

KEGAGALAN MEKANIKAL DALAM SEL FUEL MEMBRAN PERTUKARAN PROTON

MECHANICAL FAILURE IN PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS

Noradiba Nordin^a, Nurato Nurato^b, Edy Herianto Majlan^{a*}, Wan Ramli Wan Daud^a, Teuku Husaini^a, Masli Irwan Rosli^a, Abu Bakar Sulong^a, Darwin Sebayang^b

^aFuel Cell Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

^bDepartment Mechanical Engineering, Universitas Mercu Buana, Jakarta – Indonesia

Article history

Received

1 September 2023

Received in revised form

8 December 2024

Accepted

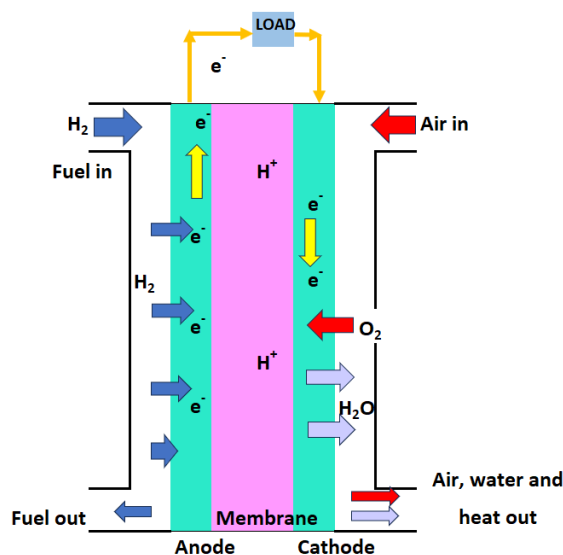
8 December 2024

Published Online

22 August 2025

*Corresponding author
edy@ukm.edu.my

Graphical abstract



Abstract

Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) is one of the most energy-efficient and energy-dense devices. PEMFC technology is outstanding due to its high durability, performance, dependability, and low unit price. PEMFC is comprised of multiple components that are susceptible to damage, resulting in system failure. Component functionality can degrade during the design process, during assembly, or during operation. Gradual component failure will lead to mechanical failure, which can result in unit damage and incapacity to operate. PEMFC's acceptance as a commercially sophisticated technology is hindered in part by its susceptibility to mechanical failure. Therefore, it is vital to comprehend and analyze the failure mechanism of frequently failing components based on the unit's arrangement in order to reduce component failure in the future through the design and development of new components.

Keywords: Fuel cell, degradation, mechanical failure, proton exchange membrane fuel cell component

Abstrak

Sel fuel membran pertukaran proton (PEMFC) adalah salah satu peranti yang paling cekap tenaga dengan kadar kecekapan yang tinggi dan kepadatan tenaga. Teknologi PEMFC adalah satu kejayaan kerana memperoleh daya tahan yang tinggi, prestasi, kebolehpercayaan dan kos unit yang rendah. Namun, PEMFC terdiri daripada pelbagai komponen yang terdedah kepada kerosakan dan mengakibatkan kegagalan pada sistem. Fungsi degradasi komponen boleh berlaku dari proses reka bentuk, pemasangan, atau selepas operasi. Kegagalan komponen secara beransur-ansur akan menyebabkan kegagalan mekanikal yang boleh menyebabkan kerosakan unit dan kegagalan untuk berfungsi. Kegagalan mekanikal adalah salah satu halangan utama PEMFC untuk diterima sebagai teknologi termaju secara komersial. Oleh itu, adalah penting untuk memahami dan menganalisis mekanisme kegagalan komponen yang sering terjadi mengikut susunan unit supaya pada masa hadapan dapat mengurangkan kegagalan

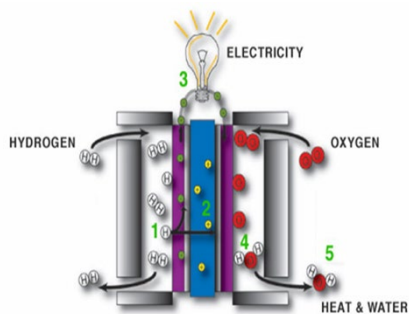
fungsi komponen dengan mereka-bentuk dan membangunkan komponen yang baru.

Kata kunci: Sel fuel membran pertukaran proton, degradasi, kegagalan mekanikal, komponen sel fuel membrane pertukaran proton.

© 2025 Penerbit UTM Press. All rights reserved

1.0 PENGENALAN

Sel fuel adalah sumber tenaga alternatif yang paling menjanjikan kerana ia adalah penukar tenaga yang menukarkan tenaga kimia secara langsung dan cekap kepada tenaga elektrik melalui tindak balas kimia yang membawa kecekapan, kesederhanaan, pelepasan rendah, dan lebih senyap [1,2,3,4]. Asas struktur sel fuel terdiri daripada lapisan elektrolit yang dilampirkan oleh anod dan katod di sisi lain [3,4]. Prinsip kerja sel fuel adalah menukarkan hidrogen menjadi elektrik apabila: (1) Atom hidrogen (dari sumber fuel) bersentuhan dengan lapisan pemangkin anod negatif, kemudian ia berpecah menjadi proton dan elektron. (2). Proton yang dihasilkan akan terus melalui elektrolit, sementara, (3) elektron pula menghasilkan elektrik semasa melalui litar luar. (4). Elektron dikembalikan daripada litar ke sisi positif lapisan elektrolit, di mana ia terikat dan bergabung dengan molekul oksigen. (5). Rajah 1 menunjukkan penghasilan air dan haba dalam lapisan pemangkin katod positif [7]. Lima kategori sel fuel yang dikembangkan dalam penyelidikan, sel fuel membran elektrolit polimer (PEMFC), sel fuel oksida pepejal (SOFC), sel fuel alkali (AFC), sel fuel asid fosforik (PAFC) dan sel fuel karbonat cair (MCFC) [8]. Diantara kesemua jenis sel fuel, PEMFC adalah salah satu jenis sel fuel yang paling baik dan selamat terutama untuk aplikasi dalam pengangkutan dan penjanaan tenaga mudah alih [9].



Rajah 1 Gambaran sel fuel berfungsi [7]

Selain daripada kelebihan PEMFC sebagai alternatif sumber tenaga, namun, masih banyak halangan yang perlu ditangani sebelum PEMFC dapat dilaksanakan dan merupakan pilihan yang tepat untuk pasaran yang ada. Terdapat tiga cabaran utama yang biasa berlaku untuk setiap

aplikasi sel fuel seperti bekalan ketulen hidrogen dengan ketulen tinggi, peningkatan kos sistem, dan pelbagai masalah teknologi. Pada masa ini, PEMFC digunakan secara meluas dalam penyelidikan dan demonstrasi bagi mengatasi masalah kos yang tinggi, ketahanan, dan kebolehpercayaan yang merupakan faktor halangan penggunaan sel fuel secara komersial dan meluas [10].

Ketahanan setiap komponen pada lapisan PEMFC banyak dipengaruhi oleh pelbagai faktor luaran berbanding faktor dalaman. Antara faktor luaran yang mempengaruhi kekuatan komponen adalah seperti keadaan sewaktu operasi. Selain itu, faktor luaran lain adalah seperti: kelembapan udara (RH), suhu, voltan sel dan sebagainya, keadaan persekitaran (permulaan hidup), mod operasi (permulaan, menyahhidup dan potensi kitaran), input (dibenarkan dari sumber fuel atau komponen) dan reka bentuk komponen [11]. Ketahanan adalah salah satu masalah utama yang mesti dipertimbangkan untuk mengkomersialkan PEMFC untuk aplikasi statik dan automotif termasuk kos dan penyimpanan hidrogen [10, 11].

Kegagalan mekanikal PEMFC boleh terhasil dari dalam atau luar, seperti reka bentuk, susunan pemasangan, bahan penurunan, keadaan operasi, bahan cemar, dan kekotoran. Kegagalan mekanikal tidak dapat dielakkan tetapi dapat dikurangkan dengan pemahaman keseluruhan mengenai mekanisme kegagalan. Kertas kerja ini direka untuk meningkatkan pemahaman tentang pencetus yang menyebabkan kegagalan mekanikal dan perhatian yang lebih mendalam terhadap perkembangan dan pendekatan teknologi ini. Sumbangan utama akan dibentangkan, dan peluang untuk penyelidikan masa depan akan dibincangkan.

