

جامعة قاصدي مرياح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء



مذكرة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

فرع: فيزياء

تخصص : فيزياء طاقوية

من إعداد : جريو وفاء و بن التواتي نجاة

مقارنة المردود المثالي والمردود العادي لمحرك ذو احتراق خارجي

(محرك ستيرلينغ)

نوقشت يوم 2017/05/25 أمام لجنة المناقشة المكونة من:

رئيسا	أ. جامعة قاصدي مرياح ورقلة	الزين عبد الله
ممتحنا	أ. جامعة قاصدي مرياح ورقلة	تخة محمد
مشرفا	أ. جامعة قاصدي مرياح ورقلة	محسن حسين

الموسم الجامعي: 2017/2016

تشكرات

الحمد لله على نعمه ، والشكر لله على توفيقه وبعد :

نتقدم بالشكر الجزيل إلى الأساتذ المشرفه محسن حسين متمنين له المزيد من

التألق في حياته العلمية

كما نتوجه بخالص مشاعر الفخر و الاعتزاز والتقدير لكل أفراد عائلتنا ونخص

بذالك الوالدين الكريمين

نتوجه أيضا بالشكر الجزيل إلى الأساتذة الكرام :

الأستاذ محمد تة ، الأستاذ كارك الربيع ، الأستاذ الزين عبد الله ، الأستاذ بن

طويلة عمر ، على كل ما قدموه لنا من توجيهات ونصائح وإرشادات لإتمام

هذا العمل

ولا يغوتنا أن نعبر عن بالغ الشكر والعرفان لكل أستاذ وافقنا في مسيرتنا

الدراسية

كما نتقدم بالشكر الجزيل لطلبة الماجستير جموعي غاية و زميله مساعد رمزي

ولا ننسى أن نشكر كل من ساعدنا في إنجاز هذا العمل من قريب وبعيد

وشكرا

إهداء

إلى حكمتي وعلمي

إلى أدبي وحلمي

إلى طريق المستقيم

إلى طريق الهداية

إلى ينبوع الصبر والتفاؤل والأمل

إلى كل من في الوجود بعد الله ورسوله أمي الغالية

إلى من ضحى براحته من أجل راحتني والدي العزيز

إلى من اثرونني عن أنفسهم

إلى من علموني علم الحياة

إلى من أظهرو لي جمال الحياة اخوتي

إلى من كانوا ملاذي وملجئي

إلى من تذوقتهم معهم أجمل اللحظات

إلى من سأفتقدهم وأتمنى أن يفتقدوني

إلى من جعلهم الله إخوتي بالله إلى من أحببتهم في الله طلاب قسم الفيزياء

إلى من يجمع بين سعادتي وحزني

إلى من أتمنى أن أذكرهم إذا ذكروني

إلى من أتمنى أن تبقى صورهم في عيوني

فهرس العناوين :

.I	تشكرات
.II	إهداء
.III	فهرس العناوين
.IV	فهرس الجداول
.V	فهرس الأشكال
.VI	المقدمة العامة

الفصل الأول : عموميات في الترموديناميك

1	1 (1) مقدمة
1	2 (2) مبدأ الصفر للترموديناميك
1	3 (3) الطاقة الداخلية والمبدأ الأول للترموديناميك
1	1.3 (1.3) الطاقة الداخلية
1	2.3 (2.3) المبدأ الأول للترموديناميك
1	4 (4) المبدأ الثاني للترموديناميك
2	1.4 (1.4) صيغة كالفن بلانك
2	2.4 (2.4) صيغة كلازيوس
2	3.4 (3.4) مبدأ كارنو الأول
2	4.4 (4.4) مبدأ كارنو الثاني
2	5.4 (5.4) صيغة أوستفالد
2	5 (5) أنواع الدورات لمختلف المحركات
2	1.5 (1.5) المحركات ذات الإحتراق الداخلي
2	1.1.5 (1.1.5) دورة أوتو
4	2.1.5 (2.1.5) دورة ديزل
5	3.1.5 (3.1.5) دورة برايتون
6	4.1.5 (4.1.5) دورة ايركسون ستيرلينغ
7	2.5 (2.5) محركات ذات احتراق خارجي

الفصل الثاني : دراسة محرك ستيرلينغ

8	1 (1) نبذة تاريخية
---	--------------------

8	..... (2) المبدأ العام لمحرك ستيرلينغ.
10	..... (3) أنواع محرك ستيرلينغ
10	..... (1.3) محرك ستيرلينغ طراز ألفا (α)
11	..... (2.3) محرك ستيرلينغ طراز بيتا (β)
12	..... (3.3) محرك ستيرلينغ طراز غاما (γ)
13	..... (4) عملية الإسترجاع لمحرك ستيرلينغ
16	..... (5) الدورة الحقيقية لمحرك ستيرلينغ
17	..... (6) الدورة المثالية لمحرك ستيرلينغ
18	..... (7) المقارنة بين محرك ستيرلينغ والمحركات الأخرى

الفصل الثالث : الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ

20	..... (1) الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ
20	..... (1.1) الأهداف من التجربة
20	..... (2.1) مبدأ العمل
20	..... (3.1) الأجهزة المستعملة
22	..... (4.1) المسائل والمقادير الفيزيائية المراد قياسها
23	..... (5.1) الإجراءات المتبعة في التجربة
24	..... (1.5.1) الحرارة المنتجة من طرف المحروقات
24	..... (2.5.1) معايرة الضغط في وحدة القياس PV المربوطة بأسطوانة المحرك
26	..... (3.5.1) معايرة الحجم في وحدة قياس PV المربوطة بأسطوانة المحرك
26	..... (4.5.1) تمثيل و رسم المخطط PV
27	..... (5.5.1) الطاقة الميكانيكية الفعالة
27	..... (6.5.1) الطاقة الكهربائية الفعالة
27	..... (2) بعض الحسابات النظرية الخاصة بمردود محرك ستيرلينغ و تطبيقها في التجربة
28	..... (1.2) طرق حساب مردود الدورة القياسية بوجود مسترجع مثالي
31	..... (2.2) طريقة حساب مردود الدورة القياسية بعدم وجود مسترجع مثالي أو وجود مسترجع غير مثالي
31	..... (1.2.2) حساب مردود الدورة المثالية لكارنو
32	..... (2.2.2) حساب مردود الدورة القياسية لستيرلينغ بعدم وجود مسترجع مثالي أو وجود مسترجع غير مثالي

34	3.2.2) شروط تساوي مردود دورة ستيرلينغ القياسية بعدم وجود مسترجع بمردود دورة كارنو.....
35	3) الطرق التجريبية لحساب الاعمال الميكانيكية المنتجة و الفعالة و الضائعة في محرك ستيرلنغ.....
35	1.3) طريقة حساب العمل الميكانيكي W_{PV} المنتج من طرف الدورة و المحسوب من المخطط PV في شاشة راسم الاهتزاز المهبطي.....
36	2.3) طريقة حساب العمل الميكانيكي الفعال W_m المنتج من طرف الدورة و المحسوب بجهاز قياس العزم الحركي.....
36	3.3) طريقة حساب العمل الميكانيكي الضائع W_{fr} بفعل الاحتكاكات و الالاعكوسية في المحرك.....
36	4.3) طريقة حساب الحرارة المستهلكة P_H من محرك ستيرلينغ خلال التجربة.....
38	5.3) النتائج التجريبية الخاصة بحساب العمل الميكانيكي الفعال و العمل الميكانيكي الضائع.....
41	6.3) طريقة حساب الإستطاعة الكهربائية P_e المنتجة في الدارة الكهربائية.....
41	7.3) النتائج التجريبية الخاصة بحساب الاستطاعة الكهربائية الناتجة من المولد الكهربائي.....
43	8.3) حساب عدد مولات الهواء داخل محرك ستيرلينغ.....
44	9.3) حساب كفاءة محرك ستيرلينغ حسب الاعمال المنتجة و الحرارة المستهلكة.....
45	1.9.3) المردود الكلي.....
45	2.9.3) مردود المحرك جهة التسخين.....
45	3.9.3) المردود المثالي لكارنو.....
45	4.9.3) المردود الداخلي للمحرك.....
45	5.9.3) المردود الميكانيكي للمحرك.....
46	10.3) النتائج التجريبية الخاصة بحساب كفاءة محرك ستيرلينغ حسب الاعمال المنتجة و الحرارة المستهلكة.....
51	الخاتمة
	قائمة المراجع
	الملخص

فهرس الجداول :

