6th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, FUELCELL 2008*, Denver, Colorado, USA, Jun 16–18. hlm 177–184.
- Csoklich, C., Xu, H., Marone, F., Schmidt, T. J. & Büchi, F. N. 2021. Laser Structured Gas Diffusion Layers for Improved Water Transport and Fuel Cell Performance. *ACS Applied Energy Materials* 4: 12808–12818.
- Ding, Q., Zhu, K. Q., Xu, J. H., Zhang, B. X., Yang, Y. R., Wang, Y. L., Wan, Z. M., Wang, X. D. & Lee, D. J. 2023. Effects of pumping power on oxygen transport and performance of proton exchange membrane fuel cell. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 144: 104749.
- Ferng, Y. M. & Su, A. 2007. A three-dimensional full-cell CFD model used to investigate the effects of different flow channel designs on PEMFC performance. *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 4466–4476.
- Gong, M., Zhang, X., Chen, M. & Ren, Y. 2023. Proton Exchange Membrane Fuel Cell as an Alternative to the Internal Combustion Engine for Emission Reduction: A Review on the Effect of Gas Flow Channel Structures. *Atmosphere* 14.
- Guo, N., Leu, M.C. & Koylu, U.O. 2014. Bio-inspired flow field designs for polymer electrolyte membrane fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 39(36): 21185–21195.
- Hashemi, F., Rowshanzamir, S. & Rezakazemi, M. 2012. CFD simulation of PEM fuel cell performance: Effect of straight and serpentine flow fields. *Mathematical and Computer Modelling* 55: 1540–1557.
- Heidary, H. & Moein-Jahromi, M. 2023. Power Density and Durability in Fuel Cell Vehicles. In *Hydrogen Electrical Vehicles*. hlm. 199–255. John Wiley & Sons, Ltd.
- Hu, B., He, G., Chang, F., Yang, H., Cao, X. & Yin, X. 2022. Low filler and highly conductive composite bipolar plates with synergistic segregated structure for enhanced proton exchange membrane fuel cell performance. *Energy* 251: 123982.
- Huang, J., Baird, D. G. & McGrath, J. E. 2005. Development of fuel cell bipolar plates from graphite filled wet-lay thermoplastic composite materials. *Journal of Power Sources* 150: 110–119.
- Huang, X., Zhang, Z. & Jiang, J. 2006. *Fuel Cell Technology for Distributed Generation: An Overview*. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Vol. 2.

- Huang, Y. 2023. Corrosion Resistance, Interfacial Contact Resistance, and Hydrophobicity of 316L Stainless Steel Bipolar Plates Coated with TiN/Amorphous Carbon Double Layer under Different Carbon Target Currents. *Coatings* 13.
- Hussain, M., Rahman, M. & Kim, K. 2020. Numerical investigation of flow distribution in PEM fuel cell channels. *Applied Energy* 261: 114403.
- Huya-Kouadio, J. M., James, B. D. & Houchins, C. 2018. Meeting Cost and Manufacturing Expectations for Automotive Fuel Cell Bipolar Plates. *ECS Transactions* 83: 93.
- Hwang, Y. M. & Manabe, K. I. 2021. Latest hydroforming technology of metallic tubes and sheets. *Metals* 11: 1–8.
- International Energy Agency. 2023. World Energy Outlook 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. [9 Januari 2026].
- Jayakumar, A., Singamneni, S., Ramos, M., Al-Jumaily, A. M. & Pethaiah, S. S. 2017. Manufacturing the gas diffusion layer for PEM fuel cell using a novel 3D printing technique and critical assessment of the challenges encountered. *Materials* 10: 1–9.
- Jung, S., Lee, K. & Kim, H. 2020. Enhanced water management in PEM fuel cells with modified flow channels. *International Journal of Hydrogen Energy* 45: 30178–30189.
- Gautam, R., Banerjee, S. & Kar, K. 2015. Bipolar Plate Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Application. *Recent Patents on Materials Science* 8(1): 15–45.
