

دراسة تأثير عملية تبريد الخلية الفوتوفولتية على رفع كفاءة أنظمة الهيدروجين الشمسي

لؤي يسير*

(تاريخ الإيداع 28 / 10 / 2014. قُبل للنشر في 19 / 1 / 2015)

□ ملخص □

إن الطاقة الشمسية والهيدروجين هي من بين الخيارات المحتملة والبديلة للوقود الحالي، لكن العائق الرئيسي لتطبيق الطاقة الشمسية وخاصة الخلايا الفوتوفولتية هي انخفاض كفاءتها في تحويل الطاقة بسبب ارتفاع درجة حرارتها، أما الهيدروجين فيجب إنتاجه بشكل غازي أو سائل قبل استخدامه كوقود ولكن عملية التحويل الرئيسية لإنتاج الهيدروجين تنتج غاز ثاني أكسيد الكربون الضار بالبيئة لما تسببه من ارتفاع في درجة حرارة الأرض، في إطار البحث عن حلول لهذه القضايا يأتي هذا البحث ليتحرى التحكم بدرجة حرارة الخلية الفوتوفولتية في محاولة لتلافي تأثيرات ارتفاع درجة حرارة الخلية كما يبحث في تأثيرات ذلك على توليد غاز الهيدروجين عن طريق جهاز التحليل الكهربائي للماء بطريقة صديقة للبيئة.

أثبتت نتائج التجارب أن نظام التبريد يوقف ارتفاع درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية مما عكس النتائج السلبية لانخفاض كفاءة التحويل كما ازداد الناتج الكهربائي للخلية بمقدار 33 % و أظهرت النتائج أيضاً أنه عند توصيل الخلية الفوتوفولتية إلى جهاز التحليل الكهربائي للماء فإن تبريد الخلية الفوتوفولتية انعكس بشكل إيجابي على ارتفاع معدل إنتاج الهيدروجين بحدود 26%

الكلمات المفتاحية: الخلية الفوتوفولتية- الطاقة الشمسية- نظام التبريد بالثقالة- الهيدروجين- المحلل (مولد الهيدروجين)

*مُشرف على الأعمال - قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

studying the effect of cooling process on Photovoltaic cell and increasing the efficiency of Hydrogen solar models

louay yaceir*

(Received 28 / 10 / 2014. Accepted 19 / 1 / 2015)

□ ABSTRACT □

Solar Energy and Hydrogen are possible replacement options for fossil fuel, But a major drawback to the full implementation of solar energy, in particular photovoltaic (PV), is the lowering of conversion efficiency of PV cells due to elevated cell temperatures while in operation. Also, hydrogen must be produced in gaseous or liquid form before it can be used as fuel; but its present major conversion process produces an abundance of carbon dioxide which is harming the environment through global warming. In search of resolutions to these issues, this research investigated the application of Thermal Management to Photovoltaic (PV) modules in an attempt to reverse the effects of elevated cell temperature. The investigation also examined the effects of the thermally managed PV module to a Electrolyzer (Hydrogen Generator) for the production of hydrogen gas in an environmentally friendly way.

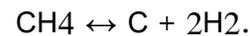
The results of the investigation showed that the cooling system stopped the cell temperature from rising, reversed the negative effects on conversion efficiency, and increased the power output of the module by as much as 33%. The results also showed that the thermally managed PV module when coupled to the hydrogen generator impacted positively with an appreciably increase of up to 26% in hydrogen gas production.

Key words: Photovoltaic cell– solar energy– gravity fed cooling system (GFC)– hydrogen– Electrolyzer (Hydrogen Generator)

* Work Supervisor , Academic Affairs, Department of Mechanical Power Engineering; Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

مقدمة :

في خلال الـ 100 عام الماضية ظل الوقود التقليدي مثل البنزين والديزل هو الخيار المفضل في قطاع النقل، ولكن ذلك قد لا يستمر طويلاً مع الخطوات المتسارعة في التوجه نحو استخدام الهيدروجين كوقود بديل للسيارات فالهيدروجين هو العنصر الأكثر وفرة في الكون [4-7]، وبحلول عام 2050 م يتوقع بعض الباحثين أن يصبح الهيدروجين هو المصدر الرئيس للوقود في هذا المجال، ومن المعروف أن الهيدروجين لا يتواجد في الطبيعة منفرداً لذلك يجب استخلائه من مصادر أخرى. يأتي 50 في المائة من الإنتاج العالمي للهيدروجين اليوم من الغاز الطبيعي، أما المتبقي فيأتي من مصادر متعددة مثل الفحم والنفط وبعض مصادر الطاقة المتجددة كالكتل الحيوية والماء وسنركز في هذا البحث على إمكانية إنتاج الهيدروجين من عملية الانشطار المائي باستخدام التحليل الكهربائي للماء water electrolysis معتمدين في ذلك على الطاقة الشمسية solar energy والهيدروجين هو مصدر الطاقة المتجددة المتعدد الاستعمالات أكثر من أي مصدر آخر في العالم، فهو وقود عام يمكن حرقه في محرك كمولدات الطاقة الكهربائية أو محركات تشغيل السيارات أو أي شيء آخر يستخدم الطاقة الكهربائية، وبما أنه لا ينبعث غاز ثاني أكسيد الكربون من المحركات العاملة بالهيدروجين، فهو يعتبر مصدر صديق للبيئة ، هذا و يتواجد الهيدروجين بوفرة على كوكب الأرض ولكنه لا يتواجد إلا كمركب مع عناصر أخرى، فذرتان من الهيدروجين مع ذرة من الأوكسجين تشكل الماء (H₂O) ، وعندما يتحد الهيدروجين مع الكربون يشكل مركبات تُعرف بالهيدروكربونات مثل الميثان والفحم والبتروول. إن تفكيك غاز الميثان يطلق غاز الهيدروجين لكن المشكلة في هذه العملية أن إنتاج كيلو غرام واحد من غاز الهيدروجين يترافق مع إطلاق ثمانية كيلوغرامات من غاز ثاني أكسيد الكربون [5-16] وهو الغاز الضار بالبيئة ويعكف العلماء والباحثون في مختلف أنحاء العالم حالياً على معالجة هذه المشكلة ومن أكثر الطرق انتشاراً اليوم في إنتاج الهيدروجين هو فيما يُعرف بتكسير الغاز الطبيعي، أو بصورة أكثر دقة، تكسير الميثان [12] (CH₄) عن طريق البخار يتفاعل البخار بدرجة حرارة عالية وضغط (700 – 1000 C°/ 3 -25 bar) مع الوقود الحجري بحضور وسيط كيميائي لينتج غاز الهيدروجين [13] وفق التفاعل التالي :



إن كفاءة إنتاج الهيدروجين بعملية تكسير أو إعادة تشكيل الميثان هي 86% بينما تصل كفاءة إنتاج الهيدروجين بتقنية تحليل الماء بالتيار المستمر إلى 77% وباستخدام تكنولوجيا متقدمة في عملية التحليل الكهربائي للماء تصل الكفاءة إلى 92% [14-15] .

