

تطوير أداء فيلم بيروكهربائي من PVDF في إنتاج الطاقة الكهربائية النظيفة

رواد حمدان⁽¹⁾ ، سحر عوض⁽²⁾

الملخص

خُصّر فيلم بيروكهربائي بتقنية السكب من بوليمير الـ PVDF بسماكة $3.9\mu\text{m}$ ، وبمساحة سطح فعال $(3\times 3)\text{mm}^2$. وتمّ قياس المقاومة الكهربائية والسعة الكهربائية للفيلم المُحضّر وكانا على التوالي $C_s = 1.52\text{pF}$ و $s = 55.1\text{M}\Omega$. تمّ حساب المعامل البيروكهربائي للكاشف بطريقة تكامل الشحنة، وكان مساوياً لـ $128.9737\text{K}^{-1}\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$. أُجريت دراسة رياضية لإيجاد علاقة مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية، ثم قورنت نتائج الدراسة الرياضية مع النتائج العملية، وقد بينت النتائج أنّ سماكة الفيلم البيروكهربائي الأفضل التي تحقّق أعلى مردود هي $d=3.9\mu\text{m}$ ، حيث يكون عندها مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية $\Psi = 7.2102 \times 10^{-6}$. وكذلك بينت النتائج أنّ إنقاص مساحة سطح الفيلم تزيد من مردوده لتحويل الطاقة. وُجِد أنّ قيمة المقاومة الكهربائية الخارجية المضافة مع الفيلم البيروكهربائي يجب أن تكون $R_A > 10\text{M}\Omega$ ويجب إزالة المكثف الخارجي بهدف زيادة المردود تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية.

الكلمات مفتاحية: مواد بيروكهربائية، المعامل البيروكهربائي، مردود تحويل الطاقة، تقنية السكب.

⁽¹⁾دكتور في الهندسة الإلكترونية والكهربائية -جامعة حلب

⁽²⁾دكتور في الهندسة الإلكترونية والكهربائية -جامعة حلب

Improving the Performance of a PVDF Pyroelectric Film for Generating Clean Electrical Energy

Rawad HAMDAN⁽¹⁾, Sahar AWAD⁽²⁾

Abstract

A PVDF pyroelectric film was prepared by casting technology with a thickness of $3.9\mu\text{m}$ and active surface area of $(3\times 3)\text{mm}^2$. The electrical resistance and capacitance of the pyroelectric film were measured and they are respectively $R_s = 55.1\text{M}\Omega$, $C_s = 1.52\text{pF}$. The pyroelectric coefficient is measured by charge integration method. It was $28.9737\mu\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. The mathematical study was carried out to define The energy conversion efficiency, then the results of the mathematical study were compared with the practical results. The results showed that the best pyroelectric film thickness that achieves the highest energy conversion efficiency is $d = 3.9\mu\text{m}$, where the energy conversion efficiency is $\Psi = 7.2102 \times 10^{-6}$. The results also showed that reducing the surface area of the pyroelectric film increases The energy conversion efficiency. It was found that an external electrical resistance value must be $R_A > 10\text{M}\Omega$. The external capacitor should be removed.

Keywords: Pyroelectric materials, pyroelectric coefficient, energy conversion efficiency, casting technology.

⁽¹⁾ Ph.D. in electronic and electrical engineering- Aleppo university

⁽²⁾ Ph.D. in electronic and electrical engineering- Aleppo university

هدف البحث وأهميته:

يهدف البحث إلى تحضير أفلام من مادة بيروكهربائية وهي بولي فينيلدين فلورايد PVDF، وتحسين أداء هذا الأفلام في تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية يمكن استثمارها في تغذية أجهزة كهربائية أو إلكترونية ذات استهلاك قليل من الطاقة الكهربائية. إنَّ الطاقة الكهربائية الناتجة في الأفلام البيروكهربائية هي طاقة متجددة فهي تعتمد على الحرارة المنتشرة في الوسط المحيط التي تتجدد بشكل مستمر، والتي مصدرها الأساسي أشعة الشمس، وكما يمكن أنْ تعتمد على مصادر غير متجددة كالحرارة الناتجة عن تشغيل محرك أو احتراق مادة أو احتكاكها. وهي أيضاً من الطاقات النظيفة لأنَّ إنتاجها لا يسبب ضرراً للبيئة، ومن هنا تأتي أهمية هذا العمل الذي يُصنف في مجال البحث عن مصادر للطاقات المتجددة النظيفة وتطويرها.

1- المقدمة:

إنَّ علم الإلكترونيات في تطور مستمر، حيث يجري تطوير أجهزة إلكترونية ذات تغذية كهربائية ذاتية مستقلة (self-power)، ولذلك تمَّ التوجه نحو تطوير بطاريات ذات قدرة على تخزين طاقة كهربائية عالية، ولكن هذا الحل له بعض السلبيات، والتي تتلخص بانخفاض موثوقية عمل البطارية في نهاية عمرها الافتراضي، والحاجة إلى استبدال البطارية والذي يترتب عليه زيادة التكلفة المادية. يمكن الحصول على أجهزة ذاتية التغذية الكهربائية من خلال تحويل الطاقات المتجددة في الوسط المحيط إلى طاقة كهربائية. هناك العديد من مصادر الطاقة في الوسط المحيط، على سبيل المثال الطاقة الحرارية أو الضوء أو الطاقة الميكانيكية. جذبت هذه المصادر أنظار العلماء لإنتاج الطاقة الكهربائية من الوسط المحيط وكانت ذات اهتمام متزايد خلال السنوات العشر الماضية.