- Kaiser, M., Schwarz, S. & Bessler, W. 2019. CFD analysis of modified flow field structures in PEM fuel cells. *Electrochimica Acta* 318: 889–901.
- Karacan, K., Celik, S., Toros, S., Alkan, M. & Aydin, U. 2020. Investigation of formability of metallic bipolar plates via stamping for light-weight PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 45: 35149–35161.
- Khalifa, R. E., Shalaby, A. A. & Špitalský, Z. 2024. Toward revolutionizing PEMFC manufacturing for clean energy conversion: a review on the innovative contribution of 3D printing techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 135: 4119–4146.
- Kim, Y., Han, J. & Yu, S. 2023. Establishment of energy management strategy of 50 kW PEMFC hybrid system. *Energy Reports* 9: 2745–2756.
- Kone, J.P., Zhang, X., Yan, Y. & Adegbite, S. 2018. An open-source toolbox for PEM fuel cell simulation. *Computation* 6(2): 1–17.

- Körner, A. 2015. Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells – Analysis - IEA. Iea. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>. [3 Januari 2026].
- Kumar, A., Singh, R. & Verma, P. 2023. Effect of flow field design on mass transport in PEM fuel cells. *Journal of Power Sources* 561: 232693.
- Kurnia, J.C., Chaedir, B.A., Sasmito, A.P. & Shamim, T. 2021. Progress on open cathode proton exchange membrane fuel cell: Performance, designs, challenges and future directions. *Applied Energy* 283: 116359.
- Kurtz, J., Sprik, S., Saur, G., Onorato, S., Kurtz, J., Sprik, S., Saur, G. & Onorato, S. 2019. On-Road Fuel Cell Electric Vehicles Evaluation: Overview. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. *NREL/TP-5400-73009*: Mac 7–13.
- Larminie, J. & Dicks, A. 2003. *Fuel Cell Systems Explained*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons.
- Lee, S. J., Lee, C. Y., Yang, K. T., Kuan, F. H. & Lai, P. H. 2008. Simulation and fabrication of micro-scaled flow channels for metallic bipolar plates by the electrochemical micro-machining process. *Journal of Power Sources* 185: 1115–1121.
- Leng, Y., Ming, P., Yang, D. & Zhang, C. 2020, March 1. Stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: Materials, flow channel design and forming processes. *Journal of Power Sources*. Elsevier B.V.
- Li, H.-W., Xu, B.-S., Du, C.-H. & Yang, Y. 2020. Performance prediction and power density maximization of a proton exchange membrane fuel cell based on deep belief network. *Journal of Power Sources* 461: 228154.
- Li, J., Liu, H. & Wang, Z. 2021. Flow field optimization in PEM fuel cells for enhanced mass transport. *Energy* 223: 120043.
- Li, J., Liu, H. & Wang, Z. 2022. Effects of non-uniform channel geometry on PEM fuel cell performance. *Energy* 239: 122151.
- Li, W., Xie, Z., Qiu, S., Zeng, H., Liu, M. & Wu, G. 2023. Improved Performance of Composite Bipolar Plates for PEMFC Modified by Homogeneously Dispersed Multi-Walled Carbon Nanotube Networks Prepared by In Situ Chemical Deposition. *Nanomaterials* 13(2).
- Li, X. & Sabir, I. 2005. Review of bipolar plates in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 30: 359–371.
- Li, Y., Wang, X., Li, Y., He, Z., Zhang, G., Wang, Z., Wang, S., Hu, F. & Zhou, Q. 2024. Corrosion and Interfacial Contact Resistance of NiTi Alloy as a Promising Bipolar Plate for PEMFC. *Molecules* 29(15).

- Liang, X., Chen, Y. & Xu, H. 2020. Influence of operating voltage on reactant distribution in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 45: 26783–26794.
- Lin, M., Cheng, Y., Lin, M. & Yen, S. 2005. Evaluation of PEMFC power systems for UPS base station applications. *Journal of Power Sources* 140: 346–349.