وسنقوم في بحثنا هذا بإجراء اختبارات على عملية التحليل الكهربائي للماء أي تمرير تيار كهربائي في الماء للفصل بين ذرات الهيدروجين والأوكسجين وبالتالي إنتاج الهيدروجين من الماء أما مصدر التيار الكهربائي المستخدم فهو الخلية الفوتوفولتية (PV) Photovoltaic التي تحول الطاقة الشمسية لطاقة كهربائية لكن أداءها يعتمد على درجة حرارة تشغيلها حيث ينخفض جهد الدارة المفتوحة (Voc) بشكل ملحوظ مع زيادة درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية ومعدل هذا الانخفاض في الجهد يساوي (2.3mV/c°) [9] وهذا التغير يتم وفق علاقة خطية ويؤدي الانخفاض المتتالي في الجهد (Voc) إلى انخفاض كفاءة الخلية الفوتوفولتية عند نفس قيم الإشعاع الشمسي وتزداد قيمة تيار القصر (Isc) المتولد في الخلية مع ارتفاع درجة الحرارة ولكن بقيم صغيرة [10] إن نسبة كبيرة من الإشعاع الشمسي الذي تمتصه الخلية الفوتوفولتية يذهب كضياء حراري فيزيد من درجة حرارة الخلية

الفوتوفولتية مما يؤثر سلباً على الناتج الكهربائي لخرج الخلية [11] ويكون معدل انخفاض جهد وطاقة الخلايا الفوتوفولتية السيليكونية بحدود (0.5% - 0.4%) مع ازدياد درجة حرارة الخلية درجة مئوية واحدة [2-8] ومن هنا تأتي أهمية تبريد الخلايا الفوتوفولتية لتحسين كفاءة التحويل الكهربائي لها وهناك عدة طرق لتبريد الخلايا تناولتها العديد من الأبحاث السابقة :

• تبريد الخلايا عن طريق تعريضها لتيار هوائي قسري على الوجه الخلفي للخلية من خلال مراوح مناسبة

[17]

• تبريد الخلايا باستخدام الماء إما بتمريرها على السطح الخلفي للخلايا أو إسالتها على الوجه الأمامي بشكل حر Gravity-Fed Cooling (GFC) أو بشكل قسري بواسطة مضخة أو بجريان الماء من خلال قنوات مثبتة على سطح الخلية الفوتوفولتية [3].

أهمية البحث وأهدافه :

مع اقتراب نفاذ مصادر الطاقة البترولية والتوجه العالمي للحصول على مصادر جديدة الطاقة تأتي أهمية هذا البحث ، ومع ازدياد اهتمام علماء البيئة بالحد من انبعاث الغازات الضارة بطبقة الأوزون للحفاظ على بيئة نظيفة. تُعدّ الطاقات المتجددة على وجه العموم والطاقة الهيدروجينية والطاقة الشمسية على وجه الخصوص موضوع هذا البحث هي طاقة المستقبل بامتياز ، ومع أن حرق الهيدروجين لا يترافق بانبعاثات ضارة بالبيئة إلا أن بعض عمليات توليده تنتج غاز ثاني أكسيد الكربون الضار بطبقة الأوزون ومن هذا المنطلق تأتي أهمية بحثنا بدراسة توليد الهيدروجين من عملية الانشطار المائي مستخدمين في ذلك الطاقة الشمسية النظيفة ، وتتخلص أهداف البحث بالنقاط التالية:

• إن إنتاج الطاقة النظيفة كلياً هي هدف هذا البحث بدراسة جدوى وإمكانية الحصول على مصدر طاقة نظيفة (الهيدروجين) كبديل للبنزين ومصادر الطاقات البترولية باستخدام مصدر طاقة نظيفة آخر (الطاقة الشمسية)

• إحدى أهم أهداف البحث الوصول إلى نتائج حول معدلات إنتاج الهيدروجين باستخدام الخلية الفوتوفولتية

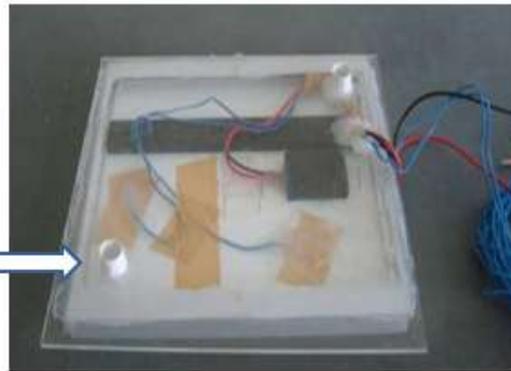
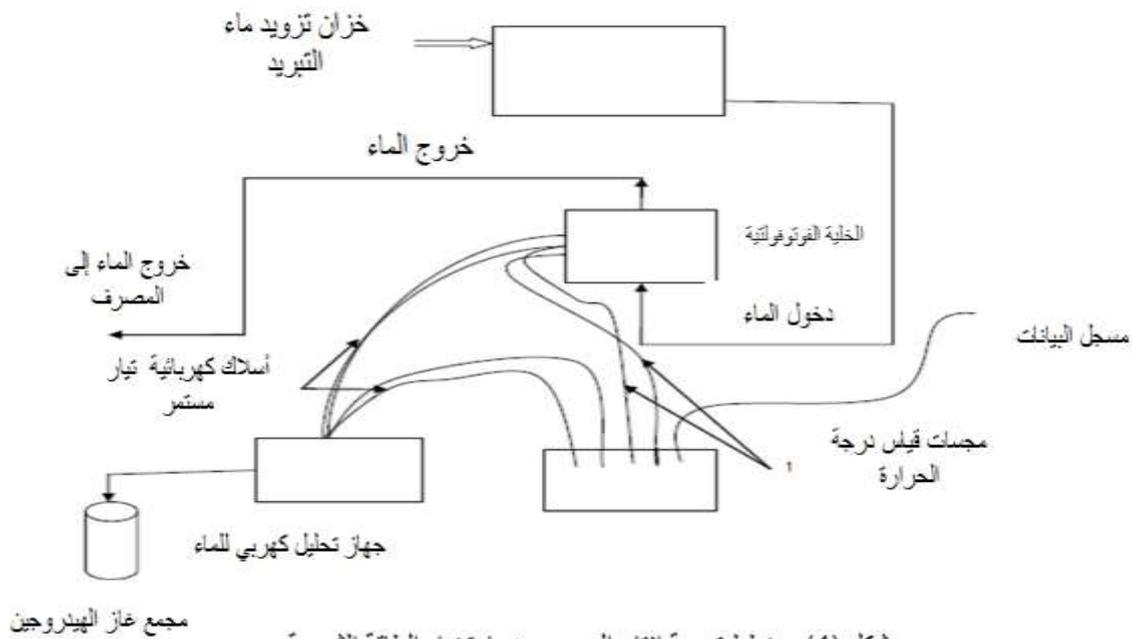
• دراسة تأثير تبريد الخلية الفوتوفولتية باستخدام نظام التبريد GFC على معدل إنتاج الهيدروجين وعلى الطاقة الكهربائية المتولدة من الخلية الفوتوفولتية.

• تحديد الأهمية الاقتصادية مقارنة مع مصادر الطاقة المتوفرة

طرائق البحث ومواده :

نعمد في هذا البحث على العمل التجريبي والتحليل العلمي لنتائج القياس والعوامل المؤثرة على الاختبار ضمن حدود الأدوات المتاحة لإجراء الاختبارات . يبدأ البحث بدراسة مرجعية حول توليد التيار الكهربائي من الخلايا الفوتوفولتية لاستخدامه في عملية التحليل الكهربائي لاستخلاص الهيدروجين وتجميعه لأغراض الطاقة المتعددة. أُجري البحث في مدينة اللاذقية وبالتحديد في منطقة القنطرة في شهر حزيران من عام 2014 حيث قمنا بربط خلية تحليل كهربي مع خلية فوتوفولتية أبعادها 33 سم x 33 سم بسماكة 0.5 سم ويوضح الشكل (1)