تعدُّ المواد البيروكهربائية مفيدة في هذا المجال، حيث يعتمد مبدأ عمل المواد البيروكهربائية على توليد شحنات سطحية نتيجة تغيير درجة حرارتها (بسبب التبادل الحراري مع الوسط المحيط) [1].

يمكن الاستفادة من الأفلام البيروكهربائية في كشف الأشعة تحت الحمراء، حيث تعمل الأشعة تحت الحمراء الممتصة من قبل الفيلم على تغيير درجة حرارته، مولدة بذلك إشارة كهربائية على خرج الفيلم البيروكهربائي.

2- المواد البيروكهربائية:

يوجد العديد من المواد التي لها خواص بيروكهربائية، منها: المواد اللاعضوية (المواد السيراميكية كالـ TGS - PZT - $PbNb_2O_6$ - $LiNbO_3$ - ZnO)، ومنها المواد العضوية (بوليميرات عضوية مثل PVDF، P(VDF-TrFE)، ECTFE، ETFE) ويضاف لهما مواد مركبة تتألف من مواد عضوية ولا عضوية معاً.

تمتاز المواد البيروكهربائية بأن خلية الوحدة unit cells (والتي تضمُّ جزيئاً واحد من المادة) ذات عزم ثنائي قطب dipole moment أي أنَّ هناك توزع لشحنة موجبة بجهة يقابلها بالجهة الأخرى شحنة سالبة. يسهم كل ثنائي قطب في الخصائص البيروكهربائية للمادة بمقدار قيمة المركبة العمودية على سطح المادة لعزمه، ومن ثمَّ فإنَّ إسهام ثنائي القطب في الخصائص البيروكهربائية للمادة تكون أكبر ما يمكن عندما يكون عزم ثنائي القطب عمودياً على سطح المادة. إنَّ عزم ثنائي القطب بالنسبة لوحدة الحجم يدعى الاستقطاب الذاتي spontaneous polarization P_s [1]. جميع المواد البيروكهربائية ذات استقطاب ذاتي، فيكون موجود ذو قيمة حتى في حال عدم تطبيق حقل كهربائي خارجي عليه [1, 2].

يعدُّ البوليمير بولي فينيلدين فلورايد Ploy (vinylidene fluoride) والذي يُرمز له بـ PVDF من أفضل المواد

العشوائي لثنائيات الأقطاب الذي يجعل بعضها تلغي إسهام ثنائيات الأقطاب الأخرى نتيجة تعاكس قطبيتها. كما يجب تسخين العينة أثناء عملية التقطيب حيث تحوّل الحرارة البوليمير إلى مائع والذي يسهم في تخفيف المقاومة الكهربائية التي تصادف ثنائيات الأقطاب أثناء توجيهها بالمقارنة مع الحالة الصلبة للبوليمير، كما يجب إبقاء الحقل الكهربائي مطبقاً على العينة أثناء التبريد بحيث تحافظ ثنائيات الأقطاب على انتظام توجيهها بعد التبريد.

3-1- التحكم بسماكة المادة البيروكهربائية:

يمكن التحكم بسماكة المادة البيروكهربائية للفيلم من خلال التحكم بحجم المحلول المسكوب (DMF+ PVDF) على صفيحة الألمنيوم، حيث إنّه لا يبقى سوى PVDF من المحلول المسكوب، لأن المحل DMF يتطاير بعد وضع الفيلم في الفرن، وعلى هذا تُعطى سماكة الفيلم d بهذه الطريقة إذا أُعتبر أنّ حجم البوليمير قبل التحضير هو نفسه بعد التحضير بالعلاقة الآتية:

$$d = \frac{V}{A} = \frac{W}{D * A} \quad (1)$$

حيث إنّ:

V : حجم PVDF المسكوب.

W : وزن PVDF المسكوب.

$D=1780Kg/m^3$: كثافة PVDF.

ومن ثمّ لتحضير فيلم سماكة مادته البيروكهربائية $d=26\mu m$ ومساحة سطحه $A=(3 \times 3)cm^2$ (ومن ثمّ حجمه هو: $V_{PVDF} = 234 \times 10^{-10}m^3$)، نحتاج إلى PVDF بوزن:

$$W_{PVDF} = V_{PVDF} \times D = 0.0416g$$

من أجل نسبة خلط 1g من PVDF لكل 10mL من المحل DMF فإن حجم DMF المطلوب لتحضير الفيلم السابق هو $V_{DMF} = 0.416mL$ ، أي أنّ الحجم الكلي المطلوب من المحلول الناتج (المكون من PVDF والـ DMF) لتحضير الفيلم السابق هو: $V = V_{PVDF} +$

البيروكهربائية حيث يمتاز بسهولة التصنيع وإمكانية استثمار خصائصه لاستخدامه بتطبيقات مختلفة. يتألف الـ PVDF من وحدة متكررة $-[CH_2-CF_2]-$. تنتج ثنائيات الأقطاب نتيجة كهرسلبية ذرة الفلور حيث تشكل المجموعات $-[CF_2]-$ ثنائيات أقطاب. يعدّ الـ PVDF بوليميراً خطياً لأن ثنائيات أقطابه عمودية على اتجاه سلسلته.

تمّ في هذا العمل تحضير فيلم بيروكهربائي من مادة الـ PVDF وحسّن أدائه في إنتاج الطاقة الكهربائية من خلال تحديد بارامترات التحضير والتصميم الأفضل.

