

## تطوير الخلايا الشمسية باستخدام تقنية النانو

خيرية علي محمد المغربي

قسم الفيزياء، كلية التربية بقصر بن غشير - جامعة طرابلس

kh78ali@yahoo.com

### Abstract

This paper aims to develop solar cells using Nano-crystalline titanium dioxide ( $TiO_2$ ), which call "Dye-Sensitized Solar Cells" (DSSC). Nanocrystalline ( $TiO_2$ ) are made in the form of thin film slides, which are controlled during the preparation process. The surface area of the film increases with the reduction of the size of the nanocrystalline and accordingly increases the stiffness of the film making it more suitable for modern applications. High cost is one of the problems associated with silicon solar cells and the main factor that led to limited exploitation and it has become possible to develop low-cost and easy-to-manufacture solar cells. DSSC are characterized by a significant reduction in their production cost, ease of manufacture. Solar cells can be developed using nanocrystalline titanium dioxide ( $TiO_2$ ) to save energy used in lighting. The use of this technology will be a major achievement in the field of energy saving, because more than 25% of the electric energy available in the world is used in lighting.

### المستخلص

تهدف هذه الورقة إلى كيفية تطوير الخلايا الشمسية باستخدام بلورات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية ويطلق عليها الخلايا الشمسية الصبغية (DSSC) (Dye-Sensitized Solar Cell). تصنع بلورات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية على هيئة شرائح رقيقة (Film) يتم التحكم في حجمها خلال عملية التحضير حيث تزداد المساحة السطحية للفيلم بتصغير حجم البلورة النانوية وتبعاً لذلك تزداد صلابة الشريحة الأمر الذي يجعلها أكثر ملائمة للتطبيقات الحديثة.

يعتبر ارتفاع التكلفة أحد المشكلات المرتبطة بخلايا السليكون الشمسية والعامل الرئيسي الذي أدى إلى محدودية استغلالها ولقد أصبح من الممكن تطوير خلايا شمسية منخفضة التكلفة وسهلة التصنيع. تتميز الخلايا الشمسية الصبغية بانخفاض كبير في تكلفة إنتاجها وبسهولة تصنيعها. يمكن تطوير خلايا شمسية باستخدام بلورات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية لتوفير الطاقة المستخدمة في الإضاءة، كما أن استخدام هذه

التقنية سيشكل إنجازاً كبيراً في مجال توفير الطاقة، لأن أكثر من 25% من الطاقة الكهربائية المتوفرة في العالم تستخدم في الإضاءة.

**الكلمات المفتاحية:** خلية شمسية صبغية،  $TiO_2$  ، الأصبغة الطبيعية، المنحني المميز لخلية شمسية.

## 1 المقدمة

لقد سيطرت تقنية السليكون على إنتاج الخلايا الشمسية منذ عام 1985 وحتى وقتنا الحاضر، ومع انطلاق مرحلة جديدة من بحوث تطوير الخلايا الشمسية تم التركيز على دراسة فيزياء وتقنية أشباه الموصلات الرئيسية في صناعة الإلكترونيات والكهروضوئيات، ولقد أدى الانتقال من الأبعاد الماكروسكوبية والميكروسكوبية إلى الأبعاد النانوسكوبية إلى انفتاح هائل ونجاح كبير في تطوير قواعد ومعايير التقنية الحديثة لأشباه الموصلات وغيرها. إن نجاح إنتاج خلايا شمسية (أغشية رقيقة) بتقنية جديدة قليلة التكلفة ستساهم في تطوير برامج الطاقة المتجددة (العاني، 2009).

في عام 1991 تمكن الباحثان (Brian O'Regan & Michael Grätzel) من اختراع الخلية الشمسية الصبغية (Dye-sensitized solar cell) وقد أطلق على هذه الخلية الشمسية كذلك اسم خلية غراتزل. حيث تمكن الباحثان من تحضير خلية شمسية منخفضة التكلفة تتكون من فيلم رقيق شفاف ضوئياً نحو (  $10 \mu m$  ) من دقائق ثاني أكسيد التيتانيوم أبعاده من رتبة عدة نانومترات، مغطى بطبقة من مادة صبغية حساسة للضوء، وابتدت الخلية كفاءة عالية في تحويل الفوتونات الواردة إليها إلى تيار كهربائي (أكثر من 80%) وقد بلغت كفاءة تحويل خلية غراتزل (7.1%).

في عام 2014 درس الباحثون (Yang, et. al.) تحضير خلايا شمسية صبغية باستعمال إلكترونات ضوئية تعتمد على أنابيب ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية أحادية البعد ولقد تم تحضير مجموعة من الخلايا الشمسية الصبغية ذات تراكيز مختلفة من أنابيب ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية وتم دراسة أثر المعالجة بتراكيز مختلفة من  $TiCl_4$  و لقد أظهرت النتائج أن أفضل مردود بلغ 7.83% وكان لخلية شمسية معالجة بتراكيز 90 mM من  $TiCl_4$ .

تنقسم الخلايا الشمسية إلى ثلاثة أجيال، خلايا الجيل الأول خلايا السليكون البلوري عالية التكلفة، ثم انطلقت مرحلة جديدة نحو تطوير خلايا الأفلام الرقيقة التي تمثل الجيل الثاني من الخلايا الشمسية، وتمتاز

خلايا هذا الجيل بقلّة التكلفة ولكن كفاءة هذه الخلايا أقل نسبياً من خلايا السليكون البلوري، وتشمل خلايا السليكون اللابلوري والخلايا المصنوعة من أشباه موصلات أخرى، أما خلايا الجيل الثالث، فهي خلايا تعتمد على الأفلام الرقيقة النانوية وتتميز هذه الخلايا بانخفاض كبير في تكلفة إنتاجها، ومنها الخلايا الشمسية الصبغية (O'Regan & Grätzel, ) (Cartlidge, 2007) (dye-sensitized solar cell) (1991).