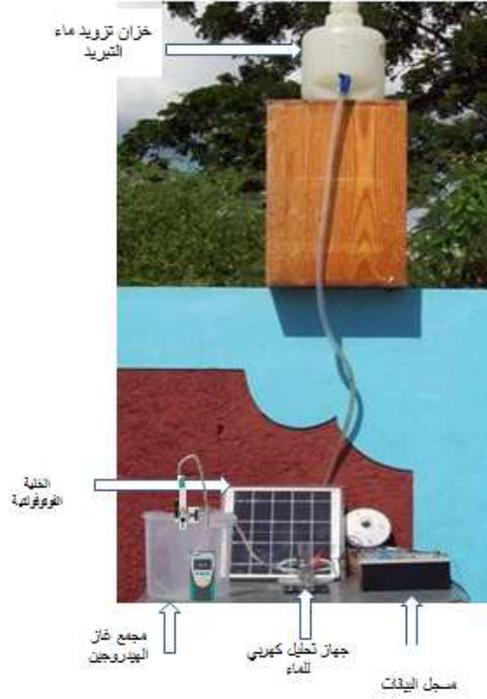
مخطط التجربة وتم إجراء تعديل بسيط على الخلية الفوتوفولتية بأن غُلِّقت الجهة الخلفية لها وأُحْكِمَ إغلاق أطرافها بمادة السيلكون لمنع تسرب المياه كما هو موضح في الشكل (2) كما وُضِعَ خزان بمستوى أعلى على حائط يرتفع بمقدار 1.2 متر عن مستوى الخلايا ليسمح بتدفق الماء بالحمل الطبيعي (بدون مضخة) تحت تأثير الثقالة بحيث يدخل الماء إلى الخلايا من الأسفل ويخرج من الأعلى ، معدل جريان الماء يتراوح بين 0.03 لتر في الدقيقة حتى 2 لتر في الدقيقة في أنابيب بقطر 3 سم ، دائرة التبريد هذه هي دائرة بسيطة لا نستخدم فيها مضخة لإعادة تدوير مياه التبريد ولا وسيط تبريد فهي دائرة تبريد مفتوحة بمعنى لا يتم إعادة الماء الخارج من الخلايا إلى الخزان بل يتم تصريفه



شكل (2) صورة الوجه الخلفي لخلية فوتوفولتية بعد أن أُحْكِمَ إغلاقه ليلائم تدفق مياه التبريد

يتم دخول الماء إلى أسفل الخلية وخروجه من أعلى الخلية من خلال المآخذ المعدة لذلك ويتم تزويد الماء تحت تأثير الجاذبية الأرضية (الثقالة) من خزان بارتفاع هيدروليكي 1.2 متر ويظهر الشكل (3) صورة للتجربة وتوضع أجزائها.

المحلل هو جهاز يقوم بتحليل الماء إلى عناصره الأولية وهو عنصر أساسي في أنظمة خلايا الوقود المتصلة مع الخلايا الشمسية أو ما يسمى أنظمة "هيدروجين - شمس"، تقوم هذه الأجهزة بتحويل الطاقة



شكل (3) صورة واقعية لتجربة إنتاج الهيدروجين

الكهربائية من الخلايا الشمسية إلى غاز الهيدروجين. . ولها عدة أنواع : محلات ذات الضغط العالي، ذات الحرارة العالية، ذات الحرارة المنخفضة، ذات الضغط المنخفض، ذات الوسيط الصلب و ذات الوسيط السائل. يفضل غالباً في أنظمة التوليد الهيدروشمسية الضغط المنخفض إلى المتوسط والحرارة المنخفضة والوسيط السائل، لانخفاض كلفتها مقارنة بتكلفة المحلات ذات الضغط المرتفع أو درجة الحرارة المرتفعة أو ذات الوسيط الصلب إضافة إلى وفرتها وسهولة التعامل معها.

مبدأ عمل المحلل (the Electrolyzer) :

المحلل هو جهاز بسيط جداً يحلل الماء إلى عناصره الأساسية المكونة له الأكسجين والهيدروجين. يمكن تنفيذ هذا عبر إمرار تيار مستمر عالي نسبياً ذو توتر منخفض في الماء أو في وسيط قاعدي مثل محلول هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) .

يستخدم في عملية التحليل تيار كهربائي مستمر يتحرك باتجاه واحد فقط وهذا مهم لمبدأ عمل المحلل أما التيار المتناوب (AC Alternating Current) فلا يمكن استخدامه في عملية التحليل الكهروكيميائي إلا في حال قمنا بتقويمه، ويمكن استرجار التيار المستمر الذي يغذي المحلل من عدة مصادر متجددة مثل الرياح أو الخلايا الشمسية أو من مولدات صغيرة تعتمد على طاقة جوف الأرض ويمكن توليدها أيضاً من مصادر غير متجددة مثل البطاريات الجافة أو من خلال تقويم التيار المتناوب العادي. يتكون المحلل من قطبين (الكترودين tow Electrodes) غالباً مصنوعين من نيكل نقي أو من سبيكة خليط (نيكل - حديد) (Nickel Iron alloy) ، ستانلس

ستيل، أحد القطبين يوصل إلى القطب السالب من التغذية الكهربائية المستمرة والثاني يوصل إلى القطب الموجب، كلا القطبين مغمورين بالماء في وعاء مغلق يحتوي أيضاً على أنبوبي تجميع لتجميع الغاز الناتج، حيث يتكون غاز الهيدروجين عند القطب السالب أما غاز الأكسجين فيتكون عند القطب الموجب.

يوضح الشكل (4) صورة لتوصيل جهاز التحليل الكهربائي للماء مع الخلية الفوتوفولتية وتمت عملية قياس غزارة الخليط الغازي الناتج بجهاز لقياس غزارة الغاز.

خروج الهيدروجين



شكل (4) يظهر ربط الخلية الفوتوفولتية مع جهاز التحليل لإنتاج الهيدروجين

وضع النظام في الهواء الطلق بعيداً عن الظل وتم تسجيل البيانات والمراقبة لمدة أسبوع خلال ساعات محددة من النهار في أيام مشمسة من شهر حزيران عام 2014. وخلال أيام الاختبار هذه كنا نفتح ماء التبريد ليتدفق ويعمل على تبريد الخلايا الفوتوفولتية حالما تصل درجة حرارة الخلايا لأقصى درجة (62C) ويترك نظام التبريد يعمل لمدة نصف ساعة ثم يغلق ليُعاد فتحه من جديد عندما تصل حرارة الخلايا لدرجة حرارة (62C) وهكذا تكررت عملية فتح وإغلاق نظام التبريد من مرتين إلى ثلاث مرات في اليوم تبعاً لكفاية الإشعاع الشمسي لرفع درجة حرارة الخلايا الفوتوفولتية للدرجة القصوى المذكورة هذه التجربة تم تكرارها لثلاثة أيام متتالية وتم تسجيل البيانات بمسجل البيانات كامبل CR23X كما في الشكل (5)



شكل (5) تسجيل البيانات المتحصّل في التجربة

بتركيب الخلية الفوتوفولتية بزاوية ميل (22) درجة مئوية لكي يسقط الإشعاع الشمسي بشكل عمودي على سطح الخلية وتم تحديد ذلك تجريبياً ثم وبالاعتماد على [1] ASHRAE تم تحديد قيم الإشعاع الشمسي عند زاوية ميل الألواح (22) درجة مئوية لمدينة اللاذقية في أيام إجراء البحث لعدم توفر جهاز لقياس شدة الإشعاع الشمسي. تم قياس تدفق الهيدروجين المتولد من عملية التحليل الكهربائي بواسطة جهاز بسيط لقياس تدفق الغازات في حين لم نتمكن من تجميع وتخزين غاز الهيدروجين المتولد لعدم توفر الوسائل والتجهيزات اللازمة لذلك كالمضاغط اللازم لرفع