3- طريقة تحضير الفيلم البيروكهربائي:

تمّ تحضير العينة باستخدام طريقة السكب، حيث يُحلّ كل 1g من البوليمير PVDF من شركة IT USA في 10ml من ثنائي ميثيل فورماميد (DMF) وهو محل عضوي للـ PVDF من شركة Sigma Alorich والذي صيغته الكيميائية C_3H_7NO . ويحرك المحلول بوساطة خلاط مغناطيسي عند درجة الحرارة $60^\circ C$ مدة 60min تقريباً مع تغطية الإناء لمنع تبخر المحل، فنحصل على محلول صافٍ شفاف يميل للون العسلي وعالي اللزوجة. ثم يُسكب المحلول على إلكترود من الألمنيوم وتترك العينة في الهواء الطلق مدة 48 ساعة لكي يتطاير المحل، ثمّ تُعالج حرارياً ضمن فرن عند درجة الحرارة $150^\circ C$ مدة ساعتين بهدف إزالة بقايا المحل. وبعد ذلك تمّ ترسيب طبقة من معجون الفضة على السطح العلوي للفيلم لتشكيل الإلكترود الثاني. أما المرحلة الأخيرة في تصنيع الفيلم فهي التقطيب حيث عُرضت العينات لحقل كهربائي قيمته (2000V) عند درجة حرارة $80^\circ C$. حيث يعمل الجهد المقطب على توجيه ثنائيات الأقطاب باتجاه واحد مما يسبب زيادة الاستقطاب التلقائي لها، ومن ثمّ التخلص من التوضع

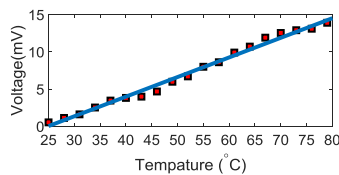
في هذا العمل بطريقة تكامل الشحنة باستخدام دارة كهربائية تتألف من مقياس جهد كهربائي موصول على التوازي مع الفيلم البيروكهربائي ومكثف بسعة $C_p = 10pF$. تم اختيار قيمة C_p بحيث تكون أكبر بكثير من سعة الفيلم البيروكهربائي، وقادرة على استيعاب جميع الشحنات الناتجة من المادة البيروكهربائية. يحدد المعامل البيروكهربائي P من تغير الإزاحة الكهربائية بالنسبة لتغير درجة الحرارة عند عدم تطبيق جهد كهربائي خارجي وثبات الإجهاد الميكانيكي المطبق على الفيلم ومن ثم يُعطى وفق العلاقة [1]:

$$P = \left(\frac{\partial D}{\partial T}\right)_{\rho, E} \quad (2)$$

حيث إن: D : هي الإزاحة الكهربائية (C/m^2) و ρ : الإجهاد الميكانيكي المطبق على الفيلم (Pa) و E : الجهد الكهربائي المطبق على الفيلم (V/m). في طريقة تكامل الشحنة نرفع درجة حرارة الفيلم بمقدار صغير ($3^\circ C$) وذلك عند درجة الحرارة المراد قياسها مع المحافظة على قيمة إجهاد p ثابتة دون تطبيق أي إجهاد أو شد ميكانيكي على الفيلم، مع قياس الجهد بوساطة مقياس الجهد. ومن ثم يحدد المعامل البيروكهربائي بالعلاقة: [3]:

$$P \approx \frac{\Delta D}{\Delta T} = \frac{\Delta Q}{A \cdot \Delta T} = \frac{C_p \Delta V_{PE}}{A \Delta T} \quad (3)$$

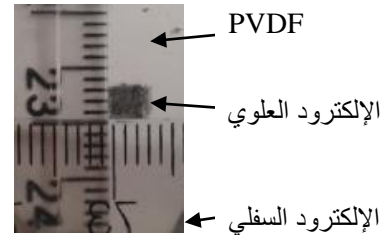
حيث ΔQ : الشحنات السطحية الناتجة على سطح الفيلم (C)، و ΔV_{PE} : تمثل تغير الجهد عبر الفيلم (V). يمكن حساب $\frac{\Delta V_{PE}}{\Delta T}$ من ميل منحنى الجهد عبر الفيلم بدلالة درجة الحرارة كما يوضح الشكل (2). وُجد أن قيمة المعامل البيروكهربائي هي $28.9737 \cdot K^{-1} \cdot \mu c. m^{-2}$.



في الواقع يتطابق $V_{DMF} = 0.439mL$ من المحل عند تحضير الفيلم، ويختلف حجم المحلول الناتج عن الحسابات الرياضية، ولذلك نخلط 1g من PVDF مع 10mL ومن ثم نقيس حجم المحلول الناتج والذي يختلف وفقاً لكمية الـ DMF المتطايرة أثناء المعالجة الحرارية. أن 1g من الـ PVDF تكفي لتحضير $(1 \div 0.0416 = 24)$ فيلم وفق المواصفات السابقة، ومن ثمّ لتحضير الفيلم السابق يجب أن نسكب جزءاً من 24 جزء من حجم المحلول الناتج على مساحة قدرها $A=(3 \times 3)cm^2$.

3-2- التحكم بمساحة الفيلم الفعالة:

يمكن التحكم بمساحة الفيلم من خلال السكب على كامل مساحة الإلكترود السفلي ومعالجته حرارياً، ومن ثم تحديد مساحة الإلكترود العلوي على المساحة المطلوبة باستخدام قناع ورقي يوضع فوق عينة الـ PVDF قبل تشكيل الإلكترود ويُرسب معجون الفضة بعدها، ثم نزيل القناع الورقي ليتشكل الإلكترود على المساحة المطلوبة فقط، وبذلك تتحدد مساحة الفيلم الفعالة من خلال مساحة الإلكترود العلوي. يظهر الشكل (1) فيلم من الـ PVDF وُضع إلكترود عليه بمساحة: $A = (3 \times 3)mm^2$.



الشكل (1) فيلم من الـ PVDF وُضع إلكترود عليه

بمساحة: $A = (3 \times 3)mm^2$.