تعرف تقنية النانو Nanotechnology بأنها التقنيات التي تصنع على مقياس النانومتر وهي تعادل واحداً من مليار من المتر، كما يمكن تعريفها على أنها مجموعة من الأدوات والتقنيات والتطبيقات التي تتعلق بتصنيع بنية معينة وتركيبها باستخدام مقاييس غاية في الصغر، وتتخذ المواد النانوية أشكالاً عديدة لكل منها تركيبها وخصائصها، ويمكن تصنيفها حسب شكلها إلى الآتي (صالح، 2010) :

- النقاط الكمية (Quantum Dots) : هي عبارة عن تركيب نانوي شبه موصل ثلاثي الأبعاد يتراوح أبعاده بين 2 و 10 نانومتر، وهذا يقابل 10 - 50 ذرة في القطر الواحد، و 100 - 100000 ذرة في حجم النقطة الكمية الواحدة.
- الفولورين (Fullerene) : جزيئات نانوية مكونة من ذرات كربون مترابطة ثلاثياً تعطي شكل كريات، ويعد أكثر الفولورينات شهرة هو الجزيء  $C_{60}$  حيث تترتب 60 كربون على رؤوس مجسم عشريني ناقص.
- الكرات النانوية (Nanoballs) : تنتمي الكرات النانوية إلى فئة الفولورينات  $C_{60}$  ولكنها تختلف عنها قليلاً بالتركيب حيث أنها متعددة القشرة، كما أنها حاوية المركز ويصل قطر الكرة الواحدة إلى أكثر من 500 نانومتر .
- الجسيمات النانوية (Nanoparticles) : الجسيمات النانوية لها أبعاد تتراوح بين 1-100 نانومتر، والجسيم النانوي هو أصغر وحدة وله الخواص الفيزيائية والكيميائية للمادة الحجمية.
- الأنابيب النانوية (Nanotubes) : تتكون الأنابيب النانوية من خليط من مواد موصلة ومواد أشباه موصلة أسطوانية الشكل مجوفة يتراوح قطر الأنبوب بين 1 إلى 100 نانومتر. أشهر الأنابيب النانوية أنابيب الكربون متناهية الصغر (Carbon Nanotubes).
- الأسلاك النانوية (Nanowires) : هي أسلاك ذات بعد واحد تقل أقطارها عن نانومتر واحد وبأطوال مختلفة، غالباً نسبة طولها إلى عرضها تزيد عن 1000 مرة وتتفوق على الأسلاك العادية ثلاثية الأبعاد بقوة التوصيل الكهربائي لأن الإلكترونات فيها تكون محصورة كميّاً باتجاه جانبي واحد مما يجعلها تحتل مستويات طاقة محددة تختلف عن تلك المستويات العريضة الموجودة في المادة الحجمية .

• الألياف النانوية (Nanofibers) : تعتبر الألياف المصنوعة من البوليمرات من أشهر الألياف النانوية ويكون عدد ذرات سطح الألياف كبيراً بالنسبة للعدد الكلي وهذا ما يكسبها خواص ميكانيكية مميزة كالصلابة وقوة الشد وغيرها.

• المركبات النانوية (Nanocomposites) : هي عبارة عن مواد يضاف إليها جسيمات نانوية خلال تصنيعها تكسبها خواص إضافية مميزة مثل التوصيل الكهربائي والحراري أو الخصائص الضوئية والميكانيكية مثل الشدة والصلابة ومن أشهر المركبات النانوية المركبات البوليمرية.

إن استخدام البلورات النانوية يسمح بزيادة المساحة السطحية للفليم، لذلك تعتبر البلورات النانوية مناسبة جداً لتصنيع الخلايا الشمسية للحصول على خلايا شمسية ذات مساحة سطحية كبيرة نسبياً وهذا يساهم في التغلب على عامل انخفاض الكفاءة الكلية للخلايا الشمسية بشكل عام، وكذلك يمكن التغلب على أحد معوقات تقنية الخلايا الشمسية السيليكونية التي تتطلب توفير مساحات سطحية كبيرة من خلايا السيليكون (خياط، 2007) .

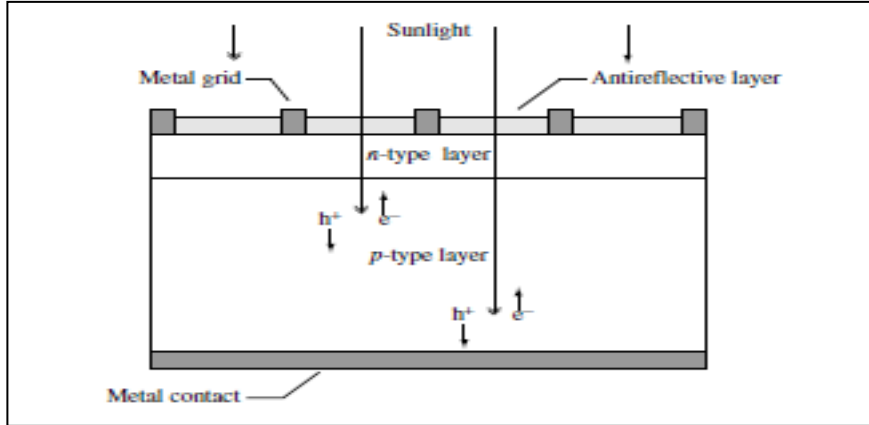
## 2 خلايا السيليكون الشمسية

يستخدم السيليكون بصورة مختلفة - وحيد التبلور (monocrystalline)، عديد التبلور (polycrystalline) وعديم التبلور (amorphous) في تصنيع الخلايا الشمسية السيليكونية . تتميز خلايا الجيل الأول خلايا السيليكون البلوري (أحادي البلورة ومتعدد البلورات) بتحقيق أعلى قيمة للكفاءة ضمن الخلايا الشمسية (جدول 1)، ولكن وعلى الرغم من توفر السيليكون في الطبيعة إلا أن تكلفة إنتاجها مرتفعة بسبب استعمالها كمية كبيرة من المواد وبسبب تقنيات التصنيع . توجهت الأبحاث بعد ذلك نحو تطوير خلايا الأفلام الرقيقة التي تشمل خلايا الجيل الثاني من الخلايا الشمسية، وتشمل خلايا هذا الجيل خلايا السيليكون اللابلوري، والخلايا المصنوعة من أشباه موصلات مثل تيلوريد وكبريتيد الكاديوم وسيلينيد نحاس-انديوم-غاليوم وغيرها. تتميز هذه الخلايا بأنها أقل تكلفة من الخلايا السيليكون البلوري بالإضافة إلى سهولة إنتاجها ولكن كفاءة هذه الخلايا أصغر نسبياً .

