

رفع كفاءة نموذج منظومة التوربين الغازي بدمجه مع خلية الوقود

ذات الغشاء البروتوني

قدري محمد الفلال¹،* عبد اللطيف بشير بن موسى²

^{1,2} قسم، الهندسة البحرية، جامعة طرابلس، طرابلس، ليبيا.

* البريد الإلكتروني: gadriglale1700@gmail.com

الملخص

إن ارتفاع درجة حرارة الهواء صيفاً من ضمن الأسباب المؤدية لهبوط القدرة الإنتاجية وبالتالي انخفاض الكفاءة لمنظومة التوربين الغازي لذا فالباحثون يسعون لإيجاد حلول فعالة للتقليل من هذه المشكلة. في هذه الورقة تم تقديم حل واعد للتقليل من هذا التأثير على أداء المنظومة الغازية وذلك بدمج منظومة التوربين الغازي مع منظومة خلية الوقود ذات الغشاء البروتوني ليشكلا معاً نظام هجين أطلق عليه اسم (منظومة أوياء). حيث تم تصميم نموذج لمنظومة توربين غازي هجين مع خلية وقود ذات الغشاء البروتوني باستخدام البرنامج العالمي (Aspen Plus). كما تم الاعتماد على منهجية التحليل الرياضي لحل المعادلات الرياضية والهندسية باستخدام برنامج المحاكاة (EES). هذه المنهجيات مجتمعة تسهم في تحقيق تقييم شامل وموثوق للنظام الهجين المقترح. تهدف هذه الدراسة إلى تعزيز كفاءة منظومة التوربينات الغازية، خصوصاً في ظل ارتفاع درجات حرارة المحيط. حيث أظهرت النتائج زيادة ملحوظة في الكفاءة، حيث ارتفعت من 37.97% إلى 43.06% عند درجة حرارة محيط تبلغ 10 درجات مئوية (خلال فصل الشتاء)، ومن 31.98% إلى 40.33% عند درجة حرارة محيط 40 درجة مئوية (خلال فصل الصيف). يُعدّ هذا التحسن في الكفاءة، الذي يتراوح بين 5.09% في الشتاء و8.35% في الصيف، إنجازاً بارزاً يتماشى مع الأهداف المرجوة من منظومة أوياء.

الكلمات المفتاحية — خلية الوقود ذات الغشاء البروتوني، منظومة التوربين الغازي، الإصلاح البخاري، الهيدروجين.

Abstract

The rise in air temperature during summer is among the factors leading to a decline in productivity and, consequently, a decrease in the efficiency of gas turbine systems. Therefore, researchers are seeking effective solutions to mitigate this issue. This paper presents a promising solution to reduce this impact on the performance of gas systems by integrating a gas turbine system with a proton exchange membrane fuel cell, together

forming a hybrid system referred to as the "Oya System." A model for the hybrid gas turbine system combined with a proton exchange membrane fuel cell was designed using the global software Aspen Plus. Additionally, a mathematical analysis methodology was employed to solve the mathematical and engineering equations using the EES simulation program. These combined methodologies contribute to a comprehensive and reliable evaluation of the proposed hybrid system. The study aims to enhance the efficiency of gas turbine systems, especially in the context of rising ambient temperatures. The results demonstrated a significant increase in efficiency, from 37.97% to 43.06% at an ambient temperature of 10 degrees Celsius (during winter), and from 31.98% to 40.33% at an ambient temperature of 40 degrees Celsius (during summer). This improvement in efficiency, ranging from 5.09% in winter to 8.35% in summer, is a notable achievement that aligns with the objectives of the Oya System.

المقدمة

ان تحسين كفاءة وأداء الوحدات الغازية تعني وثوقيه عالية في الأداء وتكلفة إنتاج منخفضة والدراسات والبحوث مستمرة في مجال اقتصاديات الطاقة ومعالجة التلوث من خلال تحسين أداء محطات توليد الطاقة الكهربائية وخاصة المحطات الغازية والتي تتميز بطرح أكثر من 60% من الحرارة الى المحيط. إن محطات الكهرباء الغازية ذات الدورة البسيطة ليست فعالة حيث إن كفاءتها عند الاستخدام لا تتجاوز 35% وذلك لسببين رئيسيين أولهما أن أكثر من ثلثي طاقة التوربين تستخدم لتدوير الضاغط لغرض ضغط الهواء الى المقدار المطلوب لدورانه خلال التوربين والثلث الاخر من الطاقة الدورانية المتبقية هي التي تتحول الى طاقة كهربائية. وثانيهما إن غازات الاحتراق الساخنة (والتي تصل درجة حرارتها الى حدود 550) عند خروجها من التوربين الى المدخنة فإنها تطرح الى الجو الخارجي وهذا يعني فقدان كمية كبيرة من الطاقة الحرارية إلى المحيط الخارجي دون الاستعادة منها. تعتبر فكره استغلال غاز حرارة العادم الخارج من التوربينات الغازية واستخدامها في توليد الهيدروجين من الافكار الواعدة من الناحية البيئية والاقتصادية للأسباب متعددة منها ان الهيدروجين يعد وقودا نظيفا وبالتالي نساهم في الحفاظ على البيئة وتقليل الانبعاثات الكربونية ومن ناحية اخرى يمكن استخدام الهيدروجين المتولد في زيادة ورفع كفاءه محطات الغاز التوربينية. وقد بدأت الافكار حول استغلال الحرارة المهذرة من المحطات الحرارية التوربينية باستخدام جزء من غاز العادم في منتصف

القرن العشرين حيث ركزت البداية على استخدام هذه الحرارة لتوليد البخار وازداده توربينات اخرى ولكن كانت التطبيقات محدودة بسبب التكاليف العالية والتعقيدات الفنية وقلة الامكانيات والخبرات الا انه في بداية القرن الحادي عشر والذي شهد طفرة كبيرة بسبب يتم تشغيلها بالضغط الناتج عن البخار المتولد مما يساعد في توليد طاقة كهربائية إضافية تساهم في رفع الكفاءة الإجمالية لمحطه التوربينات [1]. ثم في أواخر القرن العشرين وتحديدا في السبعينات والثمانينات ومع تطور تكنولوجيا الطاقة المتجددة والبحث عن بدائل الوقود الاحفوري بدائل نظيفة مستمرة وبلا تلوث اي انبعاثات بيئية ضارة بدأ استخدام جزء من غاز العادم لإنتاج الهيدروجين ومع تقدم تكنولوجيا المعلومات ومجال الخلايا الكهروكيميائية عالية الحرارة ومنخفضة في الحرارة جعلت تقنيه انتاج الهيدروجين من الحرارة المهذرة أكثر كفاءه واقل تكلفة [2]. ورغم ذلك ما زالت هذه التقنيات لتوليد الهيدروجين مرتفعة وتواجهها بعض التحديات مثل التحديات التقنية والتي تتضمن تصميم مبادلات حرارية تعمل في درجات حرارة عالية وضغوط عالية وتطوير مواد قادرة على تحمل هذه الظروف وما زالت بعض الامكانيات في هذا المجال محدودة مع تطوير المواد والتقنيات الحديثة لجعل هذه المواد تتحمل ضغوط اعلى ودرجات حرارة أعلى بات الامل كبيرا في الاعتماد على هذه التقنيات في تحقيق الاستدامة في مجال الطاقة وبالتالي تحقيق الاستدامة في مجال البيئة [3]. ان الهيدروجين الذي يتم توليده يمكن ان يستخدم وقود نظيف للسيارات وبالتالي يساهم ايضا بزيادة الاستدامة البيئية وتقليل الانبعاثات الغازية الضارة كذلك يمكن استخدامه في محطات توليد الكهرباء عن طريق الاحتراق المباشر او في خلايا الوقود. كثيرا ما نسمع مصطلح "توربين" عند الحديث عن توليد الطاقة. يُعرف التوربين بأنه جهاز يُستخدم لتحويل الطاقة الحركية لبعض السوائل، مثل الماء أو البخار أو الهواء أو الغازات الناتجة عن الاحتراق، إلى طاقة ميكانيكية على هيئة حركة دورانية. تعمل هذه الحركة على تدوير التوربين نفسه، حيث يمر السائل عبر قنوات مزودة بشفرات متصلة بجزء يُسمى الدوار. نتيجة لهذا التدفق، تتولد قوة دفع تُسبب دوران الدوار، مما يؤدي إلى دوران التوربين ككل. [4] وقد بدأ التطور هذه المنظومات للرفع من كفاءتها لأن من مشاكل التوربين الغازي هو قلة كفاءتها الى ان وصل التطور الى دمجها مع خلايا الوقود. وخلية الوقود هي جهاز بسيط نسبيا. فهي تحتوي على قطبين كهربائيين: الأنود القطب الموجب والكاثود القطب السالب. تحدث جميع التفاعلات الكيماوية عند القطبين. وللإسراع

من التفاعل الكيميائي، يستخدم أحد المحفزات في تغطية القطبين الكهربائيين. كما تحتوي خلية الوقود أيضا على الكتر وليت لحمل الجسيمات من أحد القطبين إلى القطب الآخر.