1.1 PEMFC

PEMFC adalah sejenis sel fuel pertukaran proton yang mengambil namanya dari membran khas polimer yang digunakan sebagai elektrolit. Komponen sel biasa dalam lapisan PEMFC merangkumi: membran pertukaran ion, lapisan sokongan berliang konduktif elektrik, elektromangkin (elektrod) yang berada di antara permukaan lapisan sokongan dan membran, sel penghubung dan plat aliran yang menghantar fuel dan oksigen ke tapak reaktif melalui saluran medan aliran dan menyambungkan sel secara elektrik [14].

PEMFC adalah teknologi yang menjamin kerana mempunyai banyak kelebihan termasuk:

ketumpatan kuasa yang tinggi, suhu operasi yang rendah, pelepasan buangan yang rendah, operasi yang stabil, permulaan yang mudah dan penutupan yang cepat [12,13,16]. PEMFC kini mulai mendapat perhatian sebagai sumber tenaga yang boleh diperbaharui kerana mempunyai beberapa kelebihan, seperti kecekapan setinggi 60% bahkan dapat mencapai 80% [7,17] dan boleh mengurangkan pencemaran > 90% [18,19,20]. Oleh itu, dengan semua kelebihan yang dimiliki oleh PEMFC, ini menjadikan ia sebagai pilihan utama sumber tenaga untuk diterapkan ke bidang pengangkutan, penjanaan dan aplikasi mudah alih [20,21]. PEMFC mempunyai kelebihan jenis sel fuel yang lain, seperti beroperasi pada suhu rendah 60-80 °C dan boleh dihidupkan dengan cepat agar sesuai untuk aplikasi automotif. Namun, ini tidak bermaksud bahawa kelebihan PEMFC ini boleh digunakan secara meluas. Penggunaannya yang meluas masih dibatasi oleh kos pembuatan, ketahanan yang rendah, dan kebolehpercayaan yang tinggi [24].

1.2 Komponen- Komponen PEMFC

PEMFC diperbuat daripada beberapa lapisan bahan yang berbeza, MEA adalah jantung PEMFC yang merangkumi membran, lapisan resapan gas, dan lapisan pemangkin. Komponen lain yang digunakan untuk memasukkan MEA dalam timbunan unit adalah gasket yang berfungsi sebagai pengedap untuk mengelakkan kebocoran. Plat dwikutub (BPP) dengan saluran gas dan bahan fuel, serta pengumpul arus, biasanya diperbuat daripada tembaga kerana mempunyai kebolehaliran yang tinggi dan ketahanan kakisan yang tinggi. Selain itu, terdapat juga plat akhir yang berfungsi sebagai struktur sokongan PEMFC. Walau bagaimanapun, komponen dalam lapisan PEMFC ditentukan oleh kebolehpercayaan prestasi dan struktur. Oleh itu, sesuai dengan kebolehpercayaan prestasi dan struktur, terdapat dua had kekuatan, iaitu had untuk kekuatan prestasi dan had untuk kekuatan bahan [25].

2.0 KEGAGALAN MEKANIKAL DALAM PEMFC

Kegagalan mekanikal boleh didefinisikan sebagai perubahan saiz ukuran, bentuk, atau struktur benda, mesin, atau bahagian mesin itu sendiri yang menjejaskan fungsi mesin [26]. Kegagalan mekanikal adalah disebabkan oleh daya luaran dalam bahan. Jika daya melebihi kekuatan hasil bahan, ia boleh menjadi punca kerosakan (cacat, retak atau pecah menjadi kepingan). Daya yang berlaku boleh menjadi tegangan, mampatan atau hentaman untuk jangka masa pendek atau panjang pada suhu dan kelembapan yang berbeza.

Proses merancang komponen atau struktur sering dinilai supaya dapat meminimumkan kemungkinan kegagalan dalam produk. Kegagalan dalam bahan

adalah subjek yang kompleks yang hanya dapat ditangani dengan patah tulang atau fenomena lain yang berkaitan. Oleh itu, penting untuk memahami perbezaan fungsi mekanikal seperti tekanan, kemerosotan, perubahan bentuk, kakisan, kehausan [27] dan pelbagai jenis degradasi komponen PEMFC yang boleh menyebabkan kegagalan mekanikal. penurunan fungsi pada komponen utama.

2.1 Plat Dwikutub

Secara keseluruhan bahan plat dwikutub dibahagikan kepada logam dan bahan berasaskan karbon. Pada mulanya plat bipolar berasaskan karbon, terutamanya grafit berkepadatan tinggi, menguasai aktiviti penyelidikan dan pembangunan dan aplikasi lain [28]. Keperluan ciri plat dwikutub adalah cabaran bagi setiap kelas bahan dan tidak sesuai dengan ciri profil dengan tepat. Oleh itu, penyelidikan mengenai bahan, reka bentuk, dan menghasilkan plat dwikutub untuk aplikasi PEMFC adalah isu penting bagi saintis dan jurutera yang ingin mencapai PEMFC yang sesuai untuk dikomersialkan secara global.

Grafit berkepadatan tinggi biasanya digunakan untuk pembuatan plat dwikutub, di mana bahan tersebut mempunyai kekonduksian haba yang tinggi, ketahanan kakisan yang tinggi, kestabilan dan ketersediaan kimia [29]. Grafit selalu menjadi penanda aras dalam pembuatan plat dwikutub dan selalu dibandingkan dengan bahan lain, walaupun struktur molekulnya menjadikannya mempunyai sifat mekanikal yang lemah, kos pengeluaran yang tinggi dan kesukaran dalam proses pembuatan [26–28].

Selain bahan logam grafit yang mempunyai keadaan seperti kekonduksian elektrik yang tinggi, pembentukan dan mudah dibentuk, dan sifat mekanikal yang baik dapat dianggap sebagai plat dwikutub [33]. Titanium adalah salah satu logam yang mempunyai rintangan kakisan yang sangat baik, rintangan awal yang rendah, kekuatan mekanikal yang baik, dan ringan, jadi ia kini dianggap sebagai bahan plat bipolar terbaik untuk sel bahan api membran elektrolit proton [30–32].

Kegagalan yang berlaku dalam plat dwikutub sel fuel boleh terjadi sama ada didalam komponen elektrik atau mekanikal [37]. Komponen akan beroperasi mengikut parameter operasi seperti: suhu, kelembapan, dan laju aliran. Di luar parameter operasi yang dianggap selamat untuk sistem, kemerosotan beberapa komponen mungkin berlaku, malah menyebabkan kegagalan dalam unit sel fuel [38]. Punca kegagalan dalam plat dwikutub sel fuel menyebabkan kegagalan mekanikal berlaku kerana kakisan atau kekeruhan yang disebabkan oleh hidrogen. Oleh kerana air dalam sistem berada dalam keadaan operasi yang mempunyai 3.4 – 5.6 pH, sudah tentu keadaan ini memerlukan bahan yang boleh menyesuaikan diri dengan keadaan operasi [35].

2.2 Pengaratan

Sebagai alternatif kepada plat dwikutub, logam mempunyai kelebihan berbanding bahan berasaskan grafit. Terutama untuk aplikasi pengangkutan plat dwikutub logam lebih tahan terhadap kejutan dan getaran mekanikal yang boleh menyebabkan keretakan dan kebocoran gas tindakbalas [38]. Cunningham et.al membentangkan data yang menunjukkan bahawa kekonduksian elektrik plat dwikutub dapat mencapai 1000 kali ganda daripada komposit [39]. Di samping itu, kemampuan pembuatan kos rendah juga ditunjukkan yang meningkatkan daya saingnya dalam pasar sel fuel [40]. Kelemahan logam adalah ia tidak tahan terhadap pH dan suhu operasi sel fuel, masalah rintangan plat logam boleh diminimumkan dengan salutan [41].