- Liu, M., Huang, H., Li, X., Guo, X., Wang, T. & Lei, H. 2021. Geometry optimization and performance analysis of a new tapered slope cathode flow field for PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(75): 37379–37392.
- Liu, Q., Lan, F., Zeng, C., Chen, J. J. & Wang, J. 2022. A review of proton exchange membrane fuel cell's bipolar plate design and fabrication process. *Journal of Power Sources* 538: 231543.
- Lucas, J., Lucas, P., Le Mercier, T., Rollat, A. & Davenport, W. 2015. Chapter 10 - Rare Earths dalam Rechargeable Batteries. dalam J. Lucas, P. Lucas, T. Le Mercier, A. Rollat, & W. Davenport (pnyt.), *Rare Earths* hlm 167–180. Elsevier.
- Marappan, M., Narayanan, R., Manoharan, K., Vijayakrishnan, M. K., Palaniswamy, K., Karazhanov, S. & Sundaram, S. 2021. Scaling up studies on pemfc using a modified serpentine flow field incorporating porous sponge inserts to observe water molecules. *Molecules* 26.
- Mi, B., Wang, Q., Xu, Y., Qin, Z., Chen, Z. & Wang, H. 2023. Improvement in Corrosion Resistance and Interfacial Contact Resistance Properties of 316L Stainless Steel by Coating with Cr, Ti Co-Doped Amorphous Carbon Films in the Environment of the PEMFCs. *Molecules* 28: 2821.
- Mishra, S., Verma, V., Kishore, V. & Kumar, R. 2024. A review of polymeric bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: Materials, fabrication, applications, cost analysis, and current status. *Energy & Environment* 35(8): 4408–4444.
- Modanloo, V., Alimirzaloo, V. & Elyasi, M. 2020. Optimal Design of Stamping Process for Fabrication of Titanium Bipolar Plates Using the Integration of Finite Element and Response Surface Methods. *Arabian Journal for Science and Engineering* 45(2): 1097–1107.
- Murphy, O.J., Cisar, A. & Clarke, E. 1998. Low-cost light weight high power density PEM fuel cell stack. *Electrochimica Acta* 43(24): 3829–3840.
- Musse, D. & Lee, D. 2024. Computational evaluation of PEMFC performance based on bipolar plate material types. *Energy Reports* 11: 4886–4903.
- Narasimharaju, S. J., Elumalai, P. V., Joshua, P. J. T., Alwetaishi, M. & Yong, X. 2025. Advances in materials and surface engineering for fuel cell bipolar plates: Materials, coatings. *Energy Reports* 14: 3812–3841.
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine. 2021. Assessment of Technologies for Improving Light-Duty Vehicle Fuel Economy—2025-2035.

- The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26092>. [1 Januari 2026].
- Ning, F., He, X., Shen, Y., Jin, H., Li, Q., Li, D., Li, S., Zhan, Y., Du, Y., Jiang, J., Yang, H. & Zhou, X. 2017. Flexible and Lightweight Fuel Cell with High Specific Power Density. *ACS Nano* 11(6): 5982–5991.
- O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W. & Prinz, F. B. 2016. *Fuel Cell Fundamentals* (3rd ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Fuel+Cell+Fundamentals%2C+3rd+Edition-p-9781119113805>. [1 Januari 2026].
- Ou, K., Wang, Y. -X. & Kim, Y. -B. 2017. Performance Optimization for Open-cathode Fuel Cell Systems with Overheating Protection and Air Starvation Prevention. *Fuel Cells* 17(3): 299–307.
- Pan, M., Pan, C., Li, C. & Zhao, J. 2021. A review of membranes in proton exchange membrane fuel cells: Transport phenomena, performance and durability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141: 110771.
- Parekh, A. 2022. Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review. *Frontiers in Energy Research* 10.
- Pengyan, G., Cunwu, H., Jiahao, F. & Chengwei, L. 2022. A Study on the Current status of Metal Bipolar Plate Materials and Stamping and Forming for Fuel Cells. *Journal of Engineering Research and Reports* 23: 29–40.