تصنف خلايا الوقود إلى نوعين رئيسيين بناءً على درجة الحرارة:

- خلايا الوقود ذات درجة الحرارة المنخفضة:

- خلية الوقود ذات الغشاء البروتوني (PEMFC).

- خلية وقود الحمضية الفسفورية (PAFC).

- خلية وقود الميثانول المباشر (DMFC).

- خلايا الوقود ذات درجة الحرارة العالية:

- خلية وقود الأكسيد الصلب (SOFC).

- خلية وقود القلوية (AFC).

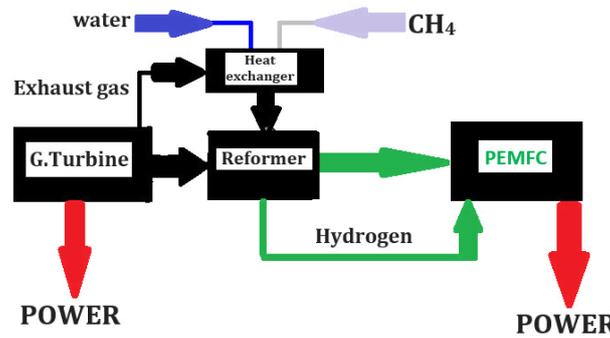
- خلايا وقود الكربون المذاب (MCFC).

وفي هذه الدراسة سيتم التركيز على خلية الوقود منخفضة الحرارة نوع خلية الوقود ذات الغشاء البروتوني (PEMFC) وتعتمد فكرة عملها في القطب الموجب ينقسم الهيدروجين إلى أيونات هيدروجين (بروتونات) وإلكترونات تعبر أيونات الهيدروجين الوسيط إلى القطب السالب بينما تسري الإلكترونات عبر دائرة خارجية لتولد الكهرباء وفي القطب السالب الأكسجين (من الهواء) يندمج مع إلكترونات و الهيدروجين مكونا الماء و تتميز هذه الخلايا بأنها تولد طاقة أكبر من أي خلية لها نفس الوزن والحجم وتعمل بدرجة حرارة اقل من 80 درجة مئوية تصل الى 100 درجة مئوية أي أنها تعمل بسرعة. هذه الميزات والاستجابة السريعة لتغير الطلب على الكهرباء هي التي تجعلها المرشح الأكبر للاستخدام في الآليات الكهربائية المختلفة مثل محركات الاحتراق الداخلي (internal combustion engines) التي تستخدم الديزل أو الجازولين كوقود. ويتميز الوسيط الصلب عن الوسيط السائل في بناء الخلايا حيث يكون أسهل في وصل القطبين الموجب والسالب والوسيط. لذا فان تكلفة تصنيعه أقل وأنه محصن ضد التآكل وهذا يزيد من عمر الخلية. إلا إن هناك شح في المنشورات العربية التي يتم فيها دمج منظومات التوربين الغازي مع خلايا الوقود ذات الغشاء البروتوني (PEMFC) والهدف من هذه الورقة هو دراسة تأثير وتحسين كفاءة منظومة التوربين الغازي من خلال

الدمج مع خلايا الوقود ذات الغشاء البروتوني (PEMFC). حيث تم تصميم نموذج لمنظومة التوربين الغازي والذي تتم معايرته وفقاً لظروف تشغيل ومعاملات أداء تم نشرها بالبحث ذات المرجع [5]. وكذلك تصميم ومعايرة نموذج لخلية الوقود ذات الغشاء البروتوني (PEMFC) وفقاً [6]. وبعد معايرة النموذجين والتأكد من دقتهما وفقاً لما هو منشور.

ومن بعد ذلك تم استغلال درجة الحرارة الكامنة في غاز العادم الخارج من التوربين الغازي لتسخين غاز الميثان والماء مبادلات حرارية وحقنهما في المصلح البخاري لإنتاج الهيدروجين.

وصف النظام المقترح (دورة أوبيا)



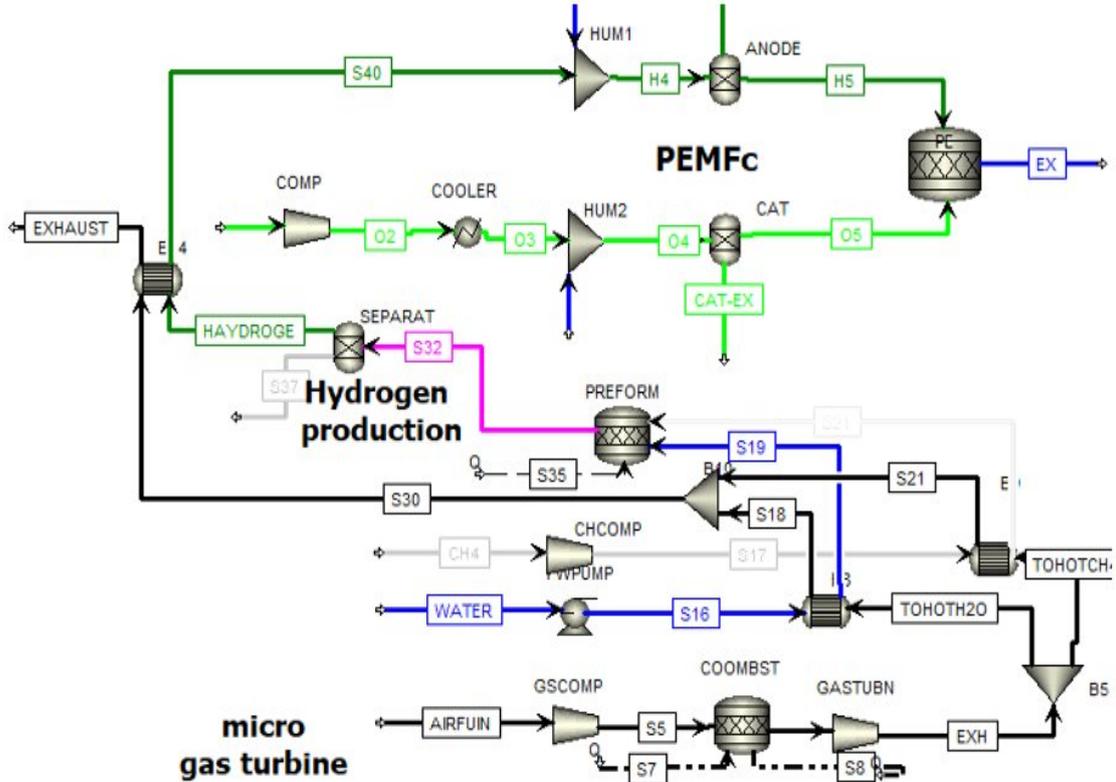
الشكل 1. مخطط صندوق يوضح مسار المحاكاة للدورة موضوع الدراسة

الشكل (1) يوضح المخطط العام للدورة المقترحة حيث تتميز عملية استخراج الطاقة من غاز العادم المغادر للتوربين الغازي بارتفاع درجة حرارته، مما يستدعي توجيهه إلى وحدتين من المبادلات الحرارية. في الوحدة الأولى، يتم تسخين الماء، بينما في الوحدة الثانية، يتم تسخين غاز الميثان حتى الوصول إلى أقصى درجة حرارة يمكن استخلاصها من غاز العادم، حيث تصل درجات حرارة غاز الميثان والماء إلى أكثر من 550 درجة مئوية.