ضغط الغاز والاسطوانات الآمنة التي يمكن وضع الغاز داخلها بشكل آمن ومدروس حيث يتم تجميع وتخزين الهيدروجين إما كغاز مضغوط أو بحالة سائلة في ضغوط مرتفعة خاصة وأن غاز الهيدروجين غاز قابل للاشتعال وخطر ويحتاج لخبرة ودراية بطريقة التعامل معه ولذلك تم إطلاقه بالهواء تُحسب استطاعة الخرج للخلية الفوتوفولتية عند نقطة العمل من المعادلة التالية :

$$[W] P_{out} = V_{out} \cdot I_{out} \quad (1)$$

النتائج والمناقشة :

في الجدول (1) نرى النتائج المسجلة لأيام 7 و 8 و 9 حزيران عام 2014 النتائج المسجلة للخلية الفوتوفولتية المعرضة لإشعاع شمسي ثابت تقريبا على وجهها الأمامي بدون تبريد للخلية أي قبل فتح صمام التبريد ويُظهر تأثير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية على جهد التيار الكهربائي الناتج والذي يبين أنه مع ارتفاع درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية ينخفض الجهد الكهربائي الناتج من الخلية الفوتوفولتية

الجدول (1) تغيرات درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية والجهد على خرج الخلية بدون تبريد

الوقت	اليوم الأول			اليوم الثاني			اليوم الثالث		
	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية c°	جهد التيار المستمر الناتج فولت	شدة الإشعاع w/m ²	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية c°	جهد التيار المستمر الناتج فولت	شدة الإشعاع w/m ²	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية c°	جهد التيار المستمر الناتج فولت	شدة الإشعاع w/m ²
11	34.2	4.368	958.6	34.0	4.36	958.5	34.0	4.358	958.3
11:01	35.8	4.35	959	36.0	4.33	959.2	35.6	4.34	959.1
11:02	37.4	4.291	959.6	37.5	4.27	959.9	37.2	4.286	959.9
11:03	39.9	4.273	960.2	40.0	4.28	960.6	40.0	4.271	960.7
11:04	42.8	4.281	960.9	42.5	4.24	961.3	42.7	4.249	961.5
11:05	44.2	4.263	961.5	44.0	4.22	962	44.1	4.238	962.3
11:06	45.1	4.244	962.1	45.0	4.2	962.7	45.1	4.23	963.1
11:07	46.3	4.225	962.9	46.0	4.17	963.4	46.2	4.194	963.9
11:08	47.2	4.21	963.6	47.5	4.16	964.1	47.4	4.183	964.7
11:09	48.2	4.193	964.2	48.0	4.14	964.8	48.2	4.173	965.5
11:10	49.1	4.176	965	49.0	4.12	965.5	49.1	4.16	966.3
11:11	49.8	4.157	965.7	50.0	4.11	966.2	50.1	4.137	967.1
11:12	50.5	4.135	966.4	50.5	4.09	966.9	50.8	4.109	967.9
11:13	51.5	4.117	967.5	51.5	4.086	967.6	51.6	4.093	968.7
11:14	52.2	4.099	968	52.0	4.076	968.3	52.3	4.082	969.5
11:15	53.3	4.082	968.5	52.5	4.067	969	52.8	4.077	970.3
11:16	53.8	4.069	968.9	53.0	4.057	969.7	53.3	4.071	971.1
11:17	54.0	4.061	969.3	53.5	4.052	970.4	53.8	4.065	971.9
11:18	54.4	4.057	969.7	54.0	4.045	971.1	54.2	4.066	972.7
11:19	55.4	4.048	970.1	55.5	4.021	971.8	55.3	4.04	973.5
11:20	55.7	4.039	970.6	55.5	4.016	972.5	55.5	4.033	974.3
11:21	56.2	4.029	971	56.0	4.004	973.2	56.0	4.021	975.1
11:22	56.5	4.027	971.5	56.2	3.997	973.9	56.2	4.017	975.9
11:23	56.6	4.026	971.9	56.5	3.994	974.6	56.5	4.018	976.7
11:24	57.0	4.018	972.4	57.0	3.98	975.3	56.9	4.016	977.5

الخلية الفوتوفولتية تعمل بدون تبريد (صمام دخول الماء مغلق)

ويُظهر الجدول (2) النتائج المسجلة لنفس الأيام المذكورة من الاختبار بعد فتح صمام مياه التبريد. وكانت درجة حرارة الجو المحيط في اليوم الأول للاختبار 28 درجة مئوية واليومين التاليين (8 و 9 حزيران) هي 29 درجة مئوية فيما كانت درجة حرارة مياه التبريد المستخدمة لتبريد الخلية الفوتوفولتية بحدود 28 درجة مئوية.

اليوم الثالث			اليوم الثاني			اليوم الأول			الوقت
شدة الإشعاع	جهد التيار المستمر الناتج	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	شدة الإشعاع	جهد التيار المستمر الناتج	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	شدة الإشعاع	جهد التيار المستمر الناتج	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	
w/m ²	فولت	c°	w/m ²	فولت	c°	w/m ²	فولت	c°	
978.3	3.925	61.9	976	3.892	62.0	972.8	3.979	61.9	11:25
979.1	3.979	59.0	976.7	3.938	59.3	973.3	3.99	59.1	11:26
979.9	4.022	55.3	977.4	4.018	55.6	973.7	4.041	55.4	11:27
980.7	4.135	50.1	978.1	4.141	50.2	974.1	4.139	49.9	11:28
981.5	4.217	43.3	978.8	4.253	44.0	974.6	4.223	43.4	11:29
982	4.333	35.5	980.3	4.361	35.9	975	4.355	36.0	11:30
982.3	4.383	33.1	980.7	4.372	32.5	975.4	4.375	32.6	11:31
982.6	4.44	30.1	981.1	4.45	30.2	975.9	4.46	30.1	11:32
982.9	4.43	30.1	981.5	4.465	29.8	976.4	4.471	29.7	11:33
983.2	4.43	30.1	981.9	4.475	29.7	976.9	4.473	29.8	11:34
983.5	4.468	30.0	982.3	4.482	29.6	977.5	4.47	29.7	11:35
983.8	4.471	30.0	982.7	4.484	29.5	978	4.468	30.0	11:36
984.1	4.472	30.1	983.1	4.488	29.5	978.6	4.47	30.0	11:37
984.4	4.469	30.1	983.5	4.488	29.5	979.4	4.472	30.0	11:38
984.7	4.47	30.0	983.9	4.49	29.5	980.3	4.472	30.0	11:39
985	4.468	30.0	984.3	4.493	29.5	981	4.472	30.0	11:40
985.3	4.468	30.0	984.7	4.495	29.5	981.7	4.471	30.0	11:41
985.6	4.47	30.0	985.1	4.496	29.4	982	4.47	30.0	11:42
986.3	4.471	30.0	985.6	4.497	29.3	983.1	4.471	30.0	11:43

