

## تصميم وتنفيذ محرك ستيرلينغ يعمل بالغاز الحيوي

مناف عديدة \*

(تاريخ الإيداع 13 / 3 / 2018 . قُبِل للنشر 10 / 6 / 2018 )

### الملخص

تم في هذه الدراسة تصميم وتنفيذ نموذج مخبري لمحرك ستيرلينغ نوع غاما باستطاعة 3 W من مواد رخيصة الثمن، وتم اختبار هذا المحرك على الهواء كوسيط عامل، واستخدام الغاز الحيوي كمصدر للحرارة، والهواء كمصدر للتبريد 27 درجة مئوية.

تم اختبار هذا المحرك عند درجة حرارة تسخين تراوحت بين (60-90) درجة مئوية، حصلنا على أعلى قيمة لمردود المحرك 10% عند درجة حرارة 90°C وسرعة دوران عمود المرفق 264rpm، وحصلنا على أعلى قيمة للاستطاعة 1,267 W عند درجة حرارة 90°C، والنتائج كانت مشجعة لتصميم محرك باستطاعة 1 kW. تبين من دراستنا أنه بالإمكان تصميم وتنفيذ محركات ستيرلينغ من مواد أولية رخيصة الثمن، ومتوفرة في السوق المحلية، كما أنه يمكن تطوير هذه المحركات للحصول على استطاعات أعلى وبمردود أفضل؛ عن طريق الاستفادة من نتائج بحثنا.

**الكلمات المفتاحية:** محرك ستيرلينغ ، الغاز الحيوي ، سرعة دوران عمود المرفق ، مصدر حرارة

## design and execution a stirling engine works with biogas

\*Manaf Odira

(Received 13 / 3 / 2018 . Accepted 10 / 6 / 2018 )

### Abstract

In this study, a laboratory model for the Gamma Stirling engine with a power 3 w was designed and executed. This engine was manufactured from inexpensive materials. The engine was tested on the air as a working fluid. Biogas was used as a source of heat and air as a source of cooling at 27°C.

This engine was tested within the range of heat source temperature (60 - 90°C), We had obtained the highest value of the efficiency 10% at 90°C and the speed of the crankshaft rotation was 264rpm ,and We had obtained the highest value of the power 1,267 w at 90°C. The results were encouraging to design an engine with a power 1 kw.

Our study had showed that Stirling engines can be designed and executed from available inexpensive raw materials in the local market, and that these engines can be developed to obtain higher power and better efficiency by taking advantage of our research results.

**Keywords:** Stirling Engine, Biogas, crankshaft Rotation Speed, Heat Source

---

\*Postgraduate Student, Department of Renewable Energies Technologies, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Tartous, Syria .

## مقدمة:

إن محرك ستيرلينغ هو محرك احتراق خارجي، يمكن أن يعمل باستخدام الوقود التقليدي والوقود البديل. وقد اخترع هذا المحرك روبرت ستيرلينغ في عام 1816م؛ حيث كان هذا المحرك غير انفجاري؛ يستعمل القليل من الوقود، ويعطي طاقة ميكانيكية أكبر من الطاقة الميكانيكية للمحركات البخارية في تلك الأيام، إلا أنه اصطدم ببعض الصعوبات بالنسبة إلى معدن المحرك؛ حيث إن الجانب الساخن في محرك ستيرلينغ يسخن حتى درجة حرارة تجعل المعدن يتوهج ويبقى الحيز الساخن عند هذه الدرجة؛ لأن رأس الاسطوانة لا يمكن أن يبرد في الفترة الوجيزة بين ترددات القدرة. وعلى الرغم من الصعوبة التي واجهت صناعة محرك ستيرلينغ بالنسبة إلى المعادن فعشرات الآلاف من تلك المحركات استعملت في تشغيل مضخات المياه، وتشغيل الآلات الصغيرة، وتدوير المراوح. وقد حاول كثير من الباحثين تطوير هذا المحرك، وازدادت في السنوات الأخيرة التصاميم الجديدة لمحركات ستيرلينغ والأبحاث المتعلقة بتقييم أدائها[1].

في عام 2006 قام الباحثان (Kongtragool,B; Wongwises,S) [2] بإجراء دراسة تحليلية لتأثير الحجم الميت، وكذلك فعالية المسترجع على محرك ستيرلينغ؛ حيث توصلت هذه الدراسة إلى أن:

1- العمل الصافي يتناقص مع زيادة الحجم الميت، بينما تزداد الحرارة المقدمة؛ أما مردود المحرك فيتناقص مع زيادة الحجم الميت ونقصان فعالية المسترجع.

2- إن كتلة مائع التشغيل تعتمد على الحجم الميت فقط، حيث تزداد مع زيادة الحجم الميت، وللحصول على مردود عالٍ يجب استخدام مسترجع جيد، على أية حال فإن محرك ستيرلينغ يمكن أن يعمل بدون مسترجع، لكن بمردود منخفض.

تمكن الباحث A.Tavakolpour [3] ومجموعته في عام 2007 من استخدام مجمع شمسي في تشغيل محرك ستيرلينغ؛ حيث وصلت درجة الحرارة إلى 100 درجة مئوية، واستخدم الماء كوسط تبريد.

تم في هذه التجربة استخدام مكبس تشغيل بطول شوط 0,044m بينما طول شوط الإزاحة 0,055m؛ حيث بلغت الاستطاعة الناتجة 0,27w، عند اعتبار مردود المسترجع مثالياً فإن المردود الحراري 0,069 بينما كان المردود الحراري عند عدم استخدام مسترجع 0,0122.

وقد توصلت هذه الدراسة إلى أن استخدام مسترجع يمكن للمردود الحراري أن يزداد إلى ستة أضعاف.