Pengendalian permukaan pada plat dwikutub keluli tahan karat dengan elektrokimia adalah disyorkan yang berfungsi untuk meningkatkan rintangan kakisan dan meminimumkan pembentukan salutan oksida yang boleh meningkatkan rintangan sentuhan semasa operasi [36-40]. Li et al. dengan kaedah pemendapan wap fizikal (PVD) salutan tahan kakisan dan konduktif tinggi yang merupakan satu lagi teknik pengubahsuaian permukaan yang dicadangkan sebagai penyelesaian kepada rintangan plat dwikutub terhadap kakisan [44]. Rawatan khas logam adalah penting untuk meningkatkan ketahanannya terhadap kakisan yang boleh berlaku dalam komponen PEMFC.

2.3 Kerapuhan

Pada masa ini banyak plat dwikutub logam yang digunakan adalah titanium dan keluli tahan karat [45]. kedua-duanya mempunyai kekonduksian elektrik yang baik, tetapi mempunyai ketahanan kakisan yang lemah. Untuk meningkatkan ketahanan terhadap kakisan boleh ditambahkan lapisan [46]. Buat masa ini, bahan plat dwikutub terbaik adalah titanium berbanding grafit, kerana ia mempunyai kekuatan mekanikal yang baik dan mempunyai ketahanan kakisan yang sangat baik selain ketahanan awal yang baik. Tetapi penyerapan hidrogen dalam bahan dapat mewujudkan kerapuhan dan risiko retak di bawah tekanan [47].

Kerosakan hidrogen adalah proses di mana logam seperti keluli menjadi rapuh dan patah tulang kerana pendedahan dan penyebaran hidrogen seterusnya masuk ke dalam logam [48], [49]. Gas hidrogen pada suhu tinggi ($>80^{\circ}\text{C}$) dapat menjadikan titanium sangat berisiko disebabkan oleh pembentukan hibrid pada sempadan butiran [35], [36]. Hidrogen bertekanan tinggi yang dihasilkan daripada tindak balas pengurangan proton pada katod meningkatkan penyerapan hidrogen dalam plat dwikutub [50], kesan ini boleh menyebabkan kegagalan mekanikal plat dwikutub.

Strategi untuk melindungi atau meminimumkan kegagalan pada BPP adalah dengan menggunakan

grafit titanium-grafit, yang digunakan untuk mencegah potensi elektrolisis tinggi [51]. Penyelidikan semasa untuk BPP lebih daripada penggunaan logam (contoh. Titanium dan keluli tahan karat) dengan salutan logam yang berharga atau dengan aloi berasaskan nitrida untuk meningkatkan ketahanan kakisan dalam sistem. Kini, untuk mengurangkan daya tahan antara sendi dan meningkatkan keterlihatan, plat titanium yang dilapisi logam berharga seperti Au [52] dan Pt [53] telah digunakan.

Walau bagaimanapun, pengubahsuaian permukaan dengan penggunaan logam yang berharga meningkatkan kos dan tidak konsisten dengan tujuan pengurangan kos. Sebagai alternatif untuk penggantian Pt, niobium dapat digunakan kerana mempunyai kelakuan asid yang stabil dan mempunyai sifat perlindungan korosi yang unggul [51–53]. Ini bermakna bahawa kos proses salutan dan kawalan kualiti di plat dwikutub untuk meminimumkan kos dan daya tahan sangat mencabar. Untuk ketahanan logam tahan yang digunakan sebagai lapisan untuk mengurangkan penggunaan hidrogen, dan pendekatan jangka panjang yang paling terjamin adalah dengan salutan titanium pada kos karbon rendah, konduktif rendah dan kekonduksian rendah. Untuk mengelakkan kerapuhan hidrogen, nitrida adalah kaedah terbaik untuk digunakan [32, 54].

2.4 Pemasangan Elektrolit Membran

Fungsi membran pada PEMFC adalah memisahkan produk tindak balas (oksigen dan hidrogen), pengangkutan proton, sokongan katod, dan lapisan pemangkin anod [50]. Membran yang mesti digunakan dalam PEMFC harus mempunyai ketahanan fenomena gas silang, kekonduksian proton, kestabilan terma, dan kekuatan mekanikal yang baik [53,54]. Bahan yang digunakan secara meluas untuk membran adalah polieter keton tersulfonasi (sPEEK), asid perfluorosulfonik, dan poli benzimidazole (PBI) polieter sulfon (PES) [60]. Selain itu, bahan lain yang menepati ciri-ciri tersebut ialah seperti komposit kerana harganya lebih murah daripada membran asid perfluorosulfonik (PFSA). Nafion sebagai membran fluorosulfonik telah banyak digunakan dalam PEMFC kerana ia adalah teknologi yang paling lama digunakan sehingga kebanyakan kerosakan awal dan masalah yang wujud telah dikurangkan atau dikurangkan oleh pembangunan selanjutnya [56,57]. Ballard, 3M, DuPont, Dow Chemical, Asahi Glass, Asahi Chemical dan W.L. Gore baru-baru ini membangunkan struktur membran dan fluorida berasaskan ionomer asid sulfonikkarbon.

Kegagalan mekanikal yang terjadi pada membran dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) kategori: kimia / elektrokimia, termal dan mekanikal [63]. Kegagalan mekanikal adalah penyebab utama kehilangan fluorida, yang merupakan penentu secara langsung kadar degradasi karbon perfluoro membran [64]. Semasa operasi sel fuel yang sedang

berjalan, jika tidak ada kelembapan [11], ketahanan kelembapan rendah [60–63], kelembapan (RH) dan kitaran [69] dan perubahan dimensi umum berlaku boleh membahayakan ketahanan mekanikal. Kegagalan mekanikal membran dinyatakan oleh Huang et.al berlaku secara rawak, kerosakan yang tiba-tiba berlaku di sekitarnya dan hal tersebut tidak dapat diperbaiki [70].

Kerosakan atau kegagalan tidak dapat dielakkan tetapi dapat diminimumkan terlebih dahulu untuk mengelakkan atau mengurangkan struktur aliran dan MEA harus dirancang dengan teliti untuk mencegah pengeringan membran [71], terutamanya dalam tindak balas separa bahagian [72]. Gore Fuel Cell Technologies mengembangkan membran bertetulang dengan e-PTFE (politetrafluoroetilena) yang menunjukkan jangka hayat yang lebih lama daripada yang tidak terjejas oleh ketebalan yang sama. Kemudian perlindungan membran tepi di kawasan pengedap juga diperlukan, terutama di bawah beban mekanikal tinggi yang diperlukan untuk menampung tekanan tinggi [73]. Pengurangan haba oleh titik panas atau haba yang berlebihan harus dielakkan dengan pengurusan haba yang betul. Kedua-dua faktor tersebut harus diambil kira kerana dapat mempercepat kerosakan pada membran [71–73].

Pada bahagian akhir, matlamat jangka panjang untuk meningkatkan ketahanan membran adalah dengan membina dan menggunakan salutan logam baru dengan ketahanan kakisan dan pemangkin yang lebih baik yang menghasilkan kurang hidrogen peroksida.

2.5 Lapisan Resapan Gas

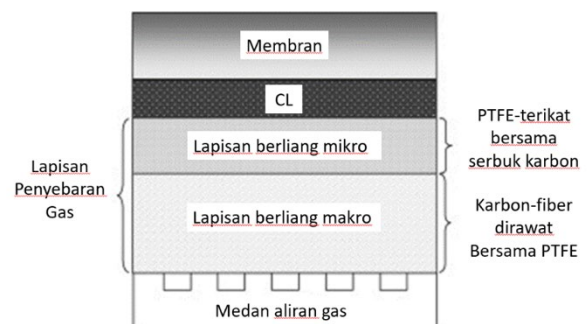
Lapisan resapan gas (GDL) umumnya merupakan lapisan 2 lapis porselin berasaskan karbon (Rajah 2), termasuk kertas gentian karbon amorfus atau substrat serat karbon yang ditutup dengan lapisan nipis mikropori (MPL) yang terdiri daripada serbuk hitam karbon dan bahan hidrofobik. Watanabe [77] pada mulanya mengimplicasikan pengumpulan MPL ke substrat berliang mikro (MPS) dari peningkatan sel ke sel, penambahan lapisan secara beransur-ansur ini berkembang menjadi teknologi sel fuel standard, yang membolehkan peningkatan prestasi [74,75], lebih rendah daripada kesan MPS [77,78] dan meningkatkan daya tahan semasa operasi [81].