الصفحة	عنوان الجدول	الجدول
	الفصل الثالث : الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ	
	معايرة وحدة القياس PV لحساب العلاقة بين الضغط و فرق الكمون في شاشة راسم الاهتزاز.....	الجدول (3-1)
25	.....
38	تغيرات العمل الميكانيكي الفعال و العمل الميكانيكي الضائع بدلالة عدد الدورات.....	الجدول(3-2)
41	القيم التجريبية للاستطاعة الكهربائية الناتجة من استعمال البكرة الكبيرة للمولد الكهربائي.....	الجدول(3-3)
42	القيم التجريبية للاستطاعة الكهربائية الناتجة من استعمال البكرة الصغيرة للمولد الكهربائي.....	الجدول(3-4)
46	القيم التجريبية الخاصة بحساب كفاءة محرك ستيرلينغ حسب الاعمال المنتجة و الحرارة المستهلكة.....	الجدول (3-5)

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
	الفصل الأول : عموميات في الترموديناميك	
3	..... دورة أوتو على مخططي P-V و T-S	الشكل (1-1)
4	..... تغيرات المردود الحراري لدورة أوتو بدلالة نسبة الإنضغاط وتأثير تغيرات γ	الشكل (2-1)
5	..... دورة ديزل على مخططي P-V و T-S	الشكل (3-1)
6	..... دورة برايتون في مخططي TS و PV	الشكل (4-1)
7	..... دورة ايركسون وستيرلينغ في مخططي TS و PV	الشكل (5-1)
	الفصل الثاني : دراسة محرك ستيرلينغ	
8	..... صورة لروبارت ستيرلينغ (1816)	الشكل (1-2)
10	..... محرك ستيرلينغ طراز α	الشكل (2-2)
11	..... محرك ستيرلينغ طراز المكسبين نوع ألفا α	الشكل (3-2)
11	..... محرك ستيرلينغ طراز بيتا β	الشكل (4-2)
12	..... محرك ستيرلينغ نوع غاما γ	الشكل (5-2)
13	..... الشكل التوضيحي لمحرك ستيرلينغ طراز α مع مسترجع والمقاد بواسطة عمود مرفق.	الشكل (6-2)
14	..... الأشكال التوضيحية لأربع وضعيات من الوضعيات الزاوية لعمود مرفق المحرك...	الشكل (7-2)
15	..... دورة ستيرلينغ الحقيقية.	الشكل (8-2)
15	..... دورة ستيرلينغ المثالية في مخططي TS و PV	الشكل (9-2)
	الفصل الثالث : الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ	
21	..... محرك ستيرلينغ من نوع γ شفاف مصنوع من الزجاج.	الشكل (1-3)
21	..... وحدة بها محرك و مولد كهربائي.	الشكل (2-3)
21	..... جهاز قياس العزم الحركي (Torque meter).	الشكل (3-3)
21	..... موقد للكحول .	الشكل (4-3)
21	..... وحدة قياس بما الأجهزة التالية : قياس التواتر f ، و جهاز قياس $PVnT$	الشكل (5-3)
21	..... وحدة قياس PV المربوطة بأسطوانة المحرك.	بالشكل (6-3)
22	..... حقنة طبية من النوع الكبير 20ml .	الشكل (7-3)
22	..... معدلة كهربائية.	الشكل (8-3)
22	..... فولطمتر أمبيرمتر.	الشكل (9-3)
22	..... أسلاك توصيل بألوان مختلفة .	الشكل (10-3)
22	..... راسم الاهتزاز المهبطي.	الشكل (11-3)
22	..... كابل تحويل من نوع BNC للربط بين راسم الاهتزاز المهبطي و وحدة قياس PV.	الشكل (12-3)

22	مزدوجات الحرارة من نوع $(+NiKr - NiAl) K$ ذات رأس سلبي.	الشكل (3-13)
22	أنبوب مدرج $50 ml$ من نوع الزجاج.	الشكل (3-14)
22	قارورة من الكحول بسعة $1000 ml$.	الشكل (3-15)
23	تجربة ستيرلنغ مع جميع اللواحق التابعة للمحرك.	الشكل (3-16)
	تغيرات فرق الكمون في راسم الاهتزاز المهبطي بدلالة الضغط في وحدة القياس	الشكل (3-17)
25	PV	
	الدارة الكهربائية المزودة بفولطمتر و أمبيرمتر و معدلة لحساب الطاقة الكهربائية	الشكل (3-18)
27	الفعالة	
27	دورة الهواء القياسية ستيرلنغ في مخطط TS و مخطط PV	الشكل (3-19)
31	تمثيل دورة كارنو في مخطط Pv	الشكل (3-20)
37	مقارنة بين دورتين (a) و (b) في المخطط الحقيقي ل PV	الشكل (3-21)
37	طريقة إيجاد الاجراءات ثابتة درجة الحرارة في المخطط الحقيقي ل PV	الشكل (3-22)
38	تغيرات درجة الحرارة T_H و T_L بدلالة عدد الدورات التي ينتجها المحرك	الشكل (3-23)
	تغيرات الفرق في درجة الحرارة $(T_H - T_L)$ بدلالة عدد الدورات التي ينتجها	الشكل (3-24)
39	المحرك	
35	تغيرات العزم الحركي بدلالة عدد الدورات التي ينتجها المحرك	الشكل (3-25)
	تغيرات الطاقة المنتجة و الفعالة و الضائعة في محرك ستيرلنغ بدلالة عدد الدورات	الشكل (3-26)
40	التي ينتجها المحرك	
40	المولد الكهربائي ذو البكرتين بكرة صغيرة و بكرة كبيرة	الشكل (3-27)
	تغيرات الاستطاعة المنتجة الفعلية P_m و الاستطاعة الكهربائية في الدارة	الشكل (3-28)
42	الكهربائية	
42	تغيرات Q_H بدلالة الفرق في درجة الحرارة $T_H - T_L$	الشكل (3-29)
43	طريقة رسم خط متساوي درجة الحرارة المتوسطة و تعيين النقطتين 1 و 2 كمثال .	الشكل (3-30)
47	تغيرات الكفاءة بأنواعها الأول و الثاني بدلالة الفرق في درجة الحرارة	الشكل (3-31)
48	تغيرات الكفاءة النوع الأول بدلالة الفرق في درجة الحرارة	الشكل (3-32)
49	تغيرات الكفاءة النوع الثاني بدلالة الفرق في درجة الحرارة	الشكل (3-33)

المقدمة العامة :

تعرف المحركات الحرارية على أنها الآلة التي تتحول بواسطتها الطاقة الحرارية الناتجة عن احتراق الوقود (سواء كان هذا الوقود سائلا أو صلبا أو غازيا) إلى شغل ميكانيكي يمكن الاستفادة منه في إدارة الآلات المستخدمة سواء في الصناعة أو النقل ...

كما أنها تنقسم إلى قسمين : محركات ذات احتراق داخلي يتم داخل اسطوانة ومحركات ذات احتراق خارجي يتم خارج الاسطوانة ، هذا الأخير هو محل دراستنا وكمثال على ذلك سندرس احد المحركات الهوائية الساخن والذي كان بداية ثورة صناعية ميكانيكية جديدة إضافة إلى ذلك انه يستخدم في تشغيل الآلات البخارية والمضخات الحرارية ألا هو محرك ستيرلينغ ، حيث سنقوم بدراسة نظرية لهذا المحرك مبدأ عمله ، دورته ، أنواعه ، كما سنتطرق إلى دراسة التجريبية وحساب المددود العادي والمثالي لمحرك ستيرلينغ .

الفصل الأول

عموميات في الترموديناميك

يحتوي هذا الفصل على مختلف القوانين و النظريات الخاصة

بالدورات الحرارية في الترموديناميك

- القانون الأول للترموديناميك
 - القانون الثاني للترموديناميك.
 - أنواع الدورات القياسية لمختلف المحركات الحرارية
-

1) مقدمة : الترموديناميك هو فرع من فروع الفيزياء يهتم بوصف المادة ظاهريا وبالخصوص دراسة خصائص الجمل الفيزيائية والماكروسكوبية المتوازنة حراريا ودراسة التبادلات في الطاقة التي تحدث بينها أي بين شكلي الطاقة الأساسين : كمية الحرارة والعمل الميكانيكي

الترموديناميك ناجح جدا في وصف العالم الماكروسكوبي دون الرجوع للمبادئ الأولية للديناميك الجزئي [1]

2) مبدأ الصفر للترموديناميك :

إذا كان نظام A مع نظام ثاني B في حالة توازن حراري , وتوجد B في توازن حراري مع نظام ثالث C , فيتواجد A و C أيضا في حالة توازن حراري [1]

3) الطاقة الداخلية والمبدأ الأول للترموديناميك :

1.3) الطاقة الداخلية : من المعروف أن الطاقة الكلية لجملة ترموديناميكية معزولة و التي تساوي مجموع الطاقة الحركية والطاقة الكامنة هي ثابت للحركة أي أنها تبقى منحفظة في الزمن