4- المعامل البيروكهربائي Pyroelectric

:Coefficient

وهو معامل يدل على مقدرة المادة البيروكهربائية على توليد تيار بيروكهربائي. تم حساب المعامل البيروكهربائي

إن الدارة المكافئة حرارياً للفيلم البيروكهربائي تتألف من ناقلية حرارية G_t (W/k)، وسعة حرارية H (J/k) (الشكل A.4)، ومن ثمّ الثابت الزمني الحراري يعطى بالعلاقة [4, 5]:

$$\tau_T = \frac{H}{G_t} \quad (6)$$

تعطى الناقلية الحرارية بالعلاقة:

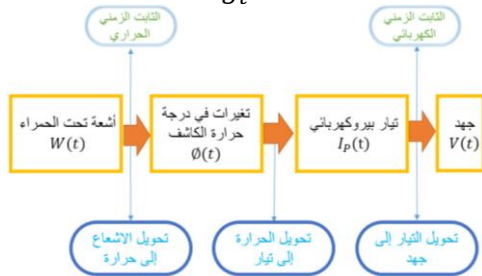
$$G_t = g_t \frac{A}{d} \quad (7)$$

حيث إنّ $g_t = 0.135 W/m.k$ هي الناقلية النوعية الحرارية للـ PVDF [6]. وتعطى السعة الحرارية بالعلاقة [5]:

$$H = c \cdot d A \quad (8)$$

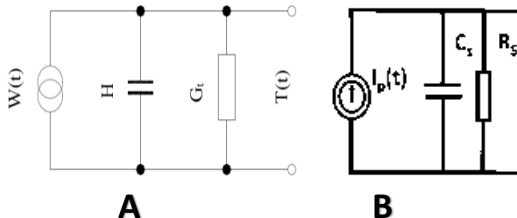
حيث إنّ $c = 2.4 \times 10^6 J/m^3.k$ هي سعة الحرارة النوعية الحجمية للـ PVDF [6]. ومن ثمّ تصبح علاقة الثابت الزمني الحراري:

$$\tau_T = \frac{c \cdot d^2}{g_t} \quad (9)$$



الشكل (3): مخطط صندوقي يبيّن مبدأ عمل المادة

البيروكهربائية في التقاط الأشعة تحت الحمراء وكيف يحولها إلى الجهد كهربائي.



الشكل (4): A: الدارة المكافئة حرارياً للمادة

البيروكهربائية وB: الدارة المكافئة كهربائياً.

الشكل (2): منحنى الجهد عبر الفيلم المُحصّر بدلالة درجة الحرارة.

5- ثابت العازلية والمقاومة النوعية

الكهربائية:

تمّ قياس كلاً من سعة الفيلم الكهربائية C_s ومقاومته الكهربائية R_s باستخدام LCR meter من شركة MICROTEST نوع 6379. تمّ قياس السعة الكهربائية والمقاومة الكهربائية للفيلم من أجل التردد $f=1\text{KHz}$ باعتبار أنّ مجال عمل الأفلام البيروكهربائية عند هذا التردد للأشعة تحت الحمراء [3]، حيث كانت: $R_s = 55.1M\Omega$ و $C_s = 1.52pF$.

تعطى علاقة ثابت العازلية ϵ' والناقلية النوعية σ_{ac} للفيلم المُحصّر ذو سماكته $d=4\mu\text{m}$ ومساحة سطح $A = (3 \times 3)mm^2$ ، وذلك بالاعتماد على العلاقتين الآتيتين:

$$\epsilon' = \frac{C_s(d = 3.9 \times 10^{-6}m)}{\epsilon_0(A = 9 \times 10^{-6}m^2)} = 7.63F/m \quad (4)$$

$$\sigma_{ac} = \frac{(d = 3.9 \times 10^{-6}m)}{R_s(A = 9 \times 10^{-6}m^2)} = 7.86 \times 10^{-9} S/m \quad (5)$$

حيث $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$ ثابت عازلية للخلاء.

6- الدارة المكافئة:

يبين الشكل (3) مبدأ عمل الفيلم البيروكهربائي في تحويل الأشعة إلى جهد كهربائي والذي يتضمن ثلاث مراحل. في المرحلة الأولى: تقوم الأشعة الموجهة للفيلم بتسخينه، ومن ثمّ تتحول في هذه المرحلة الأشعة إلى حرارة. في المرحلة الثانية: ينتج الفيلم تياراً بيروكهربائياً نتيجة تسخين الأشعة للفيلم، ومن ثمّ تتحول بهذه المرحلة الحرارة إلى إشارة كهربائية. وفي المرحلة الثالثة: يتحول التيار إلى جهد.

يمكن توصيف الاستطاعة الكلية للأشعة المسلطة على الفيلم بالعلاقة الآتية:

$$W(t) = W_0 + W_i e^{i\omega t} \quad (12)$$

حيث إن:

W_0 : الاستطاعة الناتجة من الوسط المحيط (واط)

والتي هي مطابقة لـ T_0 .

$W_i e^{i\omega t}$: الاستطاعة الناتجة من الأشعة تحت

الحمراء.

$\omega = 2\pi f$: تردد التقطيع الزاوي للأشعة تحت

الحمراء.

عندما تزداد حرارة الفيلم من T_0 إلى T ، فإن جزءاً من

الاستطاعة الممتصة سوف يضيع في الوسط المحيط إما

على شكل إشعاع، أو نتيجة انتقال الحرارة، أو على شكل

حمل حراري convection، ومن ثم تُعطى علاقة التوازن

الحراري على الشكل الآتي [9، 10]:

$$\eta W_i e^{i\omega t} = H \frac{d\phi}{dt} + \phi(t) G_t \quad (13)$$

حيث إن:

η : نسبة الاستطاعة المسلطة والتي تقوم بتسخين الفيلم

إلى الاستطاعة الكلية المسلطة (أو ما يسمى بالإصدارية

(emission).