Punca kegagalan mekanikal dalam GDL disebabkan oleh isu mekanikal yang disebabkan oleh tiga fenomena utama yang berlaku dalam tindakan PEMFC. Fenomena yang berlaku disebabkan oleh mampatan, pembekuan pencairan dan hakisan. Pelbagai fenomena boleh berlaku akibat pemampatan yang boleh menyebabkan kerosakan mekanikal GDL, seperti GDL fizikal yang secara tidak langsung mempengaruhi sifat fizikalnya [80,81] terutamanya kesan orientasi gentian pada jangka hayat semua komponen sel. MPS, yang sebahagian besarnya membentuk gentian karbon, mungkin mengalami pergeseran dalam susunan gentian atau

kerosakan besar, mengubah keseluruhan morfologi struktur dengan kemungkinan kebolehtelapan untuk cecair dan pengangkutan semasa [82,83]. Selain itu, lapisan karbon PTFE (politetrafluoroetilena) juga mungkin teruk [85]. Tekanan yang disebabkan oleh mampatan dan pengagihan yang tidak seragam juga memberi kesan pada struktur MPL, dengan pembentukan keretakan di permukaan. Di samping itu, anjakan gentian karbon yang disebabkan oleh tekanan dalam boleh menyebabkan kerosakan setempat pada membran ionomer: bergantung pada tekanan yang dikenakan dan sifat GDL itu sendiri.

Kesan beku pada MEA menghasilkan pengembangan setempat dan menyebabkan masalah mekanikal. Fakta mudah ini boleh menyebabkan permulaan sel fuel menjadi lebih rumit. Fenomena ini berulang kali diketahui mengubah campuran mekanikal komponen sel fuel, di kawasan itu, sambungan elektrik dalam prestasi lokasi yang lebih buruk [83–85]. Rintangan GDL ditentukan oleh struktur MPS, menurut Jeffrey Mishler *et al.*, jenis kertas GDL lebih sensitif daripada felts atau kain [89]. Kegagalan mekanikal yang disebabkan oleh hakisan dapat diperolehi oleh aliran gas dan cecair air. Pengedaran cecair gas secara berterusan yang berlaku di dalam plat dwikutub bersentuhan dengan permukaan MPS, menjadikan pecahan yang mungkin berlaku terutamanya dengan kehadiran cecair. Sebagai tambahan kepada kesan mampatan tempatan, fenomena geseran ini boleh menyebabkan hakisan bahan berasaskan karbon [88,89]. Kehilangan hakisan dan hidrofobik boleh berlaku selepas 100 - 150 jam operasi [91].

Menurut Borup *et al.*, untuk meningkatkan kestabilan oksidatif dan kestabilan elektrooksidatif GDL, mengesyorkan gentian grafit semasa penyediaan GDL. Selain itu, penggunaan PTFE yang lebih tinggi dapat memanfaatkan kemampuan pengurusan air di GDL [92]. Owejan *et al.* mendapati peningkatan 25% kadar penurunan awal / berhenti 5 in pada 1.2A cm⁻² dengan menggabungkan bahan karbon grafit Pureback dalam MPL [93]. Rawatan di atas adalah salah satu strategi yang digunakan untuk meminimumkan kegagalan mekanikal yang berlaku di GDL mengubah suai sifat sesuatu bahan.



Rajah 2 Gambar rajah skematik GDL untuk PEMFC [78].

2.6 Lapisan Pemangkin

Lapisan pemangkin terdiri daripada lapisan yang disusun yang terdiri daripada permukaan karbon tinggi yang mengandungi aloi Pt atau zarah Pt berskala nano dan dituang ionomer. Pemangkin nipis dengan ketebalan ~ 15 μm adalah penting untuk memudahkan tindak balas pantas pemangkin bagi elektron, gas, air dan proton [91,92]. Kegagalan mekanikal pada lapisan pemangkin disebabkan oleh pengurangan kestabilan dan struktur, penyebab utama isu ini yang mengakibatkan kegagalan mekanikal dalam pemangkin adalah kakisan karbon.

Strategi untuk mengurangkan kegagalan pemangkin dan meningkatkan ketahanannya adalah dengan dengan mematuhi syarat pengendalian dan sistem pada bahan. Borup et.al meningkatkan ketahanan pemangkin menggunakan lapisan karbonat karbonat dan mengurangkan RH [96]. Karbon menyokong kakisan kerana ia menyebabkan gas yang lemah dan berkurangan dengan meningkatkan pengekalan air anod melalui pengubahsuaian PTFE dan/atau ionomer, Knights *et al.* menambah komponen penghalang air tambahan seperti grafit, dan menggunakan pemangkin yang lebih baik untuk elektrolisis [68]. Di samping itu, proses grafitasi pada karbon juga dapat meningkatkan pengoksidaan dan ketahanan kakisan yang boleh berlaku dalam karbon [94,95].

2.7 Gasket

Kestabilan dan aspek keselamatan untuk prestasi dalam PEMFC sangat penting untuk penjagaan. Walau bagaimanapun, kegagalan gasket boleh menyebabkan kebocoran gas dan seperti yang berlaku dalam proses pemasangan atau dalam pengendalian awal PEMFC. Gasket adalah salah satu bahagian yang paling diyakini dan boleh dipercayai yang digunakan untuk mengekalkan prestasi pemacu sel fuel [57,81,94]. Ketebalan gasket dapat dikurangkan bersama dengan kajian jangka panjang, yang meningkatkan kekuatan mampatan GDL dan mengurangkan keliangan GDL dan meningkatkan daya tahan pengangkutan reaktan [99]. Gasket juga dapat membocorkan pindah [96, 97]. Tekanan mampatan yang tinggi boleh menyebabkan pecah dan berubah bentuk gasket.

Kegagalan berlaku di gasket berlaku secara beransur-ansur bermula dengan proses pemasangan dan juga disebabkan oleh kitaran haba. Tekanan haba [102] bersama dengan sifat asid PEM [103] atau kerapuhan hidrogen boleh menyebabkan perubahan / kerosakan pada bahan gasket. Pengurangan ketahanan bahan terhadap gasket yang merosakkan sifat mekaniknya boleh menyebabkan kebocoran, kehilangan mampatan, pindah silang gas dan akhirnya mempercepat proses kegagalan prestasi di PEMFC.

Oleh itu, cara bagi mengatasi kegagalan gasket berlaku terlalu cepat adalah melalui pemilihan bahan

yang sesuai dengan sifat dan ciri yang diperlukan oleh gasket.

2.8 Pemungut Arus

Pemungut arus bersentuhan langsung dengan lapisan pemangkin dan merupakan salah satu komponen kritikal sistem PEMFC, yang mempunyai fungsi yang mempengaruhi prestasi sistem. Pada dasarnya, kemerosotan fungsi pemungut arus boleh dikategorikan kepada kerosakan kimia dan kemerosotan mekanikal [104]. Kemerosotan kimia boleh menyebabkan hakisan, sementara kerosakan mekanikal yang boleh mengakibatkan kegagalan mekanikal mungkin disebabkan oleh mampatan dan kakisan akibat hidroterapi.

Pada masa ini mencapai prestasi tinggi dan ketahanan jangka panjang sebagai contoh titanium dan keluli tahan karat sering disalut dengan logam yang berharga seperti emas atau platinum. Penggunaan lapisan nitrida dalam pengumpul arus dengan pendekatan nitrida plasma adalah prospek yang baik dengan kos rendah, kekonduksian tinggi, dan anti karat. Untuk meningkatkan ketahanan pengumpul arus terhadap kakisan dan pengoksidaan untuk menukar spesies oksigen aktif ke [105] gas oksigen dengan lapisan MPL (lapisan pelindung mikro). Proses MPL adalah seperti proses konvensional, lapisan-lapisan mikropor pada lapisan resapan gas. Oleh itu, menjadi berkesan untuk memanjangkan jangka hayat walaupun setelah 1000 jam ujian.