مبدأ إنخفاض الطاقة هذا هو قانون كوني يؤدي تطبيقه في الترموديناميك إلى المبدأ الأول للترموديناميك . في الترموديناميك الطاقة الكلية للجملة تسمى بالطاقة الداخلية ونرمز لها ب U . إذن من أجل جملة ترموديناميكية معزولة فإن التغير في الطاقة الداخلية يكون معدوم أي : $dU = 0$ [1]

2.3) المبدأ الأول للترموديناميك :

ينص على أن التغير في الطاقة الداخلية للجملة هو نفسه من أجل كل التحويلات الترموديناميكية التي تربط بين نفس الحالة الابتدائية ونفس الحالة النهائية . هذا يعني بخصوص أن U هو دالة حالة بمعنى أن : dU لا يتعلق بالطريق المتبع بين الحالة الابتدائية والحالة النهائية ويتعلق فقط بالحالة الابتدائية والحالة النهائية بعبارة أخرى توجد دالة U تفاضلها هو dU تفاضل تام حسب [1]

$$\int_C dU = U_f - U_i$$

4) المبدأ الثاني للترموديناميك :

هناك بعض التحويلات الترموديناميكية التي تحقق المبدأ الأول للترموديناميك لكنها لا يمكن أن تحدث بصورة تلقائية في الطبيعة

كمثال نعتبر معدن ساخن موضوع داخل ماء بارد . المشاهد عادة أن الحرارة تنتقل من المعدن الساخن إلى الماء البارد لكن مع الاعتماد فقط على المبدأ الأول للترموديناميك يمكن للحرارة أن تنتقل من البارد إلى الساخن بحيث يزداد المعدن سخونة

ويزداد الماء برودة لكن هذا غير مشاهد في الطبيعة . المبدأ الثاني للترموديناميك يهدف إلى توضيح الاتجاهات التي تنتقل فيها الحرارة [1]

1.4 صيغة كلفن- بلانك : ينص المبدأ على أنه لا يمكن انشاء جهاز حراري ينتج عمل و متصل مع مصدر حراري واحد .

2.4 صيغة كلازيوس : و ينص المبدأ على أنه لا يمكن نقل الحرارة من مصدر بارد إلى مصدر ساخن(عكس ما يحدث في الطبيعة) بدون تقديم عمل للجهاز الذي ينقل الحرارة [1]

3.4 مبدأ كارنو الأول : أي محرك حقيقي غير عكوس تكون له كفاءة η_{irr} أقل من كفاءة المحرك المثالي العكوس لكارنو η_{rev}

و محرك كارنو أقل من الواحد حسب العلاقة التالية :

$$\eta_{irr} < \eta_{rev} < 1$$

4.4 مبدأ كارنو الثاني : كل المحركات العكوسة (محركات كارنو) المتصلة بمصدر ساخن واحد و مصدر بارد واحد لها نفس الكفاءة، حتى و لو اختلفت كمية الحرارة المسحوبة و الحرارة المطرودة . و هذا ناتج من حقيقة أن المردود المثالي لكارنو يعطى بالعلاقة التالية :

$$\eta_{rev} = \eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

5.4 صيغة اوستفالد : إن تصميم محرك ابدئي من النوع الثاني أمر غير ممكن , ويقصد بالمحرك الأبدئي المحرك القادر على تحويل كل الحرارة المأخوذة من مصدر واحد إلى عمل [2].

5) أنواع الدورات القياسية لمختلف المحركات الحرارية

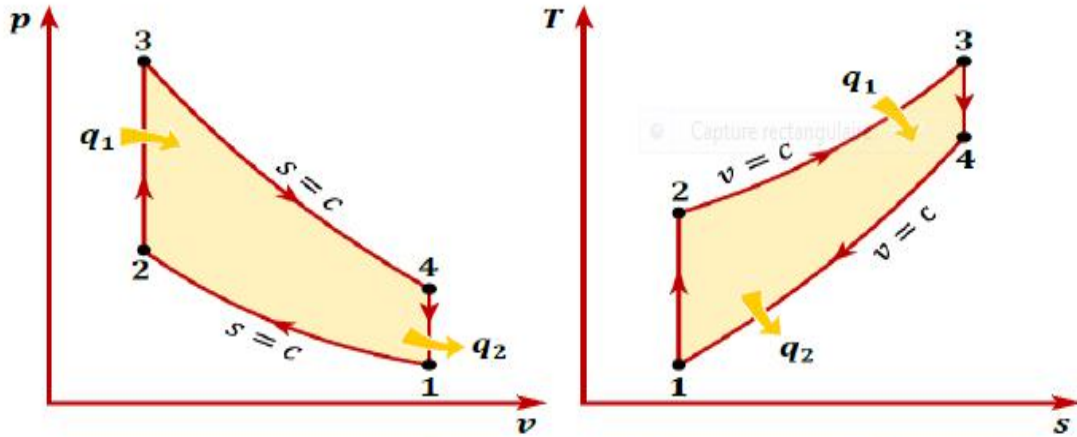
1.5 المحركات ذات الاحتراق الداخلي:

1.1.5 دورة أوتو (*Cycle de OTTO*) [3]

هي الدورة المثالية لمحرك الاحتراق الداخلي ذي الاشتعال بالشرارة

مبدأ العمل : نعتبر التحويلات كلها عكوسة، مع وجود انضغاطين وتمددين في الدورة القياسية أما في الدورة الحقيقية يوجد أربع أشواط و هي : التغذية والنظطاط و التمدد والتصريف كما يحدث انفجارات تجعل الدورة الحقيقية بعيدة من حيث الاجراءات على

الدورة القياسية.



الشكل يبيّن : دورة أوتو على مخططي $T - s$ و $p - v$.

الشكل (1-1) : دورة أوتو على مخططي TS و PV

العملية 1←2 : انضغاط اديباتيكي (كاضومي) $\delta Q = 0$

العملية 2←3 : إعطاء الحرارة تحت حجم ثابت $v = cte$ ايزوكور

العملية 3←4 : تمدد اديباتيكي $\delta Q = 0$

العملية 4←1 : طرح الحرارة تحت حجم ثابت $v = cte$ ايزوكور

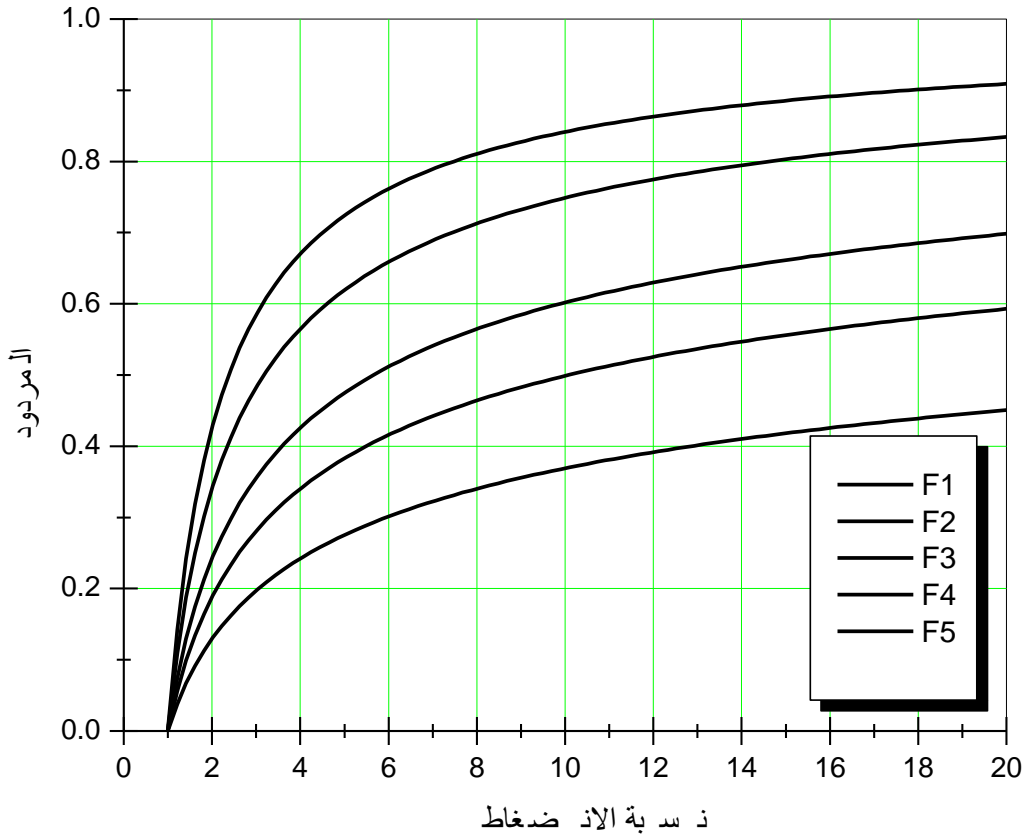
مردود أوتو :

$$\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{mc_v (T_4 - T_1)}{mc_v (T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1}$$

$$\eta_{otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r_v)^{1-\gamma} \dots \dots \dots (1)$$