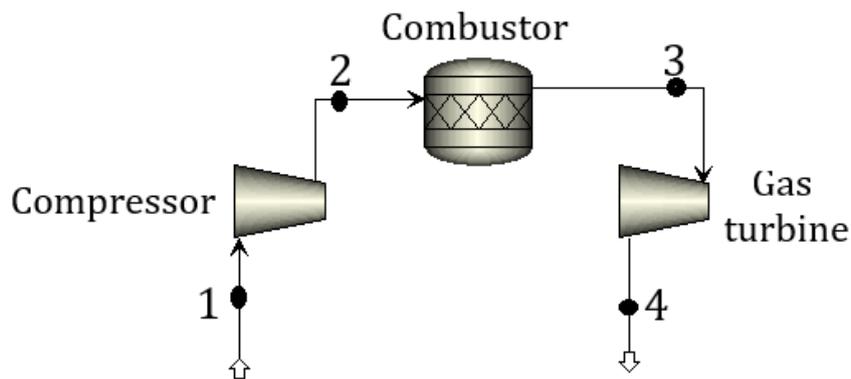
بعد ذلك، يتم توجيه غاز الميثان والماء المسخنين إلى مفاعل أو مصلح، حيث يحدث تفاعل بينهما بطريقة الإصلاح البخاري مما ينتج غاز الهيدروجين كأحد نواتج التفاعل. سيتم فصل غاز الهيدروجين عن بقية الغازات، مع التركيز على إنتاج الكمية المطلوبة لتلبية احتياجات خلية الوقود، وذلك لتفادي مشاكل تخزين الهيدروجين، وهي إحدى التحديات الرئيسية التي تسعى لمعالجتها في هذه الدراسة.

سيتم ضخ الهيدروجين المنتج إلى الأنود في خلية الوقود، بينما يتم استغلال الأكسجين المستخلص من الهواء الجوي ويتم ضخه إلى الكاثود. وبذلك، يتم تشغيل الخلية للحصول على الطاقة الكهربائية المطلوبة.

المحاكاة على برنامج Aspen Plus



الشكل 2. رسم تخطيطي لمنظومة أويا المقترحة حسب المحاكاة في برنامج Aspen Plus
التحليل الترموديناميكي لنموذج التوربين الغازي المصغر



الشكل 3. مخطط مكونات ومسار التدفق لمنظومة التوربين الغازي المصغر

الخط 1-2 يمثل انضغاطاً لا انعكاسياً كاظم للحرارة.

الخط 2-3 يمثل إمداد حراري في غرفة الاحتراق عند ثبوت الضغط.

الخط 3-4 يمثل تمدد لا انعكاسي كاظم للحرارة.

جدول (1) مدخلات المحاكاة لمنظومة نموذج التوربين الغازي المصغر والرموز المستخدمة بالنموذج الرياضي [5]

الرمز	المعلمة	القيمة	الوحدة
R	نسبة الانضغاط	3.6	
T3	درجة الحرارة عند مدخل التوربين	1117	K
η_{compGT}	كفاءة ضاغط الهواء	79.6	%
η_{GT}	كفاءة التوربين	84	%
η_{comb}	كفاءة الاحتراق	0.85	%
$\dot{m}_{air}(GT)$	معدل تدفق الهواء	0.3005	Kg/sec
$\dot{m}_f(GT)$	الوقود المستهلك	$10^{-3} \times 1.9582$	Kg/sec
\dot{m}	معدل التدفق للهواء والوقود عند مدخل الضاغط	0.302483	Kg/sec
T4	درجة حرارة العادم	873.272	K
LHV _{CH4}	المحتوى الحراري لغاز الميثان	45000	KJ/Kg

بالرجوع الى الشكل (3) وبالنظر الى النقطة (2)

$$\frac{T_2^-}{T_1} = (r)^{\frac{\gamma_{air}-1}{\gamma_{air}}} \quad (1)$$

$$\eta_{compGT} = \frac{T_2^- - T_1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

عند النقطة (3)

$$\frac{T_3}{T_4^-} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\gamma_{gas}-1}{\gamma_{gas}}} \quad (3)$$

$$\eta_{GT} = \frac{T_3^- - T_4}{T_3 - T_4^-} \quad (4)$$

نتحصل على الطاقة المعطاة من المعادلة

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} * C_{pair} * (T_3 - T_1) \quad (5)$$

وبحساب قدرة الضاغط من

$$\dot{W}_{compGT} = \dot{m} * C_{pair} * (T_3 - T_2) \quad (6)$$

وبحساب قدرة التوربين

$$\dot{W}_{GT} = \dot{m} * C_{pgas} * (T_3 - T_4) \quad (7)$$

نتحصل على صافي القدرة المستفاد منها

$$\dot{W}_{netGT} = \dot{W}_{compGT} - \dot{W}_{GT} \quad (8)$$

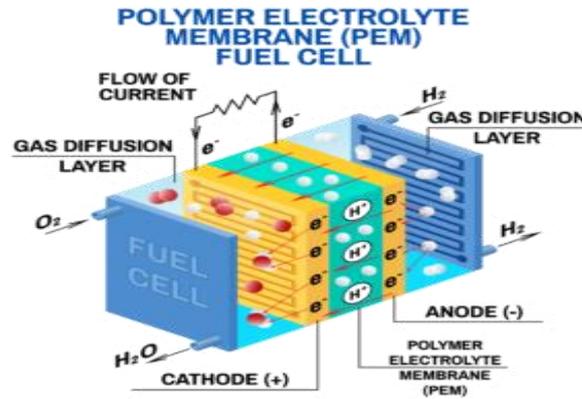
ومنها نجد ان كفاءة التوربين الغازي المصغر هي

$$\eta_{GT} = \frac{\dot{W}_{netGT}}{\dot{Q}_{in}} \quad (9)$$

النموذج الرياضي لخلية الغشاء البروتوني (PEMFC)

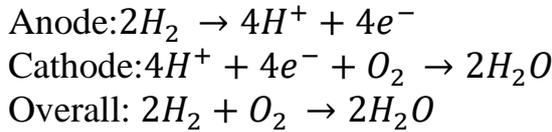
تم إنشاء نموذج خلية وقود غشاء بروتوني بأبعاد صفرية في هذه الدراسة. لتبسيط الحساب، تم وضع الافتراضات التالية:

1. النموذج في حالة مستقرة.
2. تم تجاهل درجة الحرارة الداخلية وخسائر الضغط في مدخل الأنود والكاثود، ودرجة حرارة وضغط الحزمة ثابتين.
3. يتكون الهواء من 79% نيتروجين و21% أكسجين. وتجاهل تأثير النيتروجين.
4. يتم اعتبار أكسدة الهيدروجين كعملية متساوية الحرارة.
5. تم تجاهل إشعاع الحرارة من الحزمة وانتقال الحرارة بين الحزمة والمحيط الخارجي للحزمة.



