الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر-الوادي-
كلية العلوم الدقيقة
قسم الفيزياء

رقم الترتيب: .....
رقم التسلسل: .....

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة
تخصص: فيزياء تطبيقية إشعاعات وطاقة

من إعداد:
اسحيمي شهيرة

بن دومة سكينة

تحت عنوان:

دراسة حول إنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية

نوقشت يوم: ../2023/06

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

دلمي سامية	أستاذ محاضر	رئيسا
بوراس فتحي	أستاذ محاضر	مناقشا
اللبي عبد القادر	أستاذ محاضر -أ-	مؤطرا

السنة الجامعية: 2023/2022

أنجزت المذكرة بمخبر الفوطونيات

بسم الله الرحمن الرحيم

وَقُل رَّبِّ زِدْنِي عِلْمًا

الإهـداء

الحمد لله الذي أنار لنا درب العلم والمعرفة وأعاننا على أداء هذا الواجب ووفقنا إلى انجاز هذا العمل.

نـهدي ثمار هذا العمل لأسباب النجاح والصلاح:

إلى أبي العطوف.... قدوتي، ومثلي الأعلى في الحياة; فهو من علمني كيف أعيش بكرامة وشموخ.

إلى أمي الحنونة.... لا أجد كلمات يمكن أن تمنحها حقها، فهي ملحمة الحب وفرحة العمر، ومثال التفاني والعطاء.

إلى إخوتي وأخواتي الذين أشد بهم أزري، إلى كل الأقارب والاصدقاء،

إلى كل من ساعدنا في مشوارنا الدراسي.

الشكر والتقدير

نتوجه بخالص الشكر والتقدير إلى أستاذنا الفاضل اللبي عبد القادر على إشرافه على هذه المذكرة وجميل صبره وتوجيهاته القيمة.

كما نتوجه بجزيل الشكر والتقدير إلى كل من ساعدنا وساندنا في إنجاز هذا العمل المتواضع من قريب أو بعيد دون أن أنسى أعضاء لجنة المناقشة لتفضلهم بمناقشة هذه المذكرة.

نتوجه بالشكر إلى كل من علمنا حرفا وسعى لإنارة دروبنا بالعلم من أول حرف تعلمناه إلى غاية يومنا هنا.

فهرس المحتويات

الإهداء I
الشكر والتقدير II
فهرس المحتويات..... IV
فهرس الأشكال..... VII
فهرس الجداول..... VIII
فهرس المعادلات..... IX
قائمة الرموز..... X
المقدمة العامة..... 1

الفصل الأول: الطاقة الشمسية

1.1 مقدمة: 4
2.1. الإشعاع الشمسي: 4
1.2.1 تعريف الإشعاع الشمسي:..... 4
2.2.1 مكونات الإشعاع الشمسي: 4
3.2.1 أنواع الإشعاع الشمسي: 5
4.2.1 العوامل المؤثرة على شدة الإشعاع الشمسي: 6
3.1 الطاقة الشمسية: 6
1.3.1 مفهوم الطاقة الشمسية:..... 6
2.3.1 إستخدامات الطاقة الشمسية:..... 6
3.3.1 إيجابيات الطاقة الشمسية:..... 7
4.3.1 عيوب الطاقة الشمسية:..... 8
4.1 تقنيات تحويل الطاقة الشمسية إلى كهربائية: 8
5.1 الخلية الشمسية: 8
1.5.1 لمحة عن الخلايا الكهروضوئية الشمسية:..... 8

2.5.1 تعريف الخلية الشمسية: 8
3.5.1 أشباه الموصلات: 9
4.5.1 السيليكون: 10
5.5.1 مميزات مادة السيليكون: 10
6.5.1 مكونات الخلايا الشمسية: 11
7.5.1 أنواع الخلايا الشمسية السيليكونية: 12
8.5.1 مبدأ عمل الخلية الشمسية: 15
9.5.1 ربط الخلايا الشمسية: 16

الفصل الثاني: التحليل الكهربائي للماء وإنتاج الهيدروجين

1.1 مقدمة: 18
2.1 التحليل الكهربائي للماء: 18
1.2.1 الماء: 18
2.2.1 تعريف الماء: 18
3.2.1 خصائص الماء: 18
2.2.1 التحليل الكهربائي: 19
1.2.2.1 مفهوم تحليل الماء كهربائيًا: 19
2.2.2.1 معلومات حول تقنية PEM: 20
1.2.2.2.1 كيفية صنع الأقطاب ذات البنية المسامية: 20
3.2.2.1 طريقة تحليل الماء كهربائياً بتقنية PEM: 20
4.2.2.1 العوامل المؤثرة في كفاءة التحليل الكهربائي: 21
5.2.2.1 أنواع التحليل الكهربائي: 21
3.1 إنتاج الهيدروجين: 24
1.2 الهيدروجين: 24
1.1.2 تعريف الهيدروجين: 24
2.1.2 خصائص عنصر الهيدروجين: 25

3.1.2 استغلال الهيدروجين:..... 25
4.1.2 التحديات والعراقيل:..... 26
2.2 طرق إنتاج الهيدروجين:..... 26
1.2.2 خزن الهيدروجين ونقله:..... 27
2.2.2 أفاق إنتاج الهيدروجين:..... 27

الفصل الثالث: دراسة تجريبية حول إنتاج الهيدروجين

1 المقدمة: 30
2 مبدأ العمل: 30
3 الهدف من التجربة: 30
4 عناصر النظام: 30
5 طريقة العمل: 35
1.5 دراسة أداء اللوح الشمسي:..... 35
2.5 دراسة كفاءة المحلل الكهربائي:..... 35
3.5 دراسة كفاءة خلية الوقود:..... 37
6 تحليل النتائج: 37
7 خلاصة: 41
الخاتمة العامة 43
الملخص 45
المراجع 46

فهرس الأشكال

ترتيب الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
	الفصل الأول: الطاقة الشمسية	
(1.1)	مكونات الإشعاع الشمسي	05
(2.1)	أنواع الإشعاع الشمسي	06
(3.1)	الترتيب البلوري لمادتي السيليكون والجرمانيوم	09
(4.1)	موصل من النوع P	10
(5.1)	موصل من النوع N	10
(6.1)	مكونات الخلية الشمسية	11
(7.1)	لوح كهرو شمسي مصنوع من خلايا السيليكون أحادية البلور	13
(8.1)	لوح كهرو شمسي مصنوع من خلايا السيليكون متعدد البلورات	13
(9.1)	لوح كهرو شمسي مصنوع من خلايا السيليكون عشوائية	14
(10.1)	وصلة ثنائية دايود(diode)	15
(11.1)	وصلة ثنائية	16
(12.1)	ربط الخلايا الشمسية على التوازي	16
(13.1)	ربط الخلايا الشمسية على التوالي	16
	الفصل الثاني: التحليل الكهربائي للماء وإنتاج الهيدروجين	
(1.2)	التحليل الكهربائي بتقنية PEM	20
(2.2)	مخطط يوضح التحليل الكهربائي القلوي	22
(3.2)	مخطط يوضح التحليل الكهربائي للحمض	23
(4.2)	مخطط يوضح التحليل الضوئي للماء	23
(5.2)	الهيدروجين في الجدول الدوري	24
	الفصل الثالث: دراسة تجريبية حول إنتاج الهيدروجين	
(1.3)	اللوح الشمسي	31
(2.3)	المحلل الكهربائي	31
(3.3)	وحدة القياس	32
(4.3)	خلية الوقود	33
(5.3)	وحدة الحمل	33
(6.3)	جهاز اللوكس متر	34
(7.3)	جهاز التحليل الكهربائي	34
(8.3)	تغير التيار المنتج من اللوح الشمسي بدلالة الإشعاع الشمسي	37
(9.3)	تغير الجهد بين طرفي اللوح الشمسي بدلالة الإشعاع الشمسي	38
(10.3)	تغير الجهد بين طرفي المقاومة بدلالة المقاومة المركبة في الدارة	38
(11.3)	تغير حجم غاز الأكسجين والهيدروجين بدلالة الزمن	39
(12.3)	تغير تدفق غاز الهيدروجين والأكسجين بدلالة الإشعاع الشمسي	39
(13.3)	تغير جهد خلية الوقود بدلالة المقاومة المركبة في الدارة	40
(14.3)	تغيرالتيارالكهربائي لخلية الوقود بدلالة المقاومة المركبة في الدارة	40

فهرس الجداول

ترتيب الجداول	عنوان الجداول	الصفحة
	الفصل الثالث: دراسة تجريبية حول إنتاج الهيدروجين	
(1.3)	**قيم التيار والجهد المنتج من اللوح الشمسي بدلالة تغير الاستنارة**	**35**
(2.3)	**تغير الجهد بين طرفي المقاومة بدلالة المقاومة المركبة في الدارة**	**35**
(3.3)	**تغير حجم غاز الهيدروجين والأكسجين بدلالة الزمن**	**36**
(4.3)	**تغير حجم تدفق غاز الأكسجين بدلالة الاستنارة**	**36**
(5.3)	**تغيير حجم تدفق غازا لأكسجين بدلالة الاستنارة**	**36**
(6.3)	**تغيير الجهد والتيار بدلالة المقاومة المركبة في الدارة**	**37**

فهرس المعادلات

ترتيب المعادلات	عنوان المعادلات	الصفحة
	الفصل الثاني: التحليل الكهربائي للماء وإنتاج الهيدروجين	
(1.2)	**معادلة الأكسدة للأنود**	**21**
(2.2)	**معادلة الاختزال للكاثود**	**21**
(3.2)	**معادلة التحليل الكهربائي للماء**	**21**
(4.2)	**معادلة التحليل الكهربائي القلوي للأنود**	**21**
(5.2)	**معادلة التحليل الكهربائي القلوي للكاثود**	**21**

قائمة الرموز

الرمز	التسمية
P	اختصار لكلمة Positive (موجب)
N	اختصار لكلمة Négative (سالب)
P-N Junction	منطقة الاتصال في ثنائي الوصلة
H_2	غاز الهيدروجين
O_2	غاز الأكسجين
H_2O	جزيء الماء
O	الرمز الكيميائي للأكسجين
H	الرمز الكيميائي للهيدروجين
H^+	بروتون
PH	معدل الحموضة
PEM	غشاء تبادل البروتونات
g	قرينة تشير للحالة الغازية
l	قرينة تشير للحالة السائلة
PET	التحليل الكهربائي عالي درجة الحرارة
CO_2	غاز ثاني أكسيد الكربون
PEC	التحليل الضوئي للماء
CH_4	غاز الميثان
E	الاستنارة
Q	التدفق الحجمي
V	الجهد الكهربائي
I	التيار الكهربائي
ρ	الكتلة الحجمية
si	الرمز الكيميائية للسيليكون

المقدمة العامة

كلما توسع نشاط الإنسان كلما ازداد طلبه على مصادر الطاقة وخاصة مشتقات البترول لسهولة نقلها وتخزينها ولتعدد استخداماتها، فظهرت أزمات أسعار الوقود، وتنبه الإنسان لمحدودية المصادر الغير المتجددة، وللمشاكل البيئية التي حلت بالأرض من ارتفاع حرارة سطحها فيما عرف بظاهرة الاحتباس الحراري، وظهور ثقب الأوزون والأمطار الحمضية وتلوث البيئة، وتراجع الغابات. فبدأ الإنسان يفكر في التعامل بعقلانية مع ما تبقى من المصادر الأحفوري وترشيد استخدامها، وتشجيع الرجوع لاستعمال الطاقات المتجددة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة المائية [1]. ونشهد حاليا تطورا سريعا للتقنيات التي تسُتخدم لتحويل مصادر الطاقة المتجددة إلى طاقة كهربائية كتور بينات الرياح والخلايا الشمسية والمجمعات والأفران الشمسية وما إلى ذلك من التقنيات [1].

تعتبر الطاقة الشمسية أكثر مصدر طاقة متاح للمجتمع البشري. ونظرًا لأن إجمالي الطاقة الشمسية التي تمتصها الأرض يصل إلى $4 \times 10^6 EJ/year$ فإنها تمثل عشرة أضعاف الطاقة المستهلكة في العالم في عام 2007. على سبيل المثال، إذا تحول 50 بالمائة من ضوء الشمس الساطع على ولاية نيو مكسيكو إلى طاقة نافعة، فيمكن أن يفي هذا بكل احتياجات الطاقة في الولايات المتحدة الأمريكية [2].
لكن حتى وقتنا الحالي تُعد هذه الطاقة، من بين الأنواع المتعدِّدة لمصادر الطاقة المتجدِّدة، الأقل استخدامًا، فهي حاليًا توفر فقط نحو 0.1 بالمائة من إجمالي الطاقة المستهلكة في العالم، أو 0.00001 بالمائة من الإشعاع الشمسي المتاح. مع ذلك، ونتيجة للبحث المستفيض والتطوير المستمر، يحدث حاليًا تقدم سريع على نحو مذهل في استخدام هذه الطاقة، وخاصة الخلايا الكهروضوئية الشمسية [2].

من أبرز استخدامات الطاقة الشمسية توليد الكهرباء الذي يستعمل في إنتاج غاز الهيدروجين، تعتبر هذه الطريقة من بين أهم الطرق المبتكرة والفعالة للحصول على وقود نظيف ومتجدد لتعدد طرق إنتاجه التي تعتمد على موارد متجددة تشترك في استعمال الماء والإشعاع الشمسي في إنتاجه. كذلك نواتج أكسدته أو احتراقه خالية من الملوثات وهي طاقة وبخار ماء [3].
يعد التحليل الكهربائي بواسطة تقنية PEM من أبرز الطرق المستخدمة في إنتاج الهيدروجين، حيث يقسم الماء إلى مكوناته الاساسية وهي غاز الهيدروجين وغاز الأكسجين. يتم الفصل بواسطة تطبيق طاقة كهربائية [4].

- فهل سيكون الهيدروجين البديل الأمثل للوقود الاحفوري الملوث للبيئة؟
- وإذا كان هو البديل فكيف يتم إنتاجه وتحويله إلى طاقة يستفاد منها؟

يتكون هذا العمل من ثلاثة فصول رئيسية. الفصل الأول يتناول دراسة مفصلة حول الطاقة الشمسية وتكنولوجيات توليد الكهرباء باستعمالها. أما الفصل الثاني فخُصّص لدراسة التحليل الكهربائي للماء وإنتاج الهيدروجين باستخدام تقنيات مختلفة. ويتناول الفصل الثالث دراسة تجريبية حول إنتاج غاز الهيدروجين بتقنية PEM باستخدام الطاقة الشمسية.

سيتم في هذا العمل أيضًا تحليل ومناقشة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال التجارب التي أجريت، والتركيز على أهمية استخدام تقنية PEM (غشاء تبادل البروتون) لإنتاج الهيدروجين بشكل نظيف وفعال، بالإضافة إلى تقييم كفاءة وحدات الجهاز المستخدم في عملية إنتاج غاز الهيدروجين.

تمت معالجة هذا العمل باستخدام المنهج العلمي الذي يتضمن عدة خطوات، بما في ذلك البحث الثانوي والتجريبي. وكان البحث عن المعلومات من مراجع علمية ذات صلة بالموضوع.

وفي الأخير حاولنا صياغة خاتمة لتقييم هذا العمل المتمثل في إنتاج غاز الهيدروجين انطلاقا من طرق استخراجه وتنوعه واستخداماته، ومناقشة الاستنتاجات والتوصيات المستخلصة من البحث.

الفصل الأول

الطاقة الشمسية

1.1 مقدمة:

الشمس هي مصدر الطاقة للأرض وسبب وجودها بالشكل الحالي ونتيجة لتأثير الشمس الكبير على حياة البشر فإن الاهتمام بها وصل إلى حد أنها شكلت جزءا من معتقدات بعض الأمم كاليونان والرومان كذلك نقرأ في القرآن الكريم قصة سيدنا يوسف عليه السلام وكيف رأى الشمس والكواكب له ساجدين، أي أن هذه الأهمية الكبيرة للشمس ليست عبثا بل نتيجة لإحساس وإدراك الإنسان بأنها هي المسؤولة عن العديد من الظواهر [5].

تطورت طرق استغلال طاقة الشمس عبر العصور بأشكال مختلفة حسب حاجة البشر لها، ففي وقتنا الحالي تركز معظم أبحاث الطاقة الشمسية على توليد الطاقة الكهربائية من الشمس وذلك بطريقتين هما: تحويل حراري (مركزات شمسية ومجمعات حرارية) أما الطريقة الثانية فهي التحويل الكهروضوئي (الخلايا الشمسية) [5].

سيتم في هذا الفصل التطرق لفهم أوفر حول الطاقة الشمسية وكيفية استغلالها.

2.1. الإشعاع الشمسي:

1.2.1 تعريف الإشعاع الشمسي:

هو مقدار الأشعة الشمسية الساقطة على مساحة معينة والقادرة على توليد قدرة كهربائية. لا يصيب الأرض إلا حوالي جزء من ألفي مليون جزء من أشعة الشمس التي تقدر بنحو 130ميغاواط لكل متر مربع من سطح الأرض، وهذا المقدار الضئيل هو المسؤول عن كل الطاقة الحرارية لسطح الأرض وغلافها الجوي [6].

2.2.1 مكونات الإشعاع الشمسي:

للإشعاع الشمسي عدة مكونات وهي [7]:

-الموجات الحرارية: وهي أشعة غير مرئية بالنسبة للطيف الكهرومغناطيسي وتنسب إلى مجموعة الموجات ذات المدى الطويل في المجال الذي أكبر [0.8µm].

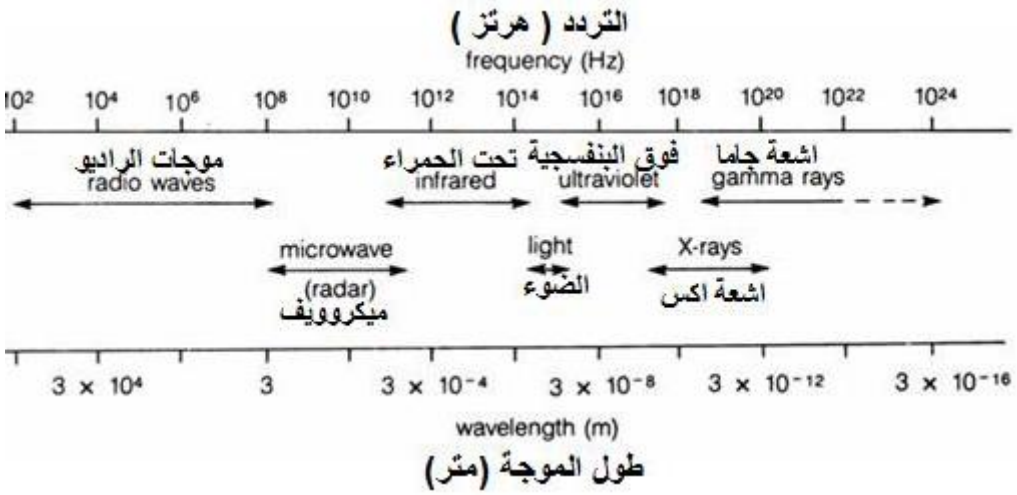
وتعرف بالأشعة تحت الحمراء وتقدر نسبتها نحو (49%) من مجموع الإشعاع الشمسي وجزئها الأكبر لهذه الأشعة يسهم في رفع درجة حرارة الغلاف الجوي وسطح الأرض وهي بذلك يكون لها أثر كبير في الدراسات المناخية، ويسهم بخار الماء في امتصاص قسم كبير منها عند أطوال موجية معينة كما هو مبين في الشكل (1.1).