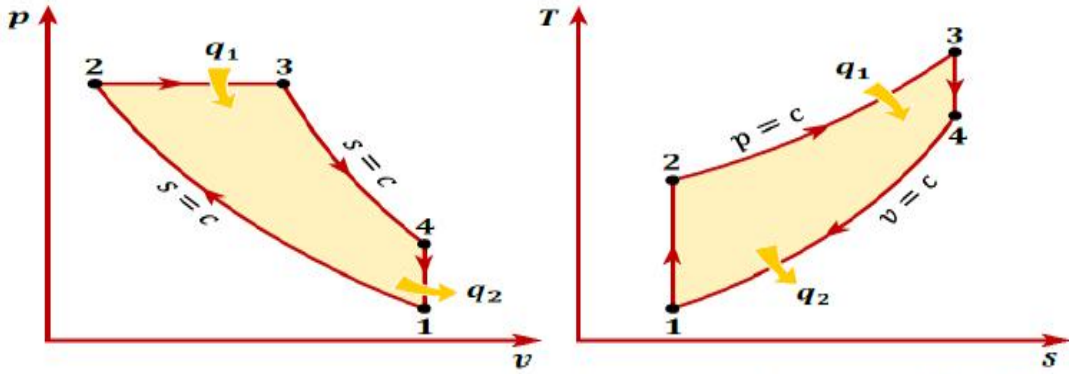


الشكل (1-2): تغيرات المردود الحراري لدورة أوتو بدلالة نسبة الانضغاط و تأثير تغيرات γ

2.1.5 دورة ديزل (Cycle de DIESEL): [3]

هي الدورة المثالية لمحرك الاحتراق الداخلي ذي الاشتعال بالانضغاط

مبدأ العمل: نعتبر التحويلات كلها عكوسة، مع وجود انضغاطين وتمددين في الدورة القياسية أما في الدورة الحقيقية يوجد أربع أشواط و هي: التغذية و الانضغاط و التمدد والتصريف كما يحدث انفجارات تجعل الدورة الحقيقية بعيدة من حيث الاجراءات على الدورة القياسية.



الشكل يبين : دورة ديزل على مخططي $T - s$ و $p - v$.

الشكل (3-1) : دورة ديزل على مخططي PV و TS

العملية 1 ← 2 : انضغاط ادياباتيكي (كاظومي) $\delta Q = 0$

العملية 2 ← 3 : إعطاء الحرارة تحت ضغط ثابت $P = cte$ ايزوبار

العملية 3 ← 4 : تمدد ادياباتيكي (كاظومي) $\delta Q = 0$

العملية 4 ← 1 : طرح الحرارة تحت حجم ثابت $v = cte$ ايزوكور

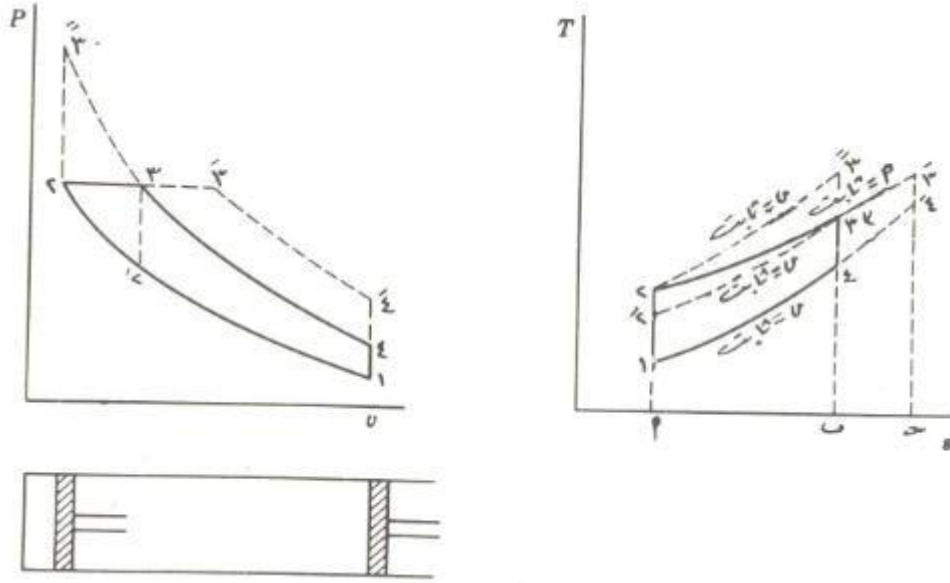
مردود ديزل :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{\gamma T_2(T_3/T_2 - 1)} \dots \dots \dots (2)$$

3.1.5 دورة برايتون :

هي الدورة المثالية لتربين الغاز البسيط. وتربين الغاز البسيط ذو الدورة المفتوحة الذي يستعمل إجراء احتراق داخلي ، وكذلك توربين الغاز البسيط ذو الدورة المغلقة الذي يستخدم عملية انتقال الحرارة كلاهما مبين في الشكل (1-4) ويبين للشكل (1-4)

(4) دورة الهواء القياسية برايتون على خريطتي TS و PV



الشكل (4-1): دورة برايتون في مخططي PV و TS

مردود برايتون :

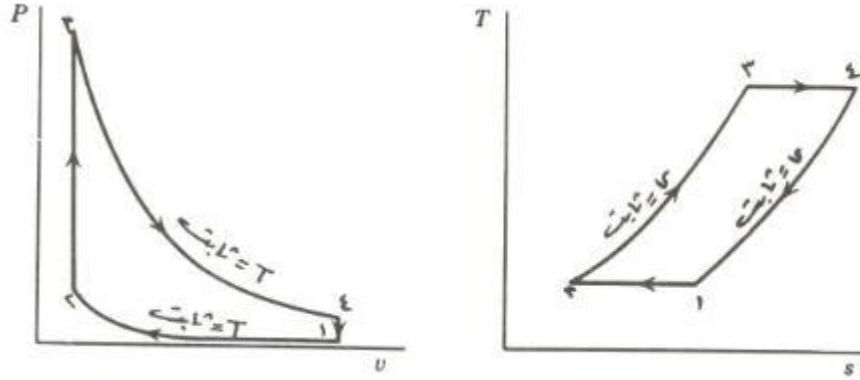
$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \quad , \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \quad , \quad \frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}} \dots \dots \dots (3)$$

4.1.5 دورة ايركسون :



الشكل (1-5) : دورة ايركسون وستيرلينغ في مخططي PV و TS

سنعتبر هاتين الدورتين باختصار ، ليس لأنهما تستعملان بكثرة ، ولكن لأنهما يوضحان كيفية استعمال مسترجع حراري في الدورة ليعطي زيادة ملحوظة في كفاءتهما . وهذا المبدأ مطبق كثيرا في التوربينات ، وكذا في بعض المكينات الترددية ويبين الشكل () دورة ستيرلينغ على خريطتي $P-V$ و $T-S$. تنتقل الحرارة إلى مائع التشغيل بإجراء حجم ثابت (2-3) وكذلك أثناء إجراء تمدد بثبوت درجة الحرارة (3-4) وتطرده الحرارة أثناء إجراء حجم ثابت (4-1) وكذلك أثناء إجراء انضغاط بثبوت درجة الحرارة (1-2)

5.1.5 دورة رانكن :

دورة رانكن هي دورة وظيفتها تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل . تغذى الحرارة من مصدر خارجي إلى حلقة مغلقة، والتي عادة ما تستخدم الماء . تولد هذه الدورة حوالي 80% من الطاقة الكهربائية حول العالم، بما في ذلك جميع منشآت الطاقة الشمسية الحرارية، الطاقة الحيوية ، طاقة الوقود الأحفوري والطاقة النووية . يعود اسمها إلى العلامة الاسكوتلاندي، ويليام رانكن .