فتح صمام دخول الماء لتبريد الخلية الفوتوفولتية

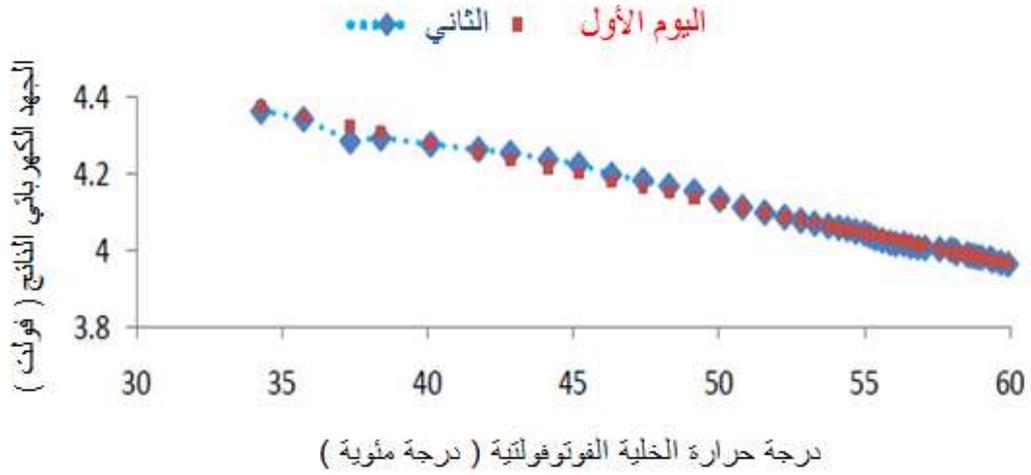
الجدول (2) تغيرات درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية والجهد الكهربائي على خرج الخلية أثناء الاختبار

وبوضح الشكل (6) تغيرات درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية والجهد الكهربائي على خرج الخلية خلال الاختبار وتظهر جلياً العلاقة العكسية بين درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية والجهد الكهربائي الناتج كما يبين أنه عند فتح صمام دخول ماء التبريد للخلية بعد 25.5 دقيقة من بدء الاختبار خلال أقل من دقيقة ارتفع الجهد الكهربائي ليصبح 4.5 فولت وحافظ على هذه القيمة مع بقاء صمام ماء التبريد مفتوحاً ليعطي بذلك ارتفاع الجهد الكهربائي بمعدل 12.8% بفضل نظام التبريد GFC.

وكذلك يوضح الشكل (7) التأثير السلبي لارتفاع درجة حرارة الخلية على الجهد الكهربائي المتولد من الخلية حيث حدث هبوط بمقدار 11.3% في الجهد الكهربائي مقابل ارتفاع درجة حرارة الخلية بمقدار 28 درجة مئوية كما يُظهر الشكل هبوط الجهد من 4.4 فولت حتى 3.9 فولت مقابل ارتفاع درجة الحرارة للخلية الفوتوفولتية من 34 درجة مئوية حتى 62 درجة مئوية



الشكل (6) يوضح تغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية وتغير الجهد الكهربائي كتابع للزمن



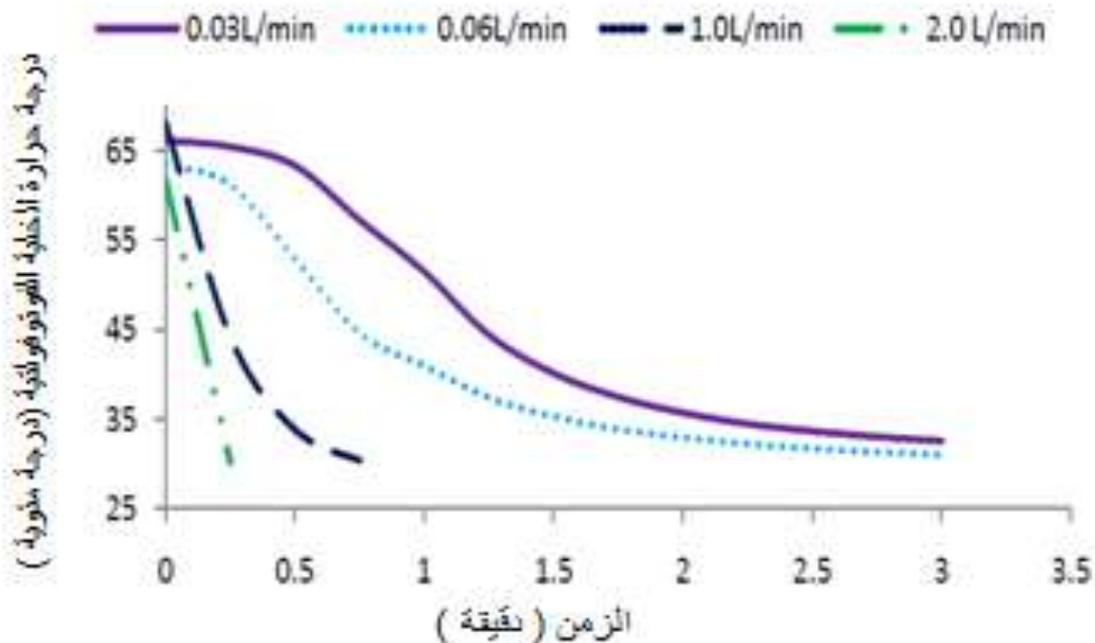
شكل (7) تغير الجهد الكهربائي تبعاً لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية (درجة مئوية) قبل فتح صمام ماء التبريد

لدراسة تأثير تغير تدفق مياه التبريد على درجة حرارة الخلية والاستطاعة الكهربائية على خرج الخلية وبالتالي على معدل إنتاج الهيدروجين قمنا بإجراء الاختبار لأربع تدفقات مختلفة على يومين متتاليين كما هو موضح الجدول (3) مع فارق زمني ربع دقيقة بين القراءات بهدف رسم مخطط دقيق لتغير درجة الحرارة والجهد الكهربائي تبعاً لتغير تدفق مياه التبريد.

أظهرت النتائج المبينة في الجدول (3) والشكل (8) أن درجة الحرارة للخلية الفوتوفولتية تصل بزمن أقل مع زيادة تدفق مياه التبريد إلى فرق 3 درجات فقط عن درجة حرارة مياه تبريد النظام وهي 28 درجة مئوية .

اليوم الثاني				اليوم الأول				الزمن دقيقة
التجربة الرابعة 2.0 L/min		التجربة الثالثة 1.0L/min		التجربة الثانية 0.06L/min		التجربة الأولى 0.03 L/min		
درجة مئوية	فولت	درجة مئوية	فولت	درجة مئوية	فولت	درجة مئوية	فولت	
65.8	3.893	68.0	3.882	65.2	3.888	66.1	3.884	0
33.3	4.45	44.2	4.216	62.4	3.915	65.4	3.887	0.25
30.0	4.447	33.9	4.371	56.3	4.066	63.3	3.891	0.5
30.0	4.45	30.4	4.44	45.1	4.216	57.2	3.974	0.75
30.0	4.451	30.3	4.447	41.3	4.259	51.4	4.086	1
30.0	4.448	30.5	4.443	37.7	4.283	44.4	4.222	1.25
30.0	4.451	30.2	4.443	35.4	4.301	40.1	4.288	1.5
30.0	4.451	30.3	4.447	33.8	4.382	37.5	4.281	1.75
30.0	4.447	30.4	4.451	32.9	4.404	35.7	4.335	2
30.0	4.449	30.4	4.452	32.3	4.418	34.5	4.362	2.25
30.0	4.453	30.4	4.448	31.8	4.423	33.7	4.375	2.5
30.0	4.451	30.4	4.452	31.4	4.436	33.0	4.391	2.75
30.0	4.451	30.4	4.451	31.1	4.447	32.5	4.401	3
30.0	4.453	30.4	4.451	30.9	4.448	32.2	4.398	3.25
30.0	4.451	30.4	4.451	30.8	4.452	31.8	4.403	3.5
30.0	4.451	30.3	4.449	30.6	4.449	31.6	4.401	3.75

الجدول (3) يُظهر تغيرات درجة حرارة الخلية والجهد الكهربائي تبعاً لتغير تدفق مياه التبريد



