

دراسة نظرية لمعرفة تأثير دالة الشغل معدن المُجمَع على مُبدل طاقة التّأين الحراري

هناء عبد السلام اسويسي سالم، فاطمة محمد حمد الغول، عبير الزروق على ابراهيم

محاضر مساعد- قسم الفيزياء- كلية العلوم - جامعة سبها- سبها.

محاضر مساعد- قسم العام- كلية الهندسة - جامعة سبها- سبها.

محاضر مساعد- قسم الفيزياء- كلية العلوم - جامعة سبها- سبها.

han.salem@sebhou.edu.ly

الملخص

إن مُبدل طاقة التّأين الحراري قادر على توفير القدرة الكهربائية، الأمر الذي يساهم في الحفاظ على مصادر الطاقة التقليدية المحدودة بباطن الأرض، ويحد من التلوث الحراري الناجم عنها. في هذه الدراسة تم اقتراح نموذج لمُبدل طاقة التّأين الحراري بهدف معرفة تأثير دالة الشغل لمعدن المُجمَع على أدائه وفهم العوامل المؤثرة عليه وتحديد المعايير التشغيلية المثلى له، وقد اجريت الدراسة بواسطة إنشاء برنامج حاسوبي بلغة "MATLAB".

أشارت النتائج المتحصل عليها إلى تميز أداء مُبدل طاقة التّأين الحراري مع خفض دالة الشغل لمعدن المُجمَع وفق خيارات محددة بثبوت كلا من دالة شغل معدن الباعث

($\phi_E = 2.4 \text{ eV}$)، والمسافة الفاصلة المفرغة من الهواء بين قطبي المُبدل ($1.6 \mu\text{m}$) وقد تحققت أعلى كفاءة حرارية (53%) وأفضل قيمة لقدرة الكهربائية لمُبدل (1105 kw/m^2) عند دالة شغل لمعدن المُجمَع منخفضة (1.2 eV).

الكلمات المفتاحية: القدرة الكهربائية، الكفاءة الحرارية، برنامج الحاسوبي ماتلاب، دالة الشغل لمعدن المُجمَع، دالة الشغل لمعدن الباعث، مُبدل طاقة التّأين الحراري.

Abstract

The thermionic Energy Converter is capable of providing electrical power, which contributes to preserving the limited traditional energy sources underground, and reduces the resulting thermal pollution. In this study, a model for the thermionic Energy Converter was proposed with the aim of knowing the effect of the collector work function on its performance, understanding the factors affecting it, and determining its optimal operational standards. This was done by creating a computer program in the MATLAB language. The results obtained indicated that the



performance of the Thermionic Energy Converter exchanger distinguished with an lower in the collector work function was increased .when the emitter work function is ($\phi_E = 2.4 \text{ eV}$),and the vacuum separation distance between the poles of the exchanger was ($1.6\mu\text{m}$), The highest thermal efficiency (53%) and the best electrical capacity value of a thermionic energy convert (1105 kw/m²) were achieved when the work function of the collector metal was low (1.2eV).

مقدمة

يقاس تقدم الأمم بمعدل استهلاك الطاقة الكهربائية، حيث تدل زيادة الاستهلاك على إدخال الآلات والمعدات المتطورة بشكل أساسي في التطبيقات المختلفة لتلك المجتمعات، وبالتالي فإن زيادة الطلب على الطاقة الكهربائية يسبب استنزاف لمصادر الطاقة التقليدية المحدودة بباطن الأرض (الوقود الأحفوري) وزيادة كميات غازات العادم الملوثة المنبعثة في الجو والناجمة من حرق الوقود المستخدم في إنتاج الطاقة، الأمر الذي أدى إلى بذل جهود بحثية من قبل المتخصصين وتركز أغلبها على إيجاد أنظمة بديلة وفعالة قادرة على توفير قدرة كهربائية [1].