قام A.Pourmorahed [4] عام 2011 بإجراء مقارنة بين نواتج الاحتراق وكذلك الطاقة الحرارية الناتجة عند استخدام الغاز الطبيعي (البروبان) والغاز الحيوي كمصدر حراري في محرك ستيرلينغ.

تم في هذه الدراسة استخدام محرك ستيرلينغ نوع غاما، باستطاعة 1kw، واستخدم النيتروجين كمائع تشغيل، حيث كانت نواتج الاحتراق هي CO-CO<sub>2</sub>-NOX.

اثبتت هذه الدراسة:

1-نسبة نواتج الاحتراق أكبر عند استخدام الغاز الطبيعي.

2-الطاقة الحرارية الناتجة عن احتراق الغاز الحيوي أقل من الطاقة الحرارية الناتجة عن احتراق الغاز الطبيعي.

حسب (I.TLILI 2012) [5] فإن الضياعات الطاقية في المسترجع تبلغ 86% من الضياعات الإجمالية للمحرك، وإن الضياعات في اسطوانة الإزاحة تبلغ 13%، حيث تعتمد الضياعات على الناقلية الحرارية

للمسترجع ، كتلة المائع ، حجم المسترجع والخصائص الهندسية لأسطوانة الإزاحة، زيادة الموصلية الحرارية للمسترجع سيخفض من الأداء.

أثبتت هذه الدراسة:

1- أداء المحرك أفضل عند استخدام مادة Stainless steel في تصنيع المسترجع لأن عامل التوصيل الحراري لها منخفض.

2- للتقليل من الضياعات الداخلية يجب استخدام مواد ذات ناقلية حرارية منخفضة وسعة حرارية عالية.

3- بلغ مردود المحرك أعلى قيمة له عندما كانت كتلة المائع 0.89 g؛ حيث إن زيادة كتلة المائع تقلل من المردود نظراً لزيادة ضياعات الضغط.

### أهمية البحث:

تأتي أهمية البحث من تصميم وتنفيذ محرك يعمل بالطاقة البديلة (الغاز الحيوي)؛ حيث إن محركات ستيرلينغ هي محركات احتراق خارجي؛ لأنها تعمل على أي مصدر حراري، وبالتالي يمكن تأمين مصادر بديلة للطاقة في مواجهة التقلبات المستمرة في أسعار النفط، وزيادة الطلب على الطاقة، وقرب نفاذ الوقود الأحفوري، إذ يعدّ الغاز الحيوي وقوداً نظيفاً نسبياً؛ حيث إن استخدامه كوقود يساهم في خفض الغازات الناجمة عن حرق الوقود الأحفوري الملوثة للبيئة. وكذلك توافر المواد الأولية اللازمة لإنتاج الغاز الحيوي النباتية منها أو الحيوانية، وبالتالي استخدام مصدر طاقة رخيص ودعم انتشاره في بلادنا.

### الهدف من البحث:

تصميم محرك ستيرلينغ باستطاعة 3 W يعمل بالغاز الحيوي، أو أي مصدر حراري آخر، وهو من النوع المستخدم لأغراض تعليمية في المخابر العملية ، ويكون نقطة بداية للإحاطة بالمفاهيم الأساسية لمحرك ستيرلينغ نظرياً ثم عملياً؛ وذلك للاستفادة من هذه التجربة في تصميم محركات باستطاعة أكبر ومردود أعلى، واستخدامها في العديد من التطبيقات الصناعية.

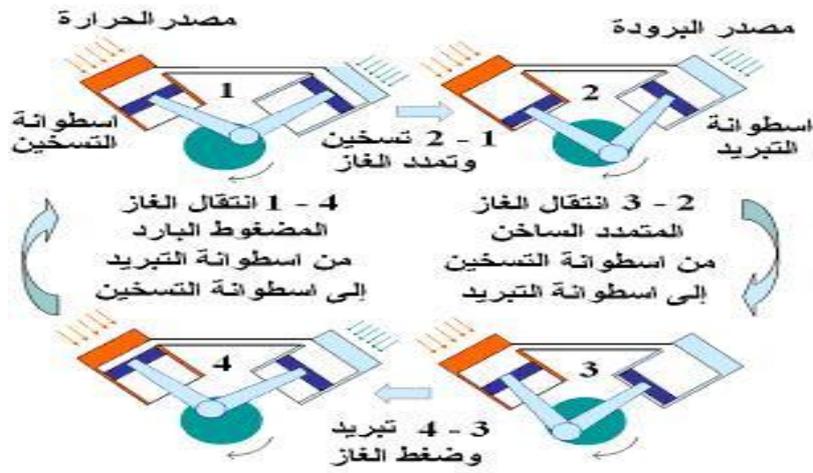
### منهجية البحث وطرقه:

اعتمدت منهجية البحث على الدراسات التحليلية لمختلف تصاميم محركات ستيرلينغ المختلفة، وتم اختيار النوع الملائم لدراستنا، ثم قمنا بالدراسة الحرارية لدارة المحرك المدروس والحسابات التصميمية لأجزاء المحرك، وبعد ذلك قمنا بتصنيع أجزاء المحرك وتجميعها وتشغيل المحرك؛ ثم تم إجراء التجارب المطلوبة لتقييم أداء هذا المحرك باستخدام مقاييس درجات الحرارة وسرعة دوران المحرك، وأخيراً تحليل ومناقشة القيم المقاسة واستخلاص النتائج والمقترحات.

### المناقشة:

#### 5-1-المبدأ العام لعمل محركات ستيرلينغ [6]:

يتلخص مبدأ عمل محرك ستيرلينغ بأن كمية محدودة من جسم التشغيل (الهواء عادة أو غازات أخرى) ومحصورة ضمن حجرة كتيمية مزودة بمكبس تتعرض للتسخين والتبريد كما هو موضح في الشكل (1).