الدورة المثالية لمحطة توليد القدرة البخار هي دورة رانكن المبينة في الشكل (6.1) والاجراءات المكونة للدورة هي :

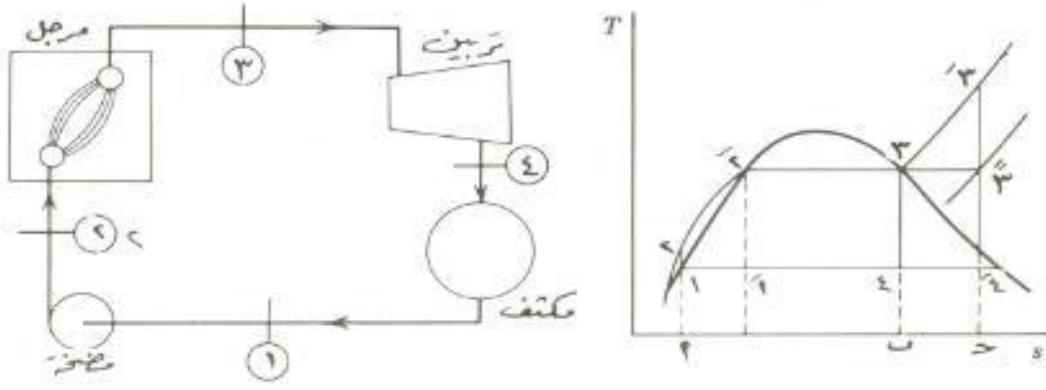
2-1 : إجراء ضخ أدياباتي انعكاسي يتم في المضخة .

3-2 : انتقال الحرارة بثبوت الضغط يتم في المرجل .

4-3 : تمدد أدياباتي انعكاسي في التوربين (أو أي محرك آخر ، كمحرك بخار)

1-4 : انتقال الحرارة تحت ضغط ثابت في المكثف .

وتتضمن دورة رانكن إمكانية تحميم البخار كالدورة (1-4-3-2-1)



الشكل (1.6) : دورة رانكن في مخطط TS ومخطة بسيطة لدورة رانكن

2.5 محركات ذات الاحتراق الخارجي : [3]

1.2.5 المحركات البخارية المكبسية :

مصطلح المحرك البخاري قد يشير أيضا إلى كامل القاطرة البخارية والسكك الحديدية التي تعمل بمحرك بخاري . استخدمت محركات البخار في محطات الضخ ، والقاطرات البخارية والسفن . وتعتبر المحركات البخارية أساسية في الثورة الصناعية وشاهد على ذلك الاستخدام الواسع في تشغيل الآلات في المصانع والمطاحن. على الرغم من اختراع محركات الاحتراق الداخلي والمحركات الكهربائية وحلها محل المحركات البخارية.

و تعتبر التوربينات البخارية تقنياً نوعاً من المحرك البخاري. و هي تُستخدم على نطاق واسع لتوليد الكهرباء حوالي 86 ٪ من مجمل الطاقة الكهربائية في العالم تولد باستخدام التوربينات البخارية.

2.2.5 المحركات البخارية التوربينية:

و هي محطات توليد الطاقة بالبخار التي تعمل بدورة رانكينغ، والمستعملة عادة في المحطات النووية المزودة بمجال ملتصقة مع قلب نووي و مكثفات لتحويل البخار إلى سائل مع وجود مضخة لتدوير السائل وتغذية المرجل الذي بدوره يحول السائل إلى بخار و منه يمكن تدوير التوربين بضغط البخار الناتج من المرجل.

3.2.5 محرك الهواء الساخن (محرك ستيرلينغ) : وهو محل دراستنا في الفصل الثاني .

الفصل الثاني

دراسة محرك ستيرلينغ

يحتوي هذا الفصل على عموميات حول محرك ستيرلينغ و دوراته
الحقيقية والمثالية

- نبذة تاريخية
 - المبدأ العام لمحرك ستيرلينغ
 - أنواع محرك ستيرلينغ
 - عملية الإسترجاع لمحرك ستيرلينغ
 - المقارنة بين محرك ستيرلينغ و المحركات الأخرى
-

1) نبذة تاريخية : [4]

في عام 1816 قام الدكتور روبرت ستيرلينغ باختراع محرك سماه محرك الهواء الساخن , كان هذا المحرك غير انفجاري يستعمل القليل من الوقود ويعطي طاقة ميكانيكية أكبر كم طاقات المحركات البخارية إلى كانت موجودة في ذلك الوقت وكان هذا المحرك تحفة إبداعية إلا أنه اصطدم ببعض الصعوبات بالنسبة لمعدن المحرك حيث إن الجانب الساخن في المحرك يسخن حتى درجة حرارة تجعل المعدن يتوهج ويبقى الحيز الساخن في هذا المحرك عند هذه الدرجة . لأن رأس الاسطوانة لا يمكن أن يبرد في فترة وجيزة بين ترددات القدرة. وعلى الرغم من الصعوبات التي واجهت محرك ستيرلينغ بالنسبة للمعدن فان عشرات الآلاف من تلك المحركات استعملت في تشغيل مضخات المياه وتشغيل الآلات البخارية وتدوير المراوح وامتد ذلك حتى عام 1915 .

ومع الانتشار السريع للكهرباء في أوائل القرن العشرين وانتشار البنزين لوقود الآلات ' فان المحركات الكهربائية ومحركات البنزين أخذت تحتل مكان محركات ستيرلينغ.



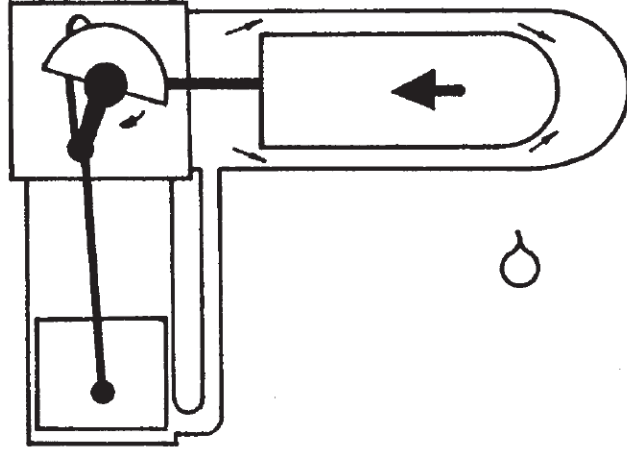
الشكل (2-1) : روبرت ستيرلينغ (1816)

2) المبدأ العام لمحرك ستيرلينغ :

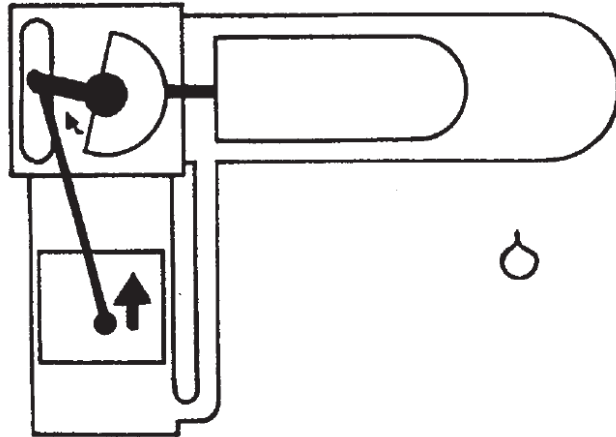
يتلخص مبدأ عمل محرك ستيرلينغ بأن كمية محدودة من مائع التشغيل (الهواء عادة) أو غازات أخرى مثل الهيدروجين أو الليثيوم ' محصورة ضمن حجرة كتيفة مزودة بمكبس تتعرض لتسخين وتبريد دوريين. تؤدي الحركة الدورية للمكبس إلى تمدد مائع التشغيل (المحصور داخل مائع التشغيل) وانضغاطه دورياً ويؤدي تسخين مائع التشغيل نفسه - في بداية عملية تمدده - إلى إزدياد ضغطه على مكبس الطاقة المتراجع خلال الشوط الفعال ' وبذلك تتحول طاقة ضغط مائع التشغيل داخل الحجرة إلى عمل ينتقل إلى محور المحرك . عندما يبرد مائع التشغيل في بداية عملية إنضغاطه يهبط ضغطه على مكبس

الطاقة المتقدمة خلال شوط الإنضغاط وهذا يعني أن العمل الازم لإعادة مكبس الطاقة إلى الوضعية الموافقة للحجم الأصغر لجسم التشغيل سيكون أصغر من عمل التمدد ' وبالتالي سيتوفر على محور المحرك ربح صاف في الطاقة . لتحقيق عمليتي التسخين التبريد ينتقل مائع التشغيل دوريا بين المبادلين الحارين الساخن والبارد. [5]