-الضوء المرئي: وهي أشعة مرئية تقدر نسبتها بنحو (43%) من مجموع الإشعاع الشمسي تنتمي للمجال من 0.4 µm إلى0.8 µm، ويكون من ضمنها الأشعة الحمراء والزرقاء والخضراء وتعتمد النباتات على هذه الأشعة في التركيب الضوئي.

-الأشعة فوق البنفسجية: وتضم نحو (7%) من مجموع أشعة الشمس وتكون هذه الأشعة ذات طول موجي قصير ينتمي إلى المجال الذي يقل عن [0.4µm].

وتصبح مفيدة للإنسان إذا وصلت له بكميات قليلة، إذ تساعد الإنسان على العلاج من بعض الأمراض مثل الكساح، وذلك لقدرتها على إنتاج فيتامين (D) وأن وصولها للأرض يكون بنسبة قليلة جدا، وذلك لأنها تمتص من قبل غاز الأوزون الذي يكون ارتفاعه عن الأرض نحو (35 Km).

أما بقية الإشعاع الشمسي يقدر بنحو (1%) فيكون بشكل أشعة سينية وغاما وموجات راديوية.



الشكل (1.1): يمثل مكونات الإشعاع الشمسي [8]

3.2.1 أنواع الإشعاع الشمسي:

يصل إلى الأرض ثلاثة أنواع من الإشعاعات تمثل 50% من الأشعة الشمسية وهي [9]:

أولا: الإشعاع الشمسي المباشر:

وهو عبارة عن الأشعة التي تصل بشكل مباشر من الشمس إلى الأرض وتمثل نسبة كبيرة في الأيام المشمسة حوالي 27%، أما في الأيام الغائمة فإن الشمس تكون محجوبة بالغيوم وعندئذ يكون الإشعاع تقريبا معدوما ويمثل الإشعاع المبعثر الأغلبية العظمى في هذه الحالة.

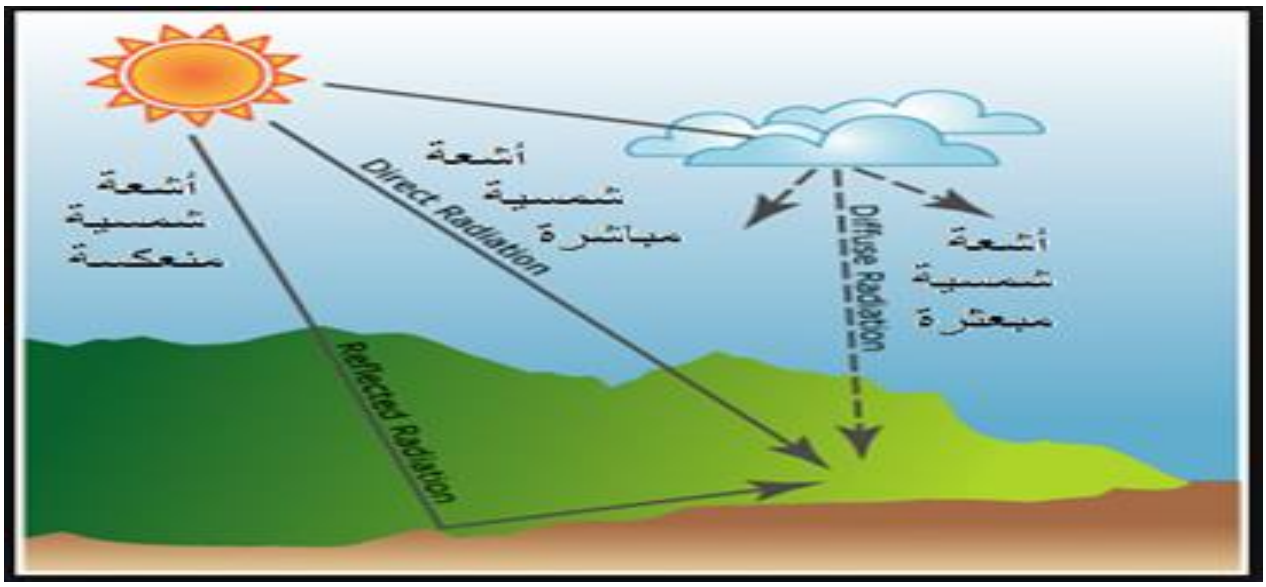
ثانيا: الإشعاع الشمسي المشتت (المبعثر) والمتطاير في الجو:

يأتي هذا الإشعاع من أنحاء متفرقة من السماء بسبب وجود الغيوم وبخار الماء والغازات المنتشرة وطبقة الأوزون وغيرها.... وتكون كمية هذا الإشعاع 10% في حالة السماء صافية و 100%عندما تكون السماء غائمة.

ثالثا: الإشعاع الشمسي المنعكس على سطح الأرض:

إن الإشعاع المنعكس عن سطح الأرض يعتمد على معامل انعكاس الأرض والذي يعرف بالألبيدو وتتراوح قيمته بين 0,2 للحالة العادية و0,7 عند تواجد الثلوج وتشكل هذه الكمية 13% من مجمل الإشعاع الشمسي الوارد.

يوضح الشكل (2.1) أنواع الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض.



الشكل (2.1): أنواع الإشعاع الشمسي [10].

4.2.1 العوامل المؤثرة على شدة الإشعاع الشمسي:

تتأثر بشكل عام كمية وشدّة الإشعاع الشمسي لجميع الأنواع السابقة بعدّ ة عوامل منها: حالة السماء من حيث صفائها وتلبدها بالغيوم، الفصول الأربعة، الارتفاع فوق سطح البحر، موقع الشمس في السماء، وزاوية ميل الشمس وسماكة الغلاف الجوي بالإضافة إلى جملة من الزوايا الشمسية [9].

3.1 الطاقة الشمسية:

1.3.1 مفهوم الطاقة الشمسية:

الطاقة الشمسية هي الضوء المنبعث والحرارة الناتجة عن الشمس اللذان قام الإنسان بتسخيرهما لمصلحته منذ العصور القديمة باستخدام مجموعة من وسائل التكنولوجيا التي تتطور باستمرار، تعرض معظم مصادر الطاقة المتجددة المتوفرة على سطح الأرض إلى الإشعاعات الشمسية بالإضافة إلى مصادر الطاقة الثانوية، مثل طاقة الرياح وطاقة الأمواج والطاقة الكهرومائية والكتلة الحيوية، من الأهمية هنا أن نذكر أنه لم يتم استخدام سوى جزء صغير من الطاقة الشمسية المتوفرة في حياتنا، ولضوء الشمس العديد من الاستخدامات منها توليد الطاقة الكهربائية، وتزويد البنايات بالتدفئة والتبريد والتسخين للماء [11].

2.3.1 إستخدامات الطاقة الشمسية:

يمكن تلخيص التطبيقات الشائعة لاستخدامات الأجهزة الشمسية في الآتي:

أولا: استخدام الطاقة الشمسية في تحلية المياه:

تستخدم الطاقة الشمسية لتحلية المياه بطريقتين، الطريقة الأولى تعتمد على استخدام الطاقة الكهربائية الناتجة من الطاقة الشمسية محل الطاقة التقليدية لاستعمالها مع التقنيات المألوفة للتحلية، أما الطريقة الثانية فتستخدم الإشعاع الشمسي لتبخير جزء من المحلول المِلحي ثم تكثيفه باستخدام المُقطرات البسيطة [1].

ثانيا: تسخين الماء:

تستخدم نظم التسخين التي تعمل بالطاقة الشمسية ضوء الشمس لتسخين الماء. ففي المنخفضات الجغرافية التي تقع (تحت 40 درجة)، يمكن أن يتم توفير ما يتراوح بين 60%إلى% 70 من الماء الساخن المستخدم في المنازل بدرجات حرارة ترتفع إلى 60درجة مئوية بواسطة نظم التسخين التي تعمل بالطاقة الشمسية. ويعتبر من أكثر أنواع سخانات المياه التي تعمل بالطاقة الشمسية الأنابيب المفرغة (44%) والألواح المستوية المصقولة 34% التي تستخدم بصفة عامة لتسخين الماء في المنازل، وكذلك الألواح البلاستيكية غير 21% التي تستخدم بصفة رئيسية في تدفئة مياه حمامات السباحة، وقد بلغ إجمالي سعة نظم تسخين الماء التي تعمل بالطاقة الشمسية خلال عام 2007 حوالي 154جيغاواط [12].

ثالثا: توليد الكهرباء:

يمكن تحويل ضوء الشمس المباشر إلى كهرباء باستخدام محولات فولت ضوئية (pv) وعملية تركيز الطاقة الشمسية والعديد من الأساليب التجريبية الأخرى، وتستخدم المحولات الفولت ضوئية بشكل أساسي لإمداد الأجهزة الصغيرة والمتوسطة بالكهرباء، بدءا من الآلة الحاسبة التي يتم تشغيلها بواسطة خلية شمسية واحدة إلى المنازل التي لا تحتوي على شبكة كهرباء والتي يتم إمدادها بالكهرباء بواسطة مجموعة من الخلايا الفولت ضوئية، وكان يتم توليد الكهرباء على نطاق واسع بواسطة محطات تركيز الأشعة الشمسية، ولكن الآن أصبحت محطات المصفوفات الضوئية الجهدية التي تنتج كمية كبيرة من الكهرباء مثل محطات (إس جس إس) أكثر شيوعا.

وفي عام 2007أصبحت محطة الطاقة التي تنتج الكهرباء بقدرة14 ميغاواط الموجودة في كلارك كاونتي في نيفادا، كذلك المحطة التي تعمل بقدرة20 مغاواط في بينيكساما في اسبانيا أوضح سمتين على الاتجاه نحو إنشاء محطات طاقة شمسية عملاقة في الولايات المتحدة الأمريكية وأوروبا [12].

رابعا: استخدام الطاقة الشمسية في الزراعة:

تعتبر الطاقة أحد المتطلبات الرئيسية للزراعة وتنمية المناطق الريفية، كما أن النباتات تستخدم ضوء الشمس وثاني أكسيد الكربون والماء لتحولها إلى طاقة تنمو بها، ويمكن لمصادر الطاقة المتجددة أن تحل بعض مشاكل المناطق الريفية مثل تحويل المخلفات الزراعية إلى غاز حيوي، إلى جانب استخدام الطاقة الشمسية في ضخ المياه، والصوب الزراعية وتجفيف المحاصيل وكذلك في طهي الأطعمة [1].

3.3.1 إيجابيات الطاقة الشمسية:

للطاقة الشمسية عدة ايجابيات منها [8]:

- الشمس منبع لا ينتهي من الطاقة.
- ما يصل إلى الأرض من الأشعة الشمسية يعادل أضعاف احتياجات البشرية من الطاقة.
- يعتمد استخدامها على التكلفة الأولية فقط.
- لأنها متوزعة على سطح الكرة الأرضية فإنها تصل إلى الجميع بدون الحاجة إلى نقلها وتوزيعها.
- قابلة للتحويل إلى أنواع أخرى من الطاقة مثل الحرارية والميكانيكية والكهربائية.
- لا تحتاج إعادة التزويد بالوقود.

- لا تحتاج إلى أعمال صيانة.
- مصدر نظيف للطاقة من حيث تأثيرها على البيئة وغير خطرة الاستخدام.
- عمر تشغيل طويل يصل إلى 20عاما.
- بناء محطات الطاقة الشمسية وتشغيلها لا يستغرق وقت طويل.

4.3.1 عيوب الطاقة الشمسية:

الطاقة الشمسية كغيرها من الطاقات أيضا لها عيوب وهي [8]:

- عدم استمراريتها خلال اليوم مما يؤدي إلى مشاكل عملية في استخدامها.
- صعوبة تخزين الطاقة بتكلفة اقتصادية منخفضة (أقصى تخزين للبطاريات لا يدوم أكثر من 5أيام).
- تعتبر الخلايا الشمسية حساسة جدا وقابلة للكسر من أقل تأثير من الحيوانات أو الأحجار.
- تحتاج إلى حيز كبير لوضع وحدات عديدة.

4.1 تقنيات تحويل الطاقة الشمسية إلى كهربائية:

يمكن تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية وطاقة حرارية من خلال آليتين [10]:

- **التحويل الكهروضوئي:** ويقصد بالتحويل الكهروضوئي تحويل الإشعاع الشمسي أو الضوئي مباشرة إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلايا الشمسية (الكهروضوئية).
- **التحويل الحراري:** فيعتمد على تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية عن طريق المجمعات الشمسية والمواد الحرارية. فإذا تعرض جسم داكن اللون ومعزول إلى الإشعاع الشمسي فإنه يمتص الإشعاع وترتفع درجة حرارته. كما يستفاد من هذه الحرارة في التدفئة وتسخين المياه وتوليد الكهرباء وغيرها.

5.1 الخلية الشمسية:

1.5.1 لمحة عن الخلايا الكهروضوئية الشمسية:

من الواضح أن في النصف الأول من القرن الحادي والعشرون سينضب الوقود الحفري لدرجة أنه لن يمكنه سد حاجة المجتمع البشري من الطاقة. هناك أنواع متعددة من مصادر الطاقة المتجددة، العديد منها له عيوب، بما في ذلك الطاقة المائية وطاقة الرياح والطاقة الحرارية الأرضية. ويمكن للتطبيقات الحرارية الشمسية مثل سخانات الماء الشمسية أن تسد جزءا صغيرا فقط من إجمالي الطلب على الطاقة، وتعد الخلايا الشمسية البديل الوحيد الواعد للوقود الحفري. وفي هذا القسم سنلقي نظرة سريعة على المفاهيم الأساسية للخلايا الكهروضوئية الشمسية، وسنعرض التفاصيل [2].

2.5.1 تعريف الخلية الشمسية:

الخلية الشمسية هي عبارة عن أجهزة بسيطة جداً مصنوعة من مواد نصف ناقلة تملك القدرة على امتصاص الضوء وتحويل جزء من الطاقة الضوئية الممتصة إلى حوامل التيار الكهربائي (ثقوب وإلكترونات)، وهكذا

فإن الخلية الشمسية ببساطة هي ثنائي (diode) مصمم ومنتج بعناية ليمتص طاقة الضوء بكفاءة من الشمس ويحولها إلى طاقة كهربائية.

تجمع وتربط الخلايا الشمسية كهربائيا مع بعضها بعضا للحصول على اللاقط الكهروضوئي، وبتجميع اللواقط مع بعضها البعض نحصل على مصفوفة لواقط، يستخدم الربط علي التسلسل للحصول علي الجهد اللازم كما أن الربط علي التوازي يعطي التيار المطلوب [13].

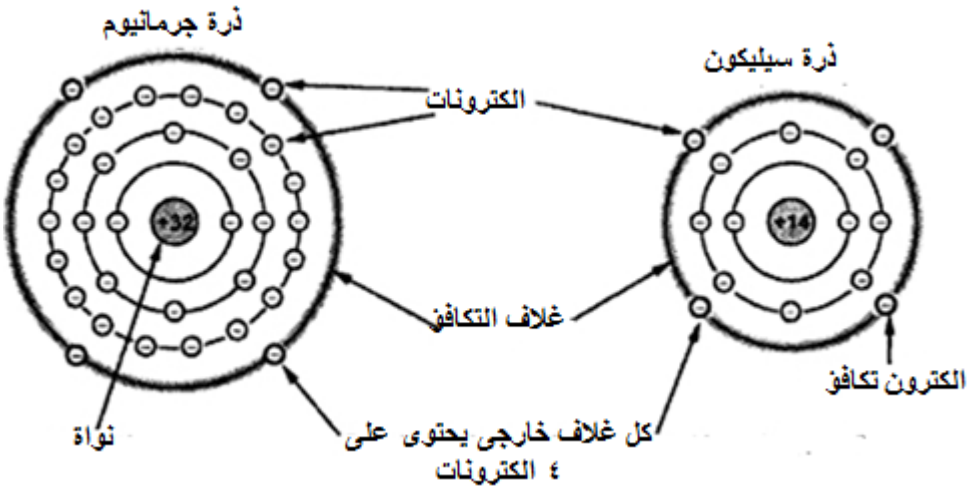
3.5.1 أشباه الموصلات:

أشباه الموصلات هي مواد تتميز بخصائص كهربائية تقع بين خصائص جيدة التوصيل للكهرباء وبين خصائص المواد العازلة، فهي مواد عازلة عند درجة حرارة الصفر المطلق، وتقل مقاومتها بارتفاع درجة الحرارة أو عند تسليط فرق جهد كهربائي عليها أو عند تعرضها لإشعاع بطاقة كافية. وهي المواد التي تحتوي على نسبة قليلة من الالكترونات الحرة، مثل السيليكون والجرمانيوم، هذه المواد هي عناصر رباعية التكافؤ (أي يحتوي غلاف الذرة الخارجي على أربعة إلكترونات) ترتبط ذراتها معا بروابط تساهمية [8].

تصنف المواد شبه الموصلة إلى [8]:

- مواد شبه موصلة نقية:

تتصف بأن لها ترتيبا بلوريا حيث تترتب ذراتها وفق نظام هندسي منسق ومن أمثلتها السيليكون الذي يحتوي على 14 إلكترونا. منهم عشرة مرتبطة بالنواة. وأربعة في الغلاف الخارجي لنواة الذرة، والجرمانيوم الذي يحتوي على32 إلكترونا منها28 إلكترون مرتبط بالنواة وأربعة في الغلاف الخارجي لنواة الذرة، كما هو موضح في الشكل (3.1).



الشكل (3.1) : الترتيب البلوري لمادتي السيلكون والجرمانيوم [8] .