ϕ : التغيرات في درجة حرارة الفيلم بدلالة الزمن،

وتعطى بالعلاقة الآتية:

$$\phi = T - T_0 \quad (14)$$

يُعطى حل المعادلة (13) بالعلاقة الآتية [11]:

$$\phi(t) = \frac{\eta W_i}{G_t + i\omega H} e^{i\omega t} = \frac{\eta W_i}{G_t(1 + i\omega\tau_T)} e^{i\omega t} \quad (15)$$

إن التيار البيروكهربائي المُؤد الناتج من تغيرات درجة

حرارة الفيلم يُعطى من المعادلة (15) بالعلاقة الآتية

[12,11]:

$$I_p(t) = AP \frac{dT}{dt} = AP \frac{d\phi}{dt} = \frac{AP\eta W_i i\omega}{G_t(1 + i\omega\tau_T)} e^{i\omega t} \quad (16)$$

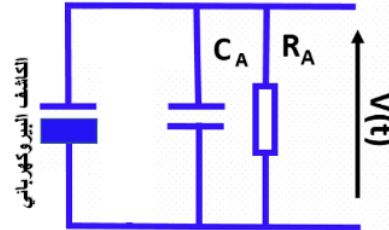
بينما الدارة المكافئة كهربائياً للفيلم البيروكهربائي تتألف

من منبع تيار $I_p(t)$ ، والمقاومة الكهربائية للفيلم R_s ، وسعة

الفيلم البيروكهربائي C_s (الشكل B.4).

تم وصل الفيلم البيروكهربائي على التفرع مع مقاومة

ومكثف كهربائيين خارجيين كما يظهر في الشكل (5).



الشكل (5): الفيلم البيروكهربائي موصول مع المقاومة

والمكثف الكهربائيين.

ومن ثمّ الثابت الزمني الكهربائي يعطى بالعلاقة الآتية

[7, 8]:

$$\tau_e = R \cdot C \quad (10)$$

حيث إن $C = C_s + C_A$ هي السعة المكافئة لكل من

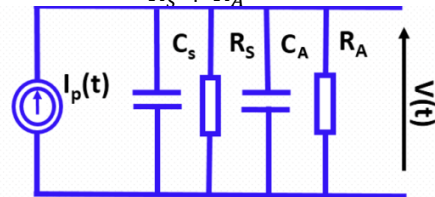
سعة الفيلم البيروكهربائي C_s وسعة المكثف الخارجي

المضاف C_A . أما R فهي المقاومة المكافئة لكل من

المقاومة الكهربائية للفيلم R_s والمقاومة R_A ، وباعتبار أنّهما

موصولتين على التفرع فإن R تُعطى بالعلاقة الآتية:

$$R = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A} \quad (11)$$



الشكل (6): الدارة المكافئة الكهربائية للدارة المستخدمة

في الشكل (5).

7- استجابة التيار:

تم افتراض أنّ امتصاص استطاعة الأشعة تحت

الحمراء المُسلطة كامل وذلك خلال زمن قدره dt وتوزعت

خلال كامل حجم المادة البيروكهربائية، بحيث يمكن

اعتبار أنّ الانتشار الحراري thermal diffusion معدوم.

بتعويض العلاقة (17) و(21) في (23) نجد:

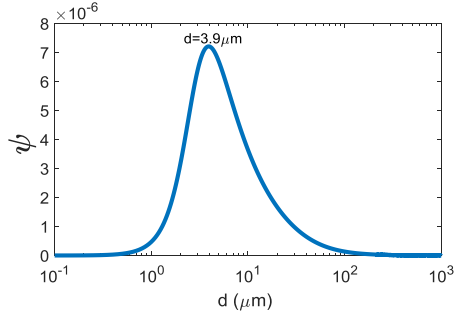
$$\Psi = \frac{W_i p^2 R \omega^2 \eta^2 A^2}{G_t^2 (1 + \omega^2 \tau_T^2) (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{0.5}} \quad (24)$$

10- النتائج والمناقشة:

10-1 نتائج الدراسة الرياضية:

تم استخدام برنامج الماتلاب لمحاكاة ورسم المنحنيات في هذا العمل. تم فرض الاستطاعة الناتجة من الأشعة تحت الحمراء $W_i = 1W$.

إن سماكة الفيلم البيروكهربائي تؤثر في كل من سعته ومقاومته الكهربائيتين، ومن ثمَّ تؤثر في مردود تحويله الطاقة الحرارية إلى الكهربائية. تمَّ إيجاد رسم منحنى مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى الكهربائية في الفيلم البيروكهربائي (العلاقة (24)) من أجل سماكات مختلفة للفيلم في الشكل (7)، وقد تبين أنَّ أفضل سماكة فيلم تحقق أعلى مردود هي $d=3.9\mu m$ والتي يكون عندها مردود تحويل الطاقة $\Psi = 7.2102 \times 10^{-6}$.



الشكل (7): مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى الكهربائية بدلالة سماكة الفيلم البيروكهربائي.

وأيضاً تؤثر مساحة سطح الفيلم البيروكهربائي الفعالة في كل من سعته ومقاومته الكهربائيتين، ومن ثمَّ تؤثر في مردود تحويله الطاقة الحرارية إلى الكهربائية. يُظهر الشكل (8) منحنى مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى الكهربائية في الفيلم البيروكهربائي بدلالة مساحة سطح الفيلم عند

إن استجابة التيار R_i للمادة البيروكهربائية هي التيار المؤدَّب بيروكهربائياً من أجل كلِّ واط من استطاعة الإشعاع الساقط عليه، ولهذا فإنَّ R_i تُعطى بالعلاقة [11,13, 14]:

$$R_i = \left| \frac{I_p}{W_i} \right| = \frac{\eta P A \omega}{G_t (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{0.5}} \quad (17)$$

واحدة استجابة التيار هي: (A/W).