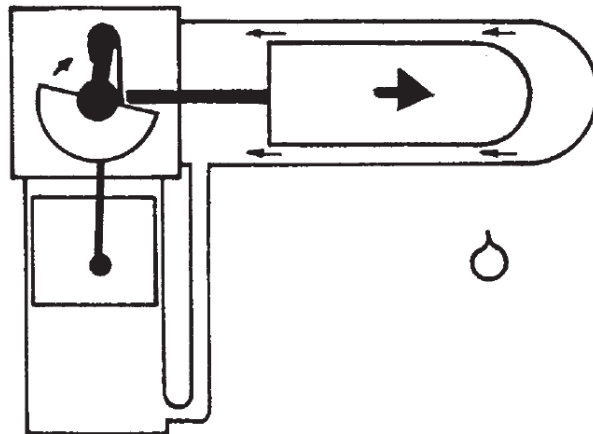
الشوط الأول (تبادل الحرارة) الشكل رقم (5): يتجه الهواء إلى منطقة الهواء الساخنة ويستقبل حرارة q_{12} في ثبوت الحجم بالتبادل . تحدث زيادة في الضغط من p_1 إلى p_2 ، وارتفاع في درجة الحرارة من T_L إلى T_H



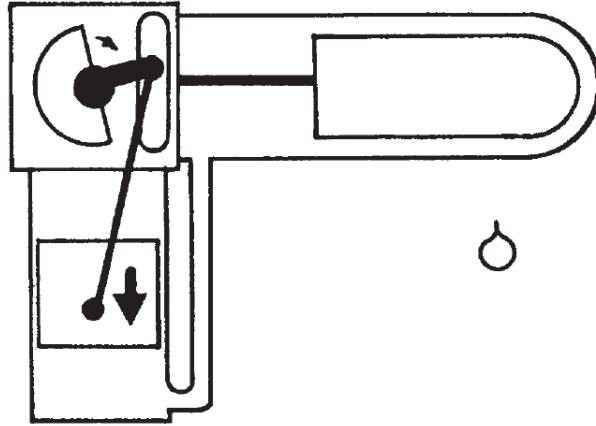
الشوط الثاني (أخذ للحرارة) الشكل رقم (6): يتمدد الغاز ويقدم عملا للمحور من الحجم V_{min} إلى V_{max} وذلك في ثبوت درجة الحرارة T_H ، ويكون قد استقبل حرارة Q_H من المصدر الساخن ، ينخفض الضغط من P_2 إلى P_3 .



الشوط الثالث (تبادل الحرارة) الشكل رقم (7): يتجه الهواء إلى التنطقة الباردة ويفقد حرارة q_{34} في ثبوت الحجم بالتبادل يحدث نقصان في الضغط من p_3 إلى p_4 ، وإنخفاض في درجة الحرارة من T_H إلى T_L



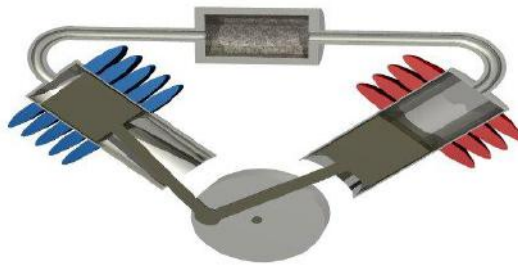
الشوط الرابع (فقدان الحرارة) الشكل رقم (8): ينضغط الغاز وبأخذ عملا من المحور من V_{max} الحجم V_{min} وذلك في ثبوت درجة الحرارة T_L ، ويكون قد فقد حرارة Q_L إلى المصدر البارد ، يرتفع الضغط من P_4 إلى P_1 .



3) أنواع محرك ستيرلينغ :

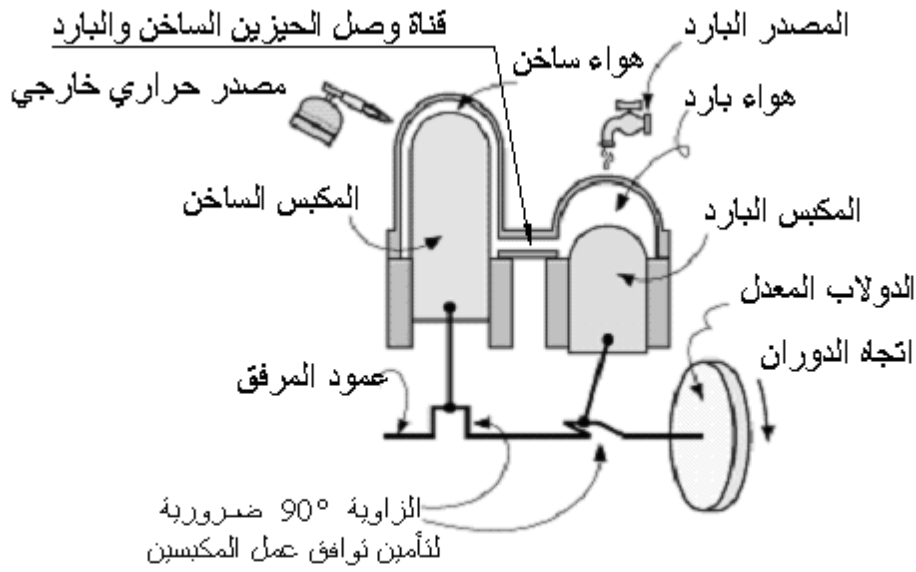
1.3) محرك ستيرلينغ من نوع α :

يتكون محرك ستيرلينغ طراز ألفا من أسطوانتين ومكبسين ، مكبس بارد ومكبس ساخن ، يتم وضع كل أسطوانة في مبدل حراري واحد ساخن ولآخر بارد . [7]



الشكل (2-2) : محرك ستيرلينغ طراز α - [7]

يستخدم هذا الطراز في التطبيقات المتوسطة والكبيرة الاستطاعة . في الشكل رقم 9- أدناه يظهر محرك طراز المكبسين . يسخن الحيز فوق المكبس الساخن باستمرار بواسطة مصدر حراري خارجي ، كما يبرد الحيز فوق المكبس البارد باستمرار ، تؤمن قناة وصل الحيزين الساخن بالبارد الوصل المستمر لأحدهما بالآخر لان اي من المكبسين لا يغلقها عند اي وضعية له . كل من المكبسين هنا هو مكبس طاقة ، ومع ذلك فإن المكبسين معا وخلال عمل المحرك ، يقومان بتحريك (بزيحان) الهواء من اسطوانة إلى أخرى وتؤدي الإزاحة إلى إعطاء الهواء حرارة أو أخذها منه . [3]

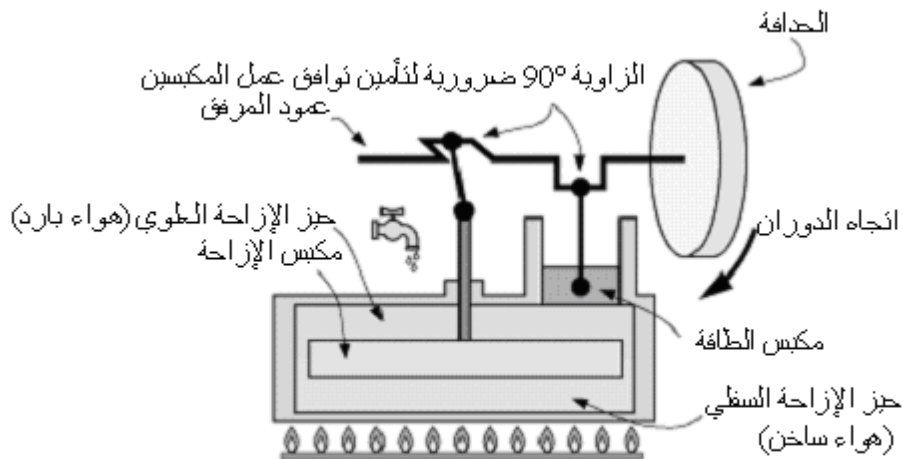


الشكل رقم (9)

الشكل (2-3) : محرك ستيرلينغ طراز المكبسين نوع ألفا α

2.3 محرك ستيرلينغ من نوع β :

يستخدم هذا الطراز في التطبيقات الصغيرة والمتوسطة الإستطاعة . في الشكل أدناه -8- يظهر شكل توضيحي لمحرك طراز بيتا . يسخن الحيز تحت مكبس الإزاحة باستمرار بواسطة مصدر حراري ، في حين يبرد الحيز فوق مكبس الإزاحة باستمرار [3]

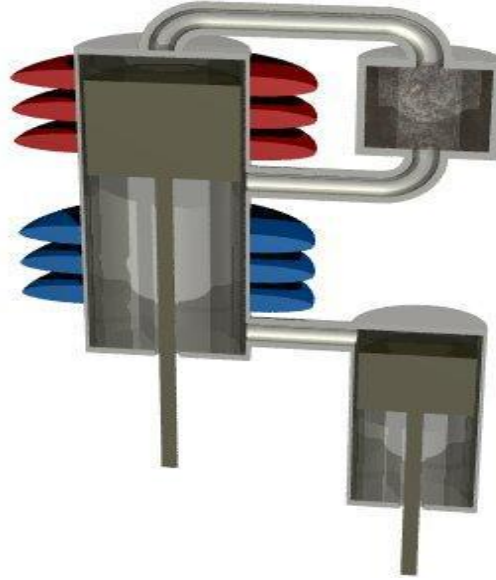


الشكل (10)