- مواد شبه موصلة غير نقية:

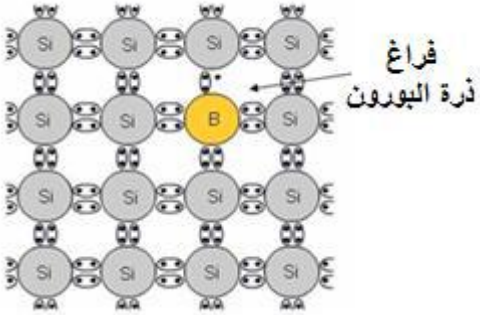
هي نفس المواد النقية السيلكون والجرمانيوم ولكن تم إضافة نسبة من الشوائب إليها مثل: الزرنيخ، الأنتيمون، الفوسفور، الجاليوم، الأنديوم، والبورون، بغرض جعل المواد شبه الموصلة غير النقية تقبل عملية التوصيل الكهربائي.

تنقسم المواد شبه الموصلة غير النقية إلى [8]:

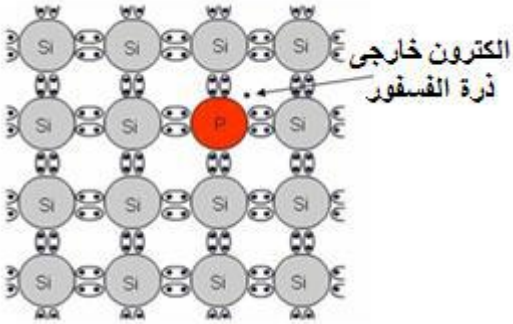
- مواد شبه موصلة مضاف إليها شوائب ذات ذرات عناصر خماسية التكافؤ، مثل: الزرنيخ أو الأنتيمون أو الفسفور... وتكون ناقلات الشحنة الكهربائية فيها هي الالكترونات الحرة وتعرف هذه المواد بالنوع "N".

- مواد شبه موصلة مضاف إليها شوائب ذات ذرات عناصر ثلاثية التكافؤ، مثل: الجاليوم أو الأنديوم أو الباريوم... وتكون ناقلات الشحنة الكهربائية فيها هي الفجوات (أو الفراغ الذي يخلفه الإلكترون المتحرر من الرابطة التساهمية) وتعرف هذه المواد بالنوع "P".

يوضح الشكل (4.1) بلورة شبه موصل نقي (سيليكون Si) مخلوط ببعض ذرات شائبة ثلاثية التكافؤ (البورون) مكونة فجوة وتعرف هذه التركيبة بالبلورة الموجبة P، والشكل (5.1) يوضح بلورة شبه موصل نقي مخلوطة ببعض ذرات شائبة خماسية التكافؤ (الفوسفور) مكونة إلكترون حر وتعرف هذه التركيبة بالبلورة السالبة N.



الشكل (4.1): موصل من النوع p [8].



الشكل (5.1): موصل من النوع N [8].

4.5.1 السيليكون:

هي مادة شبه موصلة يصنف من أشباه الفلزات يمتلك توصيلية كهربائية بين المواد الموصلة والعازلة عند ارتفاع درجة الحرارة تزداد التوصيلية الكهربائية لها، وهو عنصر كيميائي ذو رمز (si) وله عدد ذري (14) [7].

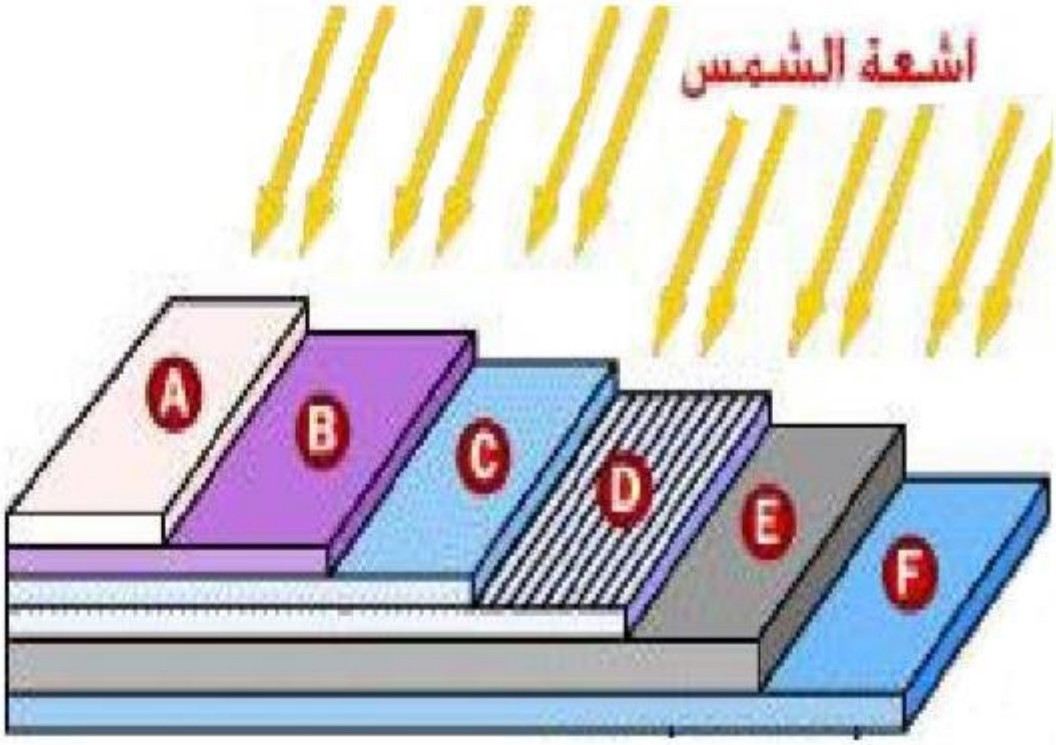
5.5.1 مميزات مادة السيليكون:

من أهم مميزات السليكون ما يلي [9]:

- يعد السيلكون، الذي يمثل 27 بالمائة من قشرة الأرض، وثاني أكثر عنصر توفرا بعد الأكسجين.
- فجوة نطاقه تعد مثلى تقريبا فيما يتعلق بالطيف الشمسي.
- كيميائيا هو عنصر مستقر جدا.
- هو غير سام.
- بفضل صناعة الإلكترونيات الدقيقة، تطورت بشدة عمليات إنتاج ومعالجة السيليكون فائق النقاء.
- بعد أكثر من 50 عاما من البحث والتطوير، اقتربت بالفعل كفاءة الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون24.7 بالمائة بالنسبة لنماذج البحث الأولية-من حدها النظري. وقد وصلت كفاءة الوحدات المنتجة على نطاق واسع، المحدودة الإمكانيات لاعتبارات خاصة بتقليل التكلفة إلى 20 بالمائة.

6.5.1 مكونات الخلايا الشمسية:

الشكل (6.1) يوضح الأجزاء التي تكوّن الخلية الشمسية علما بأن الجزئين Dو Eهما n-type وp-type وتم ذكرهم أما بقية الأجزاء فهي [14]:



الشكل (6.1): مكونات الخلية الشمسية [14].

- الغطاء الزجاجي (A):

تغطي الخلايا عادة بطبقة زجاجية أو بمادة ذات معامل مشابه للزجاج $n_0=1.5$ بالإضافة إلى إمتلاكها المعامل المناسب للإنكسار يجب أن تكون شفافة ومتينة فإن فائدتها لاتعتمد علي توفير الحماية الميكانيكية الجزئية فحسب بل تعمل أيضا كعازل ويوفر نسبة من الحماية الكيميائية ويحمي الخلية من الأضرار التي قد تحدث بسبب البرد الشديد ومن الطيور والأجسام الساقطة عليها والمطر ويحفظ التوصيلات المعدنية من التأكسد الذي تسببه العناصر المؤكسدة الموجودة في الجو. ويجب أن يكون الزجاج له قابلية التحمل لتغير درجات الحرارة خاصة بصورة مفاجئة وأن يكون رخيص الثمن.

- الطلاء غير العاكس(B):

يتم طلاء سطح الخلية المعرض للضوء بمادة غير عاكسة مما يؤدي إلى إلغاء الأشعة المنعكسة إلى حد ما. ويتم إختيار المادة لطبقة الطلاء غير العاكس بحيث يكون لها معامل إنكسار مثالي ليعطي أدني إنكسار عند600 نانومتر ومعدل الضوء المنعكس الذي يمكن الإستفادة منه يساوي 1096 تقريبا مقابل أكثر من 30% في حالة السيليكون غير المطلي.

إن المادة المختارة للطلاء غير العاكس إضافة إلى إمتلاكها المعامل الصحيح للإنكسار يجب أن تكون شفافة وترسب عادة كطبقة غير بلورية أو عشوائية لتلافي المشاكل الناجمة من الضوء المشتت عند حدود الحبيبات

البلورية وإن الطبقات المتكونة بعملية التبخير في الفراغ تقوم عموما بإمتصاص الأطوال الموجية فوق البنفسجية، يمكن تحسين كفاءة الخلية الشمسية بإستعمال طلاء غير عاكس متعدد الطبقات.

- السطح الخشن (C):

طريقة تخشين السطح تؤدي إلى تقليل الإنعكاس وتتضمن هذه الطريقة إزالة طبقة من سطح السيليكون بواسطة التآكل بإستخدام محلول كيميائي والمحلول الشائع الإستخدام لتخشين السطح هو محلول هيدروكسيد الصوديوم القلوي.

هنالك مشاكل مرتبطة بإستخدام السطوح المخشنة منها لزوم العناية عند إستخدامها كما أن هذه السطوح تكون فعالة جدا في إعادة الضوء المنعكس إلى الخلية لجميع الأطوال الموجية ومنها الأشعة تحت الحمراء التي تزيد من حرارة الخلية.

- الوصل الخلفي (F):

الإهتمام نحو الحصول علي سرعة منخفضة لعملية إعادة الإلتحام فلقد تم الحصول على تحسينات أكثر في أداء الخلية الشمسية بعد توجيه الوصل الخلفي فإن السرعة المنخفضة لإعادة الإلتحام تحسن فولطية الدائرة المفتوحةV_0 وبذلك تزيد من إنتاج التيار بدرجة جيدة وأن تقنية مجال السطح الخلفي هي إحدي التقنيات التي تستخدم لتقليل سرعة وفعالية إعادة الإلتحام في السطح الخلفي للخلية الشمسية.

7.5.1 أنواع الخلايا الشمسية السيليكونية:

للخلايا الشمسية السيليكونية عدة أنواع وهي [15]:

- الخلايا السيليكونية أحادية البلورة:

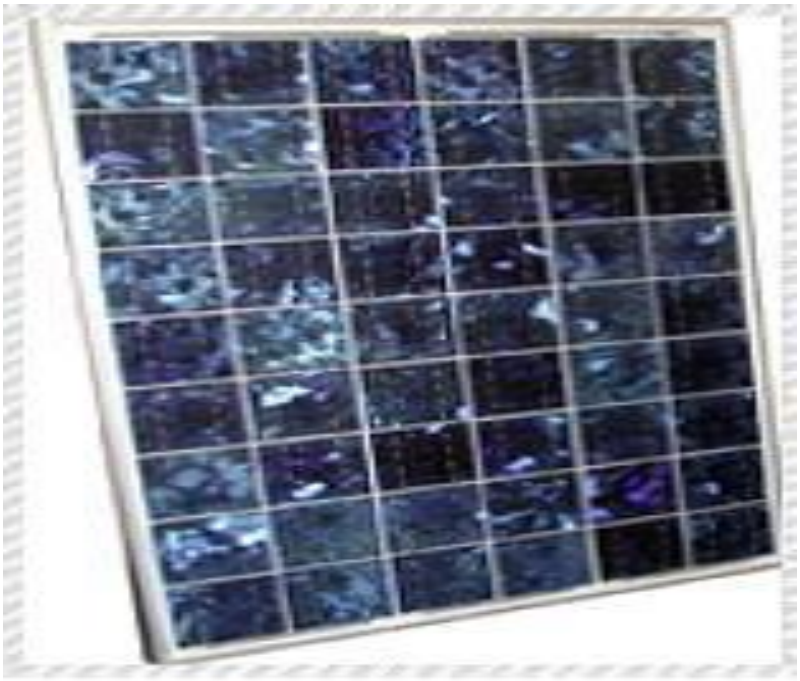
معظم الخلايا الفولطاضوئية المصنعة لغاية فترة قريبة كانت من سيليكون نقي ذي هيكل مستمر أحادي البلورة وبدون شوائب، والسيليكون أحادي البلورة يصنع عادة من حبوب صغيرة من البلور مسحوبة ببطء من كتلة مذابة من السيلكون متعدد البلورية بطريقة متقدمة وغالية الثمن، ومعظم الخلايا السيليكونية الأحادية البلورية المتوفرة في الأسواق ذات كفاءة تقارب 16% وبالرغم من ميزة الكفاءة العالية التي تختص بها الخلية الشمسية الأحادية البلورية فإن سعرها مرتفع جدا لكونها مصنوعة من سيلكون أحادي البلورة وعالي النقاوة ولكون طريقة التصنيع غالية وتحتاج إلى عمال مهرة.

ويتم حاليا تصنيع بعض الخلايا من السيلكون أقل نقاوة، وهذه الخلايا تكون أرخص سعرا وتنتج بكلفة أرخص باستخدام عمليات مختلفة قليلة الكلفة ولكنها ذات كفاءة وعمر زمني أقل، الشكل (7.1) يمثل هذه الخلية.

الشكل (7.1):لوح كهروشمسي مصنوع من خلايا سيليكونية أحادية البلورة [15].

- الخلايا السيليكونية متعددة البلورات:

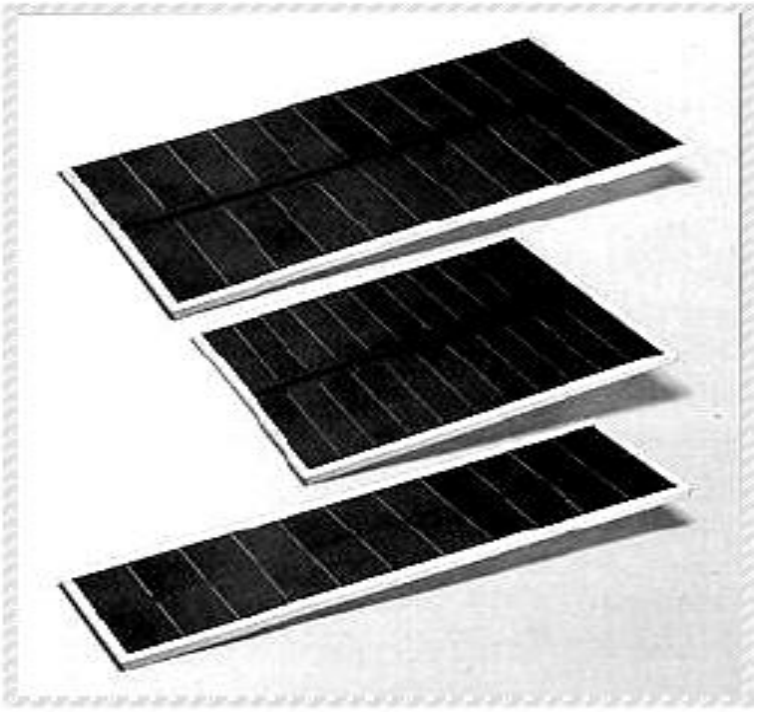
يتكون السيلكون المتعـدد البلورة من حبيبـات صـــغيرة من البلور الاحادي، بالرغم من كون الخلايـا الكهروشمسية المتعددة البلورات أرخص وأسهل تصنيعا من الخلايا أحادية البلورة بسبب النقاوة الأقل للمادة الأولية إلا أنها أقل كفاءة، وذلك كون حاملات الشحنة (الإلكترونات والثقوب) المولدة من قبل فوتونات الإشعاع الشمسي يمكن أن تتجمع علي الحدود بين الحبيبات داخل السيلكون المتعددة البلورات، وقد وجد أن كفاءة هذه الخلايا تتحسن عند عملية تصنيع المادة بطريقة تكون فيها الحبيبات كبيرة الحجم، ويتم ذلك بتبريد السيلكون المذاب ببطء ثم توجه الخلايا من الأعلى إلى الأسفل، وذلك للســماح للإشعاع الشمسي بالتغلغل بعمق خلال الحبيبات. تتراوح كفاءة الخلايا الســيليكونية متعددة البلورات بين% 11 و15% يمثل الشــكل (8.1) لوح شمسي مصنوع من خلايا سيليكونية متعددة البلورات.



الشكل (8.1): لوح شمسي مصنوع من خلايا سيليكونية متعددة البلورات [15].

- الخلايا السيليكونية العشوائية:

يمكن تصنيع الخلايا الكهروشمسية بطريقة أرخص من طرق تصنيع الخلايا السيليكونية الأحادية والمتعددة البلورات، وهذه الخلايا تسمي بالخلايا السيليكونية حيث تكون ذرات السيلكون فيها أقل ترتيبا من النوع البلوري، ففي السيلكون العشوائي لا ترتبط كل ذرة ارتباطا كاملا مع الذرات المجاورة، إنما تترك ما يسمى بالرابط المتدلي، وتستطيع امتصاص إلكترونات إضافية عند إجراء عملية الطلاء الشكل (9.1) يمثل لوح شمسي مصنوع من خلايا سيليكونية عشوائية.



الشكل (9.1):لوح شمسي مصنوع من خلايا سيليكونية عشوائية [15].

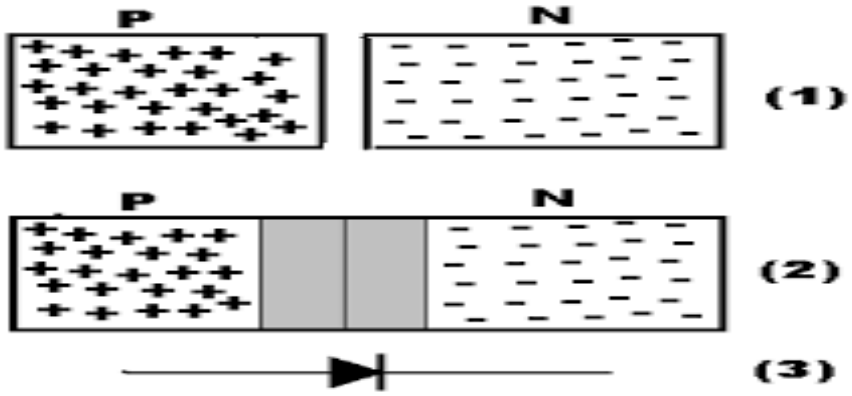
تختلف خلايا السيلكون العشوائي عن الخلايا المصنعة بطرق أخرى بالنسبة لمنطقة الإرتباط (N-P) إذ يتكون في هذا النوع من الخلايا منطقة تسمى (N-I-P) وهي رقيقة جدا من نوع (P) من السيلكون العشوائي تأتي بعدها طبقة داخلية (I) أكثر سمكا من مادة السيلكون العشوائي الخالي من الشوائب، ثم طبقة رقيقة جدا من نوع (N) من السيلكون العشوائي، كما أنها أرخص سعرا من الخلايا السيلكونية البلورية، وأكثر امتصاصا للإشعاع الشمسي إضافة إلى أن درجة حرارة تصنيعها قليلة جدا مقارنة بالخلايا السيليكونة البلورية ولذلك فهي تحتاج إلى طاقة أقل.