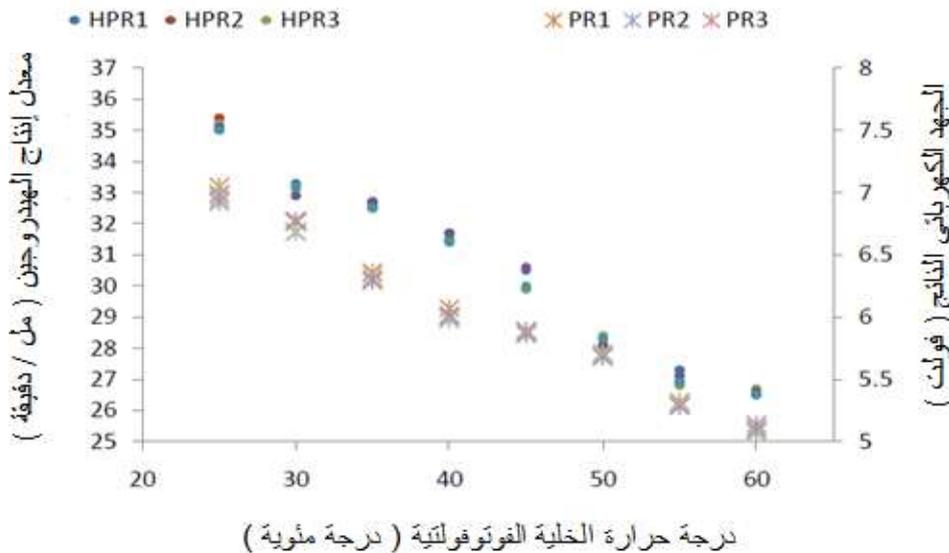
الشكل رقم (8) مخطط تغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية تبعاً لزمان عند تدفقت مختلفة لمياه التبريد

يظهر المخطط البياني في الشكل (8) أيضاً سرعة التبريد مع زيادة تدفق مياه التبريد أي سرعة انخفاض درجة الحرارة بعد تشغيل نظام التبريد GFC ففي فترة قصيرة جداً تصل الخلية الفوتوفولتية إلى حالة الثبات بعد انخفاض درجة حرارتها من 62 حتى 30 درجة مئوية ويظهر المخطط أيضاً العلاقة بين الجهد الكهربائي ودرجة الحرارة فبارتفاع الحرارة من 34 حتى 62 ينخفض الجهد الكهربائي من 4.4 فولت حتى 3.9 فولت (عند فتح صمام ماء التبريد بعد 25.5 دقيقة من بدء التجربة) حيث بعد بدء التبريد يعود النظام بسرعة إلى الثبات عند جهد 4.5 فولت

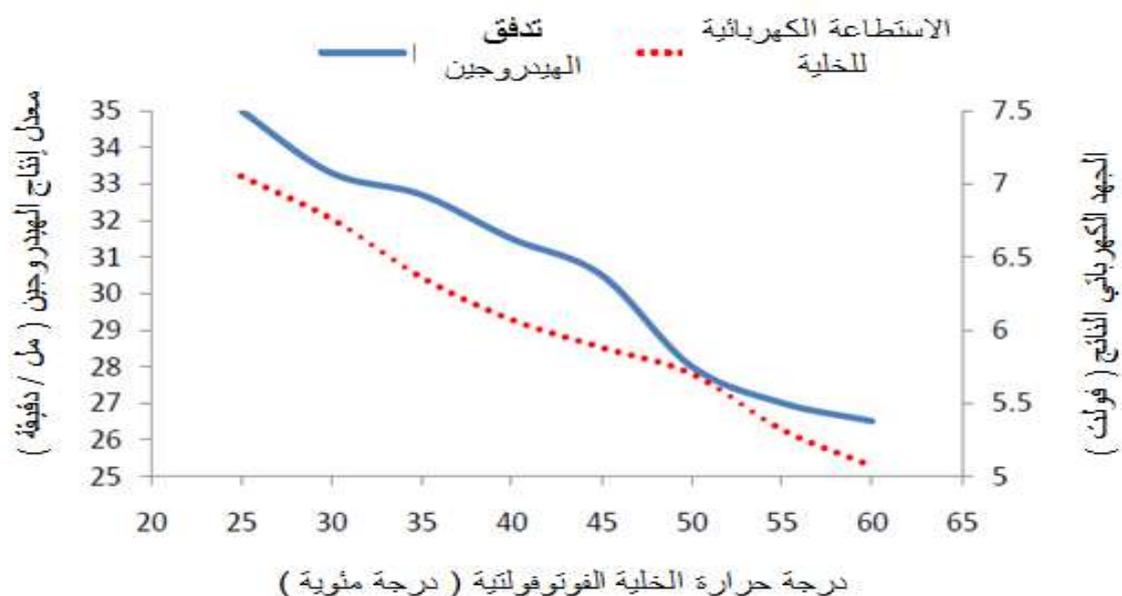
اليوم الأول		اليوم الثاني			اليوم الثالث	
درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	استطاعة الخرج في اليوم الأول	معدل إنتاج الهيدروجين	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	استطاعة الخرج في اليوم الثاني	معدل إنتاج الهيدروجين	استطاعة الخرج لليوم الثالث
c°	watt	ml/min	c°	watt	ml/min	watt
25	7.05	35	25	6.92	35.4	6.95
30	6.76	33.3	30	6.68	32.9	6.77
35	6.36	32.7	35	6.29	32.5	6.29
40	6.07	31.5	40	5.99	31.7	6.01
45	5.88	30.5	45	5.89	29.9	5.89
50	5.69	28.1	50	5.71	28.1	5.68
55	5.32	27.3	55	5.29	26.9	5.29
60	5.07	26.5	60	5.09	26.5	5.14

الجدول (4) يُظهر تغيرات معدل إنتاج الهيدروجين واستطاعة الخلية تبعاً لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية

يظهر الجدول (4) نتائج تدفق غاز الهيدروجين مقابل درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية بدون استخدام نظام تبريد للخلية الفوتوفولتية حيث بارتفاع درجة حرارة الخلية ينخفض كل من معدل إنتاج الهيدروجين ومعدل الجهد الكهربائي الناتج



الشكل (9) تغير معدل إنتاج الهيدروجين والاستطاعة الكهربائية تبعاً لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية

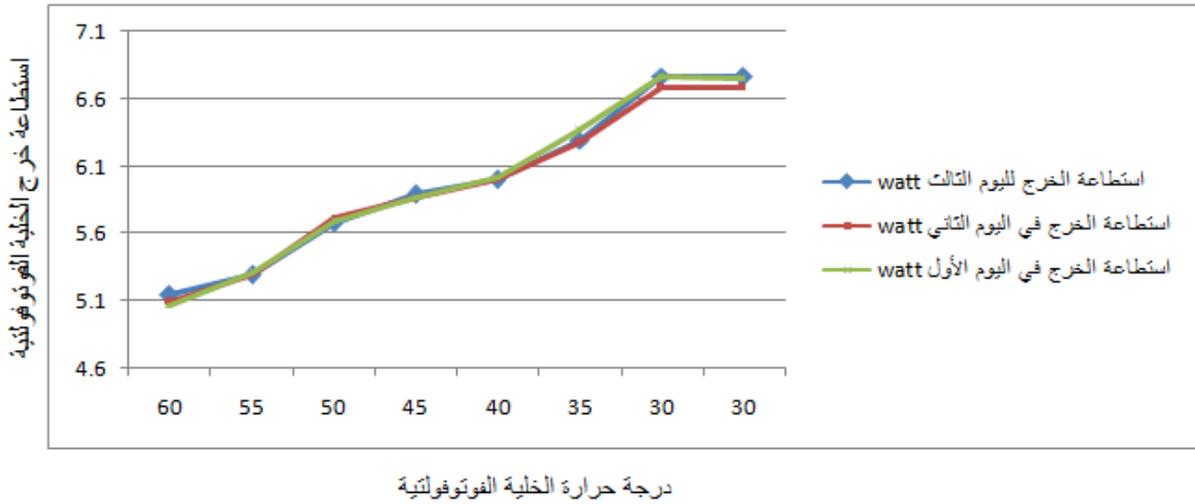
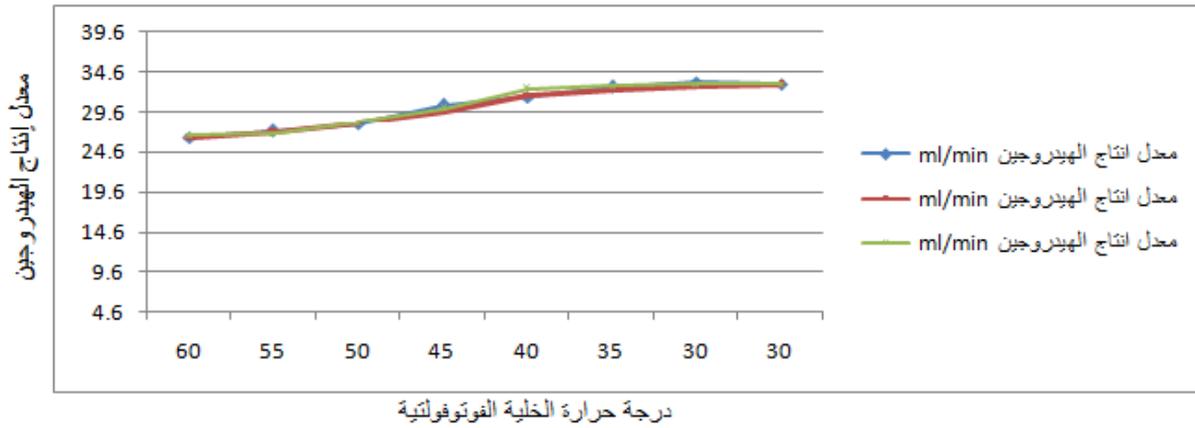


الشكل (10) تخير معدل إنتاج الهيدروجين والاستطاعة الكهربائية تبعاً لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية

ومع وصول حرارة الخلية إلى 60 درجة مئوية تم فتح صمام دخول ماء التبريد للخلية وتم تسجيل النتائج المبينة في الجدول (5) ويوضح الشكل (11) الانعكاسات الإيجابية لتبريد الخلية الفوتوفولتية على معدل إنتاج الهيدروجين واستطاعة الخلية الفوتوفولتية

اليوم الثالث			اليوم الثاني			اليوم الأول		
معدل إنتاج الهيدروجين	استطاعة الخرج لليوم الثالث	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	معدل إنتاج الهيدروجين	استطاعة الخرج في اليوم الثاني	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	معدل إنتاج الهيدروجين	استطاعة الخرج في اليوم الأول	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية
ml/min	watt	c°	ml/min	watt	c°	ml/min	watt	c°
26.7	5.14	60	26.5	5.09	60	26.5	5.07	60
26.9	5.29	55	27	5.3	55	27.3	5.31	55
28.3	5.68	50	28.3	5.72	50	28.2	5.69	50
30	5.89	45	29.5	5.87	45	30.5	5.87	45
32.5	6	40	31.7	6	40	31.5	6.02	40
32.9	6.29	35	32.3	6.27	35	32.7	6.37	35
33.1	6.77	30	32.9	6.68	30	33.3	6.76	30
33.1	6.76	30	33	6.68	30	33.1	6.75	30

الجدول (5) يُظهر تغيرات معدل إنتاج الهيدروجين واستطاعة الخلية تبعاً لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية بعد فتح صمام ماء التبريد



الشكل (11) يوضح تخير استطاعة الخلية ومعدل إنتاج الهيدروجين تبعاً لدرجة حرارة الخلية بعد البدء بتبريد الخلية

يوضح المنحني البياني في الشكلين (9) و (10) أن انخفاض الجهد الكهربائي الناتج عن الخلية الشمسية يتسبب بانخفاض معدل إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي حيث ينخفض معدل إنتاج الهيدروجين من 35 ميلي لتر في الدقيقة إلى 26.5 ميلي لتر في الدقيقة بما يترافق مع ارتفاع حرارة الخلية الفوتوفولتية 35 درجة مئوية (من 25 درجة حتى 60 درجة مئوية) وهذا يترافق مع انخفاض استطاعة جهاز التحليل الكهربائي من 7.05 وات حتى 5.07 وات ويظهر جليا في المخطط البياني للشكل (11) التأثير الايجابي للتبريد على ارتفاع الجهد الكهربائي ومعدل إنتاج الهيدروجين وقد رأينا أن نظام التبريد GFC يستطيع خفض درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية حتى 30 درجة مئوية وهذا يتسبب بزيادة 33.3% في استطاعة الطاقة الكهربائية من (5.07 حتى 6.76) وات مع انخفاض حرارة الخلية من (60 حتى 30) درجة مئوية و زيادة في معدل إنتاج الهيدروجين 25.6% من (26.5 حتى 33.3) مللتر / الدقيقة وهكذا نخلص إلى النتيجة التالية :

إن استخدام نظام التبريد للخلايا الكهربائية GFC يزيد من فعالية توليد الطاقة الكهربائية وبالتالي ينتج زيادة في معدل إنتاج الهيدروجين.

تظهر النتائج أيضا أن زيادة تدفق مياه التبريد يؤثر بشكل إيجابي وفعال في أداء الخلية الفوتوفولتية وتوضح النتائج العملية هذا الدور حيث أظهرت التجارب أيضا أنه ومن أجل جميع تدفقات مياه التبريد تبقى

درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية بعد ثباتها أعلى بثلاث درجات من درجة حرارة مياه التبريد، ومن أجل جميع نسب التدفق تبين أنه يمكن الوصول للدرجة المطلوبة من التبريد أقل من ثلاث دقائق بعد تعرض الخلية الفوتوفولتية للإشعاع الشمسي لعدة ساعات وبعبارة أخرى يمكن أن يُحسّن النظام بتدفقات تبريد منخفضة. يوضح المخطط البياني في الشكل (8) الزمن اللازم لتصل درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية إلى 30 درجة مئوية من أجل أربع تدفقات مختلفة ففي غضون 3 دقائق تصبح درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية حوالي 30 درجة مئوية وتحافظ على هذا الانخفاض (عندما تكون حرارة مياه التبريد بين 27 إلى 28 درجة مئوية).