جدول (1) : كفاءة الأنواع المختلفة لخلايا السيليكون الشمسية [3] .

المادة	الكفاءة في المعمل	الكفاءة عند الانتاج(التجارية)
سيليكون وحيد التبلور	%24	%17-14
سيليكون عديد التبلور	%18	%15-13
سيليكون عديم التبلور	%13	%7-5

وتتكون الخلية الشمسية التقليدية من اتصال شبه موصل من النوع n مع شبه موصل من النوع p كما هو موضح بالشكل (1).



الشكل (1) : تركيب الخلية الشمسية التقليدية [8] .

تتميز أشباه الموصلات بالقدرة على امتصاص الضوء وتحويل جزء من طاقة الفوتونات الممتصة إلى حاملات شحنة (إلكترون- ثقب)، تساهم في توليد تيار كهربائي، حيث تنفصل الإلكترونات عن الثقب تحت تأثير قوة الحقل الكهربائي في الوصلة pn فتتحرك الإلكترونات المتولدة في المنطقة p نحو المنطقة n، في حين تنتقل الثقب المتولدة في المنطقة n إلى المنطقة p، ومن ثم إلى الدائرة الخارجية (Luque & Hegedus, 2003).

## 2.1 بارمترات الخلية الشمسية

يشبه سلوك الخلية الشمسية في الظلام سلوك المتصل الثنائي، أما عند الإضاءة فيتولد في الخلية الشمسية تيار ضوئي يضاف إلى سلوك المتصل الثنائي. سنعرض فيما يلي بعض بارمترات الخلية الشمسية (Luque & Hegedus, 2003)، (خضر، 2018) :

- تيار الدائرة المقصورة (Short-circuit current)  $I_{sc}$ : هو التيار الكهربائي للخلية الشمسية عندما يكون فرق الجهد صفر.
- جهد الدائرة المفتوحة (Open-circuit voltage)  $V_{oc}$ : نحصل عليه عندما لا يمر تيار عبر الخلية.
- معامل الملء (Fill factor)  $FF$ : وهو علاقة تربط بين القدرة العظمى للخلية الشمسية  $P_{max}$  وجهد الدائرة المفتوحة  $V_{oc}$  و تيار الدائرة المقصورة  $I_{sc}$  ويعطى بالعلاقة (1) :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \rightarrow (1)$$

حيث:  $V_{oc}$  جهد الدائرة المفتوحة

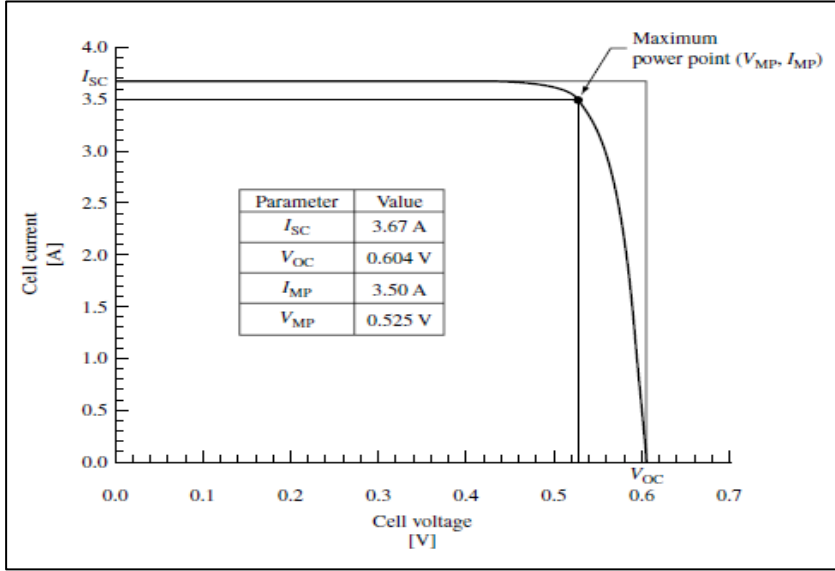
$I_{sc}$  تيار الدائرة المقصورة

$P_{max}$  الاستطاعة (القدرة) العظمى

- مردود (كفاءة) الخلية الشمسية (Efficiency)  $\eta$ : هو نسبة استطاعة (قدرة) الخرج العظمى للخلية  $P_{max}$  الى القدرة الكلية للضوء الوارد على الخلية  $P_{in}$  ويعطى بالعلاقة (2) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \rightarrow (2)$$

يوضح الشكل (2) المنحني المميز (I-V) لخلية شمسية سيليكونية .