الشكل 4. خلية الوقود ذات الغشاء البروتوني (PEMFC)

تكون تفاعلات الهيدروجين والأكسجين في خلية الوقود عند الأنود والكاثود كما يلي:



سنعمل على حساب التيار الكهربائي النظري من خلال تدفق واستهلاك الهيدروجين والاكسجين

عند الأنود والكاثود:

$$n_{H_2 \text{ theory}} = \frac{N_{cell} * I}{2F} \quad (9)$$

$$n_{O_2 \text{ theory}} = \frac{N_{cell} * I}{4F} \quad (10)$$

$$n_{H_2O \text{ theory}} = \frac{N_{cell} * I}{2F} \quad (11)$$

الكتلة الفعلية للهيدروجين والهواء دائمًا ما تكون زائدة، وتُعطى الكتلة الفعلية لهما بالصيغة التالية:

$$n_{H_2 in} = \beta_{H_2} * H_2 theory = \frac{\beta_{H_2} * N_{cell} * I}{2F} \quad (12)$$

$$n_{O_2 in} = \beta_{O_2} * H_{O_2} theory = \frac{\beta_{O_2} * N_{cell} * I}{4F} \quad (13)$$

حيث β_{H_2} و β_{O_2} هما معاملان الزيادة للهيدروجين والهواء، على التوالي ويتم عادةً استخدام كثافة التيار للخلية كما يلي:

$$J = \frac{I}{A} \quad (14)$$

التحليل الكهروكيميائي لخلية الوقود (PEMFC)

تتكون خسارة الجهد في هذه الدراسة بشكل رئيسي من خسارة جهد التنشيط، خسارة المقاومة أوم، وخسارة جهد فقد التركيز. يمكن التعبير عن جهد الخلية كما يلي:

$$E_{cell} = E_{rev} - E_{oct} - E_{ohm} - E_{conc} \quad (15)$$

حيث E_{conc} ، E_{ohm} ، E_{oct} ، E_{rev} هي الجهد القابل للعكس الذي يمكن حسابه باستخدام معادلة بيرنست [7]، وخسائر جهد التنشيط، وخسائر جهد المقاومة الأومية، وخسائر جهد التركيز، على التوالي.

$$E_{rev} = 1.229 - 8.456 \times 10^{-4}(T - 298.15) - 4.3085 \times 10^{-5} T \ln(P_{H_2} * P_{O_2}^{0.5}) \quad (16)$$

حيث إن T هي درجة حرارة التشغيل لخلية الوقود (PEMFC) و P_{H_2} ، P_{O_2} هما الضغوط الجزئية للهيدروجين والأكسجين على التوالي. ويتم حساب فاقد جهد التنشيط بواسطة معادلة بوتلر-فولمر في المعادلة (17). نظرًا لأن أكسدة الهيدروجين هي عملية غير انعكاسية، ويمكن تبسيط المعادلة بتجاهل النصف الثاني من المعادلة وحساب خسائر التنشيط عند الكاثود (10) وعند الأنود (17) وفق الآتي [8].

$$J = J_0 \left(e^{\frac{\alpha n F \eta}{RT}} - e^{-\frac{(1-\alpha) n F \eta}{RT}} \right) \quad (17)$$

$$E_{act}^{ca} = \frac{RT}{4\alpha F} \ln \frac{J}{i_0^{ca}} \quad (18)$$

$$E_{act}^{an} = \frac{RT}{4\alpha F} \ln \frac{J}{i_0^{an}} \quad (19)$$

حيث إن R هو الثابت للغازات و F هو ثابت فارداي، و i_0^{ca} و i_0^{an} هما كثافة التيار الابتدائية للكاثود والأنود، على التوالي ومن تم يمكن حساب خسائر الجهد بسبب المقاومة الأومية [9] كما يلي:

$$E_{ohm} = \frac{I t_m}{\sigma_m} \quad (20)$$

حيث إن t_m هو سمك الغشاء و σ_m هي الموصلية الكهربائية للغشاء. يمكن حساب الموصلية الكهربائية للغشاء باستخدام المعادلة التجريبية التالية: [9]

$$\sigma_m = \sigma_{303k}(\lambda) \exp \left[1260 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (21)$$

$$\sigma_{303k} = 0.005193 \lambda - 0.00326 \quad \text{at } \lambda > 1 \quad (22)$$

حيث إن λ هو محتوى الماء والذي يمكن الحصول عليه باستخدام المعادلة (23).

$$\lambda = 0.0043 + 17.81a_w - a_w^2 + 36.0a_w^3 \quad \text{if } 0 < a_w \leq 1$$

$$\lambda = 14 + 1.4(a_w - 1) \quad \text{if } a_w \leq 3 \quad (23)$$

ويمكن حساب نشاط البخار a_w باستخدام المعادلة (24):

$$a_w = \frac{P_w}{P_{sat}} \quad (24)$$

حيث إن P_w هو الضغط الجزئي لبخار الماء، و P_{sat} هو ضغط بخار التشبع للماء عند درجة حرارة التشغيل والتي يعتمد عليها ويمكن حسابها باستخدام المعادلة التالية:

$$\log P_{sat} = -2.1797 + 0.02953T - 9.1837 \times 10^{-5}T^2 + 1.4454 \times 10^{-7}T^2 \quad (25)$$

نظراً لقيود نقل الكتلة وانخفاض التركيز عند كثافة التيار العالية تحدث بعض الانخفاضات في الجهد في كل من الأنود والكاثود. مع تقدم التفاعل، يتغير التركيز عند سطح مواقع التفاعل، مما سيخلق تدرج تركيز بين مواقع التفاعل والطور الكتلي. عند كثافات التيار العالية سيكون تدرج التركيز مرتفعاً جداً وسيحد من معدل التفاعلات يتم حساب جهد التركيز الزائد بواسطة المعادلة التي قدمها جوزيلا. [10]

$$E_{conc} = i \left(B_1 \frac{i}{i_{max}} \right)^{B_2} \quad (26)$$

حيث إن B_1 و B_2 و i_{max} هي ثوابت تعتمد على درجة حرارة التشغيل وتركيز المتفاعلات. ويتم

اعتبار B_2 و i_{max} قيمتين تساويان 2، بينما يتم حساب B_1 بواسطة المعادلة التجريبية التي قدمها

بوكروشكابان وآخرون [8]

إذا كان

$$\left(\frac{P_{O_2}}{0.1173} + P_{sat} \right) < 2$$

$$B_1 = (7.16 \times 10^{-4}T - 0.622 \left(\frac{P_{O_2}}{0.1173} + P_{sat} \right) + (-1.45 \times 10^{-3}T + 1.68)) \quad (27)$$

غير ذلك

$$B_1 = (8.66 \times 10^{-5}T - 0.068 \left(\frac{P_{O_2}}{0.1173} + P_{sat} \right) + (-1.45 \times 10^{-3}T + 0.54)) \quad (28)$$

وبذلك تم حساب جهد الخلية حسب المعادلة (15)

إن فكرة عمل خلية الوقود (PEMFC) تتكون بشكل أساسي من عمليات كسر روابط الهيدروجين والأكسجين وتشكيل روابط الهيدروكسيد وينتج عنها ماء ويتم تحويل ما يصل إلى 60% من الطاقة الناتجة عن هذه التفاعلات إلى طاقة كهربائية، بينما يتم تبديد الطاقة المتبقية في شكل حرارة ولذلك يعرف هذا التفاعل بالطارد للحرارة. ويمكننا حساب قدرة الخلية كالآتي:

$$W_{\text{cell}} = N I E_{\text{cell}} \quad (29)$$

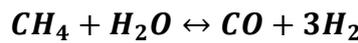
النموذج الرياضي لدورة أويا المقترحة:

الكفاءة الكلية لدورة أويا:

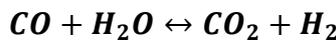
$$\eta_{\text{cycle}} = \frac{W_{\text{net(gt)}} + W_{\text{cell}} - W_{\text{pump}}}{(\dot{m}_{\text{f(GT)}} + \dot{m}_{\text{f(H}_2\text{prod)}}) * \text{LHV}_{\text{CH}_4}} \quad (30)$$

الإصلاح البخاري

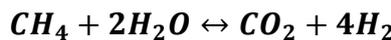
المصلح البخاري (SMR) والذي يمكن تعريفه على أنه عملية تحويل الميثان (الغاز الطبيعي) إلى غاز الهيدروجين وتمر هذه العملية باستخدام الوقود الأحفوري المصدر الرئيسي لإنتاج الهيدروجين ف ويمكن تطبيق عملية إصلاح بخاري غاز الميثان عند درجات حرارة مرتفعة تتراوح بين 500-1100 درجة مئوية حيث يمرر بخار الماء H₂O على الميثان في تفاعل ماص للحرارة ليعطي غاز الاصطناع وهو مزيج من غازي الهيدروجين وأول أكسيد الكربون [11] [12].