كمية الهيدروجين التي تم الحصول عليها :

خلال التجارب تراوح معدل إنتاج الهيدروجين بين 26.5 مل لتر في الدقيقة إلى 35 مل لتر في الدقيقة تبعاً لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية والذي ترافق بدوره بتغير استطاعة خرج الخلية الفوتوفولتية بين 5 وات حتى 7 وات أي أن المعدل الوسطي لإنتاج الهيدروجين خلال الاختبار كان 31 مل لتر تقريبا وكان العدد الكلي لساعات الإخبار خلال أيام الاختبار 9 ساعات تقريبا بالتالي الكمية الكلية للهيدروجين لمنتج هي 16.74 لتر ورافق إنتاج هذه الكمية من الهيدروجين تحليل كمية من الماء تم قياسها فكانت 12.5 مل لتر من الماء

الاستنتاجات والتوصيات :

يمكن تلخيص نتائج البحث بالنقاط الهامة التالية:

1. إن تبريد الخلية الفوتوفولتية يرفع كفاءة الخلية الفوتوفولتية في تحويل طاقة الإشعاع الشمسي إلى تيار كهربائي مستمر حيث أثبتت التجارب أن استخدام نظام تبريد بسيط يعمل بالثقالة قادر على المحافظة على درجة حرارة ثابتة للخلية الفوتوفولتية بحيث تبقى أعلى ب 3 درجات مئوية من درجة حرارة مياه التبريد المستخدمة في حال بقي صمام الماء مفتوحا بشكل مستمر
2. ترتفع استطاعة الخلية الفوتوفولتية بحدود 33% بانخفاض حرارة الخلية الفوتوفولتية بحدود 30 درجة مئوية.
3. إن معدل إنتاج الهيدروجين في أنظمة الطاقة الشمسية - هيدروجين التي يُستخدم فيها نظام التبريد GFC (درجة حرارة الماء المستخدم هي 28 درجة مئوية) تصل إلى 33 مل في الدقيقة أي بزيادة مقدارها 26% مقارنة مع حالة عدم استخدام نظام التبريد.
4. العلاقة بين درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية ومعدل إنتاج الهيدروجين هي علاقة عكسية مما يجعل تطبيق نظام تبريد أمر ضروري في تطبيقات وأنظمة الطاقة الشمسية الهيدروجينية.
5. يمكن استنتاج الارتباط الرياضي "بصورة تقريبية" بين كمية الهيدروجين التي يمكن الحصول عليها من جهاز التحليل واستطاعة الخلية الفوتوفولتية اعتماداً على ما تم الحصول عليه من بيانات بالشكل التالي : عند تشغيل الخلية الفوتوفولتية بدرجة حرارة 25 درجة مئوية وعند استطاعة خرج تساوي 7 وات فإنها تعطي 35 مل لتر غاز هيدروجين في الدقيقة ولحساب الاستطاعة المبذولة خلال ساعة $25.2 \text{ kw/h} = (7 \times 3600 / 1000)$ ويتم خلالها إنتاج $2.1 \text{ lit/h} = 35 \times 60 / 1000$ ويترافق ذلك بتحليل $1.56 \text{ ml H}_2\text{O} = (2.1 \times 12.5 / 16.74)$

6. إن النتيجة العامة من هذا البحث هي أن استخدام نظام الهيدروجين الشمسي يخفف من الاعتماد على الوقود النفطي ويساهم بشكل فعال في الحفاظ على البيئة.
7. من الناحية الاقتصادية تعتبر كلفة إنتاج الهيدروجين اقتصادية مقارنة مع أنواع أخرى لكن هذا لا يشمل تخزين وتوزيع الهيدروجين حيث أن تخزين وتوزيع الهيدروجين يتطلب تجهيزات كالضواغط وخزانات لتخزين الوقود يجعل منه أكثر كلفة من أنواع الوقود الأخرى كالديزل مثلاً لذلك ولجعل استثمار الهيدروجين اقتصادياً يمكن استثماره بأن يتم توليده بمحطات صغيرة تُقام ضمن المنشآت الصناعية التي تحتاج لاستخدام الوقود بحيث يجعل عملية تخزين الهيدروجين ضمن خزانات ونقله ضمن شبكة أنابيب صغيرة ممكناً وهذا يختصر كلفة نقل وتوزيع الهيدروجين ويلغي الصعوبات اللوجستية في عملية النقل ، ويمكن القول أن الهيدروجين كوقود إن لم يكن بديلاً اقتصادياً بالوقت الحالي فهو على الأقل مصدر مساعد للطاقة يمكن الاستفادة منه لتغطية جزء من احتياجات الطاقة.
8. الهيدروجين كغيره من أنواع الوقود الأخرى القابلة للاشتعال يعتبر غاز خطر ويحتاج إلى دراية وخبرة في التعامل معه تجنباً لوقوع الحوادث إلا أنه يمكن استعماله بسلام إذا تم فهم مزاياه وإتباع تعليمات الأمان الخاصة بذلك ومن الجدير بالذكر أن غاز الهيدروجين هو غاز عديم اللون والطعم والرائحة [7] مما يعني صعوبة اكتشاف تسربه من الأنابيب والخزانات لذلك يتم إضافة كبريت عطري له لجعله قابلاً للكشف
- نخلص من هذا البحث بفكرة إنشاء محطة كهرباء نظيفة كلياً تستخدم الخلايا الفوتوفولتية لتوليد الطاقة الكهربائية وتستخدم الطاقة الكهربائية الفائضة في عملية تحليل الماء لإنتاج الهيدروجين فيصبح الهيدروجين بمثابة خزان للطاقة الفائضة فتعمل المحطة خلال ساعات النهار بالطاقة الشمسية وخلال الليل بالطاقة الهيدروجينية

المراجع :

- [1]- ASHRAE. (*America Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*). ASHRAE Handbook OHV AC Applications, 1995-1996.
- [2]-BRINKWORTH, B.J. ; CROSS, B.M. ; MARSHALL, R.H. "*Thermal Regulation of Photovoltaic Cladding*," *Sol. Energy*. 61st, 1997, pp. 169-178.
- [3] - Brogren M., Karlsson B. *Low-Concentrating Water-Cooled PV-Thermal Hybrid Systems for High Latitudes*. In: Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp.1733-36, 2002
- [4] - Crabtree G.W., Dresselhaus M.S., Buchanan M.V. (2004). *The Hydrogen Economy*. PhysicsToday.Org. Retrieved July 15, 2007 from
- [5] - Dahl J., Buechler K., Finley R., Stanislaus T., Weimer A., Lewandowski A. et al. *Rapid Solar-thermal Dissociation of Natural Gas in an Aerosol Flow Reactor*. Proceedings of the 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-610-32405.
- [6] Engineering ToolBox. *Fuels and Higher Calorific Values*. Retrieved October 31, 2008 from
- [7] - Hydrogen Economy Fact Sheet (2003). Retrieved June 30, 2007 from
- [8]-KRAUTER, S. ; ARAUJA, R. G. ; SCHROER, S. ; HANITSH, R. ; SALHI, M.J. ; TRIEBEL, C. ; LEMOINE, R. "*Combined Photovoltaic and Solar Thermal Systems for Facade Integration and Building Insulation*," *Sol. Energy*, 67th, 1999, pp. 239-248.
- [9] -KRAUTER, S. *Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels*. Solar Energy Materials and Solar Cells, Brazil, 2004, Vol. 82, pp.131-137.

- [10] - MARTINELLI,G. ; STEFANCICH,M. *Solar Cell Cooling*. 2nd , Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp.133-149.
- [11]-Maycock, P. D., "PV Review, *World Solar PV Market Continues Explosive Growth*, " *Refocus*, 16th, 2005, pp. 105-145.
- [12] - Momirlan M., Veziroglu T.N. *Current Status of Hydrogen Energy*; Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol.6, pp.141–179, 2002.
- [13] - Natural Gas Reform (2006). *HFCIT Hydrogen Production: Natural Gas Reform*. Retrieved February 10, 2008 from
- [14] -Rosen M.A., Scott D.S. *Comparative Efficiency Assessments for a Range of Hydrogen Production Processes*. Int. Journal Hydrogen Energy, Vol.23, No.8, pp. 653-659, 1998.
- [15]- Solomon B. D., Banerjee A. *A Global Survey of Hydrogen Energy Research, Development and Policy*. Energy Policy 34 (2006) 781–792
- [16] - Spath P.L., Mann M. K. *Life cycle assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming*. NREL/TP-570-27637 Revised February 2001.
- [17] - Sweelem E., Fahmy F., Abd-El Aziz M. *Increased Efficiency in the Conversion of Solar Energy to Electric Power*. Energy Sources, Vol.21, pp.367-77, 1999