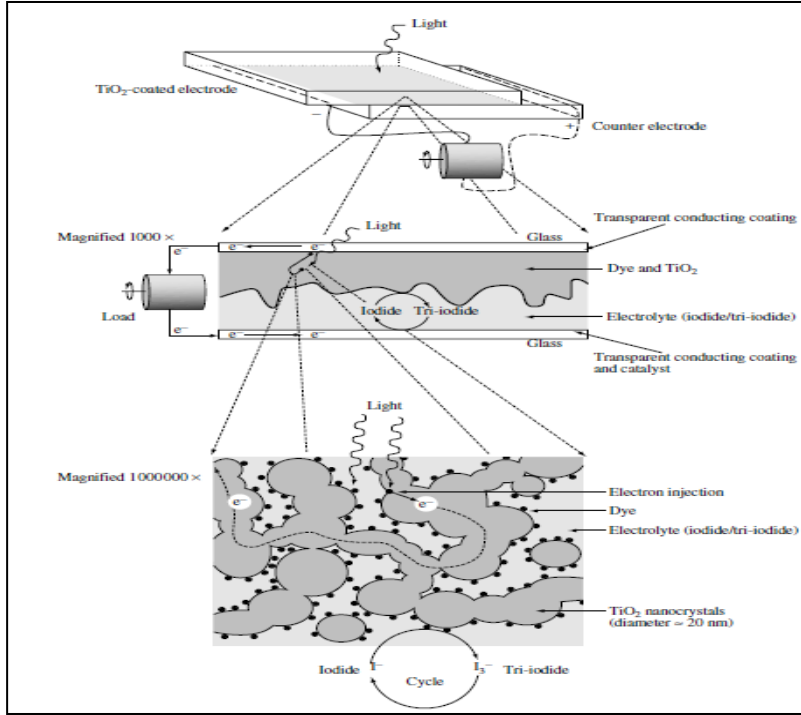
الشكل (2) : المنحني المميز (I-V) لخلية شمسية سيليكونية [8].

### 3 الخلية الشمسية الصبغية

تتكون الخلية الشمسية الصبغية (DSSC) Dye-sensitized solar cell كما هو موضح بالشكل (3) من إلكترودين، الإلكترود الأول (Photo-electrode) يتكون من ثلاث طبقات رقيقة موضوعة على شريحة زجاجية الطبقة الأولى شفافة ناقلة كهربائياً، تليها طبقة رقيقة من بلورات ثاني أكسيد التيتانيوم ( $TiO_2$ ) أما الطبقة الثالثة مادة صبغية حساسة للضوء وهي المادة الممتصة للضوء . أما الإلكترود الآخر (Counter-electrode) عبارة شريحة زجاجية أخرى مغطاة بالبلاتين. يفصل بين طبقتي الإلكترودين، الإلكتروليت (Electrolyte)، ويحتوي محلول الإلكتروليت المستخدم في الخلايا الشمسية الصبغية عادة على أيونات اليود ( $I^-/I_3^-$ ).

عندما تدخل أشعة الشمس من خلال نافذة الخلية (Photo-electrode) فإنها تصطدم بالصبغة العضوية على سطح ثاني أكسيد التيتانيوم . الفوتونات التي تمتلك طاقة كافية تمتص بواسطة الصبغة العضوية فتثار إلكترونات مدارتها الخارجية من السوية الأرضية إلى السوية المثارة، وهذا يعمل على حقن الإلكترونات المثارة في حزمة التوصيل في مادة ثاني أكسيد التيتانيوم . نتيجة لزيادة تركيز الإلكترونات الحرة في طبقة ثاني أكسيد التيتانيوم فإنها تتحرك بالانتشار الى الشريحة الناقلة ثم تنتقل عبر الدائرة

الخارجية إلى الإلكترود الثاني (Counter-electrode) ومنها إلى الألكتروليت ويستعيد مركب اليود الثلاثي الإلكترون المفقود ويتحول إلى مركب أحادي. جزئيات الصبغة العضوية تقوم بإرجاع الألكتروليت المفقود وذلك بامتصاص إلكترون آخر من مركب اليود في المحلول الموصل (الألكتروليت) الموجود أسفل طبقة ثاني أكسيد التيتانيوم ويعمل على أكسدة مركب اليود ليصبح ثلاثي التكافؤ وبذلك تعود جزئيات الصبغ المتأكسدة إلى السوية الأرضية (Halme, 2002)، (Luque & Hegedus, 2003).



الشكل (3) : تركيب الخلية الشمسية الصبغية [8] .

تنقسم المواد الصبغية المستخدمة في الخلايا الشمسية الصبغية إلى قسمين أساسيين وهما: الأصبغة العضوية والأصبغة اللاعضوية (خضر، 2018) :

• **الأصبغة العضوية:** تشمل الأصبغة العضوية النباتية الطبيعية والأصبغة النباتية من الأنتوسيانينات والتي توجد في الأوراق والأزهار كما يمكن أن توجد في الثمار، والأصبغة العضوية المحضرة مخبرياً ومن أشهرها أصبغة الكومارين ( Coumarin Dyes ) أصبغة الإندولين ( Indoline Dyes )، وغيرها.



• **الأصبغة اللاعضوية:** تشمل المعقدات المعدنية مثل معقدات الروثينيوم مثل (N3-Dye) التي تتميز بقدرة امتصاص جيدة ضمن مجال واسع من المجال المرئي (visible spectra) كما أن الضخ الإلكتروني من معقد الروثينيوم إلى ثاني أكسيد التيتانيوم فعال جداً.

### 3.1 تحضير خلية شمسية صبغية

استخدم في تحضير الخلية الشمسية الصبغية ثاني أكسيد التيتانيوم النانوي كالكترود ضوئي والبلاتين كالكترود مضاد، حيث يتم توضع طبقة ثاني أكسيد التيتانيوم وطبقة البلاتين على شرائح زجاجية مغطاة بأكسيد القصدير المشاب بالفلور FTO glass وهو أكسيد شفاف ناقل ثم استخدم كهليلت سائل وهو محلول البيود. تم تحضير الخلية الشمسية الصبغية كالتالي (خضر، 2018) :

#### ❖ تحضير الكالكترود الضوئي:

يتم تحضير الشرائح الزجاجية المراد استعمالها في تحضير الكالكترود الضوئي والكالكترود المضاد وذلك بوضع الشرائح الزجاجية المغطاة بأكسيد القصدير المشاب بالفلور FTO glass في وعاء يحتوي على الأسيون النقي، ثم بعد ذلك يوضع الوعاء في جهاز الموجات فوق الصوتية لمدة 15 دقيقة. يتم تكرار العملية مرة أخرى باستعمال الماء المنزوع الشوارد، ثم تحفظ الشرائح في الإيثانول النقي.