الشكل (1) مبدأ عمل محرك ستيرلينغ

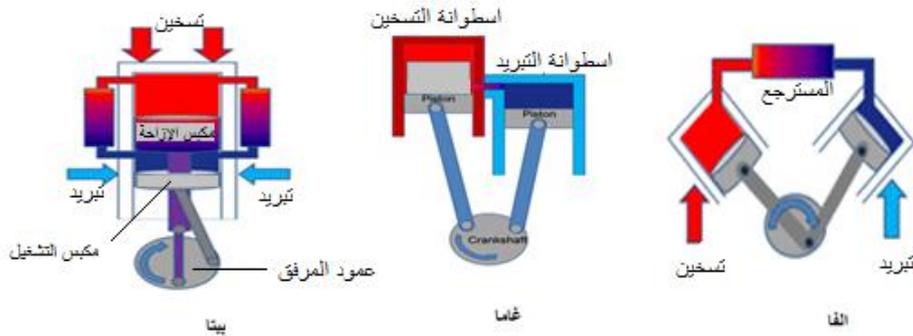
2-5- أنماط محرك ستيرلينغ [6]:

1-2-5- النمط ألفا: يتكون هذا النمط من مكبسي تحريك، أحدهما يتوضع ضمن مبادل حراري مسخن والآخر ضمن مبادل حراري مبرد.

ويتميز هذا النمط باستطاعته العالية بالنسبة إلى حجمه ولكن عيب هذا النمط هو إمكانية حدوث مشاكل في المبادل المسخن بسبب الحرارة العالية للمبادل إضافة إلى الضجة العالية التي يحدثها ويظهر هذا النمط في الشكل (2).

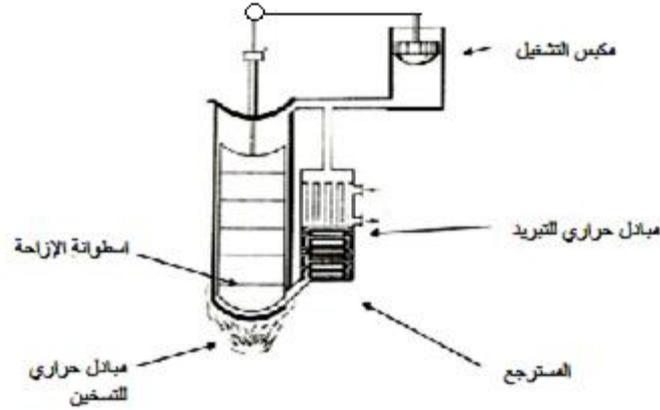
2-2-5- النمط بيتا: في هذا النمط لا يوجد سوى مكبسي تحريك واحد بالإضافة إلى مكبس الإزاحة في الاسطوانة نفسها، حيث يمثل دور مكبس الإزاحة في نقل المائع بين المبادلين الحراريين المسخن والمبرد ويظهر هذا النمط في الشكل (2).

3-2-5- النمط غاما: هذا النمط يشبه النمط السابق مع فرق وحيد أن مكبسي التحريك يكون في اسطوانة مستقلة عن اسطوانة الإزاحة كما في الشكل (2).



الشكل (2) أنماط محرك ستيرلينغ

## 3-5- أجزاء محرك ستيرلينغ [6]: الشكل (3) يظهر أجزاء محرك ستيرلينغ



الشكل (3) أجزاء محرك ستيرلينغ

## 4-5- اختيار نوع المحرك :

اخترنا تصميماً بسيطاً لنموذج مخبري لمحرك ستيرلينغ من نمط غاما ذي استطاعة من نمط  $P=3W$  وسرعة دوران  $n = 400rpm$  والضغط الاسمي للمحرك  $P_m = 2bar$  واعتمدنا الهواء كغاز عامل ، والمصدر

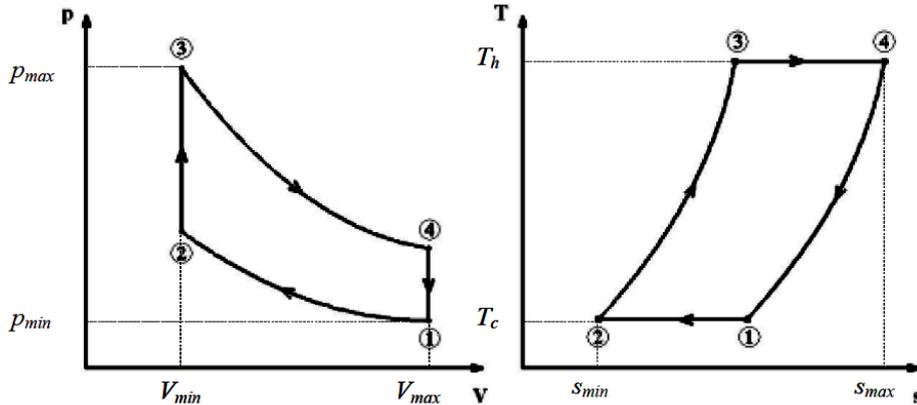
حراري يعتمد على الغاز الحيوي حيث درجة حرارة التسخين  $T_h = 363K$

وتم استخدام الهواء كمصدر للتبريد حيث درجة حرارة التبريد  $T_c = 300K$ .

## 5-5- الدورة الحرارية لمحرك ستيرلينغ [7]:

تتكون دارة محرك ستيرلينغ من أربع عمليات وهي:

العملية (1 ← 2) عملية انضغاط ايزوترمية، العملية (2 ← 3) عملية تسخين ايزوحرية، العملية (3 ← 4) عملية تمدد ايزوترمية، العملية (4 ← 1) عملية تبريد ايزوحرية كما في الشكل (4).