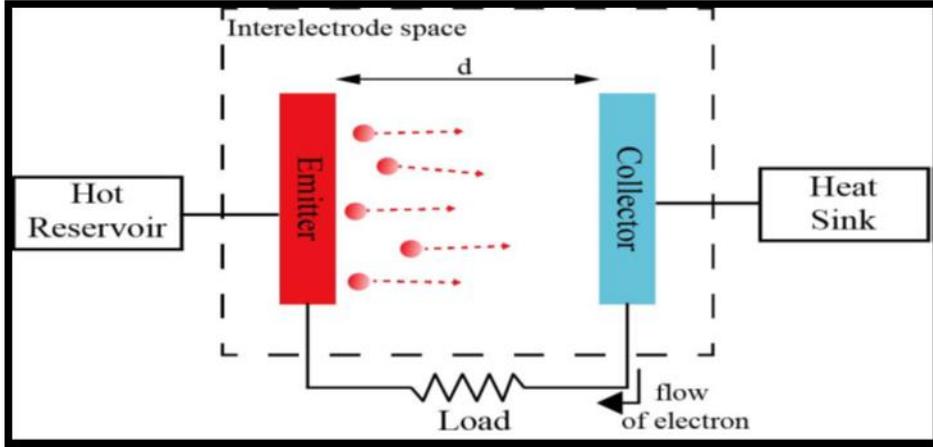
يمكن ان يكون تحويل الطاقة الحرارية المباشر للكهرباء بديلاً مناسباً للأنظمة التحويل الغير المباشرة التقليدية ، يعتبر مبدل طاقة التآين الحراري (TECs) هو احد أنظمة التحويل المباشر من الطاقة الحرارية الى الطاقة الكهربائية يتكون في الأساس من قطبين باعث ومجمع ويفصل بينهما مسافة فاصلة ، ونجد ان مبدل الطاقة التآين الحراري قادر على توفير القدرة الكهربائية، الامر الذي يساهم في الحفاظ على مصادر الطاقة التقليدية المحدودة بباطن الأرض والحد من التلوث الحراري الناجم عنها، [2] بحيث يتم تشغيل المبدل بواسطة تغذية معدن الباعث بمصدر حراري قد يكون المصدر الحراري حرارة النفايات الصناعية او الوقود الأحفوري او الطاقة النووية او الطاقة الشمسية او أي مصدر حراري اخر بهذا يكتسب الباعث طاقة حرارية كافية للتغلب على دالة شغله تنبعث الالكترونات حرارياً من سطح معدن الباعث وتعتبر المسافة الفاصلة بين الباعث والمجمع لكي تتجمع على سطح معدن المجمع المبرد نسبياً، وينتج تياراً من الالكترونات التي تندفع الى الحمل الكهربائي الخارجي لانتاج القدرة الكهربائية يمكن ان تتوفر مخرجات القدرة عالية نسبياً تصل الى ($P \approx 100 \text{ Wcm}^{-2}$) لهذا نجد ان المبدل له استخدامات كثيرة في المجالات المدنية والعسكرية والفضائية وغيرها ويتميز المبدل أيضاً بصغر حجمها نسبياً وكفاءة التحويل الحرارية عالية تقضي على الخسائر الناجمة عن العمل الميكانيكي أثناء عملية التحويل الى الطاقة الكهربائية يمكن أن يمنح مبدل طاقة التآين الحراري عمراً طويلاً بطبيعته مع القليل من الصيانة المرتبطة به [2,3,4] بشكل خاص فان مبدل طاقة التآين الحراري لها تطبيقات مناسبة