من سلبيتها أنها ذات كفاءة قليلة مقارنة بالخلايا السيلكونية المذكورة سابقا، حيث تتراوح مابين % 4 و 8%وهي تتناقص مع مدة تعريضها للشمس وكذلك عمرها الزمني قليل، إن أعلى كفاءة تم الحصول عليها لا تتجاوز12%، كما أن مخلفاتها التي تتحول إلى الزرنيخ (الارسانيد) ضارة بالبيئة.

8.5.1 مبدأ عمل الخلية الشمسية:

في بداية الخمسينات تم تطوير شرائح السيليكون ووضعها بأشكال وأبعاد هندسية معينة وقادرة على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. تتكون الخلية الفولتوضوئية (أوالشمسية) من وصلة ثنائية دايود كما في الشكل (10.1) من أشباه الموصلات والذي ينتج طاقة كهربائية عند سقوط الاشعاع الشمسي على سطحه ونفاذها خلال منطقة الاتصال (P-N junction) عموما الدايود هو صمام إلكتروني له إلكترودان هما [8]:

- **أنود(Anode):** هوالإلكترود الموجب الذي تغادره الإلكترونات في الديود.
- **كاثود(Cathode):** هو الالكترود السالب الذي يكون المصدر الأولي للإلكترونات في الديود.



الشكل (10.1):وصلة ثنائية (دايود:diode) [8].

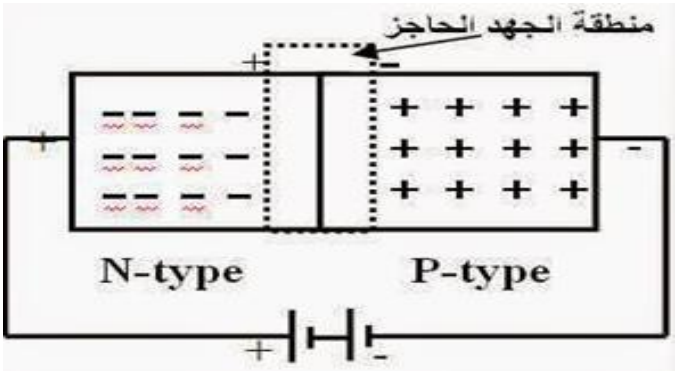
تعرف منطقة الاتصال (P-N Junction) بأنها المنطقة المكونة من تلاقي مادتين شبه موصلتين إحداهما من الصنف P والأخرى من الصنف N، وتتميز بخلوها من حاملات الشحنة (الالكترونات والفجوات) وبظهور جهد خلالهما يعرف "بجهد الحاجز".

يصـنع الديود من بلورة من السـيليكون أو الجرمانيوم مطعمة بطريقة معينة بحيث تتميز فيها منطقتين هما [8]:

- **منطقة سالبة(N):** تحتوي على ذرات شبه الموصل النقي وذرات شائبة خماسية التكافؤ (مثل الفوسفور) والتي تمنح الإلكترونات.

- **منطقة موجبة (P):** تحتوي على ذرات شبه الموصل النقي وذرات شائبة ثلاثية التكافؤ (مثل البورون) والتي تقبل الإلكترونات.

عند تكون الوصلة الثنائية تنجذب بعض الإلكترونات من المنطقة السالبة نحو منطقة الاتصال وتعبرها إلى المنطقة الموجبة ونتيجة لذلك تصبح ذرات المنطقة السالبة (أيونات موجبة) وذرات المنطقة الموجبة (أيونات سالبة) ويستمر ذلك حتى يصبح فرق الجهد بين المنطقة السالبة والمنطقة الموجبة قيمة معينة، عندما يتم انتقال مزيدا من الإلكترونات من المنطقة السالبة إلى المنطقة الموجبة، هذا الجهد يعرف "بجهد الحاجز"وهو فرق الجهد بين المنطقة السالبة والمنطقة الموجبة للوصلة الثنائية والذي يقف عنده إنتقال مزيد من الإلكترونات من المنطقة السالبة إلى المنطقة الموجبة، تتصف الوصلة الثنائية بقابليتها على مرور التيار في اتجاه واحد كما في الشكل (11.1).

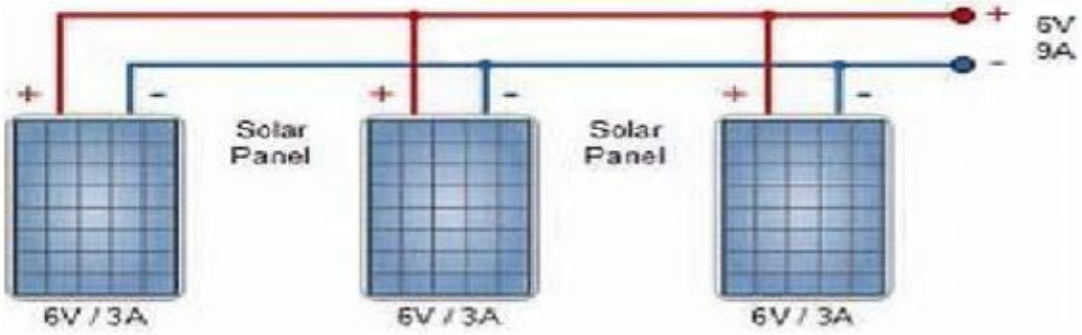


الشكل (11.1) :وصلة ثنائية [8].

9.5.1 ربط الخلايا الشمسية:

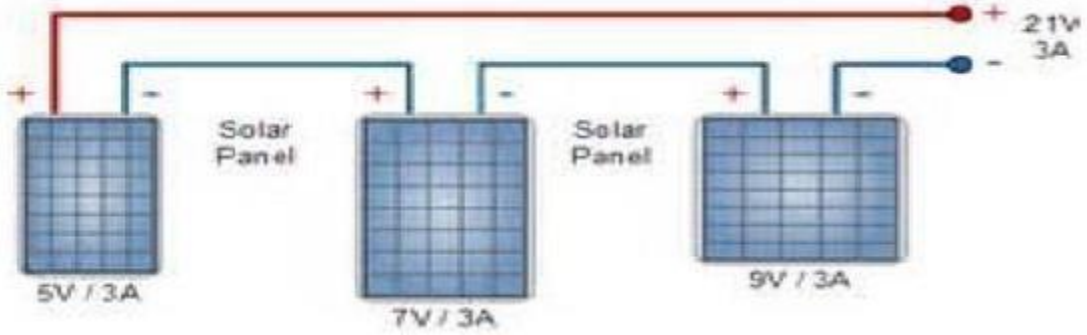
يمكن ربط الألواح الشمسية بعدة طرق وذلك تبعا لحجم الشبكة ومقدار كل من التيار والجهد المراد تحصيله والذي يحدده الحمل [16]:

-**الربط على التوازي:** الهدف منها الحصول على أكبر تيار منتج يربط الأطراف السالبة جميعها مع بعض وكذلك الموجبة.



الشكل (12.1) :ربط الخلايا على التوازي [16].

-الربط على التوالي: الهدف منه الحصول على أعلى جهد ويربط طرف اللوح الموجب مع طرف السالب للوح اللاحق. أنظر الشكل (13.1) أدناه ونجد أنه يمثل ربط ألواح قدراتها مختلفة ولكن بمقدار تيار منتج متساوي وبذلك يكون ناتج الشبكة قيمة نفس التيار ولكن الجهد الكلي يمثل مجموع جهد الألواح.



الشكل (13.1):ربط الخلايا على التوالي [16] .

الفصل الثاني

التحليل الكهربائي للماء وإنتاج الهيدروجين

1.1 مقدمة:

من خلال خبرات متعددة، تبين أن إنتاج الهيدروجين بواسطة التحليل الكهربائي للماء يعد الطريقة الأكثر نظافة من بين مختلف الطرق لإنتاج هذا الغاز. كونها لا تتسبب في تلويث البيئة ولا تشكل الغازات الناتجة عنها خطرا مباشرا ولا تدخل ضمن مسببات الاحتباس الحراري.

وتجدر الإشارة هنا بأنه في هذه الحالة يتم إنتاج الهيدروجين باستخدام الكهرباء المنتجة عن طريق الخلايا الكهروضوئية، فإن السيرورة تسمى إنتاج شمسي ومتجدد للهيدروجين [17].

2.1 التحليل الكهربائي للماء:

1.2.1 الماء:

2.2.1 تعريف الماء:

الماء هو سائل شفاف لا لون له ولا طعم ولا رائحة، وهو ضروري لجميع أشكال الحياة، وهو تلك المادة العجيبة التي تغطي ثلثي مساحة سطح الكرة الأرضية، وتتركب جزيئة الماء من ذرتي هيدروجين وذرة أكسجين، يرتبط بعضها مع بعض بروابط كيميائية قوية. ويرمز له بالرمز H_2O ، فالرمز H_2 يعني ذرتي هيدروجين، والحرف O يعني ذرة أكسجين. والجزيئات هذه ترتبط أيضاً لتكوّن الماء، فكل خمسة آلاف مليون جزيئة ماء ترتبط لتشكل قطرة ماء واحدة [18].

يتكون جزيء الماء من ذرتيّ هيدروجين صغيرتين موجبتيّ الشحنة وذرة أكسجين كبيرة سالبة الشحنة، أيّ أنّه جزيء غير متماثل الشحنة إذ يكون أحد طرفيه موجب الشحنة والآخر سالب، ويُسمّى هذا الفرق في الشحنة والذي يُحدّد كيفية تفاعل الماء مع المُركّبات الأخرى بالقطبيّة [19]، ويجدر بالذكر أنّ الماء لا يتواجد بصورته النقيّة المعروفة بالصيغة (H_2O) تحت الظروف الطبيعيّة [20]، وقد يبدو الماء عديم اللون عند تواجده بكميّات صغيرة، إلّا أنّ لونه الحقيقي هو الأزرق الناتج عن امتصاصه للضوء بشكل بسيط عند الأطوال الموجيّة الحمراء [21].

3.2.1 خصائص الماء:

1.3.2.1 الفيزيائية:

للماء العديد من الخصائص الفيزيائية التي جعلت له قيمة كبيرة سواء في الحياة و الزراعة والصناعة وغيرها من المجالات الأخرى، ومن أهم خصائصه نذكر ما يلي [22]:

- **الإذابة:** يتميّز الماء بقدرته على إذابة العديد من الأملاح والمواد فيه، إذا أن الماء الموجود في الطبيعة غالبا لا يكون نقيا 100% وذلك بسبب وجود الأملاح والغازات فيه والتي يستمدها من الطبيعة.
- **السعة الحرارية:** تُساهم السعة الحرارية المُرتفعة للماء في تنظيم درجة الحرارة في البيئة، أي أن الماء يتميز بامتصاصه للحرارة قبل أن يسخن لذلك نرى أصحاب بعض المحلات التجارية يرشون الماء في الأيام الحارة.

- **الشذوذ:** هي خاصية فريدة تتمثل بتمدد الماء في حالة الجليد خلال تجمده فيزيد حجمه وتنخفض كثافته، ويطفو على سطح الماء السائل، ولذلك فائدة عظيمة للكائنات المائية التي توجد في المناطق المتجمدة كونها تشكل عازلا طبيعيا بين الغلاف الجوي البارد والماء الموجود أسفل الحوض.
- **التوتر السطحي:** يلاحظ أن قيمة التوتر السطحي للماء مرتفعة جدا بسبب قوى التجاذب بين جزيئاته، فالتوتر السطحي هو الذي يجعل الماء يرتفع بنفسه في الأوعية الشعرية في النباتات، فيحمل الماء بواسطتها الغذاء إلى خلايا النبات لارتفاعات عالية، بالإضافة إلى أن هذه الخاصية مسؤولة عن تحريك الماء عبر الفراغات والمسامات والشقوق و الأقنية وفي الصخور والتربة للأعلى لتتساوى قوة التوتر السطحي للماء مع الجاذبية الأرضية، مما يسهل على الجذور النباتية للحصول على الماء خاصة في المناطق الصحراوية والجافة.

2.3.2.1 الكيميائية:

الخاصية الكيميائية هي تلك الخاصية التي يمكن رصدها فقط إذا حدث تغير كيميائي يغير من التركيب الداخلي للمادة، وتستخدم لوصف سلوك المادة عند تعريضها لبعض المواد مثل الهواء والماء والحموض والقواعد وغيرها، من الأمثلة على الخصائص الكيميائية [23]:

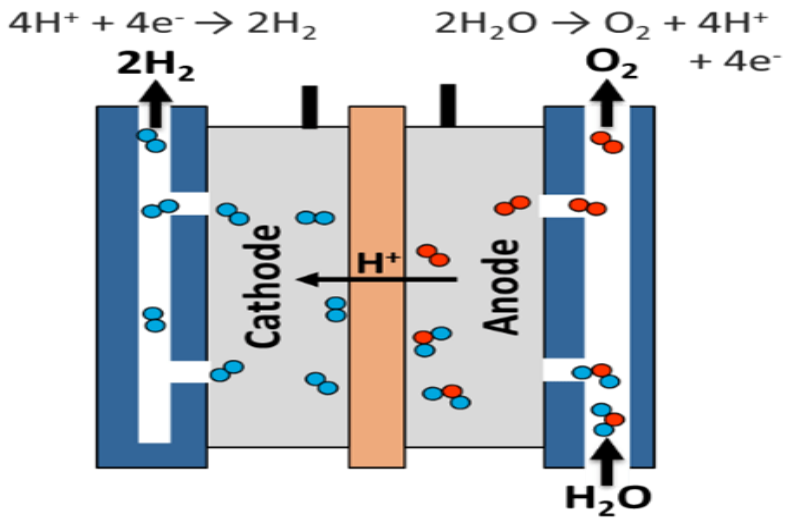
- **التعادل الحمضي:** درجتا القاعدية والحمضية (في الانجليزية تسمىPH) تساوي سبع، وهذا يعني أن الماء متعادل كيميائيا، ولا يعد مادة قاعدية ولا حمضية، كما أن إرتفاع أوإنخفاض درجة الحموضة بشكل كبير يكون على الغالب ضارا لاستخدام المياه، إرتفاع درجة الحموضة يسبب طعم مر، وتزداد الترسبات الكلسية داخل أنابيب المياه والأجهزة التي تستخدم الماء، ويقلل فعالية تطهير الكلور، مما يؤدي إنخفاض درجة الحموضة إلى تآكل أو إذابة المعادن والمواد الأخرى وبالتالي يمكن أن تضر الحيوانات والنباتات التي تعيش داخل التجمعات المائية [24].
- **القلوية:** وهي خاصية تعتمد على وجود مواد كيميائية معينة في الماء، مثل البيكربونات والكربونات والهيدروكسيدات، وتعد مقياسا لقدرة الماء على معادلة الحموضة والقواعد إذ أُضيفت إليها، والتحول المفاجئ في رقم الهيدروجين غير صحي للأسماك والكائنات الحية التي تعيش في الماء، كما أن للمياه ذات القلوية العالية قدرة أكبر على الحفاظ على درجة الحموضة ثابتة إلى حد ما [23].
- **عسر الماء:** يمكن وصفه على أنه كمية الكالسيوم والمغنيزيوم المذابة في الماء، وكلما زادت نسبة العسورة تقل قدرة الصابون على الذوبان في الماء [25].

2.2.1 التحليل الكهربائي:

1.2.2.1 مفهوم تحليل الماء كهربائيًا:

يُمكن تعريف تحليل الماء كهربائيًّا على أنّها العمليّة التي تُجرى من أجل تقسيم الماء (H_2O) وفصل مكوناته إلى غاز هيدروجين (H_2) وأكسجين (O) منفصلين تمامًا من خلال تطبيق الطاقة الكهربائيّة [4]، وتزداد الطاقة الكليّة اللازمة لتحليل الماء كهربائيّا بازدياد درجة الحرارة، وتعود الحاجة إلى مثل تلك العمليّة بسبب زيادة كلفة الوقود الأُحفوري وقلّة توفره، وبالتالي الحاجة لغاز الهيدروجين كمصدر مثالي للطاقة، ولا يلوّث الهواء عند احتراقه [26].

- من بين أنواع التحليل الكهربائي التحليل بواسطة تقنية PEM كما هو موضح في الشكل (1.2):



الشكل (1.2): التحليل الكهربائي للماء بتقنية PEM.

2.2.2.1 معلومات حول تقنية PEM:

PEM هي اختصارا لـ (Proton Exchange Membrane) وهي تعني **(غشاء تبادل البروتون)** يستخدم في هذا النوع غشاء من مادة البوليمير تسمى نفيون تمثل إلكتروليت وهي مادة ذات شكل صلب وهذا يقلل من درجة حرارة التفاعل ويزيد من الكفاءة، يوضع غشاء الفصل البوليميري بين قطبين من البلاتين المثقب (ذات بنية مسامية)، وليس هناك خطر من نشوء تلوث منه نضرا إلى طبيعته الصلبة ويتم التفاعل فيها تحت درجة حرارة (80℃-60℃) وضغط (0.1bar-0.3bar) وعند تعرض الغشاء للماء تصبح مادة موصلة للايونات [27].

1.2.2.2.1 كيفية صنع الأقطاب ذات البنية المسامية:

غالبا ما تستخدم في المحللات الأقطاب المصنوعة من سبيكة ذات بنية مسامية مثل نيكل راني. حيث تصنع هذه السبيكة عبر خلط 55 % ألمنيوم و 55 % نيكل ثم يعالج الخليط بهيدروكسيد البوتاسيوم الذي يؤدي إلى تآكل الألمنيوم ويترك النيكل ببنية مسامية إسفنجية أو ما يسمى بنيكل راني نسبة إلى العالم (Murray Raney) الذي اخترع هذه الطريقة.

الأقطاب المصنوعة من هذه المادة تتمتع بمساحة كبيرة نظرا لبنيتها الإسفنجية كثيرة المسام وتنتج كمية أكبر من الغاز بقطب أصغر نسبة إلى قطب لا يتمتع بالبنية ذاتها كالأقطاب المصمتة أو الشبكية.

يعتبر نيكل راني ذو خصائص جيدة جدا لكنه أغلى من النيكل العادي وشبكة النيكل ذات البنية المسامية تعمل أيضا كمرشح للجزيئات الصغير. لكن الراسب المتكون مع الزمن يقلل من المساحة الفعالة للقطب وبالتالي من الغاز الناتج أي أن كفاءتها تنخفض مع الزمن [28].