2.9 Plat Hujung

Kajian mengenai kegagalan komponen utama atau daya tahan PEMFC membincangkan lebih lanjut, MEA, GDL, pemangkin, plat dwikutub, dan gasket manakala untuk plat hujung data dalam penulisan-penulisan adalah terhad. Biasanya, plat hujung adalah diperbuat daripada bahan polimer atau logam [106].

Plat hujung mungkin mempunyai masalah yang sama dengan komponen utama yang lain, tetapi tidak mempengaruhi prestasi unit. Masalah utama dengan plat hujung mungkin lebih jelas setelah bentuk dan kakisan yang berpanjangan. Untuk mengatasi atau meminimumkannya selain memaksimumkan tekanan dari baut ke komponen, perlu juga dipertimbangkan dari segi pemilihan bahan komponen.

3.0 ISU-ISU STRATEGIK

Halangan utama untuk pengkomersialan sel fuel yang dilihat begitu perlahan adalah dihalang oleh pengenalan tentang ekonomi hidrogen. Terutama kerana kebolehpercayaan yang tidak mencukupi dan kos yang tinggi. Pengkomersialan teknologi sel fuel mendekati kenyataan, teknik dan protokol pengujian yang kukuh diperlukan untuk memastikan

ketahanan dan kebolehpercayaan prestasi dalam keadaan pengoperasian. Saat ini, sel fuel berada dalam fasa pengembangan kritis, kerana ia menghampiri objektif teknikal dan mula muncul di pasaran untuk pelepasan hijau, tenaga pegun, dan elektrik untuk projek gas. Kajian ekonomi tenaga menunjukkan laluan kepada kemampuhan komersial, dalam keadaan tertentu, tetapi skala waktu untuk penggunaan hidrogen dan sel fuel yang banyak tidak dapat dipastikan.

PEMFC telah menunjukkan prestasi yang stabil di bawah beban yang tetap selama puluhan ribu jam, tetapi prestasinya masih dalam keadaan yang diinginkan, seperti kitaran termal, kitaran berhenti / mula, beban berubah-ubah, dan pengendalian yang kasar, tidak memenuhi kriteria prestasi jangka panjang yang dapat diterima. Pengembangan teknik pengukuran dan peningkatan teknik ujian baru untuk meningkatkan pemahaman mengenai proses pengurangan kegagalan mekanikal dan memaklumkan pereka bentuk dan pengguna mengenai penyediaan alat diagnostik dan praktis yang terbaik.

Memahami kemerosotan prestasi bahan yang mengakibatkan kegagalan komponen mekanikal adalah penting untuk sel fuel dapat beroperasi dengan lebih cekap dan boleh dipercayai. Ujian yang baik adalah melalui pendekatan pengujian kejuruteraan dengan melihat dari segi kepantasan proses kerosakan yang disebabkan oleh kegagalan pada komponen-komponen mekanikal. Ujian ini digunakan untuk mencari hubungan antara sifat bahan dan prestasi sel fuel dari semasa ke semasa. Oleh itu perancangan pelaksanaan jadual dan pengumpulan data pengujian kejuruteraan pada kompone-komponen mekanikal PEMFC adalah penting untuk mendapatkan seberapa banyak mungkin maklumat daripada matriks ujian kecil.

4.0 RUMUSAN DAN KESIMPULAN

Sel fuel mempunyai sistem yang kompleks dengan antara permukaan setiap lapisan yang saling berkaitan, keadaan kerja mempunyai peranan penting dalam menghubungkan setiap komponen sel dan dapat dilihat dari penurunan prestasi.

Mengintegrasikan proses reka bentuk komponen antara komponen sel tunggal adalah salah satu cabaran utama dalam pembentukan sel fuel, kerana semua input berasal dari pelbagai disiplin atau industri besar. Reka bentuk struktur komponen adalah bahagian yang paling penting, seperti ketebalan optimum membran dan GDL [107]. Beberapa teknologi dan bahan baru telah berkembang pesat, seperti membran bersuhu tinggi dan fabrikasi membran berbilang-bilang lapisan, seperti lapisan panas, pemutus dan celup [108]. Pada masa ini, membran sel fuel adalah tempat ia menggandakan kekonduksian proton maksimum dan memperpanjang jangka hayat operasi [109]. Semua

ini dijangka dapat meminimumkan kerosakan / kegagalan prestasi komponen dan sudah tentu meningkatkan ketahanan komponen sel fuel.

Kegagalan mekanikal untuk mekanisme di PEMFC adalah cabaran utama teknologi untuk memastikan prestasi dan ketahanan yang berkesan. Kertas kerja ini memberikan butiran tentang komponen utama PEMFC dan kemerosotan dalam fungsi yang mengakibatkan kegagalan mekanikal.

Penghargaan

Penulis menyampaikan penghargaan kepada Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia atas sokongan kewangan yang diberikan melalui projek HICOE-2023-005.

Konflik Kepentingan

Para penulis mengesahkan bahawa tiada sebarang konflik kepentingan dalam penerbitan artikel ini.

References

- [1] D. Stolten, B. Emonts, F. Jülich GmbH, W.-V. Verlag GmbH, and C. KGaA. 2013. Fuel Cell Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology. *Platin. Met. Rev.* 57(1): 66–69. Doi: 10.1002/9783527650248.
- [2] N. Sulaiman, M. A. Hannan, A. Mohamed, E. H. Majlan, and W. R. Wan Daud. 2015. A Review on Energy Management System for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle: Issues and Challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52: 802–814. Doi: 10.1016/j.rser.2015.07.132.
- [3] X. Chen et al. 2021. Performance Study on a Stepped Flow Field Design for Bipolar Plate in PEMFC. *Energy Reports.* 7: 336–347. Doi: 10.1016/j.egy.2021.01.003.
- [4] F. C. Lee et al. 2022. Alternative Architectures and Materials for PEMFC Gas Diffusion Layers: A Review and Outlook. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 166(May). Doi: 10.1016/j.rser.2022.112640.
- [5] S. T. Ravenkar and P. Majumdar. 2016. *Fuel Cells Principles Design and Analysis*, 1st ed. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [6] L. Wang, A. Husar, T. Zhou, and H. Liu. 2003. A Parametric Study of PEM Fuel Cell Performances. *Int. J. Hydrogen Energy.* 28(11): 1263–1272. Doi: 10.1016/S0360-3199(02)00284-7.
- [7] Greenspec. 2023. Fuel Cells: Heat and Electricity.
- [8] Y. Wang, K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho, and X. C. Adroher. 2011. A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research. *Appl. Energy.* 88(4): 981–1007. Doi: 10.1016/j.apenergy.2010.09.030.
- [9] B. G. Pollet, A. A. Franco, H. Su, H. Liang, and S. Pasupathi. 2016. *Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. 10.1016/B978-1-78242-363-8.00001-3.
- [10] J. H. Wee. 2007. Applications of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11(8): 1720–1738. Doi: 10.1016/j.rser.2006.01.005.
- [11] R. Borup et al. 2007. Scientific Aspects of Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability and Degradation. *Chem Rev.* 107(10): 3904–51. Doi: 10.1021/cr050182l.
- [12] Felix N. Büchi Minoru Inaba Thomas J. Schmidt. 2009. *Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability*. 10.1007/978-0-387-85536-3.