الشكل (4) الدورة الترموديناميكية لمحرك ستيرلينغ

## 5-5-1- حساب بارامترات النقط:

يحسب حجم التمدد (حجم الشوط لمكبس التشغيل) من العلاقة [8]:

$$P = 0,015 \cdot V_g \cdot P_m \cdot f \quad (1)$$

حيث:

حجم التمدد :  $V_g$  (cm<sup>3</sup>)

استطاعة المحرك : P (W)

الضغط : P<sub>m</sub> (bar)

f : التردد (عدد الدورات في الثانية)

$$f = \frac{n}{60} = \frac{400}{60} = 6,67 \text{ Hz} \quad (2)$$

وبالتالي يصبح حجم الشوط لمكبس التشغيل (الحجم العامل):

$$V_e = V_s = \frac{P}{0,015 \cdot P_m f} = \frac{3}{0,015 \cdot 2,6,67} = 15 \text{ cm}^3$$

V<sub>R</sub> نسبة الانضغاط (نسبة الحجم) : وهي حجم الغاز عندما يكون المكبس في النقطة الميتة العليا V<sub>max</sub> إلى حجم الغاز عندما يكون المكبس في النقطة الميتة السفلى V<sub>min</sub> [8].

$$V_R = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{min} + V_p}{V_{min}} \quad (3)$$

تستخدم العلاقة الآتية لحساب نسبة الانضغاط في محرك ستيرلينغ [8]:

$$V_R = 1 + \frac{\Delta T}{1100} = 1 + \frac{T_h - T_c}{1100} = 1 + \frac{363 - 300}{1100} = 1,057 \quad (4)$$

بالتعويض بالعلاقة السابقة نجد:

$$V_c = V_{min} = 263 \text{ cm}^3$$

حجم التقلص:

بارامترات النقطة 1 :

$$V_1 = V_{max} = V_c + V_e = 263 + 15 = 278 \text{ cm}^3 \quad (5)$$

$$p_1 = 1 \text{ bar} \quad T_1 = 300 \text{ K}$$

$$p_1 \cdot V_1 = m \cdot R \cdot T_1 \quad (6)$$

من معادلة الحالة [11]:

$$1 \cdot 10^5 \cdot 278 \cdot 10^{-6} = m \cdot 287 \cdot 300$$

$$m = 0,00032 \text{ kg} = 0,32 \text{ g}$$

بارامترات النقطة 2:

$$V_2 = V_c = 263 \text{ cm}^3 \quad T_2 = T_1 = 300 \text{ K}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2} \quad (7)$$

$$P_2 = 1,057 \text{ bar}$$

وبالتالي:

بارامترات النقطة 3 :

$$T_3 = 90 + 273 = 363 \text{ K} \quad V_3 = V_2 = 263 \text{ cm}^3$$

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$P_3 = 1,28 \text{ bar}$$

وبالتالي:

بارامترات النقطة 4:

$$V_4 = V_1 = 278 \text{ cm}^3 \quad T_4 = T_3 = 363 \text{ K}$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{V_3}{V_4}$$

$$P_4 = 1,21 \text{ bar}$$

وبالتالي:

عمل الانضغاط [11] :

$$W_c = mRT_c \ln \frac{P_1}{P_2} = 0,00032.287.300. \ln \frac{1}{1,057} = -1,53 \text{ j} \quad (8)$$

عمل التمدد [11] :

$$W_e = mRT_h \ln \frac{P_3}{P_4} = 0,00032.287.363. \ln \frac{1,28}{1,21} = 1,87 \text{ j} \quad (9)$$

العمل المفيد (الصافي):

$$W_{net} = W_e - |W_c| = 1,87 - 1,53 = 0,34 \text{ j} \quad (10)$$

نلاحظ أن العمل الناتج عن تغير الحجم يكون موجبا فإنه يدل على التمدد وعندما يكون سالبا فإنه يدل على التقلص.

### 5-6-6- تصميم أجزاء المحرك 5-6-6-1- الهيكل:

يقوم الهيكل بتجميع وتثبيت أجزاء المحرك المختلفة، وتم تصنيعه من الألمنيوم؛ لخفة وزنه وسهولة تشكيله ومقاومته للعوامل الجوية من حيث الأكسدة، ويتم تشكيل الهيكل بالثني والطرق والتقنب بواسطة المتقنب، ويراعى في تشكيل الهيكل أن تكون ثقب محاور الدوران على استقامة واحدة .

### 5-6-6-2- اسطوانة مكبس التشغيل:

اخترنا اسطوانة من الألمنيوم لتحملها الحرارة ومقاومتها للصدأ، بالإضافة إلى خفة الوزن، للأسطوانة حافة علوية لتثبيت الغشاء المطاطي المستخدم بدلا من مكبس التشغيل، اخترنا اسطوانة بقطر  $D_p = 3 \text{ cm}$  ملائمة لمكبس التشغيل، واخترنا هذا القطر نظراً لتوافر اسطوانات بهذا القطر وبالتالي دون الحاجة لتصنيعها وارتفاع هذه الاسطوانة  $H_p = 4 \text{ cm}$ . وبالتالي يصبح حجم اسطوانة مكبس التشغيل :

$$V_p = \frac{\pi}{4} \cdot D_p^2 \cdot H_p = \frac{\pi}{4} \cdot 3^2 \cdot 4 = 28.26 \text{ cm}^3 \quad (11)$$

### 5-6-6-3- مكبس التشغيل ( الغشاء المطاطي):

ويصنع من المطاط المرن Latex وذلك ليتحمل الحرارة والضغط، ويثبت الغشاء المطاطي على وجه اسطوانة التشغيل بحيث يكون حر الحركة نحو الأعلى والأسفل فإذا ازداد الضغط فسوف ينتفخ الغشاء نحو الأعلى رافعاً محور ذراع التوصيل نحو الأعلى والذي بدوره يدير عمود المرفق والعكس صحيح.

ولهذا اخترنا قطر مكبس التشغيل  $d_1 = 3,3 \text{ cm}$  بحيث يكون أكبر من قطر اسطوانة مكبس التشغيل ليسمح للهواء الساخن بالتمدد وبالتالي دفع مكبس التشغيل.