3.2.2.1 طريقة تحليل الماء كهربائياً بتقنية PEM:

يتكون المحلل الكهربائي من أنبوبين بلاستيكيين أحدهما خاص بغاز الهيدروجين والآخر بغاز الأكسجين موصولين مع كاثود وأنود، يفصل بين الكاثود والأنود غشاء بوليميري.

عند ربط المحلل بطاقة كهربائية (لوح شمسي) يُفصل الماء إلى غاز أكسجين وغاز هيدروجين وتتم طريقة التحليل إلكترونيًّا عبر الخطوات التاليّة [27]:

- **القطب الموجب:** يتم إنتاج غاز الأكسوجين وتكوين أيونات الهيدروجين موجبة الشحنة المعروفة بإسم البروتونات بواسطة المادة المحفزة (البلاتين) حيث يسمح الغشاء البوليميري بمرور البروتونات فقط، تتدفق الإلكترونات من خلال دائرة خارجيّة.
- يتفاعل الأنود ضمن معادلة الأكسدة (1.2) التالية:

$$2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4é + O_2 \qquad (1.2)$$

- **القطب السالب:** يمر البروتون عبر الغشاء البوليميري بصورة انتقائية وصولا إلى القطب السالب ويتحد مع إلكترونات الدائرة الخارجيّة. من أجل تكوين غاز الهيدروجين.
- يتفاعل الكاثود ضمن معادلة الإختزال (2.2) التالية:

$$4H^+ + 4é \rightarrow 2H_2 \qquad (2.2)$$

1.3.2.2.1 معادلة التحليل الكهربائي للماء:

تتم عمليّة التحليل الكهربائي للماء كيميائيًّا ضمن المعادلة (3.2) ، وهي كما يلي [27]:

$$2H_2O\,(l) \longrightarrow 2H_2\,(g) + O_2\,(g) \qquad (3.2)$$

بحيث ينفصل الهيدروجين (H_2) عن الأكسجين (O) في هذه المعادلة، ليتواجد كل منهما منفصلًا عن الآخر.

4.2.2.1 العوامل المؤثرة في كفاءة التحليل الكهربائي:

تعتمد كفاءة التحليل الكهربائي على العديد من العوامل، ومنها ما يلي [29]:

- عدد الأنيونات والكاتيونات المتوفرة في المحلول.

- تأثير الغاز المحيط بالإلكترود على الناقل الكهربائي الإضافي.

- طاقة التنشيط اللازمة لنقل الإلكترون من القطب إلى الأيونات.

- مُعدّل حركة الأيونات للوصول إلى القطب.

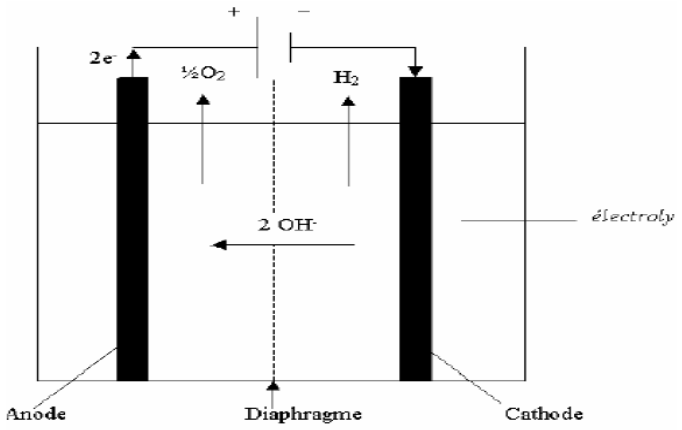
5.2.2.1 أنواع التحليل الكهربائي:

1.5.2.2.1 التحليل الكهربائي القلوي:

تعتبر هذه التكنولوجيا هي الأقدم وأكثر استخداما وبالتالي هي صالحة ومكتملة، وباستخدام المحلول المائي لهيدروكسيد البوتاسيوم الذي يختلف تركيزه ودرجة حرارته، ويفضل هذا المحلول لأنه يعتبر أساسيا في توصيل الأيونات ويحسن من مراقبة الكلوريدات وشوائب الكبريتات، كما هو موضح في الشكل (2.2) [30].

(4.2) معادلة الانود: $2OH^- \rightarrow 1/2O_2 + 2é + H_2O$

(5.2) معادلة الكاثود: $2H_2O + 2é \rightarrow H_2 + 2OH^-$



الشكل (2.2): مخطط يوضح التحليل الكهربائي القلوي [31].

وعادة ما تشمل هذه الوحدات إمدادات للطاقة وخلايا التحليل الكهربائي ووحدة تنقية المياه ووحد إزالة رطوبة الغاز ووحد تنقية الهيدروجين ونظام التحكم للضاغط حيث تعمل هاته التقنيات مباشرة تحت الضغط [31] [32].

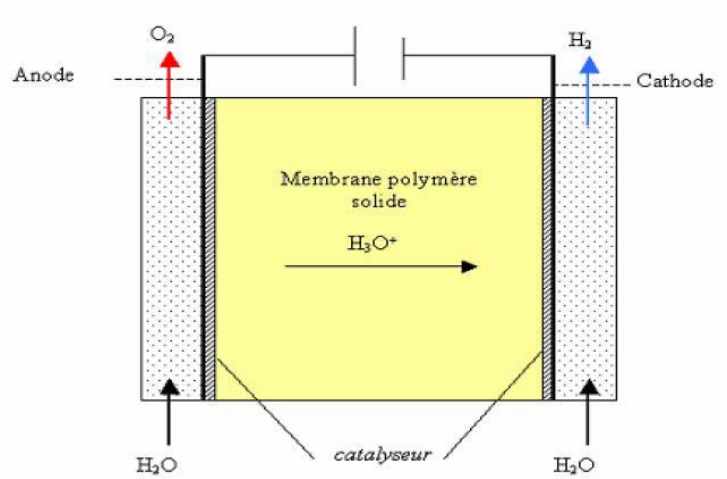
2.5.2.2.1 التحليل الكهربائي عالي درجة الحرارة (PET):

هذه التكنولوجيا نتيجة لتطور في خلايا الوقود والأهم من ذلك توفير الكهرباء والحرارة من أجل الحفاظ على الحرارة العالية المطلوبة حيث يهدف هذا النوع من التحليل الكهربائي إلى مقارنته بالنظام الشمسي أو المفاعل النووي ذوي درجات حرارة عالية.

تعتبر هذه التقنية مماثلة للتحليل الكهربائي القلوي ولكن تستخدم بخار الماء بذلا من الماء السائل حيث أن هذه الطريقة تدرس حاليا لإنتاج الهيدروجين مع الأكسجين كمنتج ثانوي ويمكن أن يكون في المستقبل أكثر فعالية من التحليل الكهربائي للماء وذلك لأن بعض الطاقة المطلوبة للتفاعل يمكن توفيرها بالحرارة وهي اقل تكلفة من الكهرباء وهو أكثر كفاءة. ولا يمكن المقارنة بالتحويلات الكيميائية الهيدروكربونية حيث أن هذه التفاعلات لا تعتمد على كفاءتها فقط بل مع أخذ كمية الإنبعاثات ل CO_2 وبالتالي فإن مصادر الطاقة الحرارية كلها كيميائية بما في ذلك مصادر الطاقة الحرارية الأرضية والمفاعلات النووية والمجمعات الشمسية [33].

3.5.2.2.1 التحليل الكهربائي للحمض:

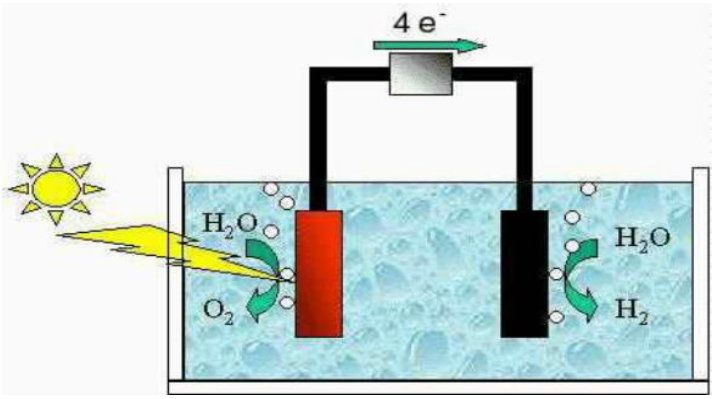
يتضمن هذا النوع من التحليل الكهربائي على غشاء النفاذية للبروتونات حيث يتكون هذا الغشاء عادة من بوليمرات حمض سلفونيك بيورفلود حيث تعمل أقطابها على تحفيز المعادن التي تسهل اختراقها و يتم التحليل الماء إلى أكسجين و إلكترونات و بروتونات في الأنود حيث تهاجر البروتونات من خلال الغشاء إلى الكاثود وتهاجرالإلكترونات من خلال الدائرة الخارجية إلى الكاثود و تعتبر هذه التكنولوجيا ناجحة و يمكن إجراء هذه العملية في ضغط جوي، و يعتبر هذا النوع من التحليل الكهربائي كمصدر للطاقات المتجددة، و هي أفضل من التحليل الكهربائي القلوي حيث نلاحظ إختلاف في الطاقة الكهربائية بالإضافة إلى ذلك يعتبر التحليل الكهربائي هو أفضل طريقة لإنتاج الهيدروجين، حيث يوضح الشكل (3.2) التحليل الكهربائي للحمض [34].



الشكل (3.2): مخطط يوضح التحليل الكهربائي للحمض [31].

4.5.2.2.1 التحليل الضوئي للماء (PEC):

التحليل الضوئي للماء هي طريقة يتم فيها تحليل الماء بالكهرباء الناتجة من المحفز الضوئي مع أشباه الموصلات حيث أن الخلايا الكهروضوئية تكون مغمورة في الماء ومقابلة لأشعة الشمس حيث يتم عنها تحليل الماء إلى أكسجين و هيدروجين فقط، ويمكن تعويضها بالأجهزة الضوئية أوالكهروضوئية، يوضح الشكل (4.2) التحليل الضوئي للماء.



الشكل (4.2): مخطط يوضح التحليل الضوئي للماء [35].

و هناك أربعة مراحل رئيسية في هذه الطريقة [33]،[36]:

- لابد أن تكون اللوحة معرضة لأشعة الشمس .
- تتم عملية الأكسدة في الأنود لإنتاج جزيئات الأوكسجين(O).
- تنتقل أيونات الهيدروجين(H^+) والإلكترونا من الأنود إلى الكاثود.
- تنخفض أيونات الهيدروجين لتشكل جزيئات الهيدروجين*(2H)* في الكاثود.

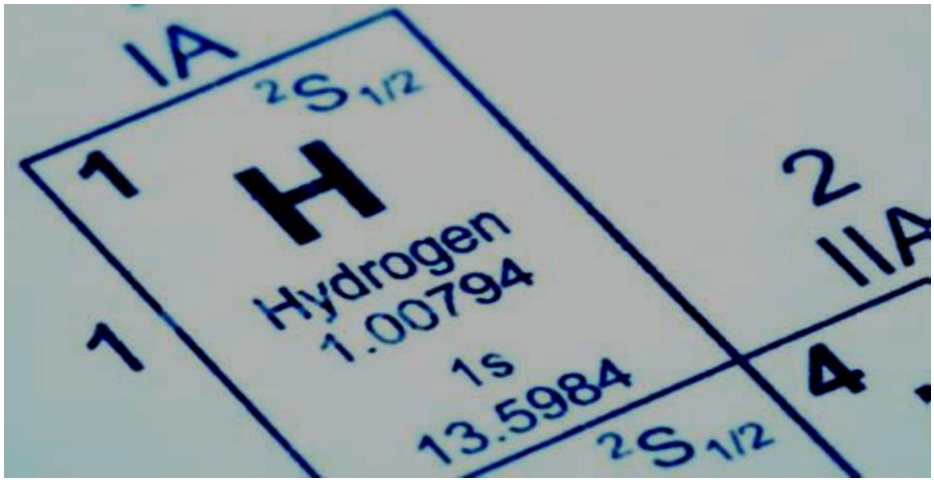
و فوائد هذه الطريقة هي الإنتاج المباشر للهيدروجين و تعتبر تكاليف هذه الطريقة في زيادة محتملة من ناحية الكفاءة العامة، و أخيرا فإن أهم حاجز تكنولوجي في هذه الطريقة يكمل في صناعة أشباه الموصلات و من ناحية أخرى فهي قادرة على امتصاص الفوتونات الشمسية [33]،[36].

3.1 إنتاج الهيدروجين:

1.2 الهيدروجين:

1.1.2 تعريف الهيدروجين:

يعود اكتشاف الهيدروجين إلى عام 1671على يد العالم البريطاني روبرت بويل، عندما وضع قطعة من المعدن داخل حمض فحدث تفاعل نتج عنه فقاعات غازية دون تعريف لسبب هذه الفقاعات أو نوع الغاز الناتج. بعد قرابة 100 عام تحديدا عام 1766أعادا العالم هنري كافنديش تجربة روبرت بويل لكن في هذه التجربة أشعل الفقاعات الناتجة عن التفاعل، ليكتشف أنه غاز قابل للاشتعال، وأطلق عليه اسم الهيدروجين، يمثل الشكل (5.2) البعض من خصائص الهيدروجين [37].



الشكل (5.2): الهيدروجين في الجدول الدوري.

الهيدروجين هو عنصر كيميائي رمزه H_2 وهو غاز عديم اللون و الرائحة و غير سام و أخف من العناصر الموجودة في الطبيعة وكتلته الحجمية $\rho = 0.09 g/l$ فهو أخف من الهواء بحوالي 14 مرة، وله قدرة كبيرة على الانتشار في الجو و وزنه الذري 1.0079uma وطاقة تأينه 13.598ev، وله نظائر هما البروتيوم، الديتريوم و التيتريوم، و مع ذلك فهو يتواجد في تركيبة مع العناصر الأخرى. الهيدروجين ليس مصدرا رئيسيا للطاقة.

ومع ذلك يصبح حاملا جذابا ومهما للطاقة عندما ينفصل عن العناصر الأخرى باستخدام مصادر للطاقة. ومن المفترض أن يكون الهيدروجين الوقود النظيف للطاقة مستقبلا وخاص لأغراض التخزين ونقل الطاقة.

السعة التخزينية لطاقة الهيدروجين ممتازة لأن الحسابات تبين أن كل كيلوغرام من الهيدروجين يحتوي تقريبا على 33 KWh من الطاقة [38].

2.1.2 خصائص عنصر الهيدروجين:

1.2.1.2 الخصائص الفيزيائية:

غاز قليل الكثافة، لا يساعد على التنفس أو الاحتراق ولكن يشتعل في الهواء بلهب أزرق غير مضيء مكونا الماء، وهو عديم الذوبان فيه. وأهم صفاته هي [27]:

- الهيدروجين أخف العناصر الكيميائيّة على الإطلاق وأقلها كثافة حيث يتكوّن من بروتون وإلكترون واحد.
- في درجة الحرارة والضغط القياسيّين يكون الهيدروجين على شكل غاز ثنائي الذرة.
- يعدّ غاز الهيدروجين H_2 أخف من الهواء بحوالي 14مرة.
- درجة غليان مقدارها 21.15 كلفن (-252°C).
- تبلغ إنحلالية (ذوبانية) الهيدروجين في الماء حوالي 1.6مغ/ل.
- يتميز الهيدروجين عن باقي الغازات أن له أكبر قدرة على الانتشار.
- يتميز الهيدروجين أن له أعلى ناقليه حرارية وأن له أكبر قدرة على التدفق، كما أن له لزوجة منخفضة نسبيّا.

2.2.1.2 الخواص الكيميائية لعنصر الهيدروجين:

للهيدروجين عدة خصائص منها [27]:

- غاز الهيدروجين سريع الاشتعال ويحترق في الهواء من مجال كبير من التركيز يتراوح بين % 40 و % 70 تركيز حجمي.
- المحتوى الحراري القياسي للاحتراق بالنسبة لغاز الهيدروجين يبلغ 286 – كيلو جول/مول.
- يمكن أن يشكل مزيج انفجاري مع الهواء بتراكيز منخفضة من الهيدروجين وذلك بوجود مصدر حراري أو نتيجة تماس كهربائي.
- درجة حرارة الاشتعال الذاتي للهيدروجين تبلغ500°C.
- يصدر الهيدروجين بتفاعله مع كمّيّات كبيرة من الأكسجين عند الاحتراق لهبا لا يرى بالعين المجرّدة، لأنّ له إصدار في منطقة الأشعة فوق البنفسجية.
- في الشروط العادية يحترق الهيدروجين بلهب أزرق يشبه لهب إحتراق الغاز الطبيعي.

3.1.2 استغلال الهيدروجين:

يمكن استخدام الهيدروجين في محركات الاحتراق الداخلي ومركبات خلايا الوقود، كما يمكنه أن يكون وسيلة فعالة لتخزين الطاقة من مصادر متجددة حيث تعتمد الاستخدامات الفرعية للهيدروجين اليوم على [39] :

- الصناعة الكيميائية: حيث يستخدم بكمية كبيرة في إنتاج الأمونيا (النشادر) هي تعتبر المادة الأولية في صناعة الأسمدة.
- الصناعة الغذائية والأدوية : في هدرجة الزيوت والدهون ومواد التجميل وغيرها.
- الصناعة البيتروكيميائية : تكرير النفط وإنتاج الميثانول وغيرها.
- الصناعة الإلكترونية : إنتاج أنصاف النواقل والألياف البصرية و غيرها.
- له القدرة على التوصيل الحراري أعلى من أي غاز آخر.
- يستخدم في وقود الصواريخ.

- يستعمل في تبريد المولدات الكهربائية حيث يستخدم الهيدروجين كوسيط تبريد عالي الأداء.
- يستخدم في المفاعلات النووي كوقود نووي.
- ويمكن استخدامه في توليد الطاقة الحرارية وذلك بحرقه المباشر في المحطات الحرارية.
- يستخدم في توليد الطاقة الكهربائية بواسطة خلايا الوقود والتي تعد تقنية حديثة.
- ويستخدم أيضا في النقل والحركة حيث تسمح المرونة الكبيرة للهيدروجين الأخضر باستخدامه كوقود للسيارات والناقلات الكبرى في النقل البري والجوي من خلال خلايا وقود الهيدروجين.

و تقدر حاليا النسبة المستهلكة من الهيدروجين المنتج عالميا بحوالي 50% في إنتاج الأمونيا و 37 % في تكرير النفط و8% في إنتاج الميثانول و الباقي في الاستخدامات الأخرى [41]،[40]،[42].

4.1.2 التحديات والعراقيل:

هناك الكثير من التحديات التي تعرقل مساهمة الهيدروجين الأخضر الكاملة في تحول الطاقة ومن أبرزها [43]:

- الكلفة المرتفعة لإنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة المتجددة.
- محدودية البنية التحتية للهيدروجين.
- عدم وجود سوق للهيدروجين في الوقت الحالي.
- شح الماء في بعض الدول كونه المادة الخام التي يستخلص منه الهيدروجين الأخضر.