- Pôle Véhicule du Futur. 2012. MobyPost : et si le soleil vous apportait votre courrier ? <https://www.vehiculedefutur.com/2012-03-04-MobyPost-et-si-le-soleil-vous-apportait-votre-courrier.html>. [3 Feb 2026].
- Porstmann, S., Wannemacher, T. & Drossel, W. G. 2020. A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends. *Journal of Manufacturing Processes* 60: 366–383.
- Pramuanjaroenkij, A. & Kakaç, S. 2023. The fuel cell electric vehicles: The highlight review. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(25): 9401–9425.
- Qi, W., Chen, X., Zhang, Z. G., Ge, S., Wang, H., Deng, R., Liu, Z., Tuo, J., Guo, S. & Cheng, J. 2024. Performance of the multi-U-style structure based flow field for polymer electrolyte membrane fuel cell. *Scientific Reports* 14: 23318.
- Ramadhan, T.M.N., Masdar, M.S. & Husaini, T. 2026. Lightweight proton exchange membrane fuel cell's bipolar plates materials selection and design for mobile application. *Journal of Solid State Electrochemistry*.
- Ramezani, M. & Ripin, Z. M. 2012. 1 - Introduction to sheet metal forming processes dalam M. Ramezani & Z. M. Ripin (pnyt.). *Rubber-Pad Forming Processes* hlm. 1–22. Woodhead Publishing.

- Ream, S. 2006. High-speed fiber laser welding for fuel cell components. *ICALEO 2006 - 25th International Congress on Applications of Laser and Electro-Optics, Congress Proceedings*, hlm. 1302.
- Rocha, C., Knöri, T., Ribeirinha, P. & Gazdzicki, P. 2024. A review on flow field design for proton exchange membrane fuel cells: Challenges to increase the active area for MW applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 192: 114198.
- Rojas, N., Sánchez-Molina, M., Sevilla, G., Amores, E., Almandoz, E., Esparza, J., Cruz Vivas, M. R. & Colominas, C. 2021. Coated stainless steels evaluation for bipolar plates in PEM water electrolysis conditions. *International Journal of Hydrogen Energy* 46: 25929–25943.
- Sagar, A., Chugh, S. & Kjeang, E. 2024. Experimental Design of High-Performing Open-Cathode Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *ECS Advances* 3(1): 014504.
- Santamaria, A. D., Cooper, N. J., Becton, M. K. & Park, J. W. 2013. Effect of channel length on interdigitated flow-field PEMFC performance: A computational and experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy* 38: 16253–16263.
- Sato, T. 2022. Recent Development Trends in Materials for Bipolar Plates of Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) and Kobe Steel's Activities. *R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports* 71: 70–76.
- Sauermoser, M., Kizilova, N., Pollet, B. G. & Kjelstrup, S. 2020. Flow Field Patterns for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Frontiers in Energy Research* 8. Frontiers Media S.A.
- Schumm, B. 2024. Fuel cell | Definition, Types, Applications, & Facts. <https://www.britannica.com/technology/fuel-cell/Types-of-fuel-cellsssed>. [11 Januari 2026].
- Shen, H., Huang, Y., Kang, H., Shen, J., Yu, J., Zhang, J. & Li, Z. 2022. Effect of the cooling water flow direction on the performance of PEMFCs. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 189: 122303.
- Shen, Y., Yan, X., An, L., Shen, S., An, L. & Zhang, J. 2022. Portable proton exchange membrane fuel cell using polyoxometalates as multi-functional hydrogen carrier. *Applied Energy* 313.
- Song, Y., Zhang, C., Ling, C. Y., Han, M., Yong, R. Y., Sun, D. & Chen, J. 2020. Review on current research of materials, fabrication and application for bipolar plate in proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 45: 29832–29847.
- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N. & Ward, K. R. 2019. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy Environ. Sci.* 12: 463–491.