8- استجابة الجهد:

تُعطى المسابرة الكهربائية للدائرة المبينة بالشكل (2.4) بالعلاقة الآتية [7]:

$$Y = R^{-1} + i\omega C \quad (18)$$

يُعطى جهد الخرج V الناتج بالعلاقة الآتية:

$$V = \frac{I_p}{Y} \quad (19)$$

ومن ثمَّ تصبح معادلة مطال جهد الخرج وفق الآتي:

$$V = \frac{R \eta P A \omega W_i}{G_t (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{0.5} (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{0.5}} \quad (20)$$

تُعرف استجابة الجهد R_v لفيلم بيروكهربائي بمقدار الجهد المؤدَّب بيروكهربائياً من أجل كلِّ واط من استطاعة الإشعاع الساقط وعليه تُعطى استجابة الجهد R_v بالعلاقة الآتية [15, 16]:

$$R_v = \left| \frac{V}{W_i} \right| = \frac{R \eta P A \omega}{G_t (1 + \omega^2 \tau_T^2)^{0.5} (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{0.5}} \quad (21)$$

9- مردود تحويل الطاقة:

يُعرف مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية Ψ للمادة البيروكهربائية بمقدار الاستطاعة الكهربائية المؤدَّدة بيروكهربائياً من أجل كلِّ واط من استطاعة الإشعاع الساقط وعليه تُعطى بالعلاقة الآتية [1]:

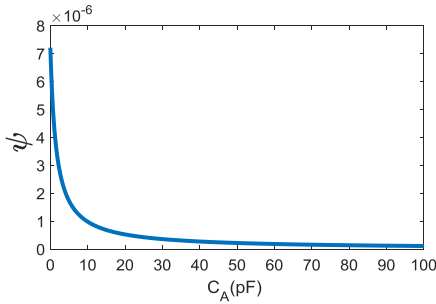
$$\Psi = \frac{\text{استطاعة الخرج الكهربائية}}{\text{استطاعة الدخل الحرارية}} \quad (22)$$

ومن ثمَّ ينتج لدينا [1]:

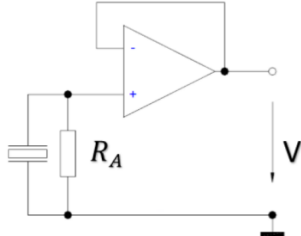
$$\Psi = \frac{I_p V}{W_i} = W_i R_i R_v \quad (23)$$

10-2- النتائج العملية:

بهدف التأكد من مطابقة النتائج الرياضية للواقع العملي، تم وصل الفيلم البيروكهربائي المُحضّر كما في الدارة الموضحة في الشكل (11) بهدف قياس الاستطاعة المولّدة من الفيلم. تم استخدام مضخم Lm741 كدارة تابع جهد والتي تشكل مرحلة عزل بين مقياس الجهد الكهربائي (من جهة الخرج) والفيلم البيروكهربائي والمقاومة الكهربائية الموصولة معه (من الجهة الدخل).



الشكل (10): مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى الكهربائية بدلالة قيم مختلفة للمكثف الخارجي C_A .



الشكل (11): دارة قياس الجهود من الأفلام البيروكهربائية.

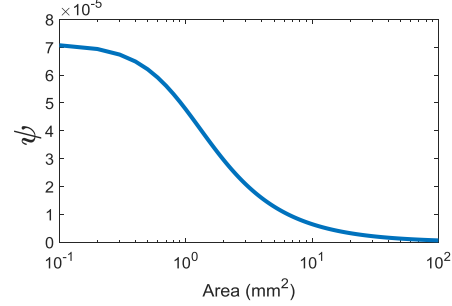
يمكن حساب الاستطاعة الكهربائية المولّدة من الفيلم البيروكهربائي بدلالة الجهد المولّد بالعلاقة الآتية:

$$P = R^{-1} \cdot V^2$$

$$= R^{-1} \cdot (1 + \omega^2 \tau_e^2)^{0.5} \cdot V^2 \quad (25)$$

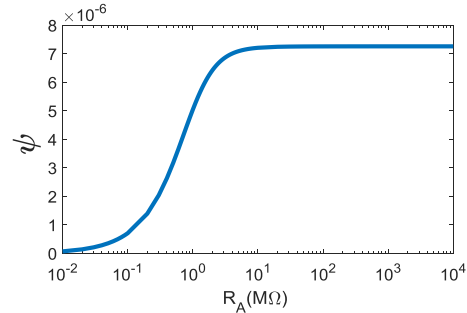
حُضّر فيلمان بيروكهربائيان، أحدهما بسماكة مادة بيروكهربائية $d=3.9\mu\text{m}$ والثاني بسماكة $d=100\mu\text{m}$ المساحة نفسها ($A = 3 \times 3\text{mm}^2$). يظهر الجدول (1) مقارنة بين الاستطاعة الكهربائية المولّدة من هذين الفيلمين وذلك عند وضعهما على بعد 30cm من جسم معدني

سماكة فيلم $d=3.9\mu\text{m}$. يبين الشكل (8) أنّ إنقاص مساحة سطح الفيلم تزيد من مردوده لتحويل الطاقة.



الشكل (8): مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى الكهربائية بدلالة مساحة سطح الفيلم البيروكهربائي الفعالة.