على الرغم من وجود بعض التحديات لاستخدام الهيدروجين الأخضر إلا أنه لازال قادرا على المساهمة في مجال الطاقة والتقليل من تلوث الهواء وتعزيز النمو الاقتصادي وخلق فرص العمل ومكافحة تحديات تغير المناخ وهو ما يسهل وصولنا إلى صفريات الكربون.

2.2 طرق إنتاج الهيدروجين:

يمكن استخلاص الهيدروجين من مصادر متعددة كالغاز الطبيعي والماء.

- قام العلماء بإطلاق تسميات لونية على أنواع الهيدروجين، حيث تعتمد على طرق استخلاصه ومصادر الطاقة المستخدمة في ذلك [44]:

- **الهيدروجين الأخضر:** ينتج عن التحليل الكهربائي للماء في محلل كهربائي، وتزود الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة المائية أو طاقة الرياح أو الطاقة الشمسية، (إذا كانت هنالك حاجة للمياه المحلاة تكون باقي العملية مدعومة بنسبة 100%من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح) ولا ينتج عن هذه العملية أي من الغازات الدفيئة.

- **الهيدروجين الرمادي:** ينتج باستخدام الغاز الطبيعي في حين يحتاج الهيدروجين الأسود للفحم كعنصر أساسي، وتكون عملية الإنتاج الرئيسية هي إعادة تشكيل الميثان بالبخار التي تستهلك الأكسجين من بخار الماء في حجرة حرارية لفصل الميثان CH_4 وإنتاج الهيدروجين. لكن هذه العملية تتسبب بقدر هائل من التلوث لأنها تنتج ما يعادل 9 كغ من ثاني أكسيد الكربون CO_2 لكل 1كغ هيدروجين يتم إنتاجه.

- **الهيدروجين الأزرق:** يحتاج لنفس عملية صنع الهيدروجين الرمادي لكن الكربون الناتج عن العملية يتم تجميعه وحبسه قبل أن يخرج إلى الغلاف الجوي للتقليل من انبعاثاته الملوثة.

- **الهيدروجين الأصفر:** يطلق على الهيدروجين المنتج بالتحليل الكهربائي للماء عبر استخدام الكهرباء المنتجة من محطات الطاقة النووية بدلا من الطاقة المتجددة، وهي كذلك طريقة صديقة للبيئة، إذ لا تطلق إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

- **الهيدروجين التركوازي:** ينتج غاز الهيدروجين من خلال عملية تسمى الإنحلال الحراري، حيث يتم تسخين الغاز الطبيعي (الميثان)، ما يؤدي إلى تفككه إلى غاز الهيدروجين وماد صلبة كربونية. أما الفرق الرئيسي بينه وبين الهيدروجين الأزرق فهو عدم إنبعاث الكربون خلال العملية، إذ أن الكربون الناتج يكون على شكل مواد صلبة.

بالتالي لكي يكون الهيدروجين جزءًا محتملاً من رحلة انتقال الطاقة إلى اقتصاد طاقة أكثر استدامة، لابد من اللجوء إلى طاقة الهيدروجين الأخضر باعتباره الخيار الوحيد. غدا لن يكون الهيدروجين مستدامًا إلا بقدر الطاقة التي نستخدمها لإنتاجه.

1.2.2 خزن الهيدروجين ونقله:

بعد إنتاج الهيدروجين يتم تخزينه ونقله من أجل الاستعمال النهائي سواء في توليد الكهرباء أو النقل أو غيرها من الاستعمالات وهناك ثلاث طرق سائدة لخزن الهيدروجين [45]:

- كغاز هيدروجين في خزانات ذات ضغط عالي عادة يكون بين 5.34 و69 ضغط جوي، وهذه الطريقة لها الأفضلية.
- كسائل مبرد جدا.
- إمكانية خزن الهيدروجين من خلال امتصاصه في مادة سائلة أو صلبة.

يمكن استخدام الهيدروجين لتخزين الكهرباء لفترات طويلة. فمن الممكن استخدامه على سبيل المثال للاستفادة من ذروة إنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة من أجل تشغيل عملية التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين من الماء [46].

ويتبع نقل الهيدروجين المبادئ ذاتها المستخدمة للغاز الطبيعي. يمكن نقله بواسطة المركبات على شكل غاز أو سائل داخل حاويات خاصة كما يمكن نقله عبر خطوط الأنابيب التي تشبه إلى حد بعيد خطوط الأنابيب المستخدمة لنقل الغاز الطبيعي. ويمكن بحسب الخبراء الاستفادة من البنية التحتية القائمة أصلا للغاز الطبيعي من أجل نقل الهيدروجين [46].

2.2.2 أفاق إنتاج الهيدروجين:

يتمثل أحد أهداف هذا العمل في تقييم الأثر البيئي والجدوى الاقتصادية لاستخدام الهيدروجين كمتجه للطاقة البديلة. وفي هذا المنظور للتنمية المستدامة ومع مراعاة ما تم شرحه أعلاه، ستقام مقارنة بين طرق الإنتاج المختلفة للهيدروجين من أجل محاولة تحديد ما هي أكثر أساليب الإنتاج القابلة للتطبيق الأكثر اقتصادا للبيئة.

إن الإنتاج العالمي للهيدروجين كبير ومتزايد على الصعيد العالمي أكثر من 50 مليون طن [47]، وقد بلغ إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي أكثر من 255.3 مليون متر مكعب عام2013 [48].

حيث أن إنتاج الهيدروجين حاليا يتم عن طريق إعادة التشكل بالبخار من الغاز الطبيعي وتعد هذه الطريقة من الطرق الرئيسية، ويتم إنتاجه أيضا عن طريق التحليل الكهربائي لكن بكميات أقل. تعتبر طريقة إعادة التشكل بالبخار حاليا الأقل تكلفة لإنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين، حيث أن نسبة 48% من الهيدروجين المنتج بالعالم يتم استخراجها من الغاز الطبيعي [49]. حيث تتميز هذه الطريقة بميزة سيئة وهي اعتمادها على مصدر وقود احفوري غير متجدد، ومن نتائجها أيضا إنتاج ثاني أوكسيد الكربون. يستخدم التحليل الكهربائي تيار مستمر لتفكيك الماء إلى أكسجين وهيدروجين، وبما أن هذه العملية تستخدم الماء كمصدر لها، يمكن أن تنتج أكسجين وهيدروجين نقي يصل إلى 99.9995% [50].

ولدت فكرة استخدام الطاقة المتجددة لتوليد الكهرباء المستخدمة في التحليل الكهربائي في أوائل عام 1900، حيث أنه يمكن إنتاج الهيدروجين والأكسجين عن طريق التحليل الكهربائي من الكهرباء المولدة من طاقة الرياح [51]، ومع ظهور تقنيات جديدة للطاقة الشمسية أصبح أيضا التحليل الكهربائي من الكهرباء المولدة من الطاقة الشمسية لإنتاج الهيدروجين [52].

يمكن إنتاج الهيدروجين من مصادر الطاقة المتجددة بما في ذلك الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، ومع ذلك تواجه أنظمة الطاقة المتجددة التحديات للحد من تكلفة الطاقة الكهربائية وتلبية احتياجات الطاقة من محطات الوقود الموزعة، في الماضي كانت العوائق الكبرى لاستخدام طاقة الرياح وتقنيات الطاقة الشمسية هي التكاليف المالية الباهظة، وعلى مدى 30 سنة الماضية، انخفضت تكاليف الطاقة الشمسية والريحية بشكل ملحوظ [53].

الفصل الثالث

دراسة تجريبية حول إنتاج الهيدروجين

1 المقدمة:

المحلل هو العنصر الأساسي في أنظمة الهيدروجين الشمسي حيث تقوم الخلايا الشمسية بتحويل الطاقة الكهربائية من الخلايا الشمسية إلى غاز الهيدروجين.

وهناك عدة أنواع للمحللات ويفضل غالبا في أنظمة التوليد الهيدروشمسية المحللات ذات الوسيط الصلب وذلك لتجنب استخدام الأوساط الكاوية فهي متوفرة ويسهل التعامل معها ويعتبر تقريبا خاليا من أي مخاطر وتبقى مشكلتها الأكبر هي استبدال أجهزتها عند انتهاء فترة صلاحيتها وهي مشكلة مكلفة.

2 مبدأ العمل:

المحلل هو جهاز يقوم بتحليل الماء إلى عناصره الأولية المكونة له. يمكن تنفيذ هذا عبر إمرار تيار كهربائي مستمر يتحول في اتجاه واحد فقط وهذا مهم لمبدأ عمل المحلل. ويستخدم التيار المستمر الذي يغذي المحلل من الخلايا الشمسية.

يتكون المحلل من قطبين أحدهما يوصل مع القطب السالب للوح الشمسي والثاني مع القطب الموجب وكلا القطبين مغموسين في أنبوبين يحتويان على ماء مقطر، حيث يتكون غاز الهيدروجين عند القطب السالب أما غاز الأكسجين عند القطب الموجب.

3 الهدف من التجربة:

الهدف من هذه التجربة هو إنتاج الهيدروجين من التحليل الكهربائي للماء باستخدام الطاقة الشمسية، وهي الطريقة التي يراهن عليها العالم من أجل خلق سوق واعد للهيدروجين ودعم التحول إلى مستقبل منخفض الكربون.

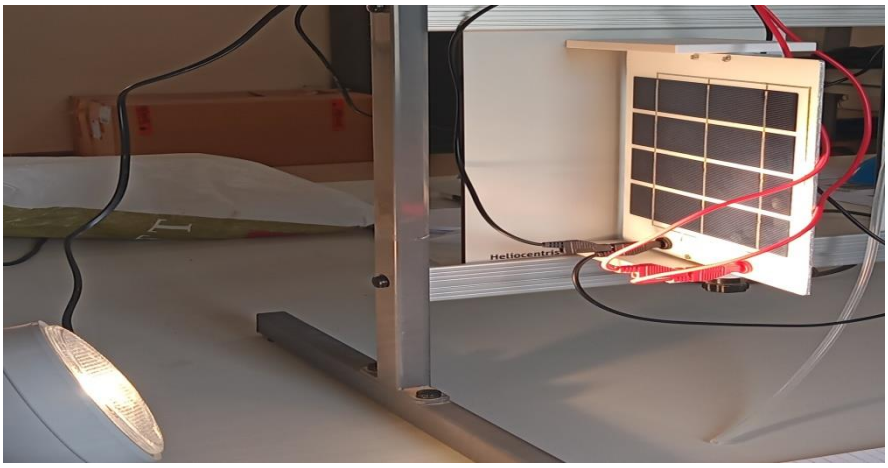
4 عناصر النظام:

أجريت الدراسة التجريبية لإنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية في شهر مارس 2023، في مخبر الفوطونيات في كلية العلوم الدقيقة. استعمل في هذه الدراسة جهاز يحتوي على 5 وحدات وهي:

- **اللوحة الشمسية:**

يمثل الشكل (1.3) اللوحة الشمسية التي أبعادها:

(العمق×الارتفاع ×العرض)(200mm×310mm×130mm)، تستخدم الألواح الشمسية المكونة من أربع خلايا لإجراء التجارب الكهروضوئية ولإنتاج الطاقة الكهربائية للمحلل الكهربائي، كما يمكن تدويرها على الحامل لمحاذاة مصدر الضوء بسهولة أكبر.



الشكل (1.3): اللوح الشمسي.

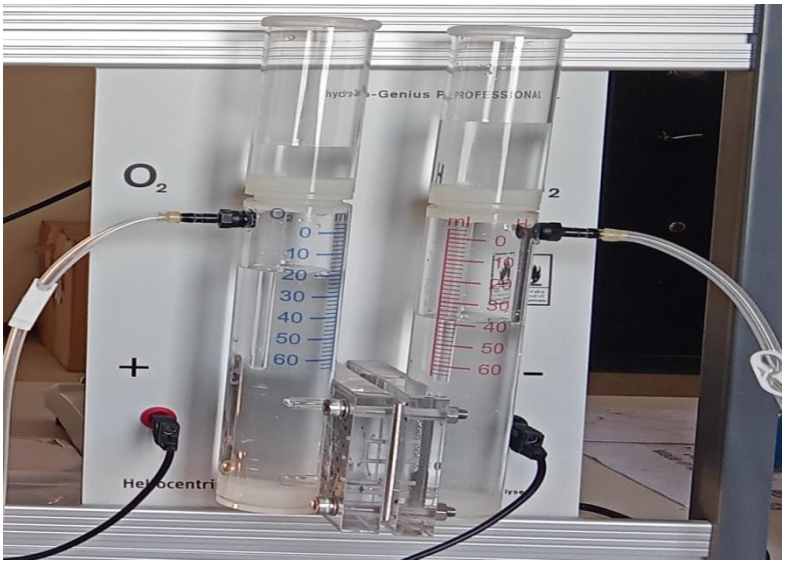
- **المحلل الكهربائي:**

الشكل (2.3) يمثل المحلل الذي أبعاده: (العمق×الارتفاع ×العرض) (200mm×297mm×125mm)

يحتوي على صهريجين (عبارة عن أنبوبين بلاستيكيين مدرجين) لتخزين غاز الهيدروجين والأكسجين المنتجين، الحجم المخصص لتخزين الغازين 64ml لكل واحد منهما كذلك تستعمل الصهاريج لملأ الماء، يقوم المحلل بتقسيم الماء إلى هيدروجين وأكسجين بفضل تقنية PEM يجب أن يكون الماء مقطر.

جهد التشغيل من 1.4Vإلى 1.8Vوالقيمة العظمى لشدة الكهرباء 4000mA كما ينتج الهيدروجين كحد أقصى (28ml/ الدقيقة).

أبعاد خلية PEMالموجودة في المحلل (العمق×الارتفاع×العرض) (200mm×297mm×115mm).

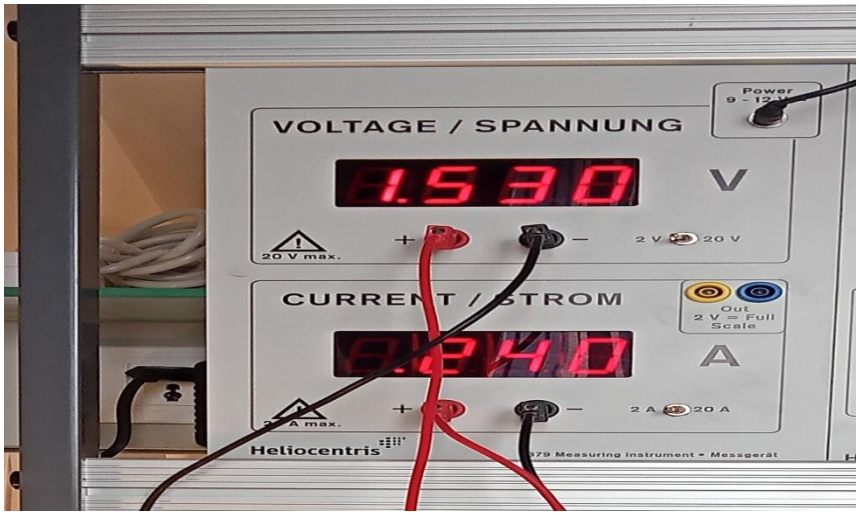


الشكل (2.3): المحلل الكهربائي.

- **وحدة القياس:**

يمثل الشكل (3.3) وحدة قياس أبعادها: (العمق×الارتفاع ×العرض) (200mm×297mm×100mm) التيار المقاس يكون [من 0 إلى 2] و [من 0 إلى 20] أمبير(A)، أما بالنسبة للجهد فيكون [من 0 إلى 2] و[من 0 إلى 20] فولت (V).

تحتوي وحدة القياس على نطاقي قياس للتيار والجهد، يمكن قراءة القيم المقاسة بوضوح على شاشات LED الكبيرة.



الشكل (3.3): وحدة القياس.

- **خلية الوقود:**

الشكل (4.3) يمثل أبعاد خلية الوقود: (العمق×الارتفاع ×العرض) (200mm × 297mm×115 mm) ودرجة الحرارة المسموح بها أثناء التشغيل من °10+ إلى °35+.

تستخدم هذه الخلية المزدوجة لإنتاج الكهرباء من الهيدروجين والأكسجين يمكن توصيل خليتي الوقود بالتوازي أو على التوالي، تعتمد في مبدأ عملها على تقنية PEM وهي أكثر التقنيات انتشارا واستخداما في تطبيقات خلايا الوقود.

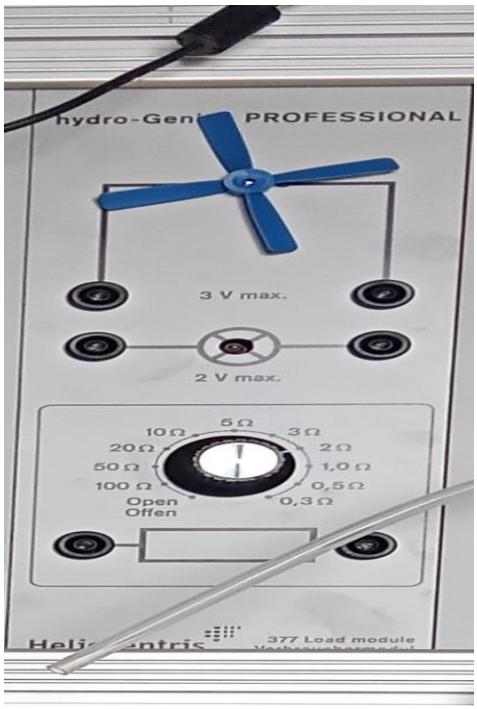
الشكل (4.3): خلية الوقود.

- **وحدة الحمل:**

أبعاد وحدة الحمل في الشكل (5.3) هي: (العمق×الارتفاع ×العرض) (100mm×297mm×100mm) أعلى جهد لتشغيل المحرك 3 فولت وأعلى جهد لتشغيل المصباح 2 فولت، تحتوي مقاومات مختلفة

Ω (100، 50، 20، 10، 5، 3، 2، 1، 0.5، 0.3) عند الفتح.

تستخدم وحدة الحمل للأحمال المحددة التي تؤثر على خلية الوقود واللوحة الشمسية عن طريق محرك أو مصباح أو عشرة مقاومات قابلة للتحديد.



الشكل (5.3): وحدة الحمل.