- [13] M. H. S. Bargal, M. A. A. Abdelkareem, Q. Tao, J. Li, J. Shi, and Y. Wang. 2020. Liquid Cooling Techniques in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks: A Detailed Survey. *Alexandria Eng. J.* 59(2): 635–655. Doi: 10.1016/j.aej.2020.02.005.
- [14] D. Garraín, Y. Lechón, and C. de la Rúa. 2011. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC) in Automotive Applications: Environmental Relevance of the Manufacturing Stage. *Smart Grid Renew. Energy.* 02(02): 68–74. Doi: 10.4236/sgre.2011.22009.
- [15] S. Kaytakoglu and L. Akyalçin. 2007. Optimization of Parametric Performance of a PEMFC. *Int. J. Hydrogen Energy.* 32(17): 4418–4423. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2007.06.025.
- [16] D. Yang, Y. Tan, B. Li, P. Ming, Q. Xiao, and C. Zhang. 2022. A Review of the Transition Region of Membrane Electrode Assembly of Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Design, Degradation, and Mitigation. *Membranes (Basel).* 12(3). Doi: 10.3390/membranes12030306.
- [17] W. L. Gellett, D. C. Dunwoody, and J. Leddy. 2020. Window Gasketing for Self Humidified H₂/O₂ and H₂/Air Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells Fed Dry Gases. *J. Electroanal. Chem.* 875. Doi: 10.1016/j.jelechem.2020.114695.
- [18] S. Shamim, K. Sudhakar, B. Choudhary, and J. Anwar. 2015. A Review on Recent Advances in Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Materials, Technology and Applications. 6: 89–100.
- [19] M. Gabbasa, K. Sopian, A. Fudholi, and N. Asim. 2014. A Review of Unitized Regenerative Fuel Cell Stack: Material, Design and Research Achievements. *Int. J. Hydrogen Energy.* 39(31): 17765–17778. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.08.121.
- [20] D. Papageorgopoulos. 2010. An Introduction to the 2010 Fuel Cell Pre-Solicitation Workshop. Lakewood, Colorado.
- [21] Z. Liu, L. Sun, W. Zhu, Y. Li, H. Pei, and L. Xing. 2023. Investigation of the Current Density's Non-uniform Distribution in Dead-end PEMFC with Multi-zone Measurement Methods. *Energy Convers. Manag.* 20(October). Doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100478.
- [22] B. Liu, M. Y. Wei, W. Zhang, and C. W. Wu. 2016. Effect of Impact Acceleration on Clamping Force Design of Fuel Cell Stack. 303: 118–125. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.10.061.
- [23] O. Z. Sharaf and M. F. Orhan. 2014. An Overview of Fuel Cell Technology: Fundamentals and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 32: 810–853. Doi: 10.1016/j.rser.2014.01.012.
- [24] A. Vasilyev, J. Andrews, L. M. Jackson, S. J. Dunnett, and B. Davies. 2017. Component-based Modelling of PEM Fuel Cells with Bond Graphs. *Int. J. Hydrogen Energy.* 42(49): 29406–29421. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.09.004.
- [25] L. F. Liu, B. Liu, and C. W. Wu. 2017. Reliability Prediction of Large Fuel Cell Stack based on Structure Stress Analysis. *J. Power Sources.* 363: 95–102. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.06.041.
- [26] H. Nakajima, T. Konomi, and T. Kitahara. 2007. Direct Water Balance Analysis on a Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC): Effects of Hydrophobic Treatment and Micro-porous Layer Addition to the Gas Diffusion Layer of a PEFC on Its Performance during a Simulated Start-up Operation. 171: 457–463. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.06.004.
- [27] E. Wang, P. Shi, and C. Du. 2008. Treatment and Characterization of Gas Diffusion Layers by Sucrose Carbonization for PEMFC Applications. 10: 555–558. Doi: 10.1016/j.elecom.2008.01.031.
- [28] S. Karimi, N. Fraser, B. Roberts, and F. R. Foulkes. 2012. A Review of Metallic Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Materials and Fabrication Methods. *Adv. Mater. Sci. Eng.* Doi: 10.1155/2012/828070.
- [29] J. Liu, L. Zhang, B. Yuan, Y. Zhang, Z. Yang, and J. Huang. 2024. Design and Development of Coating for Metallic Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC): A Review. *Mater. Des.* September: 113338. Doi: 10.1016/j.matdes.2024.113338.
- [30] R. Taherian. 2014. A Review of Composite and Metallic Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Materials, Fabrication, and Material Selection. *J. Power Sources.* 265: 370–390. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.04.081.
- [31] O. A. Alo, I. O. Otunniyi, H. C. Pienaar, and S. E. Iyuke. 2017. Materials for Bipolar Plates in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell: Performance Criteria and Current Benchmarks. *Procedia Manuf.* 7: 395–401. Doi: 10.1016/j.promfg.2016.12.011.
- [32] E. Alizadeh, M. M. Barzegari, M. Momenifar, M. Ghadimi, and S. H. M. Saadat. 2016. Investigation of Contact Pressure Distribution over the Active Area of PEM Fuel Cell Stack. *Int. J. Hydrogen Energy.* 41(4): 3062–3071. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.057.
- [33] L. Peng, P. Yi, and X. Lai. 2014. Design and Manufacturing of stainless Steel Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Int. J. Hydrogen Energy.* 39(36): 21127–21153. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.08.113.
- [34] R. A. Antunes, M. C. L. Oliveira, G. Ett, and V. Ett. 2010. Corrosion of Metal Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review. *Int. J. Hydrogen Energy.* 35(8): 3632–3647. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.059.
- [35] M. Langemann, D. L. Fritz, M. Müller, and D. Stolten. 2015. Validation and Characterization of Suitable Materials for Bipolar Plates in PEM Water Electrolysis. *Int. J. Hydrogen Energy.* 40(35): 11385–11391. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.04.155.
- [36] T. J. Toops et al. 2014. Evaluation of Nitrided Titanium Separator Plates for Proton Exchange Membrane Electrolyzer Cells. *J. Power Sources.* 272: 954–960. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.09.016.
- [37] J. Wang. 2017. System Integration, Durability and Reliability of Fuel Cells: Challenges and Solutions. *Appl. Energy.* 189: 460–479. Doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.083.
- [38] J. Wu, Q. Liu, and H. Fang. 2006. Toward the Optimization of Operating Conditions for Hydrogen Polymer Electrolyte Fuel Cells. *J. Power Sources.* 156(2): 388–399. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.05.091.
- [39] B. D. Cunningham. 2007. Development of Compression Moldable Polymer Composite Bipolar Plates for Fuel Cells.
- [40] H. Tawfik, Y. Hung, and D. Mahajan. 2007. Metal Bipolar Plates for PEM Fuel Cell-A Review. *J. Power Sources.* 163(2): 755–767. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.09.088.
- [41] S. A. Gamboa, J. G. Gonzalez-Rodriguez, E. Valenzuela, B. Campillo, P. J. Sebastian, and A. Reyes-Rojas. 2006. Evaluation of the Corrosion Resistance of Ni-Co-B Coatings in Simulated PEMFC Environment. *Electrochim. Acta.* 51(19): 4045–4051. Doi: 10.1016/j.electacta.2005.11.021.
- [42] M. C. Li, C. L. Zeng, S. Z. Luo, J. N. Shen, H. C. Lin, and C. N. Cao. 2003. Electrochemical Corrosion Characteristics of Type 316 Stainless Steel in Simulated Anode Environment for PEMFC. *Electrochim. Acta.* 48(12): 1735–1741. Doi: 10.1016/S0013-4686(03)00113-0.
- [43] S.-J. Lee, C.-H. Huang, J.-J. Lai, and Y.-P. Chen. 2004. Corrosion-resistant Component for PEM Fuel Cells. *J. Power Sources.* 131(1–2): 162–168. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.01.008.
- [44] M. Li, S. Luo, C. Zeng, J. Shen, H. Lin, and C. Cao. 2004. Corrosion Behavior of TiN Coated Type 316 Stainless Steel in Simulated PEMFC Environments. *Corros. Sci.* 46(6): 1369–1380. Doi: 10.1016/S0010-938X(03)00187-2.
- [45] M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, and D. Stolten. 2013. A Comprehensive Review on PEM Water Electrolysis. *Int. J. Hydrogen Energy.* 38(12): 4901–4934. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.
- [46] A. Nabovati, J. Hinebaugh, A. Bazylak, and C. H. Amon. 2014. Effect of Porosity Heterogeneity on the Permeability and Tortuosity of Gas Diffusion Layers in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *J. Power Sources.* 248: 83–90. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.061.
- [47] C. L. Briant, Z. F. Wang, and N. Chollacoop. 2002. Hydrogen Embrittlement of Commercial Purity Titanium. *Corros. Sci.* 44(8): 1875–1888. Doi: 10.1016/S0010-938X(01)00159-7.