إن أعظم قيمة لضغط الهواء المؤثرة على السطح السفلي لمكبس التشغيل والناتجة عن الهواء الساخن هي  $P_{max} = 1,28 \text{ bar}$  حيث إن هذه القيمة اصغر بكثير من الإجهاد المسموح به للغشاء المطاطي  $\sigma_{z \text{ allow}} = 60 \text{ Mpa}$

والضغط المؤثر على السطح العلوي لمكبس التشغيل هو الضغط الجوي  $P_0 = 1 \text{ bar}$

وبالتالي فإن القوة المؤثرة بدلالة فرق الضغط تعطى بالعلاقة:

$$F = \Delta P \cdot A = \Delta p \cdot \frac{\pi}{4} d_1^2 = (1,28 - 1) \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 3,3^2 \cdot 10^{-4} = 24 \text{ N} \quad (12)$$

هذه القوة ناتجة عن فرق الضغط أما الأوزان أهملت في الدراسة نظرا لصغرهما.

### 5-6-6-4- اسطوانة مكبس الإزاحة:

يتم تصنيع هذه الاسطوانة بحيث تحوي غرفتين إحداهما للمنطقة الساخنة والأخرى للمنطقة الباردة، وبالقطر نفسه، وتصنع الاسطوانة من الفولاذ المصقول أو الألمنيوم أو حديد الصب طبقاً لمتطلبات عمل المحرك. ونظراً للحرارة المنخفضة المستخدمة في المحرك تم استعمال اسطوانة من الحديد المطلي بالقصدير لتحملها الحرارة والتي سطحها مصقول يساعد المكبس على الانزلاق داخله ومقاومتها للتآكل وقطر هذه الاسطوانة  $D_s = 5 \text{ cm}$ .

اخترنا هذا القطر نظراً لتوفر اسطوانات بهذا القطر دون الحاجة إلى تصنيعها. وهذه الاسطوانة محكمة الإغلاق لمنع تسرب الهواء من وإلى خارج الاسطوانة ويحتوي الغطاء العلوي للأسطوانة على ثقب لانزلاق محور اسطوانة الإزاحة.

وتتصل أسطوانة مكبس الإزاحة مع أسطوانة مكبس التشغيل عن طريق أنبوب من مادة البولي فينيل كلوريد والذي يسمح بانتقال الهواء بين الاسطوانتين حيث يبلغ طول هذا الأنبوب  $L_t = 5 \text{ cm}$

وقطر الأنبوب  $d_t = 1,5 \text{ cm}$ ، وبالتالي يصبح حجم الأنبوب: (13)  $V_t = \frac{\pi}{4} \cdot d_t^2 \cdot L_t = 8,8 \text{ cm}^3$

(14) لدينا حجم التقلص

$$V_c = V_p + V_t + V_s$$

$$263 = 28,6 + 8,8 + V_s$$

$$V_s = 225,6 \text{ cm}^3$$

وبالتالي يصبح حجم اسطوانة الإزاحة:

$$V_s = \frac{\pi}{4} \cdot D_s^2 \cdot H_s = \frac{\pi}{4} \cdot 5^2 \cdot H_s = 225,6 \text{ cm}^3$$

$$H_s = 11,5 \text{ cm}$$

وبالتالي يصبح ارتفاع اسطوانة الإزاحة:

#### 5-6-5- مكبس الإزاحة:

وهو مكبس ينزلق داخل اسطوانة الإزاحة بشكل حر تحت تأثير وزنه؛ ويصنع هذا المكبس من الألمنيوم لخفة الوزن وتحمله الحرارة، وقلة احتكاك المكبس مع جوانب المكبس، ولتحقيق هذا الفرض اخترنا مكبساً ارتفاعه  $2 \text{ cm}$ .

حيث يكون مكبس الإزاحة بقطر  $d_2 = 4,4 \text{ cm}$  أصغر بقليل من قطر اسطوانة الإزاحة ليسمح بمرور الهواء الساخن إلى اسطوانة التبريد.

ويتصل مكبس الإزاحة مع عمود المرفق عن طريق ذراع مصنوعة من الألمنيوم لخفة وزنها اخترنا.

#### 5-6-6- حامل عمود المرفق:

يثبت حامل عمود المرفق فوق الغطاء العلوي لأسطوانة الإزاحة ويصنع هذا الحامل من المعدن وفي أعلاه صفيحة بها ثقبان لثبيت عمود المرفق. وتم استخدام معدن الألمنيوم في تصنيع الحامل لخفة وزنه ومقاومته للعوامل الجوية.

#### 5-6-7- عمود المرفق:

يقوم عمود المرفق بتحويل الحركية الترددية للمكبس إلى حركة دورانية، ويصنع من سلك معدني نحاسي مقاوم للتآكل والاحتكاك، ويثبت في نهايته مدرجات كروية أحدهما لذراع مكبس الإزاحة والآخر لذراع مكبس التشغيل.

يخضع عمود المرفق بشكل رئيسي إلى إجهاد التواء نتيجة عزم القوة القادمة من اسطوانة التشغيل، هذه القوة F تؤدي إلى التواء محور عمود المرفق .