#### ❖ تحضير الطبقة المتراسة compact TiO<sub>2</sub>:

يتم مزج ايزوبروكسيد التيتانيوم مع الأستيل أسيون بالنسبة المولية (1:1) ويتم التحريك لمدة 30 ثانية حتى يصبح متجانساً، ثم ترسب الطبقة على شريحة FTO glass بعد تجفيفها بغاز الأزوت بطريقة التغطية بالدوران بالجهاز الموضح بالشكل (4)، ثم بعد ذلك تجفف الشريحة في درجة 90 درجة مئوية، بعد ذلك يتم غسلها بالإيثانول النقي في جهاز الموجات فوق الصوتية لمدة دقيقة، ثم تجفف بغاز الأزوت، ويتم معالجتها حرارياً عند الدرجة 450 درجة مئوية لمدة 30 دقيقة بمعدل تسخين 5 درجات بالدقيقة.

#### ❖ تحضير طبقة ثاني أكسيد التيتانيوم المسامية:

يضاف 10 mL من الإيثانول النقي و 0.25 mL من الإيزوبروبانول و 0.4 g من البولي إيثيلين غليكول 400 إلى 2 g من مسحوق ثاني أكسيد التيتانيوم النانوي، يحرك المزيج حتى يصبح متجانساً. ترسب طبقة ثاني أكسيد التيتانيوم على الشريحة الزجاجية ثم تعالج الشريحة حرارياً عند الدرجة 450 درجة مئوية لمدة 30 دقيقة، ثم تترك لتبرد تدريجياً إلى أن تصل إلى درجة حرارة الغرفة.



الشكل (4) : جهاز التعشية بالدوران [4].

يتم استخلاص الأصبغة من بعض الفواكه أو الخضار كالتوت والسبانخ وغيرها وقد تم استخدام الأصبغة المستخلصة من ثمار التوت في هذه الخلية . يتم التأكد من تجفيف الشريحة الزجاجية المطلوبة بطبقة ثاني أكسيد التيتانيوم المسامية بشكل تام وذلك بتسخينها إلى درجة 70 درجة مئوية، ثم تغمس في المحلول الصبغي لمدة 24 ساعة، بعد ذلك، يتم إخراج الشريحة من المحلول الصبغي، وتغسل بالماء المقطر وبالإيثانول النقي و يتم تجفيفها وحفظها في مكان مظلم لحين استعمالها.

#### ❖ تحضير الالكترود المضاد:

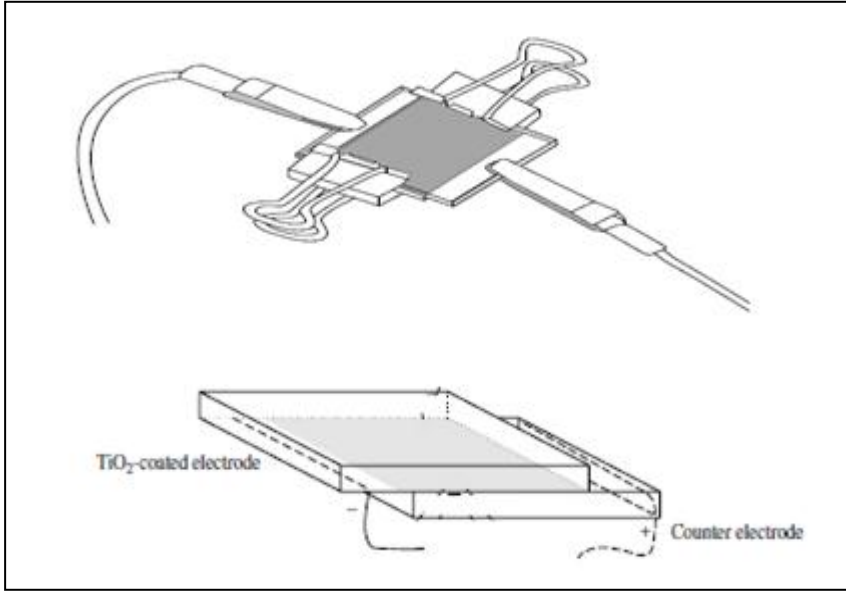
ترسب طبقة من محلول حمض كلور البلاتين المتجانس على شريحة FTO glass بعد تجفيفها بغاز الأزوت بطريقة التعشية بالدوران بالجهاز الموضح بالشكل (4)، ثم يتم معالجتها حرارياً عند الدرجة 450 درجة مئوية لمدة 30 دقيقة بمعدل تسخين 5 درجات بالدقيقة وبذلك يتم الحصول على طبقة مرآتية عاكسة من البلاتين، ويتم تكرار هذه العملية بحيث يتم ترسيب ثلاث طبقات، ثم تحفظ الشريحة في مكان نظيف لحين استعمالها.

#### ❖ تحضير الالكتروليت السائل

يتم الحصول على محلول غني بأيونات اليود وذلك بإضافة 2.07 g من يوديد البوتاسيوم و 0.19 g من اليود إلى 25 mL من الإيثيلين غليكول، ويحرك المزيج لمدة 15 دقيقة حتى يصبح متجانساً.

#### 3.2 تجميع الخلية الشمسية الصبغية

يجفف الإلكترود الضوئي ثم توضع عليه قطرة من محلول إلكتروليت اليود، ثم يتم وضع الإلكترود المضاد بشكل يقابل الإلكترود الضوئي بحيث يغطي طبقة ثاني أكسيد التيتانيوم (خضر، 2018)، ويوضح الشكل(5) كيفية تجميع الخلية الشمسية الصبغية (Smestad & Grätzel, 1998)، (Luque & Hegedus, 2003).