الشكل (2-4) : محرك ستيرلينغ طراز بيتا β

3.3 محرك ستيرلينغ من نوع δ :

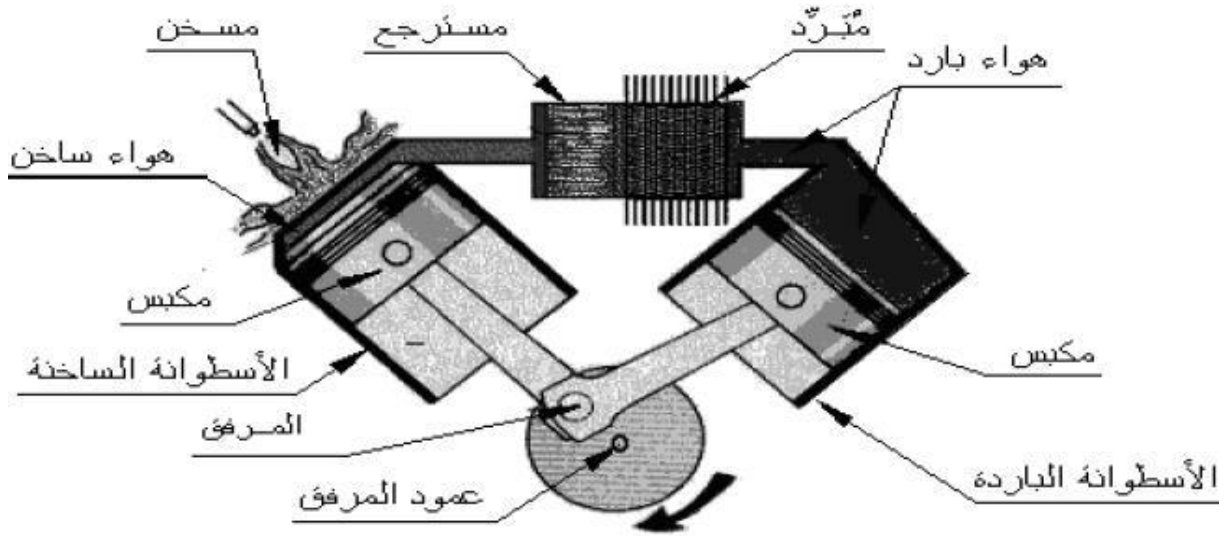
محرك ستيرلينغ نوع غاما يتكون من مكبسين واسطوانتين غير متماثلتين حيث الاسطوانة الأولى أكبر بكثير من الاسطوانة الثانية ، والثانية تعتبر كمساعدة للأسطوانة الثانية [4]



الشكل (2-5) : محرك ستيرلينغ نوع غاما γ [7]

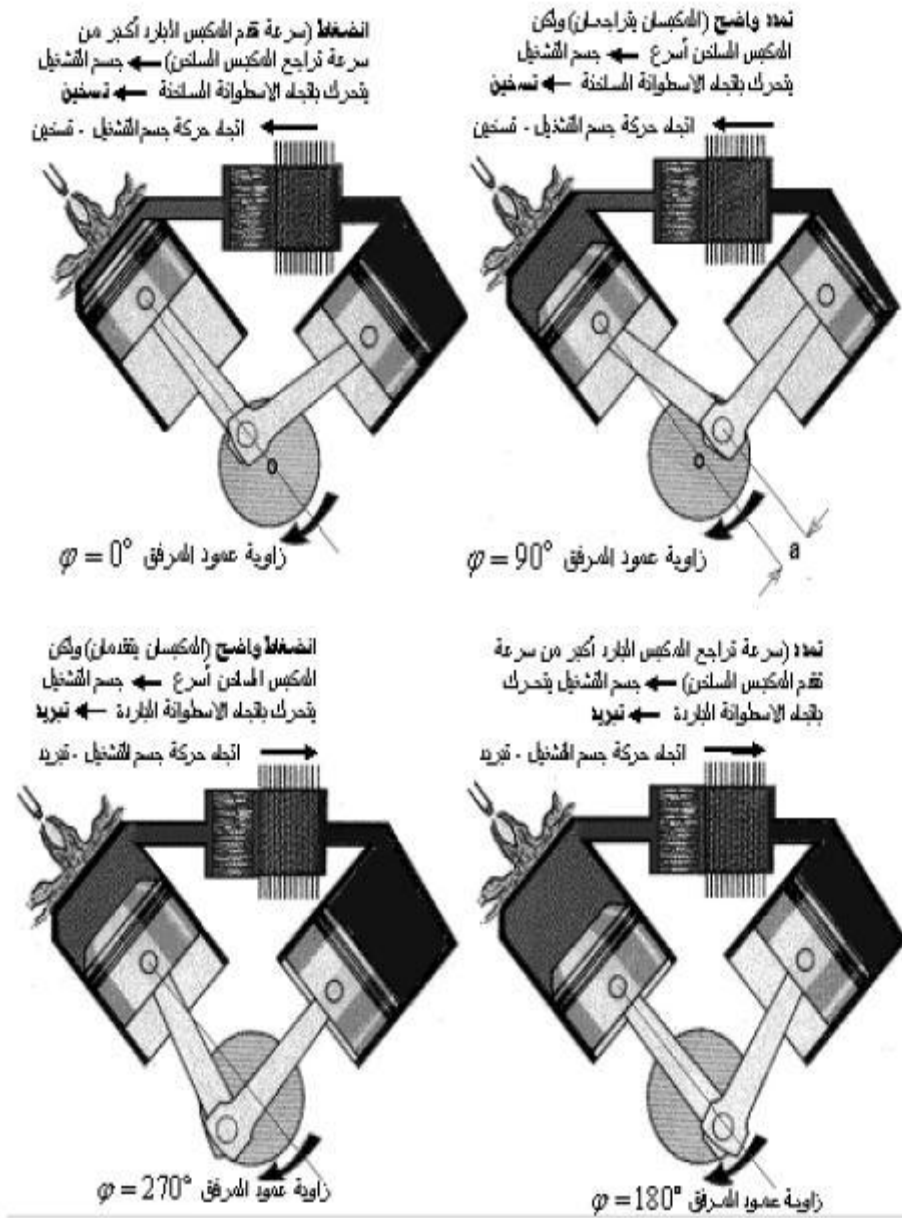
4) عملية الاسترجاع في محرك ستيرلينغ :

لتحويل المحرك طراز المكبسين إلى محرك استرجاعي يجب الاستعاضة عن قناة وصل الحيزين الساخن والبارد بمسترجع ،ويمكن تخيل المسترجع هنا كقطعة أنبوبية مغطاة بألياف معدنية . يمكن أن يحول المحرك طراز β إلى محرك استرجاعي عن طريق استخدام مادة مسامية في تصنيع مكبس الإزاحة (أو تصنيعه على شكل علبه مثقبة جوفاء ومغلقة ومغطاة بالليف المعدني ،وفي هذه الحالة يجب السعي لتمرير كل مائع التشغيل المنتقل بين الحيزين الساخن والبارد عبر مكبس الإزاحة (المسترجع) عن طريق تامين كتامة مقبولة بين مكبس الإزاحة والاسطوانة . الشكل التوضيحي لمحرك ستيرلينغ (الإسترجاعي طراز المكبسين مبين في الشكل (09) [3]



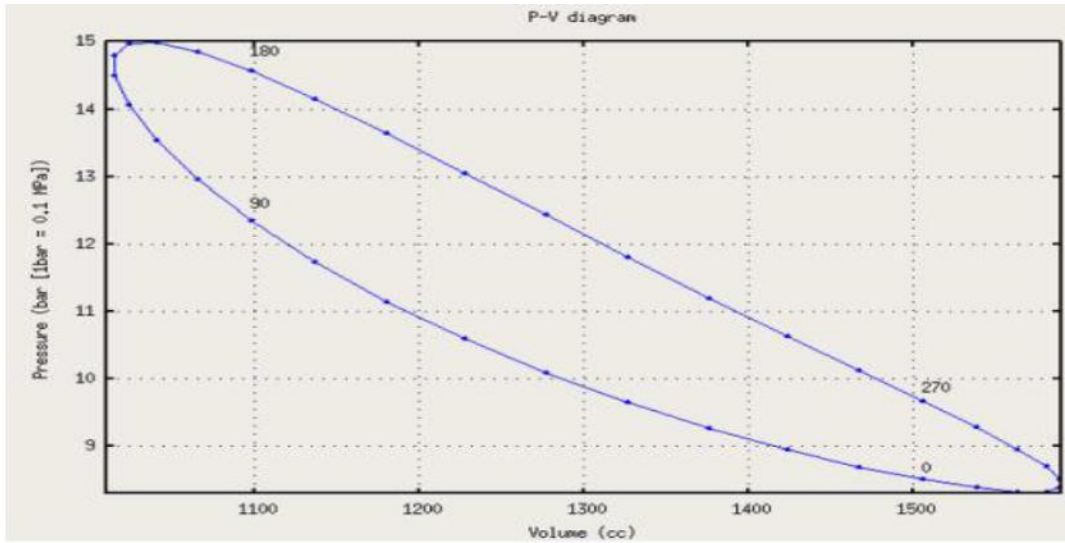
الشكل رقم (2-6): الشكل التوضيحي لمحرك ستيرلينغ طراز α مع مسترجع والمقاد بواسطة عمود مرفق