يجب على عمود المرفق أن لا يتغير شكله جراء تأثير القوة عليه؛ أي يجب أن يكون إجهاد الالتواء الأعظمي

الذي يخضع له عمود المرفق  $T_{max}$  أصغر من إجهاد الالتواء المسموح به  $T_{allow}$

$$d = 365 \sqrt[3]{\frac{P}{n \cdot T_{allow}}} \quad (15) \quad \text{إن المعادلة اللازمة لحساب قطر عمود المرفق [9] :}$$

وبتعيين قيمة إجهاد الفتل المسموح به  $T_{allow} = 12 \text{ Mpa}$

$$d = 160 \sqrt[3]{\frac{P}{n}} \quad \text{فتصبح معادلة قطر عمود المرفق كما يلي:}$$

حيث:  $d(\text{mm})$  ,  $P(\text{kw})$  ,  $n(\text{rpm})$

فإذا كانت استطاعة اسطوانة التشغيل صغيرة بما يعادل  $p=3w=0,003\text{kw}$  وسرعة دوران عمود المرفق التقريبية  $400\text{rpm}$  فإن قطر عمود المرفق سيصبح طبقاً للمعادلة أعلاه:

$$d = 160 \sqrt[3]{\frac{0,003}{400}} \approx 3\text{mm}$$

### 5-6-8- ذراع التوصيل:

وهو القسم الذي يصل ما بين الغشاء المطاطي المرن في اسطوانة التشغيل وعمود المرفق، وهو عبارة عن محور معدني من مادة [37 St] لنقل الحركة من غشاء اسطوانة المكبس إلى عمود المرفق ويثبت ذراع التوصيل مع الغشاء المطاطي عن طريق صامولة، كما نثبت ذراع التوصيل مع عمود المرفق عن طريق مدرجات كروية، اخترنا مدرجات كروية بقطر  $4\text{mm}$  أكبر من قطر عمود المرفق ولكن لعدم توفر مدرجات بقطر صغير استعضنا عنها بحلقة دائرية بقطر  $4\text{mm}$  مناسبة لقطر عمود المرفق من مادة 37 St حيث إن الإجهاد الشد المسموح به لهذا المعدن أكبر من الإجهاد الذي تتعرض له هذه الحلقة.

نختار قطر ذراع التوصيل  $D_r = 3\text{mm}$  وبالتالي فإن إجهاد الشد في ذراع التوصيل:

$$\sigma_z = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi D_r^2}{4}} = \frac{24}{\frac{\pi 3^2}{4}} = 3,4\text{Mpa} \quad (16)$$

وهو أصغر بكثير من إجهاد الشد المسموح  $\sigma_{z\text{ allow}} = 120 \text{ Mpa}$

لحساب ذراع التوصيل على الانكسار نحسب عامل النحافة  $\lambda$  حيث [9] : (17)

$$\lambda = \frac{L_r}{i}$$

$i$ : نصف قطر العطالة وفي حالة المحاور الاسطوانية فإن [9]:

$$i = 0,25 D_r = 0,25 \cdot 3 = 0,75 \quad (18)$$

اخترنا طول ذراع التوصيل  $L_r = 6\text{cm}$

$$\lambda = \frac{60}{0,75} = 80 \quad \text{وبالتالي}$$

وطبقاً لعلاقة أولير في حساب انكسار المحاور فإن:

$$80 < 86$$

حيث هي  $\lambda_p$  حدود النحافة للانكسار وفي حالتنا للمعدن 37 St تبلغ 86 وهذا يعني أن هناك ضماناً لعدم انكسار أو تني ذراع التوصيل نظراً لوجودها ضمن عامل النحافة للمعدن المختار.

### 5-6-9- الدولاب المعدل (الحدافة):

تستخدم الحدافة لتوازن الحركة الدورانية أثناء عمل المحرك وهي تساعد على تنظيم سرعة دوران المحرك وتصنع عادة من معدن ذي شكل دائري اسطواني وهي مثبتة على عمود المرفق. اخترنا الألمنيوم في تصنيع الحدافة نظرا لخفة وزنه بما يناسب متطلبات المشروع.

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{\pi \cdot 400}{30} = 41,86 \text{rd/sec} \quad (19) \quad \text{[10]:}$$

حيث  $n$  عدد دورات الحدافة في الدقيقة .

$$\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3 \quad \text{أما كتلة الحدافة والمصنوعة من الألمنيوم ذي الكثافة}$$

$$m = \pi \cdot \rho \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 2,7 \cdot 7^2 \cdot 0,3 = 103 \text{g} = 0,103 \text{kg} \quad (20) \quad \text{فتحسب كما يلي:}$$

اخترنا حدافة بقطر  $d=14\text{cm}$  وارتفاع  $h=3\text{mm}$

وبالتالي فإن عزم العطالة للحدافة [10]:

$$I = k \cdot m \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,124 \cdot 0,07^2 = 0,0003 \text{kg} \cdot \text{m}^2 \quad (21)$$

حيث  $m$  كتلة الحدافة و  $k$  عامل التناسب و  $r$  نصف قطر الحدافة حيث أنه في حالة الحدافة من نوع اسطوانة

$$k = \frac{1}{2} \quad \text{جامدة معدنية فإن:}$$

نحسب الطاقة الحركية للحدافة [10]:

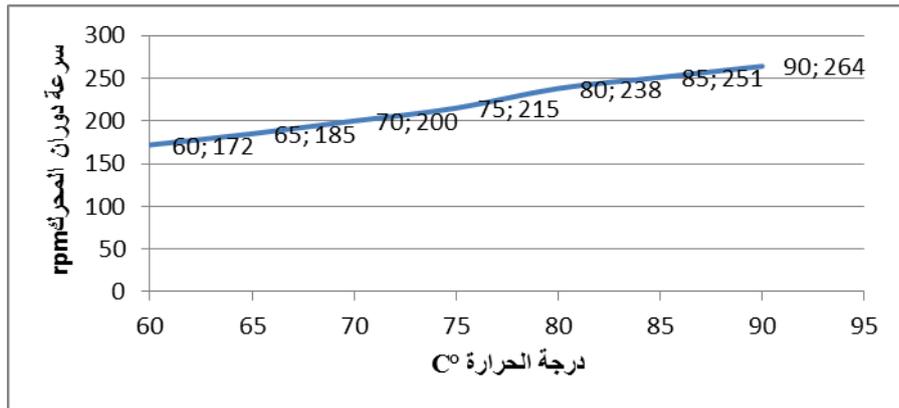
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,0003 \cdot 41,86^2 = 0,262 \text{ j} \quad (22)$$

### النتائج

#### 6-1- تشغيل المحرك واختباره:

قمنا بتجميع أجزاء المحرك كما في الشكل (5-b) وتشغيله، إذ قمنا باستخدام الغاز الحيوي كمصدر للحرارة واستخدمنا الهواء في التبريد  $27^\circ\text{C}$ ، والهواء كماء تشغيل. وتجدر الإشارة إلى أنه عند تسخين المحرك فإن المحرك لم يبدأ بالدوران إلا بعد دفعه باليد.