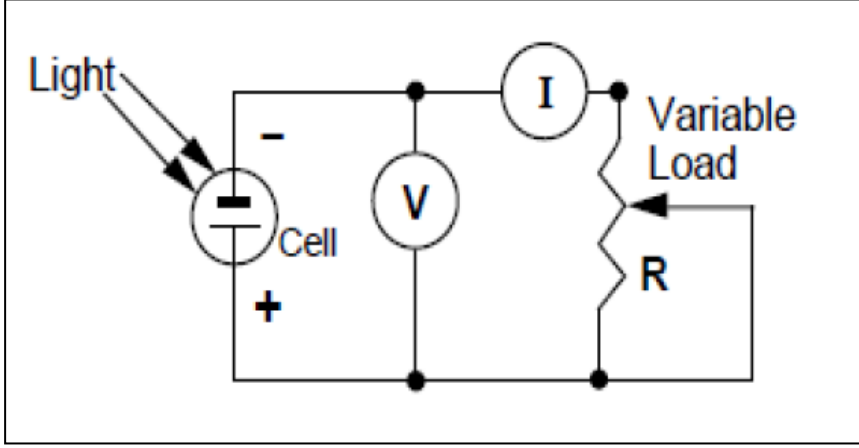


الشكل (5) : تجميع الخلية الشمسية الصبغية [8]، [11].

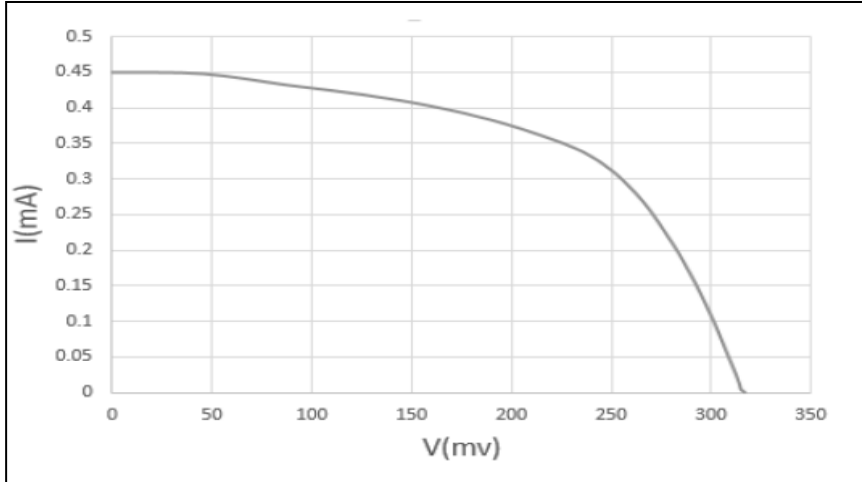
#### 4 النتائج والمناقشة

تتمثل دراسة الأداء الكهربائي للخلية الشمسية الصبغية في كل من قياس المنحني المميز للخلية (I-V) و حساب معامل الملء  $FF$  وكذلك مردود الخلية الشمسية كالاتي:  
4.1 قياس المنحني المميز للخلية الشمسية الصبغية (I-V) :

يوضح الشكل (6) الدائرة الكهربائية لقياس المنحني المميز للخلية الشمسية، حيث يتم تسليط الضوء على الخلية الشمسية وقياس شدة التيار وفرق الجهد عند قيم مختلفة للمقاومة.

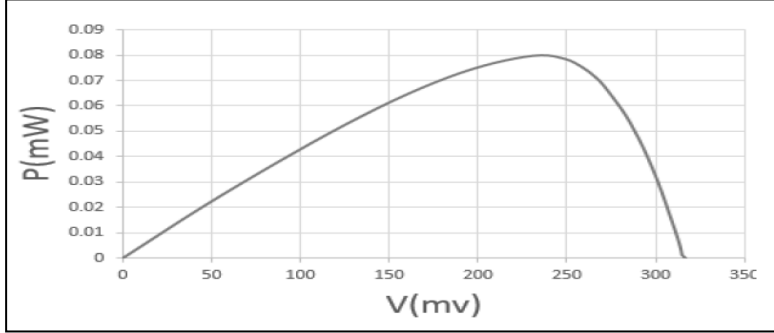


الشكل (6) : الدائرة الكهربائية لقياس المنحنى المميز للخلية الشمسية الصبغية [4].  
يوضح الشكل (7) المنحنى المميز لقياس التيار والجهد الكهربائي للخلية الشمسية الصبغية.



الشكل (7) : المنحنى المميز للخلية الشمسية الصبغية [4].

كما يوضح شكل (8) منحنى تغيير الاستطاعة بدلالة الجهد للخلية الشمسية الصبغية.



الشكل (8) : منحنى تغير الاستطاعة بدلالة الجهد للخلية الشمسية الصبغية [4] .

يمكن الحصول على بارامترات الخلية الشمسية الصبغية من الشكلين (7)، (8) حيث نجد من الشكل (7) أن جهد الدائرة المفتوحة ( $V_{OC} = 0.32V$ )، وتيار الدائرة المقصورة ( $I_{SC} = 0.45 mA$ )، أما القدرة العظمى للخلية الشمسية الصبغية نحصل عليها من الشكل (8) حيث نجد أن ( $P_{max} = 0.08 mW$ ) وباستخدام هذه القيم يمكن حساب معامل الملء FF وبالتالي حساب مردود (كفاءة) الخلية الشمسية  $\eta$ ، وتعتبر القيم المتحصل عليها جيدة عند مقارنتها مع الدراسات العالمية المنشورة لمثل هذا النوع من الخلايا، وسيتم توضيح ذلك في الجزء التالي.

#### 4.2 حساب معامل الملء FF وكفاءة الخلية $\eta$

يحسب معامل الملء FF و مردود (كفاءة) الخلية الشمسية  $\eta$  من العلاقة (1) والعلاقة (2) على التوالي، ويوضح الجدول (2) النتائج المتحصل عليها.