- [48] M. B. Djukic, V. S. Zeravcic, G. Bakic, A. Sedmak, and B. Rajicic. 2014. Hydrogen Embrittlement of Low Carbon Structural Steel. *Procedia Mater. Sci.* 3: 1167–1172. Doi: 10.1016/j.mspro.2014.06.190.
- [49] M. B. Djukic, G. M. Bakic, V. S. Zeravcic, A. Sedmak, and B. Rajicic. 2016. Hydrogen Embrittlement of Industrial Components: Prediction, Prevention, and Models. *Corrosion*. 72(7): 943–961. Doi: 10.5006/1958.
- [50] Q. Feng et al. 2017. A Review of Proton Exchange Membrane Water Electrolysis on Degradation Mechanisms and Mitigation Strategies. *J. Power Sources*. 366: 33–55. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.09.006.
- [51] K. E. Ayers et al. 2010. Research Advances Towards Low Cost, High Efficiency PEM Electrolysis. *ECS Trans.* 33(1): 3–15.
- [52] H.-Y. Jung, S.-Y. Huang, P. Ganesan, and B. N. Popov. 2009. Performance of Gold-coated Titanium Bipolar Plates in Unitized Regenerative Fuel Cell Operation. *J. Power Sources*. 194(2): 972–975. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.06.030.
- [53] A. S. Gago et al. 2016. Protective Coatings on Stainless Steel Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzers. *J. Power Sources*. 307: 815–825. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.12.071.
- [54] R. Günzel, S. Mändl, E. Richter, A. Liu, B. Y. Tang, and P. K. Chu. 1999. Corrosion Protection of Titanium by Deposition of Niobium Thin Films. *Surf. Coatings Technol.* 116–119: 1107–1110. Doi: 10.1016/S0257-8972(99)00321-7.
- [55] N. Alonso-Falleiros and S. Wolyneć. 1998. Effect of Niobium on Corrosion Resistance to Sulfuric Acid of 430 Ferritic Stainless Steel. *Mater. Res.* 1(1): 39–45. Doi: 10.1590/S1516-14391998000100007.
- [56] P. Lettenmeier et al. 2016. Nanosized IrOx-Ir Catalyst with Relevant Activity for Anodes of Proton Exchange Membrane Electrolysis Produced by a Cost-Effective Procedure. *Angew. Chemie - Int. Ed.* 55(2): 742–746. Doi: 10.1002/anie.201507626.
- [57] T. Nishikiori, T. Nohira, and Y. Ito. 2001. Hydrogen Impermeability of TiN Films and Its Dependence on Nitrogen Concentration at High Temperatures. *J. Electrochem. Soc.* 148(1): E52. Doi: 10.1149/1.1344551.
- [58] H. Ito, T. Maeda, A. Nakano, and H. Takenaka. 2011. Properties of Nafion Membranes under PEM Water Electrolysis Conditions. *Int. J. Hydrogen Energy*. 36(17): 10527–10540. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.127.
- [59] A. U. Yakubu et al. 2024. A Comprehensive Review of Primary Cooling Techniques and Thermal Management Strategies for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells PEMFC. *Heliyon*. 10(19). Doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e38556.
- [60] C. A. Linkous, H. R. Anderson, R. W. Kopitzke, and G. L. Nelson. 1998. Development of New Proton Exchange Membrane Electrolytes for Water Electrolysis at Higher Temperatures. *Int. J. Hydrogen Energy*. 23(7): 525–529. Doi: 10.1016/S0360-3199(97)00113-4.
- [61] Y. Li, X. Sun, and Y. Feng. 2017. Hydroxide Self-Feeding High-Temperature Alkaline Direct Formate Fuel Cells. *ChemSusChem*. 10(10): 2135–2139. Doi: 10.1002/cssc.201700228.
- [62] Y. Li, Y. Feng, X. Sun, and Y. He. 2017. A Sodium-Ion-Conducting Direct Formate Fuel Cell: Generating Electricity and Producing Base. *Angew. Chemie - Int. Ed.* 56(21): 5734–5737. Doi: 10.1002/anie.201701816.
- [63] A. Collier, H. Wang, X. Zi Yuan, J. Zhang, and D. P. Wilkinson. 2006. Degradation of Polymer Electrolyte Membranes. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31(13): 1838–1854. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.05.006.
- [64] A. Pozio, R. F. Silva, M. De Francesco, and L. Giorgi. 2003. Nafion Degradation in PEMFCs from End Plate Iron Contamination. *Electrochim. Acta*. 48(11): 1543–1549. Doi: 10.1016/S0013-4686(03)00026-4.
- [65] E. Endoh, S. Terazono, H. Widjaja, and Y. Takimoto. 2004. Degradation Study of MEA for PEMFCs under Low Humidity Conditions. *Electrochem. Solid-State Lett.* 7(7): A209. Doi: 10.1149/1.1739314.
- [66] J. Yu, T. Matsuura, Y. Yoshikawa, M. N. Islam, and M. Hori. 2005. In Situ Analysis of Performance Degradation of a PEMFC under Nonsaturated Humidification. *Electrochem. Solid-State Lett.* 8(3): A156. Doi: 10.1149/1.1854781.
- [67] J. Yu, T. Matsuura, Y. Yoshikawa, M. N. Islam, and M. Hori. 2005. Lifetime Behavior of a PEM Fuel Cell with Low Humidification of Feed Stream. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 7(2): 373–378. Doi: 10.1039/B412600A.
- [68] S. D. Knights, K. M. Colbow, J. St-Pierre, and D. P. Wilkinson. 2004. Aging Mechanisms and Lifetime of PEFC and DMFC. *J. Power Sources*. 127(1–2): 127–134. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2003.09.033.
- [69] M. S. Wilson, F. H. Garzon, K. E. Sickafus, and S. Gottesfeld. 1993. Surface Area Loss of Supported Platinum in Polymer Electrolyte Fuel Cells. *J. Electrochem. Soc.* 140(10): 2872–2877. Doi: 10.1149/1.2220925.
- [70] K. Kowalczyk, T. Spychaj, and G. Krala. 2015. High-Build Alkyd Urethane Coating Materials With a Partially Solvolyzed Waste Polyurethane Foam. *Polym. Eng. Sci.* 55(9): 2174–2183. Doi: 10.1002/pen.
- [71] W. M. Yan, S. C. Mei, C. Y. Soong, Z. S. Liu, and D. Song. 2006. Experimental Study on the Performance of PEM Fuel Cells with Interdigitated Flow Channels. *J. Power Sources*. 160(1): 116–122. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.01.063.
- [72] J. Wu, B. Yi, M. Hou, Z. Hou, and H. Zhang. 2004. Influence of Catalyst Layer Structure on the Current Distribution of PEMFCs. *Electrochem. Solid-State Lett.* 7(6): A151. Doi: 10.1149/1.1718195.
- [73] J. Cargnelli and B. Evers. 2013. Recent Advances in PEM Water Electrolysis. *Int. Work. Durab. Degrad. Issues PEM Electrolysis Cells its Components*.
- [74] U. Babic, M. Suermann, F. N. Büchi, L. Gubler, and T. J. Schmidt. 2017. Critical Review—Identifying Critical Gaps for Polymer Electrolyte Water Electrolysis Development. *J. Electrochem. Soc.* 164(4): F387–F399. Doi: 10.1149/2.1441704jes.
- [75] K. Vivekananda, G. N. Arka, and S. K. Sahoo. 2014. Finite Element Analysis and Process Parameters Optimization of Ultrasonic Vibration Assisted Turning (UVT). *Procedia Mater. Sci.* 6(6): 1906–1914. Doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.223.
- [76] V. A. Sethuraman, J. W. Weidner, A. T. Haug, S. Motupally, and L. V. Protsailo. 2008. Hydrogen Peroxide Formation Rates in a PEMFC Anode and Cathode. *J. Electrochem. Soc.* 155(1): B50. Doi: 10.1149/1.2801980.
- [77] M. Watanabe, M. Tomikawa, and S. Motoo. 1985. Preparation of a High Performance Gas Diffusion Electrode. *J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem.* 182(1): 193–196.
- [78] S. Park, J. W. Lee, and B. N. Popov. 2006. Effect of Carbon Loading in Microporous Layer on PEM Fuel Cell Performance. *J. Power Sources*. 163(1): 357–363. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.09.020.
- [79] G. H. Yoon et al. 2009. Novel hydrophobic Coating Process for Gas Diffusion Layer in PEMFCs. *J. Electroceramics*. 23(2–4): 110–115. Doi: 10.1007/s10832-007-9321-1.
- [80] Z. Qi and A. Kaufman. 2002. Improvement of Water Management by a Microporous Sublayer for PEM Fuel Cells. *J. Power Sources*. 109(1): 38–46. Doi: 10.1016/S0378-7753(02)00058-7.
- [81] S. Kundu, K. Karan, M. Fowler, L. C. Simon, B. Peppley, and E. Halliop. 2008. Influence of Micro-porous Layer and Operating Conditions on the Fluoride Release Rate and Degradation of PEMFC Membrane Electrode Assemblies. *J. Power Sources*. 179(2): 693–699. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.11.117.
- [82] S. R. Dhanushkodi, F. Capitanio, T. Biggs, and W. Mérida. 2015. Understanding Flexural, Mechanical and Physico-chemical Properties of Gas Diffusion Layers for Polymer Membrane Fuel Cell and Electrolyzer Systems. *Int. J. Hydrogen Energy*. 40(46): 16846–16859. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.033.
- [83] V. Radhakrishnan and P. Haridoss. 2010. Effect of Cyclic Compression on Structure and Properties of a Gas Diffusion Layer used in PEM fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*. 35(20): 11107–11118. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.07.009.