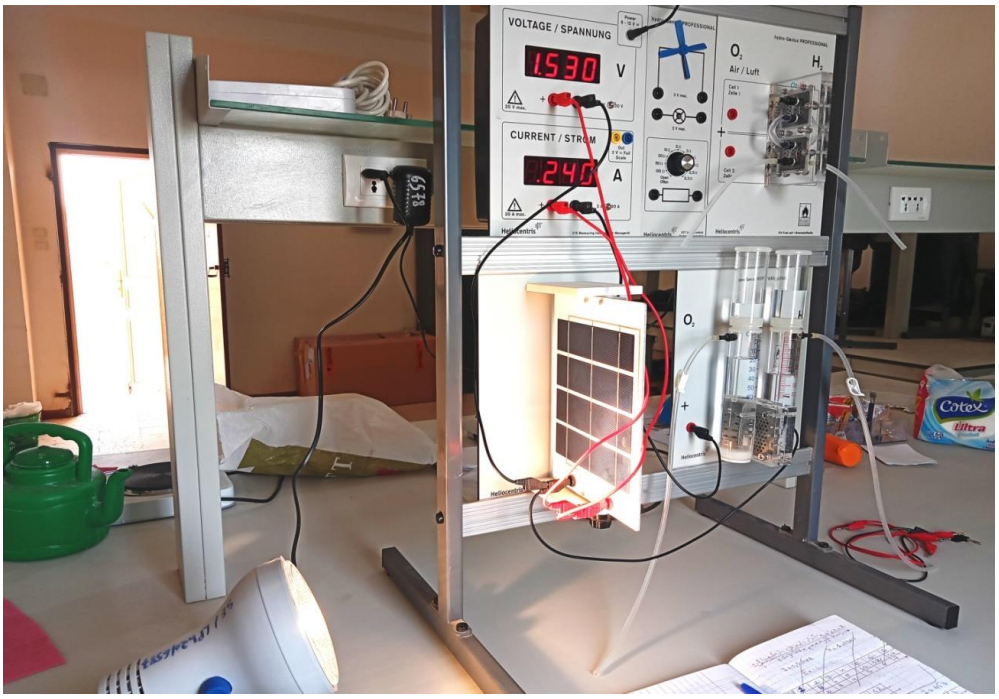
كما إستعملنا في هذه التجربة أيضا جهاز اللوكس مترالموضح في الشكل (6.3) لقياس الاستنارة، وهو جهاز يقيس أيضًا سرعة الهواء، ودرجة حرارة الهواء، والرطوبة النسبية.

الشكل (6.3): جهاز اللوكس متر.

استخدمنا أيضا:

- 4خراطيم بلاستيكية (خرطومين قصيرين وخرطومين طويلين).
- منبع ضوئي (مصباح استطاعته من 100إلى150W).
- خيوط توصيل للربط بين الوحدات.
- سدادات لغلق الأنابيب.

يمثل الشكل (7.3) الجهاز المستخدم في التجربة:



الشكل (7.3): جهاز التحليل الكهربائي.

5 طريقة العمل:

العلاقة بين الإشعاع الشمسي واستنارة المصباح: $1w/m^2 = 122\ lux$ [54].

1.5 دراسة أداء اللوح الشمسي:

- نربط اللوح الشمسي مع الفولت متر والأمبير متر في وحدة القياس، نقوم بتعريض اللوح للمنبع الضوئي، نغير في الاستنارة ونسجل التيار والجهد المنتجين في كل تغيير، النتائج موضحة في الجدول (1.3):

الجدول (1.3): قيم التيار والجهد المنتج من اللوح بدلالة تغير الاستنارة.

الإشعاع الشمسي (w/m^2)	43.03	55.32	69.22	91.80	122.95	162.29
الاستنارة(lux)	5250	6750	8445	11200	15000	19800
الجهد (V)	0.016	0.020	0.024	0.030	0.037	0.047
التيار(A)	0.250	0.300	0.363	0.441	0.550	0.682

- لقياس الجهد بين طرفي المقاومة نقوم بتثبيت الاستنارة E =15000 Lux ونغير في المقاومة نسجل الجهد والتيار لكل موضع النتائج موضحة في الجدول (2.3):
  I=0.532A التيار المسجل ثابت.

الجدول (2.3): يمثل تغير الجهد بين طرفي المقاومة بدلالة المقاومة المركبة في الدارة.

المقاومة (Ω)	0.3	0.5	1	2	3
الجهد (V)	0.179	0.271	0.546	1.102	1.760

2.5 دراسة كفاءة المحلل الكهربائي:

- دراسة تغير حجم غاز الهيدروجين والأكسجين بدلالة الزمن:

نملأ أولا الأنبوبين المدرجين إلى التدريجة 0ml الموضحة في الجهاز، نغلقهما بإحكام كذلك نغلق الخرطومين بالسدادات.

نربط اللوح الشمسي بالمحلل والفولت متر والأمبيرمتر ونعرضه إلى إضاءة ثابتة حيث ينتج تيار كهربائي يفصل الماء إلى أكسجين وهيدروجين بواسطة تقنية PEM، نراقب تغير الحجم مع مرور الوقت. النتائج مدونة في الجدول (3.3):

I=0.566A E=15900 LUX V=1.600V

الجدول (3.3): يمثل تغير حجم غاز الهيدروجين والأكسجين بدلالة الزمن.

الزمن (S)	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
حجم غاز الهيدروجين (ml)	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
حجم غاز الأكسجين (ml)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20

- حساب تدفق غاز الأكسجين والهيدروجين:

$Q_{O2}=0.033ml/s$ $Q_{H2}=0.066ml/s$ $Q=(V_1-V_0)/(t_1-t_0)$

- دراسة تغير حجم غاز الهيدروجين والأكسجين بدلالة الاستنارة:

نقوم بنفس العمل السابق لكن نغير في الاستنارة ونقيس الحجم المنتج كل 180ثانية ندون النتائج مع حساب التدفق لكل غاز، النتائج مدونة في الجدول (4.3) و(5.3):

الجدول (4.3): تغير حجم وتدفق غاز الأكسجين بدلالة الاستنارة.

الإشعاع الشمسي (w/m^2)	68.85	81.91	95.40	104.09	130.32	140.98
E(lux)	8400	9830	11640	12700	15900	17200
حجم غاز الأكسجين (ml)	2	2.25	3.75	4	6	6.5
Qتدفق غاز الأكسجين (ml/s)	0.011	0.013	0.021	0.022	0.033	0.040
الجهد (V)	1.52	1.53	1.54	1.56	1.59	1.62
التيار (A)	0.226	0.258	0.323	0.408	0.554	0.674

الجدول (5.3): تغيرحجم وتدفق غاز الهيدروجين بدلالة الاستنارة.

الإشعاع الشمسي (W/m^2)	68.85	81.91	95.40	104.09	130.32	140.98
E (lux)	8400	9830	11640	12700	15900	17200
حجم غاز الهيدروجين (ml)	4	4.5	7.5	8	12	13
Q تدفق غاز الهيدروجين (ml/s)	0.022	0.025	0.042	0.044	0.067	0.072
الجهد (V)	1.52	1.53	1.54	1.56	1.59	1.62
التيار(A)	0.226	0.258	0.323	0.408	0.554	0.674

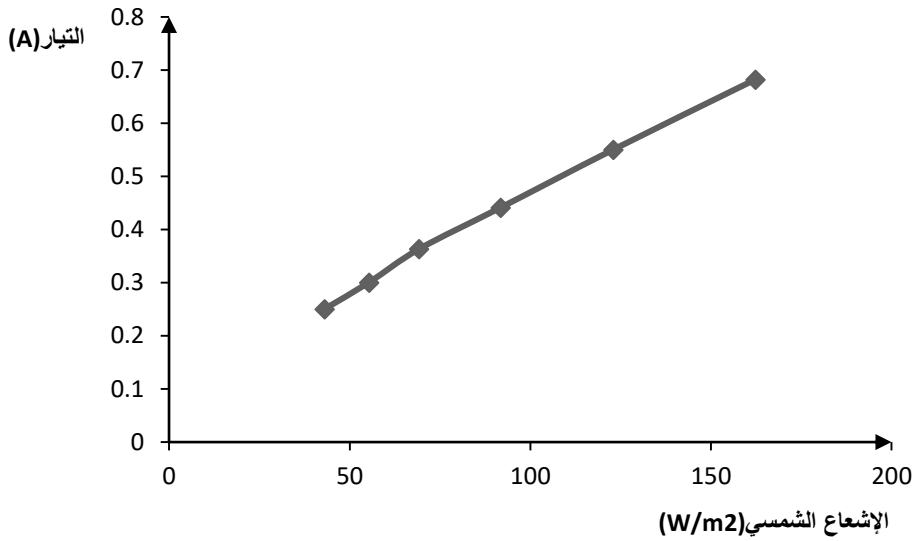
3.5 دراسة كفاءة خلية الوقود:

نتحقق أولا من اتصال خراطيم إمداد الغاز بين المحلل وخلية الوقود ونقوم بالربط على التسلسل بين خليتي الوقود مع وحدة الحمل ووحدة القياس، نملأ خزاني الغاز بالماءإلى التدريجة 0ml، نوجه اللوح الشمسي إلى المنبع الضوئي، ننتج حجما من غاز الهيدروجين قدره60ml، نفصل عندئذ المحلل عن اللوح الشمسي، نقوم بفتح المشابك للخراطيم القصيرة المتصلة بمخرج الخلية والتغيير في المقاومة من الأكبر نحو الأصغر ونسجل التيار والجهد المنتجين من الخليتين لكل موضع مفتاح (ننتظر30sقبل القراءة). النتائج موضحة في الجدول (6.3): E=13000lux

الجدول (6.3): تغير الجهد والتيار بدلالة المقاومة المركبة في الدارة.

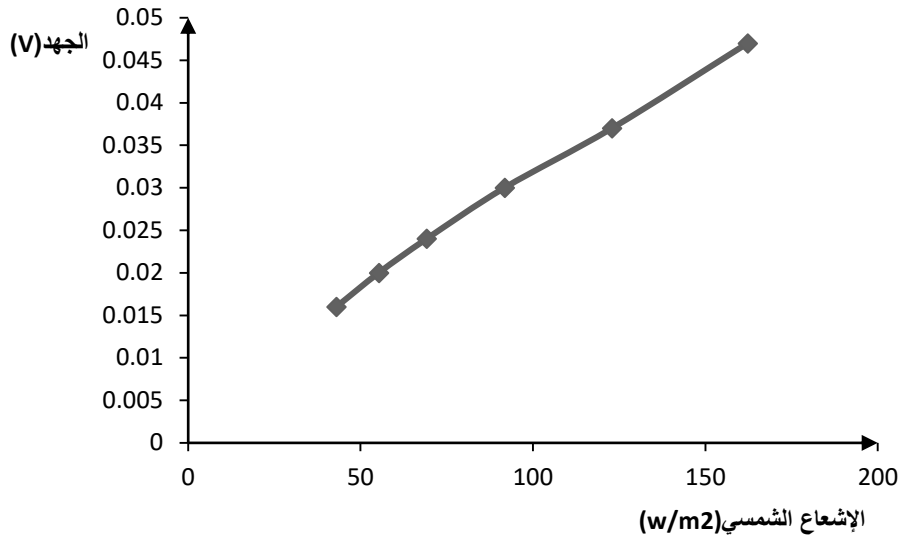
المقاومة (Ω)	1	2	3	5	10	20	50
الجهد (v)	0.432	0.492	0.510	0.583	0.619	0.649	0.683
التيار(A)	0.232	0.217	0.155	0.116	0.057	0.027	0.011

6 تحليل النتائج:



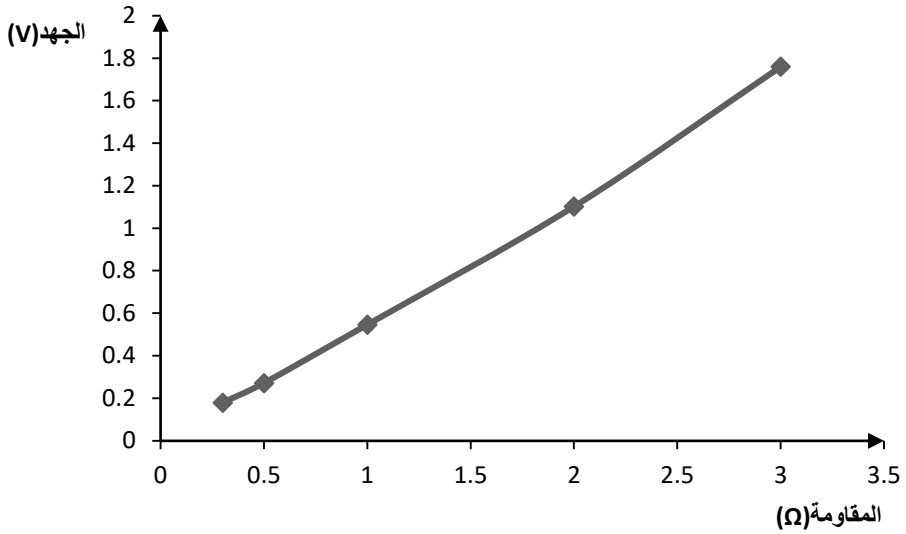
الشكل (8.3): تغير التيار المنتج من اللوح الشمسي بدلالة الإشعاع الشمسي.

يمثل الشكل (8.3) منحنى تغير قيمة التيار المنتج من اللوح الشمسي بدلالة الإشعاع الشمسي حيث نلاحظ أنه كلما زاد الإشعاع الشمسي الساقط على اللوح الشمسي زاد التيار الكهربائي المنتج من طرف اللوح.



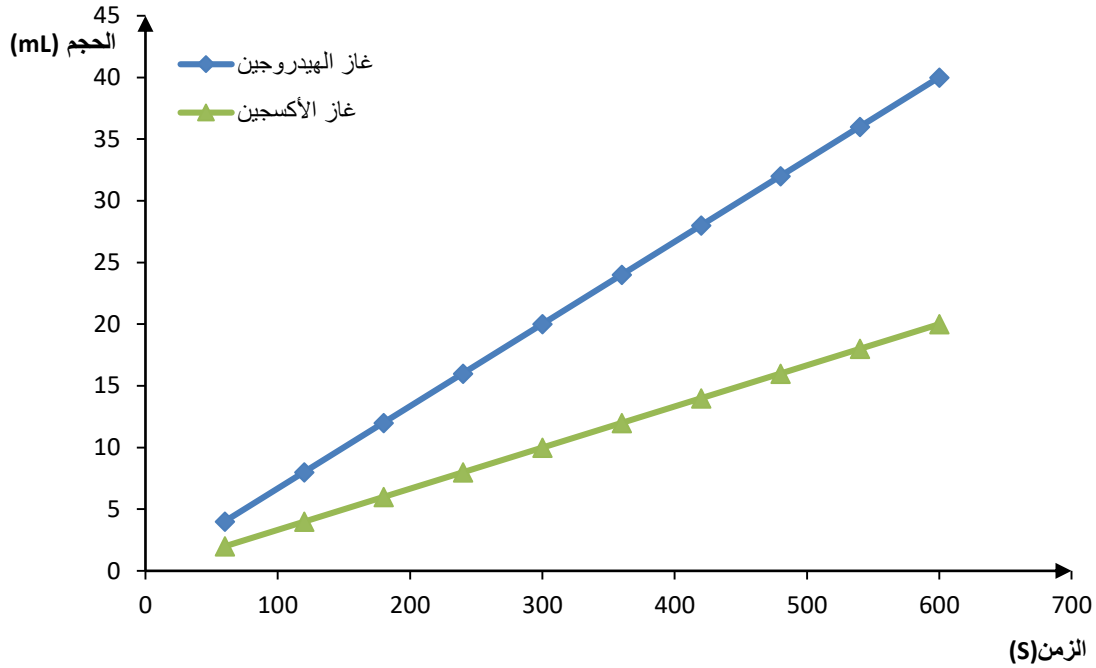
الشكل (9.3): تغير الجهد بين طرفي اللوح الشمسي بدلالة الإشعاع الشمسي.

يمثل الشكل (9.3) منحنى تغير الجهد بين طرفي اللوح الشمسي بدلالة الإشعاع الشمسي حيث نلاحظ أنه كلما زاد الإشعاع الشمسي الساقط على اللوح الشمسي زاد الجهد بين طرفيه.



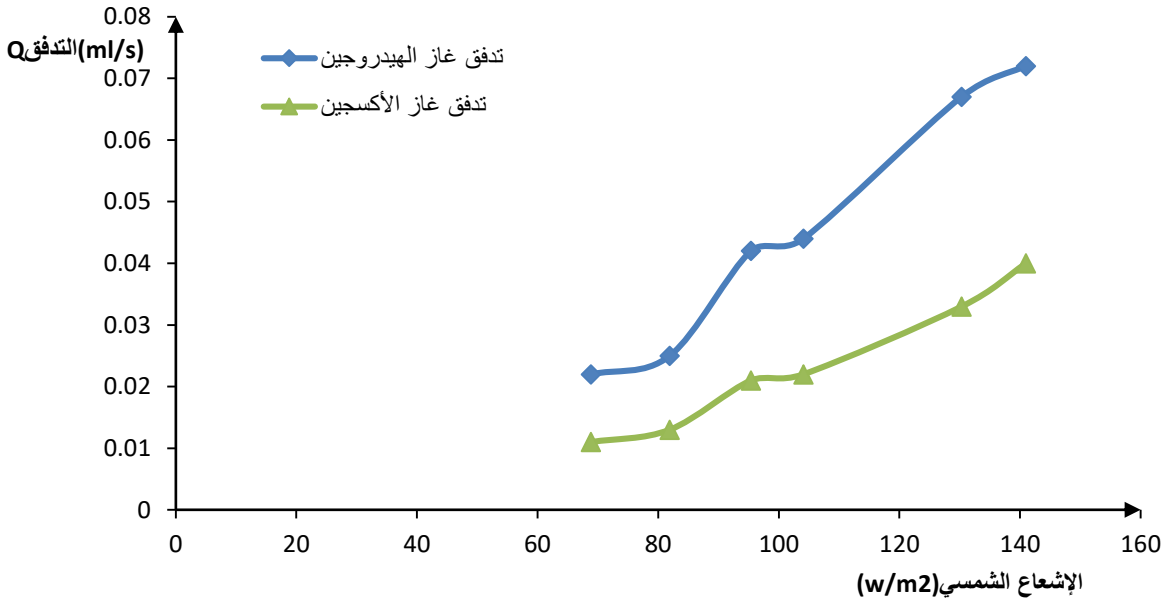
الشكل (10.3): تغير الجهد بين طرفي المقاومة بدلالة المقاومة المركبة في الدارة.

يمثل الشكل (10.3) منحنى تغير الجهد بين طرفي المقاومة بدلالة المقاومة حيث نلاحظ أنه كلما زادت قيمة المقاومة زاد الجهد بين طرفيها.