منذ أن اقترح "schlichter" أول جهاز تحويل حراري في عام 1915 (schlichte, 1915)، لكن العروض الأولى للمستويات العملية لتوليد الطاقة لم يتم إجراؤها إلا في الخمسينيات من القرن العشرين عندما قامت كل من الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي السابق (Hatopouios and Gyftopoulos, 1973, 1979) [2]، وكذلك بدأت دول أوروبا الغربية الاهتمام بمجال مبدل طاقة التآين الحراري عندما قام (Razor, 1991) باستكشاف تطورات مبدل في التطبيقات الفضائية [5]، كما استهدفت تطورات مبكرة في الولايات المتحدة باستخدام الطاقة الشمسية والنظائر المشعة كمصدر حراري وقام برنامج تكنولوجيا الطاقة الشمسية بتطوير مبدل طاقة التآين يعمل عند درجة حرارة الباعث $1900K$ وكفاءة المبدل تقريباً (7% – 10%) لمدة تصل الى تقريباً الى (11000h) [2]. مع ذلك فقد اثبتت احدث التقنيات في ذلك الوقت عدم قدرتها على مواجهة تحديات المبدل لان يتأثر أداء مبدل طاقة التآين الحراري بمستوى دالة الشغل لمعدني الباعث والمجمع اكثر تحدي واجه المبدل ان نتحصل على دالة شغل منخفضة لمعدن الباعث والمجمع وان يتم تحرر الالكترونات من الباعث بشكل سريع ويبقى المبدل مستقرا حراريا وكيميائية وان يكون مستوى دالة الشغل للمجمع اقل من مستوى دالة الشغل للباعث، هناك تحدي اخر لمبدل عندما تنتقل الالكترونات المحررة من الباعث عبر المسافة الفاصلة بين قطبي مبدل طاقة التآين الحراري لتترسب على المجمع ويتم انتقال الالكترونات المتجمعة على المجمع و اعاذتها للباعث بواسطة دائرة كهربية خارجية باستمرار العملية تتجمع الالكترونات في المسافة الفاصلة ينتج عن ذلك شحنة سالبة (عائق الشحنة) تعمل على إعاقة مرور الالكترونات المنبعثة من الباعث وتمنع وصولها للمجمع، حيث ان الالكترونات المنبعثة من الباعث التي تمتلك طاقة كافية تستطيع التغلب على عائق الشحنة فقط تصل الى المجمع، لهذا ينخفض معدل الالكترونات المتجمعة على المجمع وبذلك تتدنى القدرة الكهربية المنتجة من المبدل طاقة التآين الحراري و الكفاءة الحرارية [1,3] لهذا أثمرت الجهود البحثية في إيجاد طرق وتقنيات ساهمت في التغلب على جل التحديات [6]. حث تم تصنيع جيل جديد من مبدل طاقة التآين الحراري من قبل "Donajd. B.king" واخرون عام (2001) باستخدام تقنية تصنيع الدوائر المتكاملة لأشباه الموصلات (MTC) وتكون المسافة الفاصلة بين قطبي المبدل طاقة التآين الحراري متقاربة جداص تصل الى الميكرو متر وكانت دالتي الشغل للباعث والمجمع على التوالي $(\Phi_C = 1\text{ ev}, \Phi_E = 2.5\text{ ev})$ وكننتيجة لهذه الدراسة كانت الكفاءة الحرارية في حدود 25% وخرج القدرة الكهربية في حدود $(10\text{ s OF } A. \text{cm}^{-2})$ وعند اجراء اختبار على نموذج (MTC) عند درجات حرارة مختلفة تبين ان الطاقة المتولدة من النموذج اقل من المتوقعة بسبب خصائص الانبعائية من الباعث لهذا كان من التوصيات الحث على ظهور تقنيات لخفض دالتي الشغل للباعث والمجمع [7] حيث قا "A. M. Koeck R F", واخرون



" (2009) باستخدام طبقة رقيقة من الفوسفور في طلي باعث مصنوع من الألماس بواسطة تقنية التغليف المتقدم، الأمر الذي سبب في خفض دالة الشغل حتى (0.9ev) في درجة حرارة ثابتة (765°C) [8] كما قام "Remi Yacine Belbachir" عام (2014) وآخرون بتطوير مبدل طاقة التأين الحراري ذو مسافة فاصلة صغيرة بين القطبين المبدل الذي يعمل عند درجات حرارة منخفضة نسبياً $830C^0$ لمادة الباعث (SiC) تم الحصول على خرج للطاقة ($11.5mWcm^{-2}$) [9] في (2015) كانت هناك دراسة نظرية لمبدل طاقة التأين الحراري من قبل "S-. J.Liang, S.sun, and L.K.Ang". ل باعث جرافين ذو دالة شغل ($4.514ev$) يعمل عند درجة حرارة 900K في ظروف معينة يمكن ان تصل الكفاءة الحرارية للمبدل (45%) [10] حيث قام "Yuan Wang and Shanhe Su" عام (2020) بدراسة على المبدل طاقة التأين الحراري كان خرج الجهد الكهربائي (1.5V) بحيث قللت المسافة الفاصلة لمنع فرصة تراكم الشحنات العائقة وكانت المسافة الفاصلة ($1\mu m$ و $3\mu m$) فان كفاءتها الحرارية (30.4% و 30.6%) على التوالي [11] حيث قامو - **Matthew F.Campbell, Thomas J. Celenza, Felix Schmitt**, **JaredW.Schwede, Igor Bargatin** عام (2021) باجراء دراسة على المبدل الطاقة التأين الحراري وكان الفراغ هو الفاصل بين القطبين (الباعث و المجمع) بمبدل، وقللت المسافة الفاصلة بين القطبي في حدود $1\mu m$ و $1.5\mu m$ و $2\mu m$ ، وعند يكون دالة الشغل للباعث والمجمع على التوالي ($\emptyset_C = 1 ev, \emptyset_E = 2 ev$) و درجة حرارة الباعث والمجمع ($T_C = 600K, T_E = 1500$) وجدو الكفاءة في حدود 35% والقدرة الكهربائية في حدود ($100Wcm^{-2}$) [3] كما قام "Shuguang Lu, Yuwu Huang" عام (2023) تحسين كفاءة مبدل طاقة التأين الحراري عن طريق اعادة تدوير الحرارة المهذرة منخفضة الجودة عن طريق تقنية جديدة تجمع بين (GTEC) و (AHT) لترقية الحرارة [4]



الشكل(1): مبدل طاقة التآين الحراري [1].