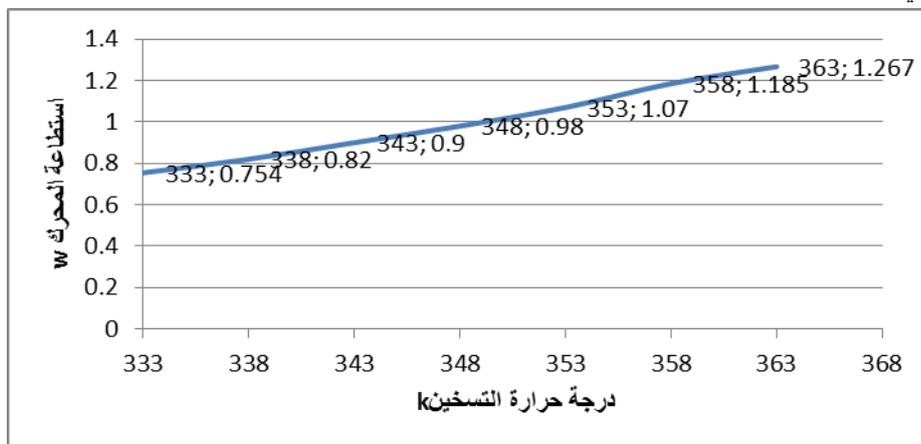
الشكل (7) العلاقة بين درجة حرارة التسخين وسرعة دوران عمود المرفق

نلاحظ أنه عند زيادة درجات الحرارة تزداد سرعة المحرك وبالتالي فإن استخدام مائع موصليته الحرارية عالية كالهليوم أو الهيدروجين سيعطي نتائج أفضل من الهواء. نلاحظ أنه عند درجة الحرارة  $90^{\circ}\text{C}$  بلغت سرعة دوران المحرك 264 rpm، والضغط الأعظمي للمحرك  $P_{\max} = 1,28 \text{ bar}$  وبالتالي يمكننا حساب الاستطاعة الناتجة من العلاقة:

$$P = 0,015 \cdot V_g \cdot P_m \cdot f = 0,015 \cdot 15 \cdot 1,28 \cdot 4,4 = 1,267 \text{ w}$$

وهي أقل من الاستطاعة التصميمية 3W ويعود ذلك إلى الضياعات الحاصلة في الطاقة وهي:

- ضياعات التدفق: تنتج هذه الضياعات عن مقاومة تدفق المائع (الهواء) في اسطوانتي التسخين والتبريد.
- ضياعات التسريب: تحدث نتيجة انتقال الحرارة عبر الهواء إلى الوسط الخارجي من الثقب الموجود في الغطاء العلوي لأسطوانة التبريد الذي يمر من خلاله الذراع الواصل مع مكبس الإزاحة.
- ضياعات حرارية بالتوصيل: تنتج هذه الضياعات من انتقال الحرارة من السطح الداخلي لأسطوانة التسخين إلى السطح الخارجي للأسطوانة ومن جسم اسطوانة التسخين إلى جسم المحرك.
- ضياعات حرارية بالحمل: تنتج هذه الضياعات من انتقال الحرارة من جسم اسطوانة التسخين إلى الوسط الخارجي.



الشكل (8) العلاقة بين درجة حرارة التسخين واستطاعة المحرك

نلاحظ أنه عند زيادة درجة الحرارة تزداد استطاعة المحرك وبالتالي فإن استخدام مواد تتحمل درجات حرارة مرتفعة تسمح بزيادة درجة الحرارة وبالتالي تحسين أداء المحرك.

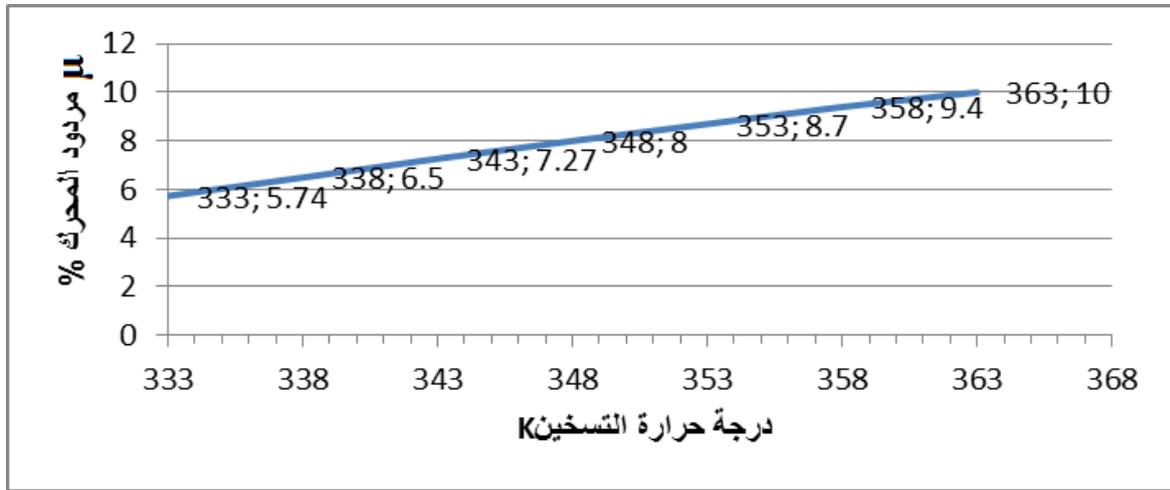
#### 2-6- حساب مردود المحرك :