بهدف إيجاد القيمة المثالية للمقاومة الكهربائية الخارجية المضافة، تم رسم منحنى مردود تحويل الطاقة من أجل قيم مختلفة للمقاومة الخارجية R_A في الشكل (9)، والذي يظهر انخفاض مردود تحويل الطاقة عند استخدام مقاومة R_A أقل من $10\text{M}\Omega$ ، ويصبح المردود ثابتاً من أجل $R_A > 10\text{M}\Omega$.



الشكل (9): مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى الكهربائية بدلالة قيم مختلفة للمقاومة الخارجية R_A .

أما بالنسبة للمكثف الخارجي بهدف معرفة تأثير المكثف الخارجي في مردود تحويل الطاقة، رُسم منحنى مردود تحويل الطاقة من أجل قيم مختلفة للمكثف الخارجي C_A (الشكل (10))، وقد أظهرت النتائج أنّ إضافة مكثف خارجي تُنقص مردود تحويل الطاقة، وعليه يجب إزالة المكثف الخارجي.

الـ PVDF بسماكة $d=3.9\mu\text{m}$ ومساحة سطح فعال $A = 3 \times 3\text{mm}^2$ ، والذي يبين أن استخدام مقاومة كهربائية ذات قيمة $R_A = 10\text{M}\Omega$ ، يولد استطاعة كهربائية أعلى وذلك عند وضعهما على بعد 30cm من جسم مُسخن كهربائياً في المكان نفسه من أجل المحافظة على أن يكونا تحت تأثير شروط الوسط المحيط نفسها لكلا الفيلمين.

الجدول (3): الجهد والاستطاعة المولدة من فيلم ذي سماكة المادة البيروكهربائية $d=3.9\mu\text{m}$ ومساحة سطح فعال $A = 3 \times 3\text{mm}^2$ عند استخدام مقاومة خارجية $10\text{M}\Omega$ و $1\text{M}\Omega$.

قيمة مقاومة خارجية (Ω)	$10\text{M}\Omega$	$1\text{M}\Omega$
الجهد الكهربائي المولد (mV)	25.3mV	17.8mV
الاستطاعة الكهربائية المولدة (μw)	$\times 6.3292 \times 10^{-4}$	$\times 10^{-4} 4.4821$

تمت المقارنة بين الاستطاعة المولدة عند حالتين: الأولى عند عدم استخدام مكثف خارجي C_A والثانية عند وجود مكثف خارجي $C_A = 1\text{PF}$ وذلك عند استخدام فيلم مُحضّر من الـ PVDF بسماكة مادة بيروكهربائية $d=3.9\mu\text{m}$ ، ومساحة سطح فعال $A = 3 \times 3\text{mm}^2$ (الجدول (4))، حيث وجد أن عدم استخدام مكثف خارجي، يجعل الفيلم يولد استطاعة كهربائية أعلى من حالة فيلم موصول مع مكثف خارجي وذلك عند وضعهما على بعد 30cm من جسم مُسخن كهربائياً في المكان نفسه من أجل المحافظة على يكونا تحت تأثير شروط الوسط المحيط نفسها لكلا الفيلمين.

الجدول (4): الجهد والاستطاعة المولدة من فيلم ذي سماكة المادة البيروكهربائية $d=3.9\mu\text{m}$ ومساحة سطح فعال $A = 3 \times 3\text{mm}^2$ عند استخدام مكثف خارجي 1PF وعند عدم استخدامه.

حالة عدم وجود مكثف خارجي A	حالة وجود مكثف خارجي $A = 1\text{PF}$	الجهد الكهربائي
25.3mV	16.3mV	

مُسخن كهربائياً (كاوي) في المكان نفسه من أجل المحافظة على يكونا تحت تأثير شروط الوسط المحيط نفسها لكلا الفيلمين. نلاحظ أن الاستطاعة المولدة من الفيلم ذي سماكة مادة بيروكهربائية $d=3.9\mu\text{m}$ أعلى والذي يتوافق مع نتائج الدراسة الرياضية.

الجدول (1): الجهود والاستطاعات المولدة من فيلمين بيروكهربائيين لهما مساحة سطح فعال $A = 3 \times 3\text{mm}^2$.

سماكة المادة البيروكهربائية (d)	$3.9\mu\text{m}$	$100\mu\text{m}$
الجهد الكهربائي المولد (mV)	25.3mV	24.7mV
الاستطاعة الكهربائية المولدة (μw)	$\times 10^{-4} 6.3292$	$\times 10^{-4} 0.65741$

دُرِس تأثير مساحة السطح الفعال في مردود تحويل الطاقة في الفيلم البيروكهربائي من خلال المقارنة بين الاستطاعة الكهربائية المولدة لفيلمين بيروكهربائيين أحدهما بمساحة سطح فعال $A = 3 \times 3\text{mm}^2$ ، والثاني $A = 5 \times 5\text{mm}^2$ بالسماكة نفسها ($d=3.9\mu\text{m}$) وذلك عند وضعهما على بعد 30cm من جسم مُسخن كهربائياً في المكان نفسه من أجل المحافظة على أن يكونا تحت تأثير شروط الوسط المحيط نفسها لكلا الفيلمين. نلاحظ أن إنقاص مساحة سطح الفيلم تزيد من الاستطاعة المولدة الكهربائية ومن ثمّ يزيد مردوده لتحويل الطاقة والذي يتوافق مع نتائج الدراسة الرياضية.

الجدول (2): الجهود والاستطاعات المولدة من فيلمين بيروكهربائيين ذي سماكة المادة البيروكهربائية $d=3.9\mu\text{m}$.