- Sun, H., Cooke, K., Eitzinger, G., Hamilton, P. & Pollet, B. 2013. Development of PVD coatings for PEMFC metallic bipolar plates. *Thin Solid Films* 528: 199–204.
- Swider-Lyons, K., Stroman, R., Page, G., Mackrell, J., Rodgers, J. & Schuette, M. 2010. The Ion Tiger Fuel Cell Unmanned Air Vehicle. *44th Power Sources Conference*, Hlm. 561–563. https://www.researchgate.net/publication/264543084_The_Ion_Tiger_Fuel_Cell_Unmanned_Air_Vehicle. [20 Januari 2026].
- Systems, B. P., Bull, O. & Bull, O. 2016. Protonex demos UAV propulsion system with Boeing Insitu. *Fuel Cells Bulletin* 2016: 3–4.
- Tang, A., Crisci, L., Bonville, L. & Jankovic, J. 2021. An overview of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 13: 22701.
- Tawfik, H., Hung, Y. & Mahajan, D. 2007. Metal bipolar plates for PEM fuel cell—A review. *Journal of Power Sources* 163: 755–767.
- Toghyani, S., Atyabi, S. A. & Gao, X. 2021. Enhancing the Specific Power of a PEM Fuel Cell Powered UAV with a Novel Bean-Shaped Flow Field. *Energies* 14(9).
- U.S. Department of Energy. t.th. Alternative Fuels Data Center: Fuel Cell Electric Vehicles. <https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel-cell>. [9 Januari 2026].
- Vichard, L., Steiner, N.Y., Zerhouni, N. & Hissel, D. 2021. Hybrid fuel cell system degradation modeling methods: A comprehensive review. *Journal of Power Sources* 506: 230071.
- Wan, Z., Pan, D., Zhu, X., Chen, Y., Huang, T. & Wang, X. 2023. Numerical study on the performance of a novel three-dimensional stepped wavy flow field in PEMFC. *Energy Conversion and Management: X* 20: 100469.
- Wang, H., Lin, N., Nouri, M., Liu, Z., Yu, Y., Zeng, Q., Ma, G., Fan, J., Li, D. & Wu, Y. 2023. Improvement in surface performance of stainless steel by nitride and carbon-based coatings prepared via physical vapor deposition for marine application. *Journal of Materials Research and Technology* 27: 6021–6046.
- Wang, J. & Wang, H. 2012. Flow-field designs of bipolar plates in PEM fuel cells: Theory and applications. *Fuel Cells* 12: 989–1003.
- Wang, Y., Chen, K. S., Mishler, J., Cho, S. C. & Adroher, X. C. 2011. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells. *Applied Energy* 88: 981–1007.
- Wang, Y., Ruiz Diaz, D. F., Chen, K. S., Wang, Z. & Adroher, X. C. 2020. Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review. *Materials Today* 32: 178–203.
- Weng, F.-B., Dlamini, M. M. & Hwang, J.-J. 2023. Evaluation of flow field design effects on proton exchange membrane fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy* 48: 14866–14884.

- Wilberforce, T., Olabi, A.G., Rezk, H., Abdelaziz, A.Y., Abdelkareem, M.A. & Sayed, E.T. 2022. Boosting the output power of PEM fuel cells by identifying best-operating conditions. *Energy Conversion and Management* 270: 116205.
- Wu, S., Yang, W., Yan, H., Zuo, X., Cao, Z., Li, H., Shi, M. & Chen, H. 2021. A review of modified metal bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells. In *International Journal of Hydrogen Energy* 46(12): 8672–8701.
- Xia, Z., Chen, H., Zhang, T. & Pei, P. 2022. Effect of channel-rib width ratio and relative humidity on performance of a single serpentine PEMFC based on electrochemical impedance spectroscopy. *International Journal of Hydrogen Energy* 47(26): 13076–13086.
- Xing, L., Xuan, J. & Das, P.K. 2023. Fuel cell fundamentals. *Fuel Cells for Transportation* 29–72.