وفي مرحلة ثانية تتولد كميات إضافية من الهيدروجين نتيجة حدوث التفاعل الناشر للحرارة



يحدث خلال هذا التفاعل تجريد لذرة الأكسجين من بخار الماء المضاف من أجل أكسدة CO إلى CO₂ وعملية الأكسدة تزود المصلح بالطاقة ويمكن زيادة العملية بالطاقة من خلال احتراق جزء من غاز الميثان أو تزويد الملح بطاقة حرارية من مصدر خارجي. ومحصلة هذا التفاعل



التحقق من صحة نموذج التوربين الغازي المصغر

بعد إدخال البيانات في الجدول (1) وإجراء المحاكاة لنموذج التوربين الغازي المصغر، أظهرت النتائج توافقاً ملحوظاً مع المرجع الرئيسي للنموذج. حيث كانت النتائج قريبة جداً، إذ بلغ صافي القدرة للنموذج

30.82 كيلوات. هذا التوافق يعزز الثقة في دقة المحاكاة ويؤكد مصداقيتها وموثوقيتها العالية. [5]

التحقق من صحة نموذج PEMFC

في هذه الدراسة تم انشاء نموذج لخلية الوقود ذات الغشاء البروتوني باستخدام برنامج Aspen Plus. وللتأكد من صحة النموذج من خلال المقارنة مع البيانات التي أبلغ عنها وانغ وآخرون [13] وبالمقارنة يظهر منحنى الاستقطاب المحاكي والبيانات في الشكل (4) حيث يمكن ملاحظة أن المنحنى المحاكي في توافق جيد مع البيانات مما يدل على إن نموذج ذو مصداقية وتم سرد البيانات للخلية كما في جدول (2)

جدول (2) مدخلات المحاكاة لحزمة الخلايا [14][15]

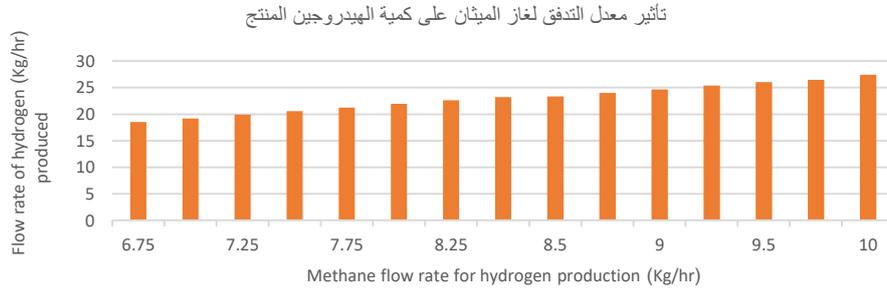
الرمز	المعلمة	القيمة	الوحدة
N	عدد الخلايا	400	
A	المساحة الفعالة في الخلية	200	Cm ²
t _m	سمك الغشاء	0.0127	Cm
t _a , t _c	سمك طبقة انتشار الغاز (GDL)	0.0003	M
i ₀ ^{ca}	كثافة التيار للأنود	2.5 × 10 ⁻³	A/cm ²
i ₀ ^{an}	كثافة التيار للكاثود	2 × 10 ⁻⁷	A/cm ²
F	ثابت فارادي	96.400	C.mol ⁻¹

النتائج والمناقشة:

تشير نتائج الدراسة إلى أن زيادة كثافة التيار تؤدي إلى تعزيز قدرة الخلايا والإنتاج الصافي لوحدات خلايا الوقود ذات غشاء البروتوني يرافق هذه الزيادة في الكثافة توليد حرارة متزايد داخل الحزمة، نظراً لأن التفاعل داخل الخلية يعد طارداً للحرارة مما قد يؤثر سلباً على إنتاجية الخلية كما سيتم توضيحه لاحقاً. لضمان التشغيل الفعال لحزمة PEMFC ، عادةً ما تكون كثافة التيار العاملة المستقرة أقل من الحد الأقصى للقدرة. يوضح الجدول (3) مدخلات الحزمة في برنامج Aspen Plus حيث يهدف إلى تحقيق توازن مثالي بين الحصول على أعلى قدرة وأقل توليد للحرارة.

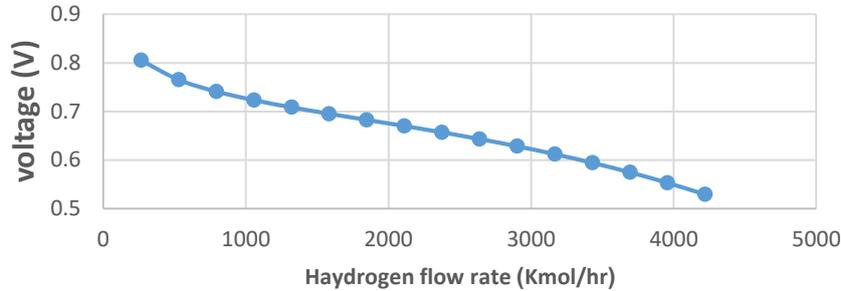
جدول (3) مدخلات المحاكاة لخلية الوقود

الرمز	المعلمة	القيمة	الوحدة
T	درجة حرارة التشغيل لحزمة الخلايا	353	K
P	ضغط التشغيل لحزمة الخلايا	3	Atm
T _c	درجة الحرارة عند مدخل الكاثود	353	K
T _a	درجة الحرارة عند مدخل الأنود	353	K
P _c	ضغط الكاثود	3	Atm
P _a	ضغط الأنود	3	Atm
	رطوبة الكاثود	0.9	
	رطوبة الأنود	0.9	
β _{H₂}	معامل زيادة الهيدروجين	1.25	
β _{O₂}	معامل زيادة الأكسجين	2	
J	كثافة التيار	0.8	A/cm ²
E	جهد الخلية	0.67	V
W _{cell}	قدرة الحزمة	60	kW
n _{H₂} theory	معدل تدفق الهيدروجين	2110	Mol/hr
n _{O₂} theory	معدل تدفق الهواء الجوي	8039	Mol/hr



الشكل 5. منحنى العلاقة بين معدل تدفق غاز الميثان إلى المصلح البخاري ومعدل إنتاج الهيدروجين العلاقة بين معدل تدفق غاز الميثان إلى المصلح البخاري ومعدل إنتاج الهيدروجين هي حجر الأساس في عملية إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي. وكما نلاحظ في الشكل (5) كلما زاد معدل تدفق غاز الميثان إلى المصلح البخاري زاد معدل تدفق الهيدروجين المنتج وذلك عند زيادة معدل للتدفق لغاز الميثان، يتحول التفاعل نحو اليمين لإنتاج المزيد من الهيدروجين ثاني أكسيد الكربون، وذلك سعياً لإعادة الاتزان وبذلك كلما زادت فرص تفاعل جزيئات غاز الميثان مع بخار ينتج المزيد من الهيدروجين.

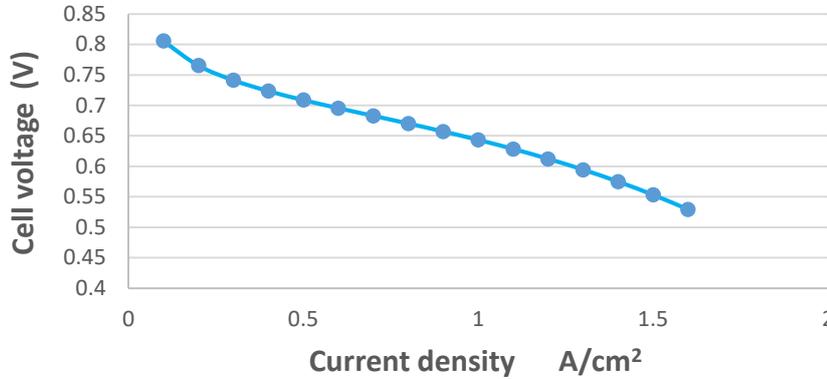
تأثير معدل تدفق الهيدروجين على فرق الجهد المفيد



الشكل 6. منحنى العلاقة بين معدل تدفق الهيدروجين والجهد المفيد الناتج من الخلية.