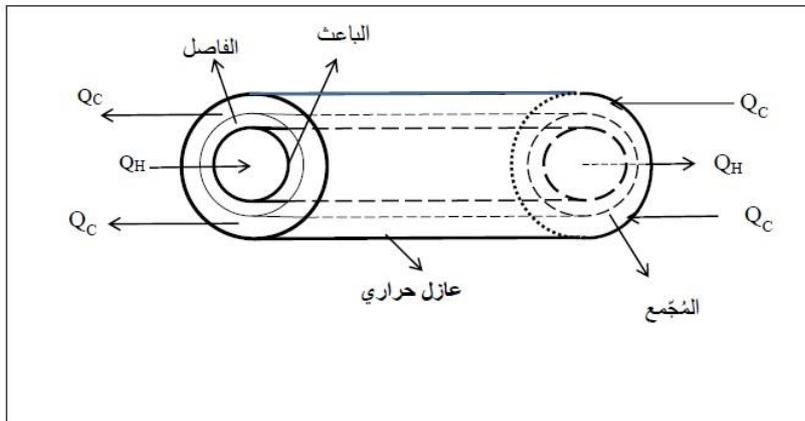
انجزت هذه الدراسة باقتراح نموذجاً لمبدل طاقة التآين الحراري بهدف معرفة تأثير دالة الشغل للمجمع على أداء مبدل طاقة التآين الحراري حسب الفرضيات التالية الوسط الفاصل بين القطبين الباعث والمجمع بمبدل طاقة التآين الحراري هو فراغا والمسافة الفاصلة بين قطبي المبدل ($d = 1.6\mu\text{m}$) ودالة الشغل لمعدن الباعث تعتمد على درجة الحرارة المغذية له وهي (2.5ev) وكانت الدراسة وفق برنامج ماتلاب.

مواد وطرق البحث

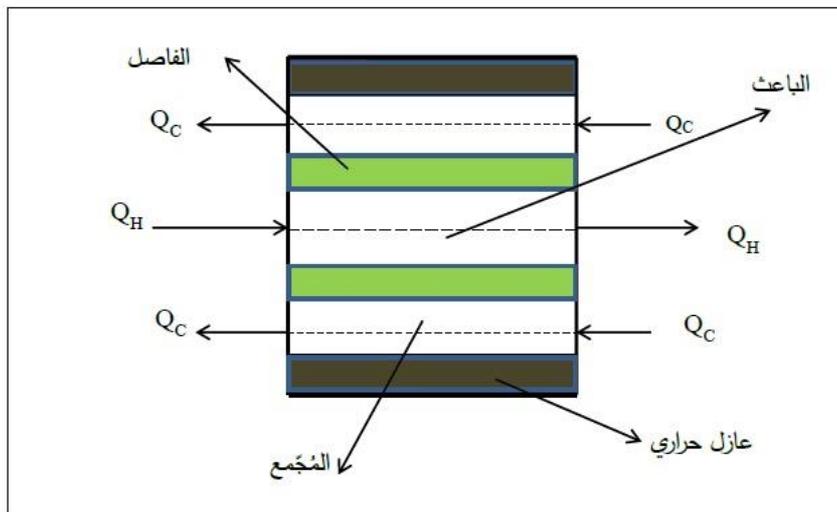
لأجراء دراسة نظرية على مبدل طاقة التآين الحراري، لغرض رفع القدرة الكهربائية المنتجة منه وتحسين الكفاءة الحرارية له، ولإنجاز هذه الدراسة يتطلب القيام بالآتي: -

1. تصميم وتركيب النموذج لمبدل طاقة التآين الحراري.

حيث ان المبدل طاقة التآين الحراري الذي صمم هو مبادل حراري حلقي على شكل أنبوب معزول حرارياً كما بالشكل السابق (2)، فقد في الضغط داخله مهمل في الاتجاهين.



الشكل (2): مبدل طاقة التآين الحراري المقترح.