$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} = \frac{363 - 300}{363} = 17\% \quad (23) \quad \text{يمكننا حساب المردود من علاقة كارنو [9]:}$$

لكن يجب الأخذ بعين الاعتبار الضياعات الحاصلة في المحرك تخفض من قيمة مردود المحرك لذلك تؤخذ القيمة الفعلية للمردود من العلاقة [9]:

$$\eta = 0,58\eta_c = 10\% \quad (24)$$

بالاعتماد على هذه العلاقة تم رسم المخطط البياني لعلاقة مردود المحرك مع درجة حرارة التسخين عند درجات حرارة تراوحت من 60 إلى 90 درجة مئوية كما في الشكل (9):



الشكل (9) العلاقة بين درجة حرارة التسخين ومردود المحرك

نلاحظ أنه عند زيادة درجة الحرارة التسخين يزداد مردود المحرك وبالتالي فإن استخدام مصدر حراري يعطي حرارة أعلى سيسهم في زيادة مردود المحرك.

#### الاستنتاجات:

تبين من دراستنا أنه بالإمكان تصميم وتنفيذ محركات ستيرلينغ من مواد أولية رخيصة الثمن ومتوفرة في السوق المحلية، كما أنه يمكن تطوير هذه المحركات للحصول على استطاعات أعلى وبمردود أفضل عن طريق الاستفادة من نتائج بحثنا وتلافي السلبيات المشار إليها حيث وجدنا:

- إن استطاعة المحرك عند درجة الحرارة 90 درجة مئوية بلغت 1,267W وهي أقل من الاستطاعة التصميمية 3W ويعود ذلك إلى الضياعات الحاصلة في المحرك.
- يمكن زيادة استطاعة المحرك باستخدام مواد تتحمل درجات حرارة مرتفعة.
- يمكن التحكم بسرعة دوران محركات ستيرلينغ من خلال التحكم بمصدري الحرارة الساخن والبارد.
- للتقليل من ضياعات الاحتكاك في محرك ستيرلينغ يمكن استخدام مواد لتزبيبت أماكن الاحتكاك في المحرك مما يؤدي إلى زيادة في استطاعة المحرك.
- محركات ستيرلينغ تحتاج إلى محركات إقلاع ذاتي مما يزيد من كلفة تصنيعها

## التوصيات:

- 1- إن محركات ستيرلينغ هي محركات احتراق خارجي، فهي تعمل على أي مصدر حراري، وبالتالي يمكن استخدام الحرارة المهدورة والناجمة عن المنشآت الصناعية كمصدر حراري في محركات ستيرلينغ؛ وإن استخدام الطاقة الشمسية كمصدر للحرارة في محركات ستيرلينغ سيؤدي إلى خفض الانبعاثات الغازية وحماية البيئة من التلوث.
- 2- للتقليل من الضياعات الحرارية في اسطوانة التسخين يمكن تصنيع الاسطوانة من مواد ذات موصلية حرارية منخفضة واستخدام مائع لزوجته منخفضة سيقبل من ضياعات التدفق، وبالتالي فإن تخفيض الضياعات الناتجة في المحرك مما يزيد من كفاءة المحرك.
- 3- إن ضياعات التسريب تحدث نتيجة انتقال الحرارة عبر الهواء إلى الوسط الخارجي من الثقب الموجود في الغطاء العلوي لأسطوانة التبريد، الذي يمر من خلاله الذراع الواصل مع مكبس الإزاحة؛ ويمكن استخدام جلبة معدنية أو مطاطية تتحمل الحرارة لمنع التسرب.
- 4- يمكن زيادة مردود المحرك خصوصاً من خلال إضافة مسترجع يعمل كخزان للحرارة.

## المراجع:

- [1]-Thombare, D.G;Verma, S.K. *Technological development in the Stirling cycle engines. Renewable & Sustainable Energy Reviews*,U.S.A,12,2008, p.1-38.
- [2]-Kongtragool,B; Wongwises,S. *Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator. Renewable Energy Thailand*, 31 ,2006,p 345-359.
- [3] -Tavakolpoura, R.A; Zomorodiana,A ; Golneshanb,A.A. *Simulation construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator. Renewable Energy,Iran*,33,2008, 77-87.
- [4]- Pourmovahed,A. *Performance and Efficiency of a Biogas CHP System Utilizing a Stirling Engine*, 13<sup>th</sup>, Las Palmas de Gran,Spain, 2011,202.
- [5]-Iskander,Tlili. *Thermodynamic Study on Optimal Solar Stirling Engine Cycle Taking Into Account the Irreversibilities Effects. Energy Procedia, Kingdom of Saudi Arabia*,N.14 ,2012, 584 – 591
- [6]- Kolin,I. *Stirling motor : history-theory-practice : contributions to the 5th International Stirling Engine Conference*, University of Dubrovnik , Croatia,1991.
- [7] -Kongtragool,B; Wongwises,S. *Performance of a twin power piston low temperature differential Stirling engine powered by a solar simulator. Solar Energy,Thailand*,81,2007,884-895.
- [8]-Martini, W. R. *Stirling Engine Design Manual.*, 2<sup>th</sup> ,U.S.A, 1983,P;99-105.

[9] –**Senft,J.R.** *Ringbom Stirling engines*,Oxford University Press, New York,1993,672.

[10]–**Caleb,C.L.** *A Low Temperature Differential StirlingEngine for Power Generation*.thesis in the University of Canterbury, Zagreb,2009.

#### المراجع العربية:

11-، أ. د. محمد ، موسى - ا.د. عمران ،عدنان، " أسس الترموديناميك" ، جامعة تشرين ، 2007