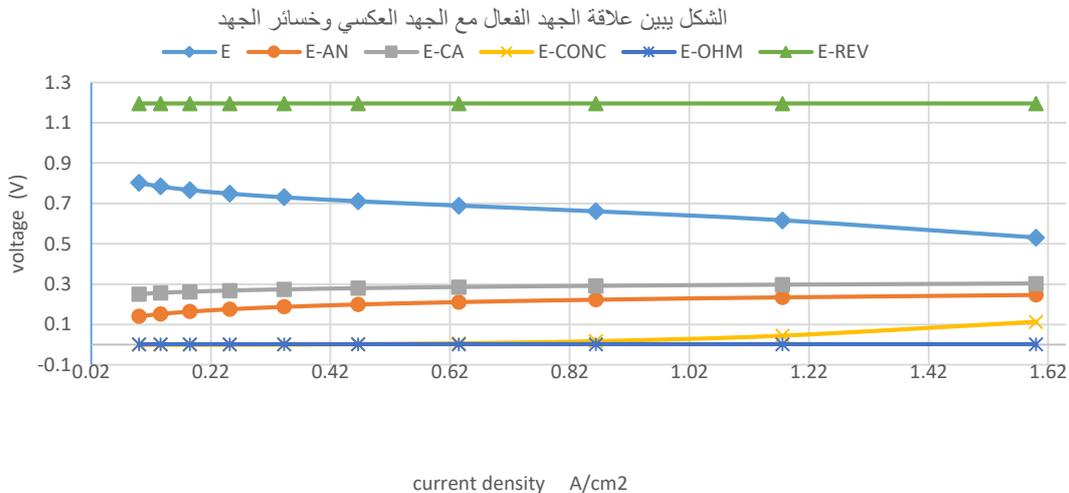
يوضح الشكل (6) العلاقة بين معدل تدفق الهيدروجين والجهد المفيد الناتج من خلية الوقود ذات الغشاء البروتوني هي علاقة عكسية. بمعنى أنه كلما زاد معدل تدفق الهيدروجين، قل الجهد الناتج عن الخلية وذلك بسبب تفاعل الأكسدة والاختزال في خلية الوقود والذي يتم فيه تفاعل أكسدة للهيدروجين على الأنود وتفاعل اختزال للأكسجين على الكاثود. هذا التفاعل ينتج عنه تدفق للإلكترونات عبر دائرة خارجية، مما يولد تياراً كهربائياً وجهداً. فعند زيادة معدل تدفق الهيدروجين، يزداد تركيز الهيدروجين عند الأنود. هذا يؤدي إلى زيادة سرعة التفاعل، وبالتالي زيادة التيار الكهربائي وهذه الزيادة تؤدي إلى زيادة في مقاومة الخلية الداخلية، مما يؤدي إلى انخفاض في الجهد الناتج عن الخلية.

العلاقة بين تيار الخلية وجهد الخلية



الشكل 7. العلاقة بين تيار الخلية وجهد الخلية (منحنى الاستقطاب)

الشكل (7) منحنى الجهد- وكثافة التيار لخلية الوقود موضوع الدراسة وهو تمثيل بياني للعلاقة بين كثافة التيار الكهربائي المستخلص من الخلية والجهد الناتج عنها. يعتبر هذا المنحنى هو المرجع الأهم عند معايرة النماذج البحثية ومطابقة النتائج والتحقق منها عند الباحثين والمهتمين بدراسة خلايا الوقود ويعكس أداء الخلية وكفاءتها في تحويل الطاقة الكيميائية إلى كهربائية. ومن خلال مقارنة هذا المنحنى البياني يمكننا تقييم أداء الخلية وتحديد خسائر الجهد ويساعدنا هذا المنحنى في تصميم خلية وقود أكثر كفاءة ومنه يمكن تحديد نقطة التشغيل الأفضل والمتاحة لتحقيق أكبر قدر من الإنتاجية. وكما يتضح من الشكل (6) والشكل (7) أن المنحنيان متطابقان وهذا يؤكد بأن كثافة التيار تعتمد اعتماد كامل على معدل تدفق الهيدروجين.



الشكل 8. يوضح أنواع الجهود في الخلية وخسائر الجهد

يوضح الشكل (8) أنواع الجهود في الخلية وخسائر الجهد التي تم حسابها في الدراسة ويمكن توضيحها كما يلي: -

- الخط المميز باللون الأخضر (الجهد المثالي): يمثل الجهد النظري الأقصى الذي يمكن أن تنتجه الخلية وفقاً لقوانين الديناميكا الحرارية. هذا الجهد يبقى ثابتاً بغض النظر عن مقدار التيار المستخلص طالما توفر الوقود بشكل كافٍ.
- الخط المتصل (الجهد المفيد): يمثل الجهد الفعلي الذي نحصل عليه من الخلية في الواقع. نلاحظ أن هذا الجهد أقل من الجهد المثالي وذلك بسبب خسائر التي تحدث داخل الخلية. هناك ثلاثة أنواع رئيسية من خسائر الجهد تؤثر على شكل منحنى الجهد-التيار:

1. خسائر جهد التنشيط

- يحدث هذا النوع من الخسائر بسبب الحاجة إلى طاقة تنشيط لبدء التفاعلات الكيميائية على سطح الأقطاب.
- تأثيره على المنحنى: يؤدي إلى انخفاض كبير في الجهد عند قيم التيار المنخفضة.

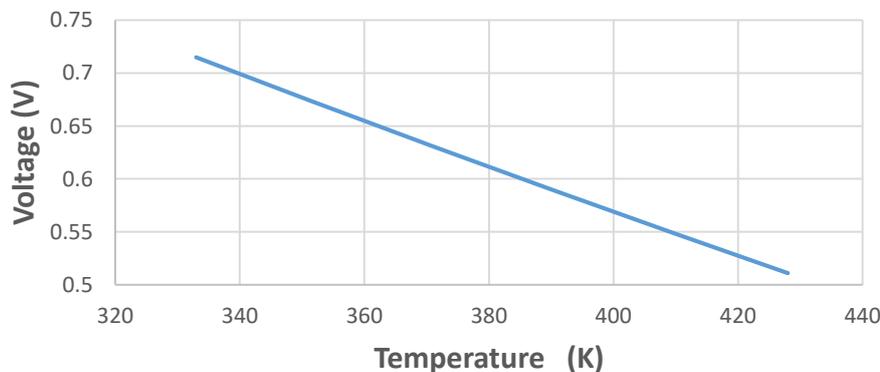
2. خسائر المقاومة الأومية.

- ينتج هذا الاستقطاب عن المقاومة الداخلية لخلية الوقود (المقاومة الأومية).
- تأثيره على المنحنى: يؤدي إلى انخفاض خطي في الجهد مع زيادة التيار.

3. استقطاب التركيز.

- يحدث هذا الاستقطاب عندما لا يكون هناك إمداد كافٍ للمواد المتفاعلة (الهيدروجين والأكسجين) إلى سطح الأقطاب أو عندما تتراكم منتجات التفاعل (الماء) على السطح.
- تأثيره على المنحنى: يؤدي إلى انخفاض حاد في الجهد عند قيم التيار العالية.