الشكل (3): مقطع لمبدل طاقة التآين الحراري المقترح

2- العلاقات الرياضية لوصف النموذج

أنجزت الدراسة على مبدل طاقة التآين الحراري باختيار البرنامج الحاسوبي ماتلاب لتنفيذ هذه الدراسة تم تحديد العلاقات مناسبة لوصفه

الباعث •

دالة الشغل لمعدن الباعث (Φ_E) تعتمد على درجة الحرارة المغذية له (T_E) تحسب:

$$\Phi_E = \frac{T_E}{750} \quad (1)$$

كثافة الإلكترونات المتبخرة من الباعث (J_E) تحسب:

$$J_E = A_0 T_E^2 \exp\left(-\frac{\Phi_E}{k_B T_E}\right) \quad (2)$$

حيث ان A_0 ثابت ريتشاردسون قيمته ($12 \times 10^5 A \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$) ، k_B ثابت بولتزمان قيمته ($1.38 \times 10^{-23} K^{-1}$) . [7,3]

كمية الحرارة المغذية للمبدل طاقة التأين الحراري:

كمية الحرارة المغذية للباعث (Q_E) هي عبارة عن كمية حرارة التأين (Q_{iE}) وكمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع (Q_R) تحسب كالتالي:

$$Q_E = Q_{iE} + Q_R \quad (4)$$

كمية حرارة التأين التي تحملها الإلكترونات المحررة نتيجة التسخين والمتجهة للمُجمَع تحسب من العلاقة:

$$Q_{iE} = A \left(\frac{J_E(\Phi_E + 2 k_B T_E) - J_C(\Phi_E + 2 k_B T_C)}{e} \right) \quad (5)$$

حيث ان A هي مساحة التبادل، e شحنة الإلكترون وقيمتها ($1.6 \times 10^{-19} C$)
كمية الحرارة المنتقلة بالإشعاع من الباعث تحسب من العلاقة:

$$Q_R = A \sigma \varepsilon (T_E^4 - T_C^4) \quad (6)$$

σ ثابت ستيفان قيمته ($5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$) ، ε الانبعاثية الحرارية [6].

• المُجمَع

دالة الشغل للمُجمَع (Φ_C) تعتمد على درجة حرارة التبريد المستخدمة (T_C) وتحسب كالتالي [3,7]:

$$\Phi_C = \frac{T_C}{600} \quad (7)$$

كثافة الإلكترونات العائدة من المُجمَع في اتجاه الباعث (J_C) تحسب من العلاقة [12]:

$$J_C = A_0 T_C^2 \exp\left(-\frac{\phi_C}{k_B T_C}\right) \quad (8)$$

• المسافة الفاصلة

نوع الوسط الفاصل بين الباعث و المُجمَع المستخدم في هذه الدراسة هو الفراغ والمسافة الفاصلة بينهما محددة و تقاس بالميكرومتر، كثافة الإلكترونات المتدفقة خلال الوسط الفاصل بين الباعث و المُجمَع بمعدل طاقة التأين الحراري المقترح (J) تحسب وفق قانون (Child–Langmuir).

$$J = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e V^3}{m d^2}} \quad (12)$$

حيث ان ϵ_0 سماحية الفراغ وقيمتها ($8.85 \times 10^{-12} Fm^{-1}$)، V فرق الجهد الناشئ بين القطبين بمعدل طاقة التأين الحراري، d المسافة الفاصلة بين الباعث و المُجمَع بمعدل طاقة التأين الحراري [13].

فرق الجهد الناشئ بين القطبين بمعدل طاقة التأين الحراري يحسب من المعادلة [2]:

$$V = \frac{(\phi_E - \phi_C)}{e} \quad (13)$$

القدرة الكهربائية المنتجة من معدل طاقة التأين الحراري (P_e) تحسب من المعادلة [2]:

$$P_e = A \times J \times V \quad (14)$$

▪ الكفاءة الحرارية للمنظومة (η_{th}) تحسب من المعادلة [2]:

$$\eta_{th} = \frac{P_e}{Q_E} \quad (15)$$

3- اعداد فرضيات مناسبة

لقد أُجريت الدراسة بالاعتماد على الفرضيات التالية:

- دالة الشغل لمعدن الباعث تعتمد على درجة الحرارة المغذية له.
- الفراغ هو الفاصل بين القطبين (الباعث و المُجمَع) بمعدل طاقة التأين الحراري.
- دالة الشغل لمعدن المُجمَع تعتمد على درجة حرارة المبرد المستخدم في تبريده.
- معدل طاقة التأين الحراري هو مبادل حراري حلقي على شكل أنبوب معزول حرارياً.