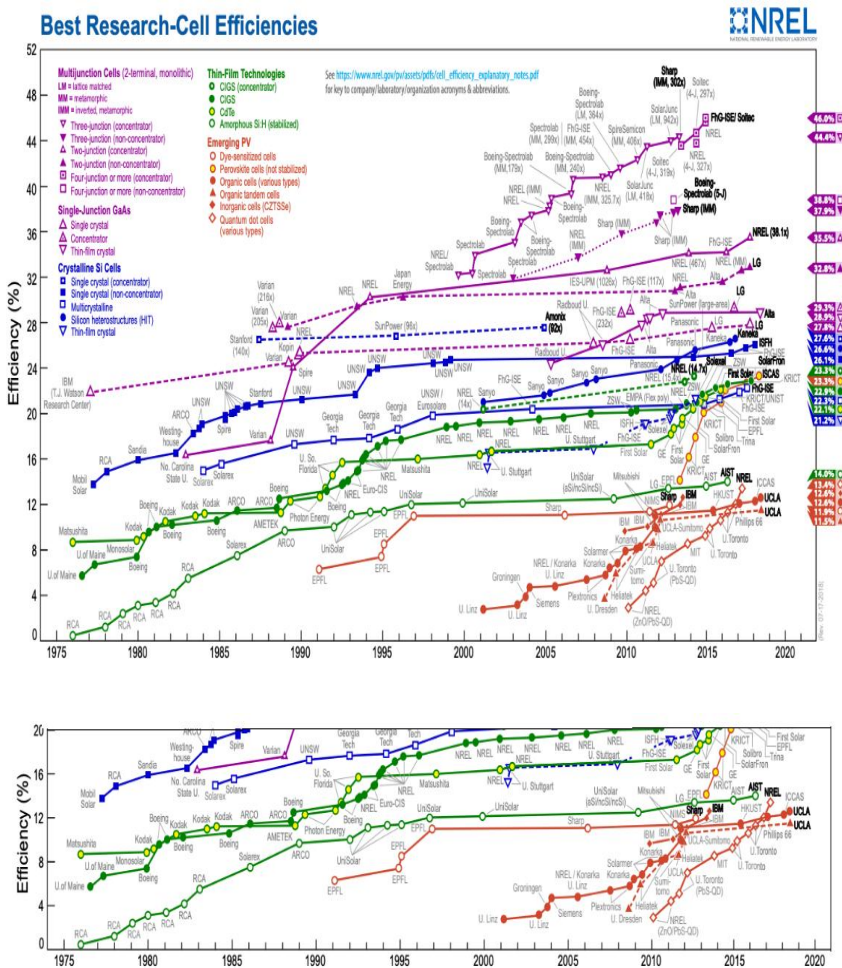
جدول (2) : المواصفات الكهربائية للخلية الشمسية الصبغية [4] .

1	$V_{oc}$	Open circuit potential	جهد الدائرة المفتوحة	0.32V
2	$I_{sc}$	Short - circuit current	تيار الدائرة المقصورة	0.45 mA
3	$P_{max}$	Maximum Power	القدرة العظمى	0.08 mW
4	$P_{in}$	Total power of incident light on the solar cell	القدرة الكلية للضوء الوارد على الخلية	145 mW
5	FF	Filling factor	معامل الملء	56%
6	$\eta$	Solar cell efficiency	كفاءة الخلية الشمسية	0.06%

نلاحظ أن مردود الخلايا الشمسية المعتمدة على أصبغة طبيعية نباتية صغير لكنه بالمقارنة مع الدراسات العالمية يعتبر جيد، حيث بينت الدراسة التي قام بها الباحثون Wongcharee, et. al., (2007) أن مردود خلية استخدمت فيها أصبغة مستخلصة من أزهار البازلاء الزرقاء بلغ 0.05%. كما بينت الدراسة التي قام بها الباحثان (Smestad & Grätzel, 1998) أن مردود الخلايا الشمسية الصبغية المحضرة من أصبغة مستخلصة من ثمار التوت وأصبغة الأنتوسيانين الطبيعية تراوح بين (0.5% و1%)، إضافة إلى ذلك العمل الذي قام به (Cherepy, et al., 1997)، لدراسة نسبة مردود الخلايا الشمسية الصبغية، المحضرة من أصبغة الأنتوسيانين النباتية المستخلصة من ثمار التوت الأسود، والتي بلغت فيها 0.56%.

يبين الشكل (9) مخطط تطور كفاءة الخلايا الشمسية المختلفة الصادر عن المخبر الوطني للطاقة المتجددة في الولايات المتحدة الأمريكية، تم تمييز الكفاءات حسب التكنولوجيا المستخدمة لتصنيع الخلايا الشمسية، ويتم التمييز حسب لون الخط المرسوم والشكل المصاحب له. توضح الأسماء المكتوبة ضمن الشكل أسماء المخابرات والشركات التي حققت هذه الكفاءات، بينما توضح الأرقام على يمين الشكل أحدث الكفاءات لكل تكنولوجيا.

من خلال المخطط المبين في الشكل (9) نجد أن كفاءة الخلايا الصبغية وصلت حتى 11.9% وهذه القيمة تعتبر منخفضة نسبياً بالمقارنة مع الخلايا السيليكونية التقليدية التي تصل كفاءتها إلى 27.6% ولكن نظراً لأهميتها في التطبيقات المختلفة فإن دعم البحوث والدراسات لتطوير كفاءتها والحصول على خلية شمسية قليلة التكلفة ومتفوقة في الكفاءة سيكون أمر مجد اقتصادياً وسيساهم في التوسع في استغلال الطاقة المتجددة، كما نلاحظ أن هذه القيمة تعتبر كبيرة نسبياً بالمقارنة مع النتائج المبينة في هذا البحث ويرجع السبب ربما لاختلاف تقنيات التصنيع.



الشكل (9) : تطور كفاءة أنواع الخلايا الشمسية، وللمقارنة بين الخلايا الشمسية الصغرة والخلايا الشمسية السليكونية تم استقطاع الجزء الخاص، بذلك من المخطط [13].