- [84] A. Bazyalak, D. Sinton, Z. S. Liu, and N. Djilali. 2007. Effect of Compression on Liquid Water Transport and Microstructure of PEMFC Gas Diffusion Layers. *J. Power Sources*. 163(2): 784–792. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.09.045.
- [85] Y. H. Lai, P. A. Rapaport, C. Ji, and V. Kumar. 2008. Channel Intrusion of Gas Diffusion Media and the Effect on Fuel Cell Performance. *J. Power Sources*. 184(1): 120–128. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.12.065.
- [86] C. Lee and W. Mérida. 2007. Gas Diffusion Layer Durability under Steady-state and Freezing Conditions. *J. Power Sources*. 164(1): 141–153. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.09.092.
- [87] Q. Yan, H. Toghiani, Y. W. Lee, K. Liang, and H. Causey. 2006. Effect of Sub-freezing Temperatures on a PEM Fuel Cell Performance, Startup and Fuel Cell Components. *J. Power Sources*. 160(2): 1242–1250. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.02.075.
- [88] S.-Y. Lee et al. 2010. Performance Degradation and Microstructure Changes in Freeze-thaw Cycling for PEMFC MEAs with Various Initial Microstructures. *Int. J. Hydrogen Energy*. 35(23): 12888–12896. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.070.
- [89] J. Mishler, Y. Wang, R. Lujan, R. Mukundan, and R. L. Borup. 2013. An Experimental Study of Polymer Electrolyte Fuel Cell Operation at Sub-Freezing Temperatures. *J. Electrochem. Soc.* 160(6): F514–F521. Doi: 10.1149/2.051306jes.
- [90] S. Latorrata, P. G. Stampino, C. Cristiani, and G. Dotelli. 2015. Development of an Optimal Gas Diffusion Medium for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells and Assessment of Its Degradation Mechanism. *Int. J. Hydrogen Energy*. 40(42): 14596–14608. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.100.
- [91] J. H. Chun, D. H. Jo, S. G. Kim, S. H. Park, C. H. Lee, and S. H. Kim. 2012. Improvement of the Mechanical Durability of Micro Porous Layer in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell by Elimination of Surface Cracks. *Renew. Energy*. 48: 35–41. Doi: 10.1016/j.renene.2012.04.011.
- [92] R. Borup, J. Davey, D. Wood, F. Garzon, and M. Inbody. 2005. VII.1.3 PEM Fuel Cell Durability.
- [93] J. E. Owejan, P. T. Yu, and R. Makharia. 2007. Mitigation of Carbon Corrosion in Microporous Layers in PEM Fuel Cells," *ECS Trans.* 11(1): 1049–1057. Doi: 10.1149/ma2007-02/9/593.
- [94] S. Zhang et al. 2009. A Review of Accelerated Stress Tests of MEA durability in PEM Fuel Cells. *Int. J. Hydrogen Energy*. 34(1): 388–404. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.10.012.
- [95] J. Wu et al. 2008. A Review of PEM Fuel Cell Durability: Degradation Mechanisms and Mitigation Strategies. *J. Power Sources*. 184(1): 104–119. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.06.006.
- [96] R. L. Borup, J. R. Davey, F. H. Garzon, D. L. Wood, and M. A. Inbody. 2006. PEM Fuel Cell Electrocatalyst Durability Measurements. *J. Power Sources*. 163(1): 76–81. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.03.009.
- [97] S. Ye, M. Hall, H. Cao, and P. He. 2006. Degradation Resistant Cathodes in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *ECS Trans.* 3(1): 657–666. Doi: 10.1149/1.2356186.
- [98] C. He, S. Desai, G. Brown, and S. Bollepalli. 2005. PEM Fuel Cell Catalysts: Cost, Performance, and Durability. *Electrochem. Soc. Interface*. 41–44.
- [99] S. J. C. Cleghorn et al. 2006. A Polymer Electrolyte Fuel Cell Life Test: 3 Years of Continuous Operation. *J. Power Sources*. 158(1): 446–454. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.09.062.
- [100] A. Husar, M. Serra, and C. Kunusch. 2007. Description of Gasket Failure in a 7 Cell PEMFC stack. *J. Power Sources*. 169(1): 85–91. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.01.078.
- [101] Y. Al-okbi, M. J. Jweeg, M. A. Atiya, and R. Al-Dujele. 2024. Design, Analysis and Development of a Proton Exchange Membrane in Fuel Cell. *J. Eng. Res.* Doi: 10.1016/j.jer.2024.07.019.
- [102] D. Yang, J. Ma, Q. Zhang, B. Li, P. Ming, and C. Zhang. 2020. Accelerated Test of Silicone Rubbers Exposing to PEMFC Environment. *Prog. Nat. Sci. Mater. Int.* 30(6): 882–889. Doi: 10.1016/j.pnsc.2020.10.008.
- [103] M. Schulze, T. Knöri, A. Schneider, and E. Gülzow. 2004. Degradation of Sealings for PEFC Test Cells during Fuel Cell Operation. *J. Power Sources*. 127(1–2): 222–229. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2003.09.017.
- [104] J. Park, H. Oh, T. Ha, Y. Il, and K. Min. 2015. A Review of the Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Durability and Degradation. *Appl. Energy*. 155: 866–880. Doi: 10.1016/j.apenergy.2015.06.068.
- [105] C.-Y. Liu, L.-H. Hu, and C.-C. Sung. 2012. Micro-protective Layer for lifetime Extension of solid Polymer Electrolyte Water Electrolysis. *J. Power Sources*. 207: 81–85. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.01.045.
- [106] S. Oldewurtel, A. Wagner, C. Imdahl, S. Zellmer, and K. Dröder. 2024. ScienceDirect Disassembly Technologies for PEMFC Stacks in Heavy-duty Applications. 127: 218–223.
- [107] A. Arvay et al. 2012. Characterization Techniques for Gas Diffusion Layers for Proton Exchange Membrane Fuel Cells - A Review. *J. Power Sources*. 213: 317–337. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.04.026.
- [108] C. M. Branco, S. Sharma, M. M. De Camargo Forte, and R. Steinberger-Wilckens. 2016. New Approaches Towards Novel Composite and Multilayer Membranes for Intermediate Temperature-Polymer Electrolyte Fuel Cells and Direct Methanol Fuel Cells. *J. Power Sources*. 316: 139–159. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.03.052.
- [109] L. Zhang, S. R. Chae, Z. Hendren, J. S. Park, and M. R. Wiesner. 2012. Recent Advances in Proton Exchange Membranes for Fuel Cell Applications. *Chem. Eng. J.* 204–205: 87–97. Doi: 10.1016/j.cej.2012.07.103.