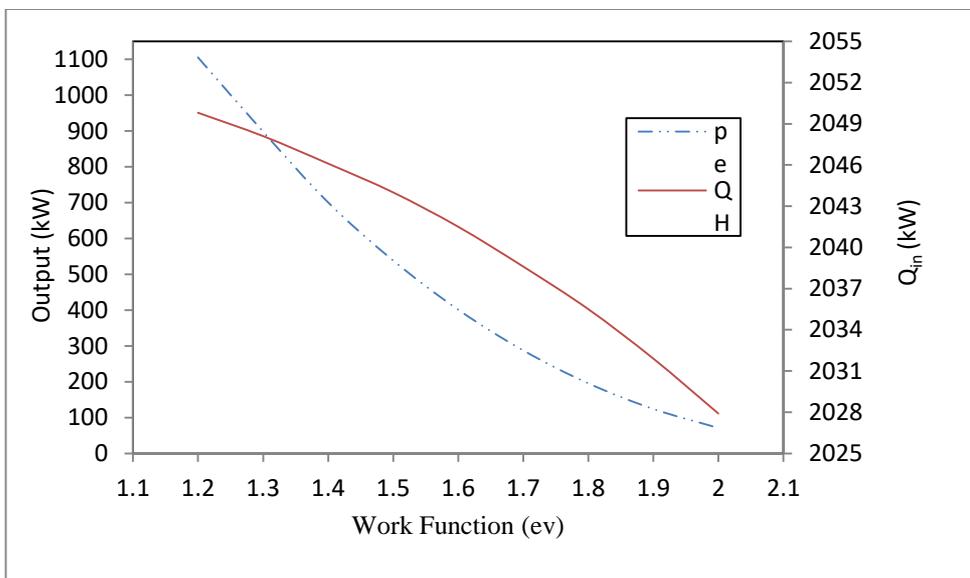
بالإضافة للمعايير التشغيلية المحددة

- المسافة الفاصلة بين قطبي المبدل $1.6\mu\text{m}$ [7,3].
 - درجة الحرارة القصوى للباعث 1800K [7].
- 4- البرنامج الحاسوبي المستخدم لهذه الدراسة هو Matlab

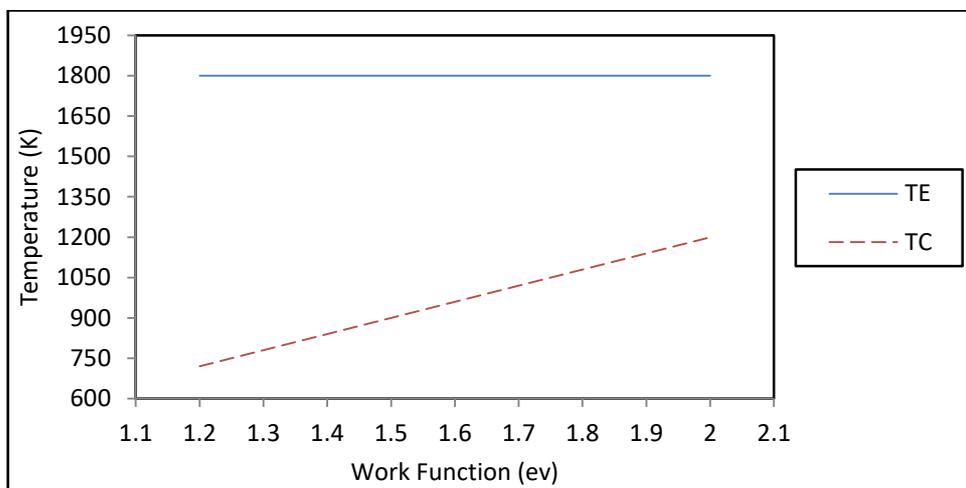
النتائج والمناقشة

أُنجزت هذه الدراسة حسب الفرضيات الموضحة سابقاً ويهدف لمعرفة أداء دالة الشغل للمُجمَع على مبدل طاقة التآين الحراري.