## 5 الخلاصة

تناول هذا البحث تحضير خلية شمسية صغرية اعتماداً على الأصبغة المستخلصة من ثمار التوت، وقد استخدم فيها ثاني أكسيد التيتانيوم النانوي كالكترود ضوئي، والبلاتين كالكترود مضاد، حيث يتم توزيع طبقة ثاني أكسيد التيتانيوم وطبقة البلاتين على شرائح زجاجية مغطاة بأكسيد القصدير المشاب بالفلور (FTO glass) وهو أكسيد شفاف ناقل، ثم استخدم كهربيته سائل وهو محلول اليود، وقد تم تجميع الخلية

ودراسة خواصها الكهربائية والحصول على المنحنيات المميزة لها، حيث كان جهد الدائرة المفتوحة ( $V_{OC} = 0.32 V$ ) أما تيار الدائرة المقصورة ( $I_{SC} = 0.45 mA$ ) و معامل الملء ( $FF=56\%$ )، أما مردود الخلية الشمسية الصبغية بلغ ( $\eta = 0.06\%$ )، وتعتبر هذه القيم جيدة بالمقارنة مع الدراسات العالمية المنشورة لمثل هذا النوع من الخلايا.

تتميز الخلايا الشمسية الصبغية بانخفاض كبير في تكلفة إنتاجها وبسهولة تصنيعها مقارنة بخلايا السليكون الشمسية، كما تعتبر البلورات النانوية مناسبة جداً لتصنيع خلايا شمسية ذات مساحة سطحية كبيرة نسبياً وهذا يساهم في التغلب على عامل انخفاض الكفاءة الكلية للخلايا الشمسية بشكل عام، وكذلك يمكن التغلب على أحد معوقات تقنية الخلايا الشمسية السيليكونية التي تتطلب توفير مساحات سطحية كبيرة من خلايا السليكون. كما أن تطوير خلايا شمسية باستخدام بلورات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية لتوفير الطاقة المستخدمة في الإضاءة سيشكل إنجازاً كبيراً في مجال توفير الطاقة، لأن أكثر من 25% من الطاقة الكهربائية المتوفرة في العالم تستخدم في الإضاءة.

إن نجاح وتطوير خلايا الأغشية الرقيقة الشمسية ذات التكلفة المنخفضة سيساهم في انتشار برامج الطاقة المتجددة مثل اندماج الخلايا الشمسية الرقيقة ذات التكلفة المنخفضة مع المباني الضخمة والتي تعرف بالأسلوب المعماري الحديث : تكامل الطاقة في المباني (Building Integrated Photovoltaics) (BIPV)، وتشمل هذه التقنية اللوحات الكهروضوئية الثابتة وألواح النوافذ الكهروضوئية المتحركة . كما ستنتشر ما تسمى العمارة الخضراء (Green Building)، حيث ستعتمد كل عمارة على متلازمة خماسية : إنتاج الطاقة ونظم التسخين والتبريد ونظم الإنارة والتخزين (العاني، 2009).

## المراجع:

## المراجع العربية:

- [1] العاني، أسامة أحمد، 2009، الطاقة المتجددة وتقنية النانو: الجيل الثالث من الخلايا الشمسية، مجلة النانو تصدر عن معهد الملك عبدالله لتقنية النانو، جامعة الملك سعود، العدد الثاني، (19- 20).
- [2] صالح، محمود محمد سليم، 2010، الطاقة المتجددة وتقنية النانو: تقنية النانو وعصر علمي جديد، مجلة النانو تصدر عن معهد الملك عبدالله لتقنية النانو، جامعة الملك سعود، العدد الرابع، (51 - 54).



- [3] خياط، مها محمد عمر، 2007، بلورات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية، مجلة العلوم والتقنية تصدر عن مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، العدد (82)، (26 – 29).
- [4] خضر، لؤي يوسف، 2018، تحضير خلية شمسية صبغية بوليميرية وتوصيفها (Preparation and Characterization of a polymer Dye Sensitized Solar Cell)، رسالة ماجستير علوم وهندسة مواد، قسم الفيزياء التطبيقية، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا Higher Institute for Applied Sciences & Technology – HIAST)، الجمهورية العربية السورية .

### المراجع الانجليزية:

- [5] Cartlidge, Edwin, July 2007, Bright outlook for solar cells, Physics World.
- [6] O'regan, Brian & Grätzel, Michael, 1991, A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films. NATURE · VOL 353 · 737
- [7] Halme, Janne , 2002 "Dye-sensitized nanostructured and organic photovoltaic cells: technical review and preliminary tests. Master's thesis, Helsinki University of Technology.
- [8] Luque, Antonio, Hegedus, Steven, 2003, Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley & Sons Ltd., England, (664 – 671).
- [9] Yang, Jun Hyuk, et al., 2014, "Characteristics of the dye-sensitized solar cells using TiO<sub>2</sub> nanotubes treated with TiCl<sub>4</sub>." Materials 7.5, 3522–3532..
- [10] Wongcharee, Khwanchit, Vissanu Meeyoo, and Sumaeth Chavadej, (2007) , "Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers." Solar Energy Materials and Solar Cells 91.7, 566–571.
- [11] Smestad, Greg P., and Grätzel, Michael. 1998, "Demonstrating electron transfer and nanotechnology: a natural dye-sensitized nanocrystalline energy converter." Journal of chemical education 75.6 , 752.

- [12] Cherepy, Nerine J., et al., 1997, "Ultrafast electron injection: implications for a photoelectrochemical cell utilizing an anthocyanin dye-sensitized TiO<sub>2</sub> nanocrystalline electrode." The Journal of Physical Chemistry B, 101.45, 9342-9351.
- [13] National Renewable Energy Laboratory (NREL), Rev. July 17, 2018, (Best Research – Cell Efficiencies), Colorado.