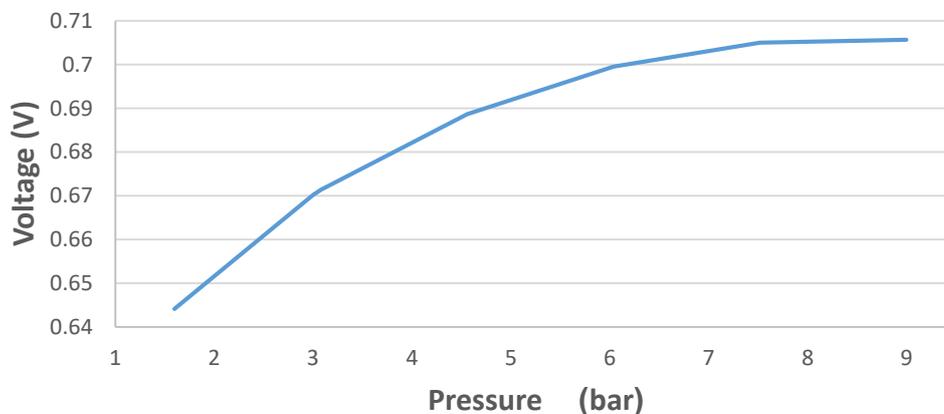
تأثير درجة الحرارة على فرق الجهد المفيد للخلية



الشكل 9. العلاقة بين درجة حرارة الخلية والجهد المفيد

يوضح الشكل (9) العلاقة العكسية بين درجة حرارة حزمة الوقود والجهد المنتج في خلية الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني (PEMFC) مع زيادة درجة الحرارة، ينخفض الجهد الكهربائي الناتج عن الخلية. يرتبط هذا الأمر بعدة عوامل أساسية. وتؤثر درجة الحرارة بشكل مباشر على توصيلية الغشاء البروتوني، الذي يتمثل في دوره كحامل رئيسي لنقل البروتونات بين قطبي الخلية. مع ارتفاع درجة الحرارة، تزداد اهتزازات جزيئات البوليمر في الغشاء، مما يؤدي إلى زيادة المسافات بينها. هذا التوسع يقلل من احتجاز الماء، الذي يعد عنصرًا حيويًا لتوصيل البروتونات. نتيجة لذلك، تنخفض كفاءة نقل الشحنة عبر الخلية، مما ينعكس سلبيًا على الجهد الناتج. وكذلك تلعب تفاعلات الأكسدة والاختزال دورًا حاسمًا في إنتاج الكهرباء داخل الخلية. هذه التفاعلات حساسة لدرجات الحرارة، حيث قد تؤدي الزيادة في الحرارة إلى زيادة معدل التفاعلات الجانبية الغير مرغوب فيها والتي تستهلك جزءًا من الهيدروجين والأكسجين المتوفرين، مما يقلل من الكفاءة الكلية للخلية. في النهاية، تفاعل الخلية هو تفاعل طارد للحرارة، مما يعني أن التحويل من الطاقة الكيميائية إلى كهربائية ينتج حرارة. مع ارتفاع درجة الحرارة، تزداد الطاقة الحركية لجزيئات الغاز المتفاعلة، مما يزيد من معدل التصادمات الفعالة ويؤدي إلى زيادة سرعة التفاعل. ومع ذلك، فإن التوازن الكيميائي يميل نحو الاتجاه الذي يمتص الحرارة، مما يؤدي إلى زيادة التفاعل العكسي، وبالتالي نقص في تركيز المواد المتفاعلة وزيادة في تركيز النواتج، مما ينعكس سلبيًا على الجهد الكهربائي الناتج.

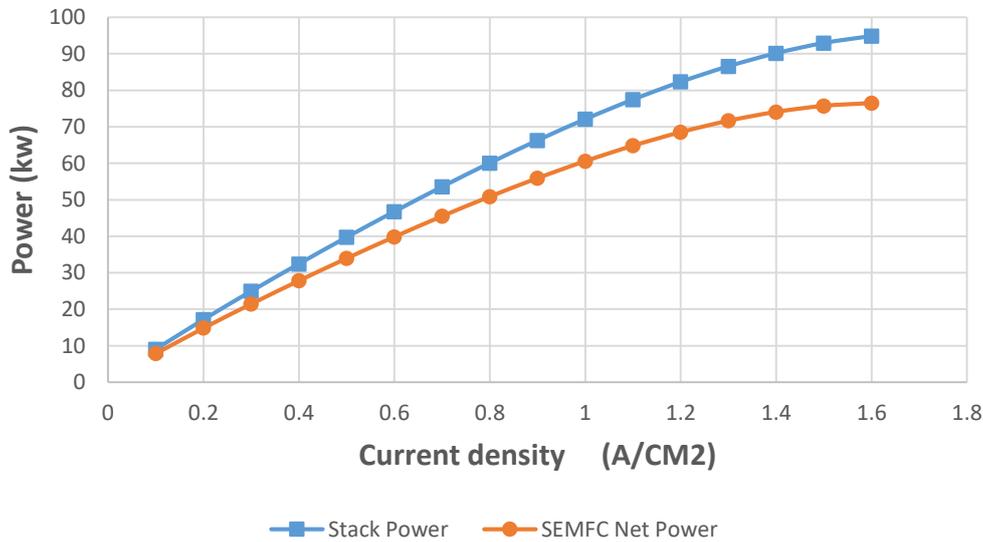
تأثير ضغط الخلية على الجهد



الشكل 10. يوضح العلاقة بين ضغط الخلية والجهد المفيد

يوضح الشكل (10) العلاقة بين ضغط الخلية والجهد المنتج في خلية الوقود ذات الغشاء البروتوني هي علاقة طردية بشكل عام، ولكنها ليست خطية تمامًا لأن زيادة ضغط الغاز تعزز من الضغط الجزئي للهيدروجين والأكسجين عند سطح المحفز. تفسير هذا السلوك يمكن أن يُعزى إلى حالة التشبع، حيث عند زيادة الضغط بشكل مفرط، يتم تغطية جميع المواقع النشطة على سطح المحفز، مما يمنع أي زيادة ملحوظة في معدل التفاعل. بالإضافة إلى ذلك، هناك عوامل أخرى مثل درجة الحرارة ونوع المحفز وسمك الغشاء البروتوني، التي تؤثر على شكل العلاقة بين الضغط والجهد. ونستنتج من ذلك أنه يمكن تحديد ضغط مثالي للخلية يحقق أقصى كفاءة، حيث يتوازن بين زيادة معدل التفاعل وتجنب حالة التشبع. تحسين أداء الخلية يتطلب التحكم في ضغط الغاز، اختيار المحفز المناسب، وتحسين تصميم الحزمة وفهم هذه العلاقات يساهم في تصميم أنظمة خلايا الوقود لتطبيقات مختلفة.

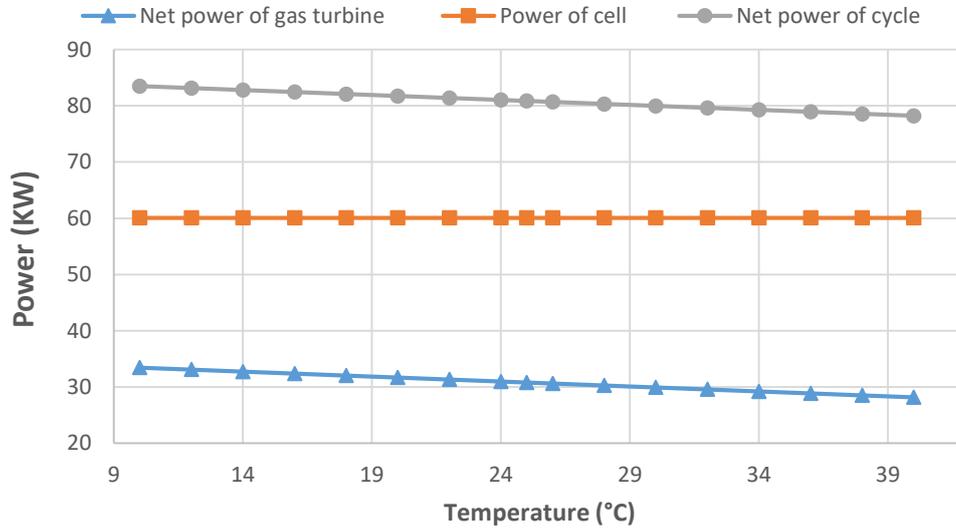
تأثير كثافة التيار على القدرة و الحرارة المتولدة من الخلية