سلوك القدرة الكهربائية المنتجة وكمية الحرارة المغذية لمبدل طاقة التآين الحراري مع دالة شغل للمُجمَع عند $d = 1.6\mu\text{m}$, $\Phi_E = 2.4\text{ eV}$ موضحة في الشكل (4)، حيث ان كانت افضل قيمة للقدرة الكهربائية ($1105\text{Kw}/\text{m}^2$) تتطلب كمية حرارة مغذية للباعث ($2049\text{Kw}/\text{m}^2$) عند تشغيل مبدل طاقة التآين الحراري بدالة شغل المجمع منخفضة (1.2eV) عند مقارنة خرج القدرة الكهربائية لمبدل طاقة التآين الحراري من خلال هذه الدراسة مع خرج القدرة الكهربائية المبدل لدراسة لتي قام بها "dW.Schwed" عام (2021) بحيث كانت المسافة الفاصلة بين القطبي في حد ($1\mu\text{m}$ و $1.5\mu\text{m}$ و $2\mu\text{m}$)، نجد ان القدرة الكهربائية في هذه الدراسة افضل من القدرة الكهربائية المنتجة من قبل دراسة "dW.Schwed" التي كانت ($1000\text{ KW}/\text{m}^2$) حيث نلاحظ من الشكل (4) تقل كلا من القدرة الكهربائية المنتجة من مبدل طاقة التآين الحراري وكمية الحرارة المغذية له مع زيادة دالة شغل للمُجمَع، ويعود السبب ذلك لتناقص الفارق بين دالتي لمعدني الباعث والمُجمَع الموضحة بالجدول (1) ، بسبب زيادة دالة الشغل لمعدن المُجمَع التي تعتمد مباشرة على درجة حرارة التبريد للمُجمَع كما هو موضح بالشكل (5) نلاحظ أيضاً من الشكل تبوُّث درجة حرارة المغذية للباعث على طول مدى التشغيل لان دالة شغل معدن الباعث ثابتة التي تعتمد على درجة الحرارة المغذية له

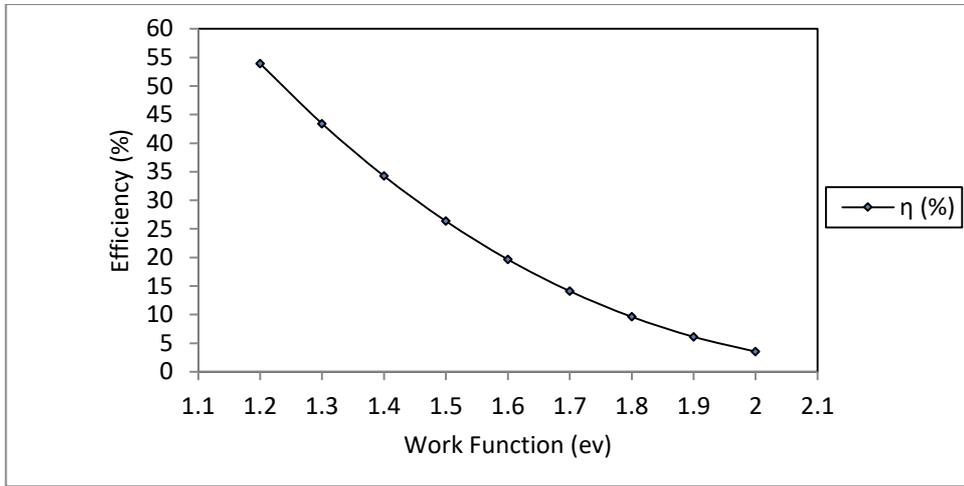


الشكل (4): القدرة الكهربائية المنتجة (P_e) وكمية الحرارة المغذية (Q_H) لمبدل طاقة التآين الحراري مع دالة الشغل المجمع عند ($d = 1.6\mu\text{m}, \phi_E = 2.5\text{ ev}$).



الشكل (5): درجتي الحرارة للباعث والمجمع بمبدل طاقة التآين الحراري مع دالة الشغل المجمع عند ($d = 1.6\mu\text{m}, \phi_E = 2.5\text{ ev}$).

نلاحظ من الشكل (6) تقل الكفاءة الحرارية للمبدل طاقة التأين الحراري المركبة المقترحة مع زيادة دالة الشغل للمجمع، استخدام دالة الشغل للمجمع عالية بالمبدل طاقة التأين الحراري يقلل القدرة الكهربائية المنتجة منه ويقلل أيضاً من كمية الحرارة المغذية له كما في الشكل (4)، إلا أن النتائج المتحصل عليها أوضحت أن معدل النقصان في كمية الحرارة المغذية لمبدل طاقة التأين الحراري كان أقل من معدل النقصان في القدرة الكهربائية المنتجة منه، هذا الأمر حسن الكفاءة الحرارية للمبدل طاقة التأين الحراري حيث بلغت افضل قيمة لها (53%) عند خفض دالة الشغل للمجمع مستخدمة، اختيار دالة الشغل للمجمع تبقى خياراً محدوداً حسب طبيعة المعادن المستعملة في تكوينها.