مساحة سطح الفعّال (A)	$3 \times 3\text{mm}^2$	$5 \times 5\text{mm}^2$
الجهد الكهربائي المولد (mV)	25.3mV	14.1mV
الاستطاعة الكهربائية المولدة (μw)	$\times 6.3292 \times 10^{-4}$	$\times 10^{-4} 5.4296$

يظهر الجدول (3) مقارنة بين الاستطاعة المولدة عند استخدام مقاومة خارجية R_A بقيمتين مختلفتين ($1\text{M}\Omega$ - $10\text{M}\Omega$) موصولة مع فيلم بيروكهربائي محضّر من

		المولّد (mV)
$\times 10^{-4}4.2891$	$\times 10^{-4}6.3292$	الاستطاعة الكهربائية المولّدة (μW)

11- الخلاصة:

إن طريقة السكب لتحضير أفلام بيروكهربائية من PVDF طريقة سهلة وجيدة ولا تحتاج إلى تقنيات معقدة. أظهرت نتائج هذه الدراسة أنّ سماكة الفيلم البيروكهربائي الأفضل التي تحقق أعلى مردود هي $d=3.9\mu m$ ، حيث يكون عندها مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية $\Psi = 7.2102 \times 10^{-6}$. وكذلك بينت النتائج أن إنقاص مساحة سطح الفيلم تزيد من مردوده لتحويل الطاقة. ووجد أنه يجب إضافة مقاومة كهربائية مع الفيلم البيروكهربائي ذات قيمة $R_A > 10M\Omega$ ، ويجب إزالة المكثف الخارجي بهدف زيادة مردود تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية. من الملاحظ من النتائج أن الطاقة الكهربائية الناتجة من الأفلام البيروكهربائية منخفضة ولكن يمكن التغلب على هذه المشكلة بزيادة عدد الأفلام ودمج الطاقات الناتجة عنها.

مسرد المصطلحات:

self-power	تغذية ذاتية مستقلة
Ploy (vinylidene fluoride)	بولي فينيلدين فلورايد
unit cells	خلية الواحدة
dipole moment	عزم ثنائي قطب
spontaneous polarization	الاستقطاب الذاتي
formamide Dimethyl	ثنائي ميثيل فورماميد
Pyroelectric Coefficient	المعامل البيروكهربائي
thermal diffusion	الانتشار الحراري
emission	الإصدارية

المراجع References

- [12] Shuza Binzaid1, Wasim Hafiz Dipon, 2016 “Pyroelectric Simulation System- Advancing Programmability and Portability Concepts” International Journal of Engineering Research and General Science Volume 4, Issue 3, 2016 ISSN 2091-2730.
- [13] Mathew Ivill, Eric Ngo, Melanie W. Cole - 2013 “Method and Characterization of Pyroelectric Coefficients for Determining Material Figures of Merit for Infrared (IR) Detectors” ARL-TR-6758.
- [14] Genc Hyseni; Nebi Caka; Kujtim Hyseni; “Infrared Thermal Detectors Parameters: Semiconductor Bolometers Versus Pyroelectrics”, April 2010, WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS, Issue 4, Volume 9.
- [15] William L. Wolfe, Paul W. Kruse “Handbook of Optics: Fundamentals, techniques, and design”, Optical Society of America, 1995 ch.19.
- [16] Antoni Rogalski “Infrared detectors: Status and trends”, December 2003, Progress in Quantum Electronics.
- [1] Kwan C. K., 2004 “DIELECTRIC PHENOMENA IN SOLIDS”, Elsevier Academic Press PP: 269-271.
- [2] Xiaoguang Yuan, Fengpeng Yang, -2011 “Energy Transfer in Pyroelectric Material” Heat Conduction - Basic Research, ISBN: 978-953-307-404-7.
- [3] A Navid, C S Lynch, L Pilon., 2014 – “Purified and porous poly (vinylidene fluoride trifluoroethylene) thin films for pyroelectric infrared sensing and energy harvesting” Smart Mater. Struct. 19.
- [4] M. Kohli, C. Wuethrich, K. Brooks, B. Willing, M. Forster, p. Muralt, N. Setter, P. Ryser., 1997 – “Pyroelectric thin-film sensor array” Sensors and Actuators A60 P:147-153.
- [5] Chun Ching Hsiao, Sheng Yi Liu, An-Shen Siao., 2015 – “A Meliorated Multi-Frequency Band Pyroelectric Sensor” Sensors, 15, 16248-16264; doi:10.3390/s150716248.
- [6] Yong Cao, Minjie Liang, Xingming Wang, Nan Jiang, Jinhong Yu, ChengTe Lin., 2016 – “Enhanced thermal conductivity for poly(vinylidene fluoride) composites with nano-carbon fillers” RSC Advances DOI: 10.1039/c6ra11178e.
- [7] Odon A., 2010 “Modelling and Simulation of the Pyroelectric Detector Using MATLAB/ Simulink” MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 10, No. 6.
- [8] Andrzej Odon 2005 “Voltage Response of Pyroelectric PVDF Detector to Pulse Source of Optical Radiation” MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 5, Section 3.
- [9] Chun-Ching Hsiao, An-Shen Siao -2013 “Improving Pyroelectric Energy Harvesting Using a Sandblast Etching Technique” sensors ISSN 1424-8220 PP: 12113-12131.
- [10] 15-Jie H., 2016 “HYBRID PIEZO-PYROELECTRIC ENERGY HARVESTING FROM PAVEMENT” Master Thesis, Akron University.
- [11] R.W. Whatmore “Pyroelectric Devices and Materials” Reports on Progress in Physics · January 1999 DOI: 10.1088/0034-4885/49/12/002.

Received	2020/5/10	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2020/10/22	قبول البحث للنشر