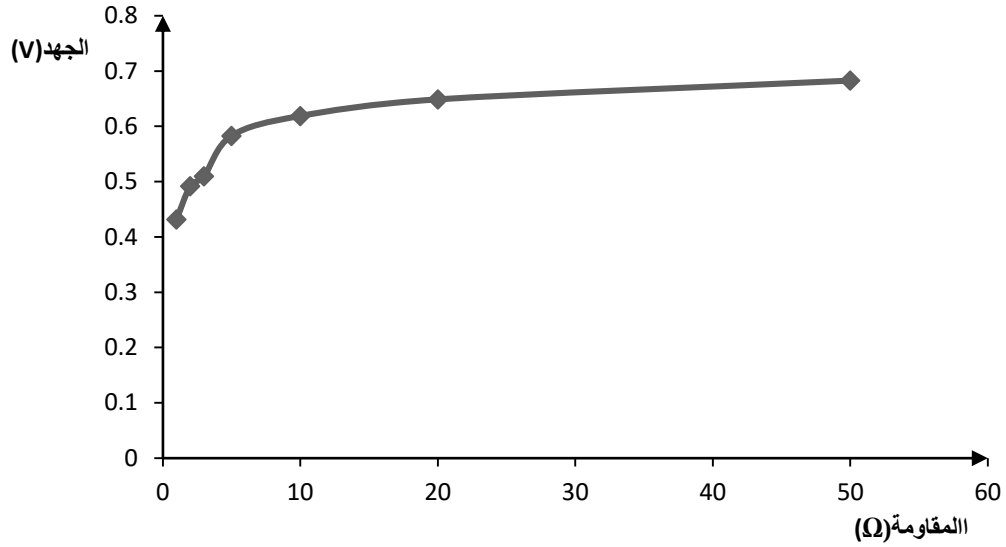
الشكل (11.3): تغير حجم غازي الهيدروجين والأكسجين بدلالة الزمن.

يمثل الشكل (11.3) منحنى تغير حجم غازي الهيدروجين والأكسجين بدلالة الزمن حيث نلاحظ أنه كلما زاد الزمن زاد حجم غاز الهيدروجين وغاز الأكسجين المنتجين.



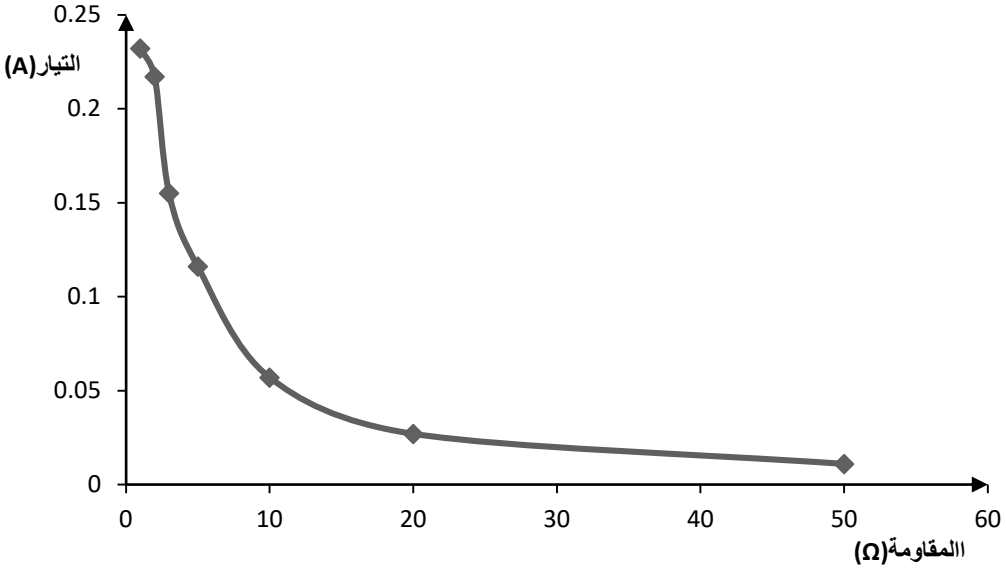
الشكل (12.3): تغير تدفق غاز الهيدروجين وغاز الأكسجين بدلالة الإشعاع الشمسي.

يمثل الشكل (12.3) منحنى تغير تدفق غاز الهيدروجين وغاز الأكسجين بدلالة الإشعاع الشمسي حيث نلاحظ أنه كلما زاد الإشعاع الشمسي زاد تدفق غاز الهيدروجين والأكسجين المنتجين.



الشكل (13.3): تغير جهد خلية الوقود بدلالة المقاومة المركبة في الدارة.

يمثل الشكل (13.3) منحنى تغير جهد خلية الوقود بدلالة المقاومة حيث نلاحظ أنه كلما زادت قيمة المقاومة زاد الجهد بين طرفي خلية الوقود.



الشكل (14.3): تغير التيار الكهربائي لخلية الوقود بدلالة المقاومة المركبة في الدارة.

يمثل الشكل (14.3) منحنى تغير التيار الكهربائي لخلية الوقود بدلالة المقاومة حيث نلاحظ أنه كلما زادت قيمة المقاومة كلما نقصت قيمة التيار الكهربائي المنتج من طرف خلية الوقود.

7 خلاصة:

من خلال التجارب السابقة التي قمنا بها لاحظنا أنه هناك علاقة طردية بين كمية الإشعاع الشمسي الساقط على اللوح الشمسي وكمية الهيدروجين المنتجة، حيث كلما زادت كمية الإشعاع زاد تدفق غاز الهيدروجين.

كذلك نلاحظ أنه كلما زاد الإشعاع الساقط على اللوح الشمسي زادت قيمة التيار المنتج من اللوح.

ويوجد أيضـــا علاقة طردية بين حجم غاز الهيدروجين المنتج والزمن حيث لاحظنا زيادة حجم الهيدروجين بمرور الزمن.

الخاتمة العامة

الطاقة جزء ضروري ومهم في حياتنا اليومية، تتعدد مصادرها وأنواعها فمنها التقليدية كالوقود الأحفوري والغاز الطبيعي وإلى غيرها. ما يعيب هذه الطاقة أنها مضرة وملوثة للبيئة رغم المردود الكبير لها، لذلك اتجه العالم نحو التحول إلى طاقات أخرى أكثر نظافة وأمان، من بينها استغلال الطاقة الناتجة عن غاز الهيدروجين بآليات وظروف مناسبة ومن مصادر متجددة وبتكنولوجيا متطورة.

لحدوث الظاهرة الكهروضوئية لابد من توفر الإشعاع الشمسي والألواح الكهروضوئية، ولتحسين مردود الكهرباء الناتجة عن هذه الظاهرة يجب تطوير صنع الألواح الشمسية وزيادة كفاءتها.

ينتج غاز الهيدروجين بواسطة عملية التحليل الكهربائي للماء، ويتم استعماله في مجالات مختلفة كوقود الصواريخ والسيارات، كذلك في توليد الكهرباء. كما أن هذا الغاز خفيف بالنسبة لغازات أخرى وسريع التدفق.

اتضح من خلال العمل التجريبي المدروس أن هناك علاقة بين الإشعاع الشمسي والجهد والتيار الكهربائي المنتجين حيث تمت ملاحظة أنه كلما زاد الإشعاع الشمسي الساقط على اللوح الشمسي زادت قيمة التيار والجهد الكهربائي المنتجين كذلك لوحظ أيضا زيادة حجم غاز الهيدروجين والأكسجين المنتجين مع مرور الزمن واتضح أيضا أن هناك علاقة طردية بين الإشعاع الشمسي وتدفق غاز الهيدروجين والأكسجين المنتجين حيث كلما زاد الإشعاع الساقط زاد تدفق الغازين.

- لابد للعلماء من إيجاد طريقة لصنع ألواح شمسية بحجم صغير وكفاءة عالية.
- البحث على تخزين أفضل لغاز الهيدروجين ليسهل استغلاله ونقله.
- تطوير خلايا الوقود من أهم الايجابيات التي تساعد عل إنتاج كميات كبيرة من الهيدروجين.
- نأمل في المستقبل أن تكون هناك تبادلات تجارية للمنتجات التي تعمل بهذا الغاز.

الملخص

في هذا العمل تم التطرق إلى مفاهيم عامة حول الطاقة الشمسية والألواح الكهروضوئية وكيفية صناعتها وأنواعها. وتم التعرف أيضا على خصائص غاز الهيدروجين وأنواعه وطرق إنتاجه. من بينها التحليل الكهربائي بواسطة تقنية PEM المسؤولة عن فصل جزيء الماء إلى هيدروجين وأكسجين.

كما تم تطبيق عدة تجارب قصد إنتاج غاز الهيدروجين من الماء المقطر بواسطة الطاقة الشمسية، الجهاز المستخدم يحتوي على خمس وحدات: وحدة حمل، وحدة قياس، لوح شمسي، محلل كهربائي وخلية وقود يعملان بتقنية PEM. تمت أيضا دراسة كفاءة اللوح الشمسي والمحلل فلوحظ أن هناك علاقة طردية بين الإشعاع الشمسي الساقط وتدفق غاز الهيدروجين المنتج، كذلك لوحظ زيادة حجم الغاز المنتج مع مرور الزمن.

الكلمات المفتاحية: الهيدروجين الشمسي، تقنية PEM، الطاقة الشمسية، اللوح الشمسي، خلايا الوقود.

In this work, general concepts about solar energy and photovoltaic panels, their manufacturing processes, and types were addressed. Additionally, an introduction to the properties of hydrogen gas, its types, and production methods was provided. Among these methods is the electrochemical analysis using the PEM (Proton Exchange Membrane) technology, responsible for separating water molecules into hydrogen and oxygen.

Several experiments were conducted to produce hydrogen gas from distilled water using solar energy. The device used consisted of five units: a load unit, a measurement unit, a solar panel, an electrical analyzer, and a fuel cell, all operating with PEM technology. The efficiency of the solar panel and the analyzer was also studied, and it was observed that there is a direct relationship between incident solar radiation and the flow of produced hydrogen gas. Additionally, an increase in the volume of the gas produced over time was observed

Keywords: Solar hydrogen, PEM technology, solar energy, solar panel, fuel cells..

المراجع

[1] محمد مصطفى محمد الخياط، 2006، "الطاقة مصادرها-أنواعها-إستخدماتها"، القاهرة.

[2] سي جوليان تشن، 2011،"فيزياء الطاقة الشمسية"، مصطفى محمد فؤاد ودار النشر مؤسسة هنداوي المملكة المتحدة.

[3] صباح طارق أحمد، حسن فخري محمد رسول، 2010، دراسة نظرية وتجريبية لإنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الشمسية في مدينة بغداد-العراق، مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد 28، ال عدد19، العراق.

[4] chem libretexts, Powered by NICE CXone Expert "Electrolysis of Water",24/6/2021.

[5] ستيفان ك. و. كراوتر، 2011، توليد القدرة الكهربائية من الطاقة الشمسية أنظمة الطاقة الفولت ضوئية، د.عبد الباسط علي صالح كرمان، المنظمة العربية للترجمة، بيروت.

[6] إشعاع شمسي، https://ar.m.zikipedia.org 27/03/2023

[7] مريم أزهر علي غالب،2016، تقييم كفاءة خلية شمسية من مادة السليكون ذات اخاديد مختلفة الشكل باستخدام برنامج زيماكس، رسالة ماجستير، جامعة بغداد، العراق.

[8] كاميليا يوسف محمد ،2016، الطاقة الكهروشمسية، دار الكتب والوثائق القومية، مصر.

[9] رزق محمد قرفول ،2019، حساب وتحليل كمية الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على سطح مائل في منطقة مرتفعة من سطح البحر،مجلة جامعة تشرين ، العلوم الأساسية، المجلد(41) ،العدد(4) ، سورية .

[10] تاتي مريم وبسملة رجاء،2019 ، تأثير الغبار على الألواح الشمسية الكهروضوئية، مذكرة ماستر ، جامعة قاصدي مرباح، ورقلة.

[11] سليمان كعوان ، جابة أحمد،2015، تجربة الجزائر في استغلال الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، مجلة العلوم الإقتصادية والتسييروالعلوم التجارية ، العدد(14) ، الجزائر.

[12] بوعشة أسمهان ،2019، جدوى استغلال الطاقة الشمسية كطاقة متجددة وإمكانية استخدامها في التبادلات التجارية الخارجية (دراسة حالة الجزائر) ، رسالة لنيل شهادة دكتوراه، جامعة محمد خيضر، بسكرة.

[13] ادريس-الرمحين-القادري،2012، نمذجة ومحاكات لاقط كهروضوئي في بيئة الحزمة البرمجية (LaBview)، مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية ، المجلد (28) ، الثاني، سورية.

[14] إسراء عبد الرحمن يوسف وآخرون، 2016، مقارنة بين أقصى قدرة ودرجة الحرارة عند استخدام ألواح خلايا شمسية في نظامين تابع وأخر ثابت .

[15] جون ر.فانشي،2011، الطاقة التقنية وتوجيهات للمستقبل، عبد الباسط علي صالح كرمان، المنضمة العربية للترجمة ، بيروت.

[16] عثمان زكي مبارك علي،2022، تحسين عمل الخلايا الشمسية السيلكونية، مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية، المجلد (3) ، العدد (2) ، الإمارات.

[17] ف مسعود، تصميم وإنجاز التحليل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين بالطاقة الشمسية، فريق هندسة نظم الطاقة الهيدروجينية ،ترجمة خولة عقيلة ،قسم الهيدروجين والطاقات المتجددة.

[18]عبد الدائم الكحيل،"دورة الماء بين العلم والإيمان". المصدر " المكتبة الشاملة الذهبية" ،15اكتوبر2019.

[19]- Sargen, Molly. "Biological Roles of Water: Why is water necessary for life." *Retrieved from Science in the news: https://sitn. hms. harvard. edu/uncategorized/2019/biologicalroles-of-water-why-is-water-necessary-for-life* (2019).

[20] Martin Khublaryan (2009), Types and Properties of Water, United States: UNESCO, Page 43.

[21] Steven Zumdahl (2-6-2020), "Water-www.britannica.com

[22] Physical Properieties of water, www.physicalgeography.net.

[23] Samantha Ma (24.05.2016), "Physical au Chemical Properties of watter " ,www.chem.libretes.org.

[24]Haward Perlmain (08.08.2018), "PH-Water Properties ", www.water.ugs.gore .

[25] Haward Perlmain (05.12.2016), "Water Hardness" , www.water.usgs.gov .

[26] "Water Electrolysis", sciencedirect, 24/6/2021..

[27] د.عطية محمد الهادي،" خلاياالوقود وإنتاج الهيدروجين"الوادي 2021، ص19 ص21.

[28] كرم شـــبيـب والأخرون، "الـهيـدروجين.....وقود المســـتقبـل"، المركز الوطني للمتمييزين، سوريا،2015/2014.

[29] "Water Electrolysis", BYJU'S, 24/6/2021.

[30] ALPHEA HYDROGÈNE – Veille thématique n°2 – Bulletin mensuel sur un sujet thématique lié à l'hydrogène et ses applications : Production d'hydrogène – avril 2006 - Association Lorraine pour la Promotion de l'Hydrogène Et de ses Applications (A.L.P.H.E.A.) : www.alphea.com

[31] Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) : revue Clefs CEA n°50/51 : L'hydrogène, les nouvelles technologies de l'énergie : Hiver 2004-2005 – http://www.cea.fr/

[32] J. Labbé, L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité ―Énergétique‖, 2006

[33] Hashimoto A and al.," Development of PEM water electrolysis type hydrogen production system for WE-NET", proceedings of 14th WHEC, Montreal, 2002.

[34] يوسف سعود عياش، كتاب" تكنولوجيات الطاقة البديلة " فيبراير 1981.

[35] Lunkka-Hytönen,Maria, Katileena Lohtander-Buckbee, (2016).

http://www.science.org.au/nova/newscientist/111ns_002.htm.

[36] Kauranen P.S, Lund P.D, Vanhanen J.P, Development of a self-sufficient solar hydrogen energy system, International Journal of Hydrogen Energy, 1994, Vol. 19, p. 99-106.

[37] بوابة أرقام المالية،"الهيدروجين وقود المستقبل القادم من السعودية"، 2015/05/18، المملكة العربية السعودية.

[38] Cau, Giorgio, et al. "Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system." *Energy Conversion and Management* 87 (2014): 820-831.

[39] D. SImbeck and E. Chang, "Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways -Scoping Analysis," National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2002.

[40] http://www.h2wales.org.uk/documents/4.html.
[41] www.hnei.hawaii.edu,sites,filesxlink.rsc.org,journals,GreenChemistry.
[42] www.hydrogen.energy.gov>enduse.

[43] مؤسسة فريد ريش إيبرت، مشروع الطاقة والمناخ الإقليمي، " الهيدروجين الأخضر"، الأردن العراق.

[44] كورنيليوس ماتيس ، فاليريا أروفو ،لويس ريتبي برادو،" تحديات وفرص إنتاج الهيدروجين الأخضر وتصديره من منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا إلى أوروبا"، فريدريش إيبرت ،المملكة الأردنية الهاشمية رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (5363/12/2020).

[45] لعمى احمد رحال أمال، مداخلة بعنوان "مستقبل الهيدروجين الشمسي في الجزائر"، جامعة ورقلة 2012.
[46] مؤسسة فريد ريش إيبرت، مشروع الطاقة والمناخ الإقليمي، "منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا"، الأردن العراق.

[47] Kauranen P.S, Lund P.D, Vanhanen J.P," Development of a self-sufficient solar hydrogen energy system", International Journal of Hydrogen Energy, 1994, Vol. 19, p. 99-106.

[48] Dufoix Mathieu, Mastrangelo Jean-François, Valmage François, “Quelle place pour l'hydrogène dans les systèmes énergétiques“, Atelier Changement Climatique, 2003 2004.

[49] Ram B. Gupta, “Hydrogen fuel production, transport, and storage“, CRC Press Taylor &Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton,

FL 33487 2742, International Standard Book Number, 13: 978-1-4200-4575-8) (Hardcover.

[50] WYLD GROUP PTY LTD. Hydrogen Technology Roadmap, Australian, 2008.Persistence Market Research “Hydrogen Market - Global Study on Hydrogen”.

[51] New York City, 2014.N. Lymberopoulos, “Hydrogen Production from Renewables”, Center for Renewable Energy Sources (C.R.E.S), Pikermi Attiki, Project Technical Assistant.

[52] Framework Contract EESD Contract No: NNE5-PTA-2002-003/1, September 2005. “Technology Brief: Analysis of Current-Day Commercial Electrolyzers”.

[53] NREL, Golden, CO NREL/FS-560-36705, September 2004. P. Hoffman, “Tomorrow's Energy – Hydrogen", Fuel Cells, and the Prospects for.

[54] peter R. Michael, and others ,2020, A conversion guide:solar irradiance and lux illuminance, JOURNAL OF MEASUREMENTS IN ENGINEERING,VOLUME8,ISSUE4,USA.