الشكل (6): يبين تصرف الكفاءة مبدل طاقة التأين الحراري مع دالة الشغل للمجمع عند

$$(d = 1.6\mu\text{m}, \phi_E = 2.5\text{ ev})$$

الاستنتاجات

أجريت هذه الدراسة النظرية على مبدل طاقة التأين الحراري، بهدف التعرف على الظروف التشغيلية المختلفة وتحديد المعايير التشغيلية المثلى وللحصول على أفضل أداء، أُختبر مبدل طاقة التأين الحراري باستخدام درجة حرارة قصوى للباعث ($T_E = 1800K$) ودالة شغل معدن الباعث



شغل متغيرة للمجمع بمبدل طاقة التآين الحراري المستخدم. و المسافة الفاصلة المفرغة من الهواء صغيرة بين الباعث والمُجمع ($1.6\mu\text{m}$) ودالة ($\emptyset_E = 2.4\text{ ev}$)

أشارت النتائج المتحصل عليها إلى تميز مُبدل طاقة التآين الحراري مع خفض دالة الشغل لمعدن المُجمع (1.2 ev) وتحققت اعلى كفاءة الحرارية له (53%)، و أفضل قيمة لقدرة الكهربائية لمُبدل ($1105\text{ kw}/\text{m}^2$)، ولكن باستخدام دالة شغل منخفضة (1.2 ev) يتطلب كمية حرارة عالية مغذية للمبدل طاقة التآين الحراري تصل الى ($2049\text{Kw}/\text{m}^2$)

تبين النتائج باستخدام دالة شغل منخفضة للمجمع تميز أداء مبدل طاقة التآين الحراري ولكن لكي نتحصل على معدن له دالة شغل منخفضة يتطلب ذلك تقنيات معينة.

قائمة المراجع

- [1] K.A.A. Khaild, T.J. Leong and K. Mohamed, 2016. Review On Thermionic Energy Converters. IEEE Transactions on Electronic Devices, Vol.63,NO 6
- [2] David B.Go. John R.Haase .Jeffrey George. Jochen Mannhart. Robin Wanke. Alireza Nojeh. Robert Nemanich. 2017. Thermionic Energy Conversion in the Twenty-first Century : Advances and Opportunities for Space and Terrestrial Applications. Front Mech .Eng.,08 November.
- [3] Matthew F.Campbell,Thomas J. Celenza,Felix Schmitt, JaredW.Schwede,Igor Bargatin. 2021.Progress Toward High Power Output in Thermionic Energy Converters ". Advanced science/Volume 8,Issue9/2003812,03 March
- [4] Shuguang Lu, Yuwu Huang. 2023. Graphene thermionic energy converter combined with an absortion heat transformer for electricity generation and thermal upgrading".Applied Thermal Engineering , Volume 219,Part,25 January 2023,119640.
- [5] N .S. Rasor, 1991. "Thermionic Energy Conversion Plasmas", IEEE Transactions Of Plasma Science, VOL. 19, NO. 6.
- [6] Jae-Hyung Lee, Igor Bargatin, Nicholas A. Melosh, and Roger T. Howe. 2012. Optimal emitter-collector gap for thermionic energy converters. APPLIED PHYSICS LETTERS 100, 173904



- [7] Donahd B.King;James R.Luke R.zavadil. 2001.The microminiatyre thermionic converter. Alp Conf.Proc.552,1152-11
- [8] F. A. M. Koeck, R. J. Nemanich, A. Lazea, and K. Hacnen, . 2009. “Thermionic electron emission From Low Work-Function Phosphorus doped diamond films,” Diamond Rel. Mater., Vol. 18, nos. 5-8, pp. 789-791, May/Aug
- [9] Remi Yacine Belbachir,Zhonglie An,Takahito Ono. 2014.Thermal investigation of a micro-gap thermionic power generator. Journal of micromechanics and microengineering24 (8)085009,2014
- [10] S.- J.Liang, S.sun,and L.K.Ang, 2015.Electron thermionic emission from grapheme and a thermionic energy converter.phys.Rev.Appl.,vol.3,no.1,p.014002,Jan.
- [11] Yuan Wang and Shanhe Su 2020. Efficiency Optimization in a Microscale Vacuum –Gap thermionic Energy Converter with High Solar Concentration"Es Energy Environ, 2020, 8,15-20.
- [12] Xin Zhang, Zhuolin Ye,Shanhe Su,Jincan Chen. 2018. Therionic-thermoradiative Converters .IEEE Electron Device Letters 39(9),1429-1432
- [13] M.Hoseinzade, A.Nijatje,A.Sadighzadeh. 2016. Numerical simulation and design of a thermionic electron gun. Chinese Physics C Vol.40, 057003.