- Xu, Z., Qiu, D., Yi, P., Peng, L. & Lai, X. 2020. Towards mass applications: A review on the challenges and developments in metallic bipolar plates for PEMFC. *Progress in Natural Science: Materials International* 30: 815–824.
- Yan, X., Hou, M., Zhang, H., Jing, F., Ming, P. & Yi, B. 2006. Performance of PEMFC stack using expanded graphite bipolar plates. *Journal of Power Sources* 160: 252–257.
- Yang, C., Wan, Z., Chen, X., Kong, X., Zhang, J., Huang, T. & Wang, X. 2021. Geometry optimization of a novel M-like flow field in a proton exchange membrane fuel cell. *Energy Conversion and Management* 228: 113651.
- Yi, P., Li, X., Yao, L., Fan, F., Peng, L. & Lai, X. 2019. A lifetime prediction model for coated metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *Energy Conversion and Management* 183: 65–72.
- Yin, C., Hua, S., Nie, W., Yang, H. & Tang, H. 2024. Comparative study on air-cooled fuel cell stacks with metal and graphite bipolar plate designs for unmanned aerial vehicles. *ETransportation* 21: 100344.
- Yu, S., Li, X., Hao, J., Liu, S., Shao, Z. & Yi, B. 2014. Preparation of microporous layer for proton exchange membrane fuel cell by using polyvinylpyrrolidone aqueous solution. *International Journal of Hydrogen Energy* 39(28): 15681–15686.
- Yoo, H., Kwon, O., Kim, J., Cha, H., Kim, H., Choi, H., Jeong, S., Lee, Y., Kim, B., Jang, G., Koh, J.-S., Cho, G. Y. & Park, T. 2022. 3D-printed flexible flow-field plates for bendable polymer electrolyte membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 532: 231273.
- Zamel, N. & Li, X. 2013. Effective transport properties for polymer electrolyte membrane fuel cells – With a focus on the gas diffusion layer. *Progress in Energy and Combustion Science* 39(1): 111–146.

- Zhang, D., Duan, L., Guo, L., Wang, Z., Zhao, J., Tuan, W. H. & Niihara, K. 2011. TiN-coated titanium as the bipolar plate for PEMFC by multi-arc ion plating. *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 9155–9161.
- Zhang, L., Zhou, Y. & Sun, Q. 2020. Experimental investigation of transport phenomena in proton exchange membrane fuel cells. *Energy Conversion and Management* 205: 112421.
- Zhang, S., Zhang, X., Sun, Y., Zhou, W., Cao, W. & Cheng, D. 2023. Investigation of the annealing treatment on the performance of TiO₂ photoanode. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(77): 29996–30005.
- Zhang, Y. & Tu, Z. 2024. Flow-field design of the bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell: Problem, progress, and perspective. *Applications in Energy and Combustion Science* 17: 100244.
- Zhou, Y., Chen, B., Meng, K., Zhou, H., Chen, W., Zhang, N., Deng, Q., Yang, G. & Tu, Z. 2023. Optimization and evaluation criteria of water-gas transport performance in wave flow channel for proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 48(54): 20717–20733.
- Zhou, W., Li, M. & Chen, H. 2022. Enhancement of mass transport in wavy flow field PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 47: 30521–30534.

SENARAI PENERBITAN

1. Ramadhan, T.M.N., Masdar, M.S. & Husaini, T. Lightweight proton exchange membrane fuel cell's bipolar plates materials selection and design for mobile application. *J Solid State Electrochem* (2026). <https://doi.org/10.1007/s10008-026-06531-1> WoS (Q3)
2. Teuku Muhammad Naufal Ramadhaa, Mohd Shahbudin Masdar, Edy Herianto Majlan, Lim Bee Huah, Teuku Husaini. A Wavy-Parallel Flow Field Channel for a Bipolar Plate of a Lightweight Metallic Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Chemical Engineering Research and Design* (2026). <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2026.06.030>. WoS (Q2)