الشكل 11 يوضح العلاقة بين كثافة التيار وصافي قدرة حزمة الخلايا

تأثير كثافة التيار على قدرة الحزمة PEMFC يظهر في الشكل 5 وقدرة الخلية يصحبها حرارة لأن التفاعل داخل الخلية طارد للحرارة. ذلك يظهر الفرق بين قدرة الحزمة المنتجة وقدرة الحزمة الحقيقية أي القدرة الصافية ونلاحظ ان عند زيادة كثافة التيار تزداد معه قدرة الحزمة لصافي القدرة المستفاد منها في الخلية ويسرد الجدول (3) معاملات العمل للحزمة وهي أفضل قراءات للخلية [13]

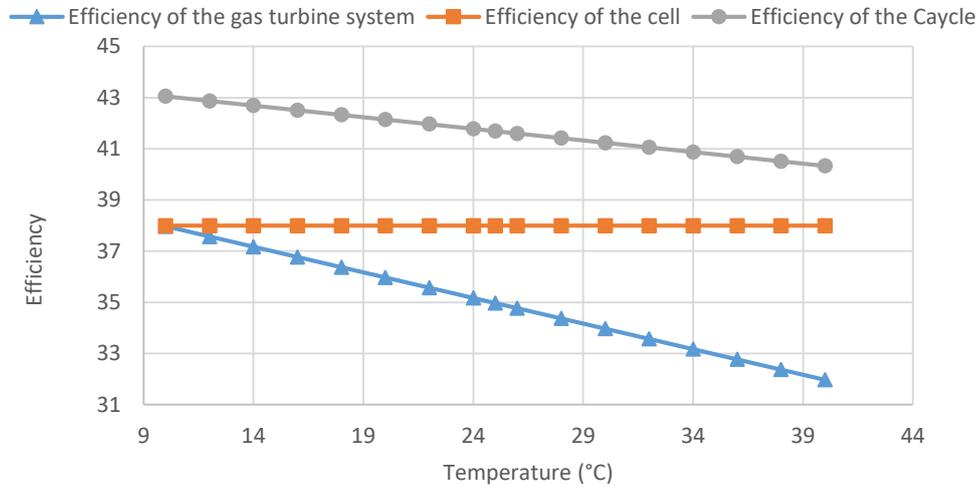
العلاقة بين القدرة في الدورة



الشكل 12. منحنى القدرات المستفاد منها في منظومة أويا

الشكل (12) يظهر فيه منحنى القدرة للتوربين الغازي ويتضح أن القدرة الناتجة عن التوربين تتناقص مع ارتفاع درجة الحرارة المحيطة ويعود هذا الانخفاض إلى تراجع معدل التدفق الكتلي للهواء الذي يؤثر بدوره على نسبة انضغاط الهواء وكفاءة تشغيل التوربين ونجد أن عند درجة حرارة 40 درجة مئوية للمحيط ينخفض إنتاج القدرة إلى 28.18 كيلو وات مقارنةً بـ 33.46 كيلو وات عند درجة حرارة 10 درجات مئوية. يعكس مدى تأثير درجة حرارة المحيط على أداء منظومة التوربين الغازي. ومن المنحنى يتبين إلى أن قدرة خلية الوقود تظل مستقرة وغير متأثرة بتغيرات درجات الحرارة المحيطة. هذا الثبات يعود إلى أن عملية الهيدروجين الذي يغذي الخلية يتم إنتاجه من المصلح البخاري تحت ظروف حرارة وضغط ثابتين ومعالج خصيصاً للخلية. وتشير البيانات إلى أن قدرة الخلية عند درجة حرارة 25 مئوية تصل إلى 60 كيلوات، مما يجعلها مناسبة كمصدر طاقة ابتدائي للتغلب على مشاكل بدء التشغيل لمنظومة التوربين الغازي إذا توفر الهيدروجين من مصدر مستقل وبالتالي تشغيل ضاغط منظومة التوربين الغازي بكل سهولة.

تأثير حرارة المحيط على الكفاءة في الدورة



الشكل 13. منحنى الكفاءة لمنظومة أويا

يوضح الشكل (13) منحنى كفاءة منظومة أويا، والذي يشكل الهدف الأساسي لهذه الدراسة. تشير النتائج إلى انخفاض كفاءة التوربين الغازي من 37.97% إلى 31.98%، مما يعكس متوسط انخفاض قدره 5.99% نتيجة لارتفاع درجة حرارة المحيط. ومع إدخال خلية الوقود ذات الغشاء البروتوني التي تظل كفاءتها مستقلة عن درجة حرارة المحيط، يتضح أن كفاءة منظومة أويا تتناقص من 43.06% إلى 40.33%، أي بمتوسط انخفاض يبلغ 2.73%. ومن منظور آخر تكشف النتائج عن زيادة ملحوظة في الكفاءة حيث ارتفعت من 37.97% إلى 43.06% عند درجة حرارة محيط تبلغ 10 درجات مئوية (خلال فصل الشتاء)، ومن 31.98% إلى 40.33% عند درجة حرارة محيط 40 درجة مئوية (خلال فصل الصيف). يُعتبر هذا التحسن في الكفاءة، الذي يتراوح بين 5.09% في الشتاء و8.35% في الصيف، إنجازاً بارزاً يتماشى مع الأهداف المرجوة من منظومة أويا أي بمعنى آخر يعتبر إحدى الحلول المقترحة الجديدة للتغلب على التأثير السلبي لدرجة حرارة المحيط صيفاً على معدل إنتاج وكفاءة منظومة التوربين الغازي.

المراجع

- [1] Öberg, S., Odenberger, M., & Johnsson, F. (2022). Exploring the competitiveness of hydrogen-fueled gas turbines in future energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(1), 624-644.
- [2] Giampaolo, T. (2020). *Gas turbine handbook: principles and practice*. River Publishers.
- [3] Horlock, J. H. (2013). *Advanced gas turbine cycles: a brief review of power generation thermodynamics*.
- [4] Baker, R. W., Freeman, B., Kniep, J., Wei, X., & Merkel, T. (2017). CO₂ capture from natural gas power plants using selective exhaust gas recycle membrane designs. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 66, 35-47.
- [5] Bakalis, D. P., & Stamatias, A. G. (2011, January). Performance simulation of a hybrid micro gas turbine fuel cell system based on existing components. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 54648, pp. 171-179).
- [6] Wang, C., Li, Q., Wang, C., Zhang, Y., & Zhuge, W. (2021). Thermodynamic analysis of a hydrogen fuel cell waste heat recovery system based on a zeotropic organic Rankine cycle. *Energy*, 232, 121038.
- [7] Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A., Jensen, H. M., Peppley, B. A., & Roberge, P. R. (2000). Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. *Journal of power sources*, 86(1-2), 173-180.
- [8] Mert, S. O., Dincer, I., & Ozcelik, Z. (2007). Exergoeconomic analysis of a vehicular PEM fuel cell system. *Journal*
- [9] Springer, T. E., Zawodzinski, T. A., & Gottesfeld, S. (1991). Polymer electrolyte fuel cell model. *Journal of the electrochemical society*, 138(8), 2334.
- [10] Pukrushpan, J. T., Peng, H., & Stefanopoulou, A. G. (2004). Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems. *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 126(1), 14-25.
- [11] Mujeebu, M. A. (2016). Hydrogen and syngas production by superadiabatic combustion—a review. *Applied energy*, 173, 210-224.

- [12] Song, C., Liu, K., & Subramani, V. (2010). Introduction to hydrogen and syngas production and purification technologies. Hydrogen and syngas production and purification technologies. J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 1-13.
- [13] Wang, L., Husar, A., Zhou, T., & Liu, H. (2003). A parametric study of PEM fuel cell performances. International journal of hydrogen energy, 28(11), 1263-1272.
- [14] Ramousse, J., Deseure, J., Lottin, O., Didierjean, S., & Maillet, D. (2005). Modelling of heat, mass and charge transfer in a PEMFC single cell. Journal of Power Sources, 145(2), 416-427.
- [15] Zhao, P., Wang, J., Gao, L., & Dai, Y. (2012). Parametric analysis of a hybrid power system using organic Rankine cycle to recover waste heat from proton exchange membrane fuel cell. International Journal of hydrogen energy, 37(4), 3382-3391.