تظهر الأشكال التوضيحية لأربع وضعيات من الوضعيات الزاوية لعمود مرفق المحرك المبين في الشكل (10) وبسبب الشرح بفارق 90° (ربع دورة) بين كل وضعيتين متتاليتين خلال دورته 1-2-3-4 سيقصر شرح محرك ستيرلينغ من الطراز α على الملاحظات الواردة ضمن الأشكال المبينة على أساس أن قطري المكبسين متساويان و أن سرعة المكبس تابع جيبي لبعده عن منتصف الشوط وتتناقص مع ابتعاده عن هذه الوضعية (المكبس الأقرب إلى منتصف الشوط هو الأسرع)



الشكل (7-2): الأشكال التوضيحية لأربع وضعيات من الوضعيات الزاوية لعمود مرفق المحرك

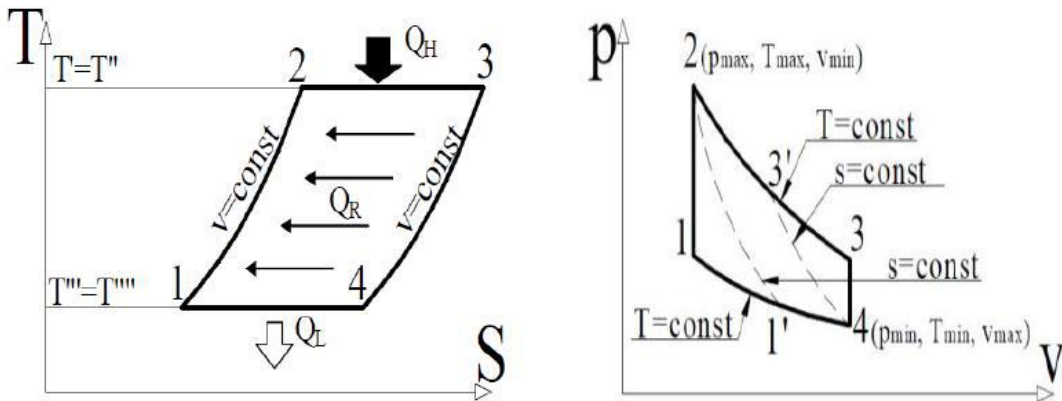
5) دورة ستيرلينغ الحقيقية: [3]



الشكل (2-8): دورة ستيرلينغ الحقيقية

- 1/ إجراء تمدد بثبوت درجة الحرارة $T=cte$ (180° الى 270°): والذي يتم تسخين منطقة التمدد خارجيا .
- 2/ إجراء طرد الحرارة بثبوت الحجم $V=cte$ (0° الى 270°): حيث يمر الغاز على مجدد (المبرد) والذي يبرد الغاز تدريجيا أو يسحب كمية من الحرارة ويتم استخدام تلك الحرارة عن طريق المجدد (المبرد) في الدورة التالية.
- 3/ إجراء انضغاط بثبوت درجة الحرارة $T=cte$ (0° الى 90°): حيث يتم تبريد منطقة الانضغاط خارجيا
- 4/ إجراء إضافة الحرارة بثبوت الحجم $V=cte$ (90° الى 180°): حيث يتم تمرير تيارات الهواء المضغوط على المجدد (المبرد) والذي يستمد طاقة حرارية منه أثناء اتجاهه لمنطقة التمدد .

6) دورة ستيرلينغ المثالية :



الشكل (2-9): دورة ستيرلينغ المثالية في مخططي PV و TS

السهم داخل المنحني الدورة تعبر عن كمية الحرارة المسترجعة Q_R التي تنتقل عبر المسترجع من مائع التشغيل في العملية $4 \leftarrow 1$ إلى مائع التشغيل نفسه في العملية $2 \leftarrow 1$

تحتوي دورة ستيرلينغ المثالية على أربع إجراءات :

1/ إجراء تمدد بثبوت درجة الحرارة $T=cte$ والذي يتم فيه تسخين منطقة التمدد خارجيا

2/ إجراء طرد الحرارة بثبوت الحجم $V=cte$: حيث يمر الغاز على المجدد (المبرد) والذي يبرد الغاز تدريجيا أو يسحب كمية من الحرارة ويتم استخدام تلك الحرارة عن طريق المجدد (المبرد) في الدورة التالية .

3/ إجراء انضغاط بثبوت درجة الحرارة $T=cte$: حيث يتم تبريد منطقة الانضغاط خارجيا .

4/ إجراء إضافة الحرارة بثبوت الحجم $V=cte$: حيث يتم تمرير تيارات الهواء المضغوط على المجدد (المبرد) والذي يستمد طاقة حرارية منه أثناء اتجاهه لمنطقة التمدد .

في الدورة التي صممها ستيرلينغ بالذات لا تطرح الحرارة التي يبندها مائع التشغيل نفسه في العملية $1-2$ وعليه فإن الحرارة Q_{3-4} في العملية $3-4$ ليست حرارة ضائعة والحرارة Q_{1-2} في العملية $1-2$ ليست حرارة مكلفة . كل من الحرارتين يسمى الحرارة المسترجعة Q_R حيث $Q_R = Q_{1-2} = Q_{3-4}$

تبعاً لتكيب المحرك الحقيقي فإن الحرارة المسترجعة لا تنتقل من وإلى المصادر الحرارية الخارجية وإنما تنتقل بين أجزاء المحرك (مدخرات حرارية أو مسترجعات) وبين مائع التشغيل أو أجزائه . وتجدر الإشارة إلى أن بعض محركات ستيرلينغ الحديثة من فئة الاستطاعات الصغيرة منفذ بدون استرجاع.

إذا أنشئنا دورة كارنو $1'-2-3'-4-1'$ المشتركة مع دورة ستيرلينغ بالنقطتين 2 و 4 على المخطط $P-V$ لدورة ستيرلينغ نفسه فإن الدورتان تشتركان :

- مجال تغير الضغط والحجم النوعي مما يعني أن عامل امتلاء مخطط $P-V$ في دورة ستيرلينغ أكبر منه في دورة كارنو.
- مجال تغير درجات الحرارة مما يعني أن المردودين الحراريين للدورتين مطلقتي العكوسية متساويان

7) المقارنة بين محرك ستيرلينغ والمحركات الأخرى :

من الجدير بالاهتمام مقارنة محرك ستيرلينغ مع المحركات الأخرى فمحرك ستيرلينغ : هو محرك حراري يقوم بتحويل الطاقة الحرارية إلى عمل ميكانيكي أي انه يقوم بنفس ما تقوم به المحركات المعروفة الأخرى كالمحركات التي تعمل على الديزل أو البنزين أو لمحركات البخارية .

وكما في المحركات البخارية فان محرك ستيرلينغ هو محرك احتراق خارجي حيث أن الحرارة تأتي من مصدر يقع خارج الاسطوانة وذلك على عكس محركات الاحتراق الداخلي التي يحترق فيها الوقود داخل الاسطوانة . وبما أن محرك ستيرلينغ هو محرك احتراق خارجي فيمكن تصميم محرك للعمل وفق أي نوع من المصادر الحرارية ' بدءاً من الوقود العضوي وإنتهاءً بالاستفادة من الطاقة الشمسية او التسخين الجيو حراري (الاستفادة من حرارة جوف الأرض).

وبخلاف المحركات البخارية فان محرك ستيرلينغ لا يستعمل المراحل التي يمكن أن تنفجر أن لم تتم مراقبتها بشكل جيد ' عند عمل محرك ستيرلينغ على حرارة الشمس أو على التسخين الجيوحراري فان هذا المحرك وبشكل أكيد لا ينتج أي تلوث على الإطلاق وبذلك يمكن اعتباره اقل المحركات انبعاثاً للغازات الضارة , حتى ولم تم تشغيله على البنزين أو الديزل ' وبخلاف المحركات العاملة على البنزين أو الديزل التي لديها الألاف من دورات التوقف والإستمرار في الاحتراق كل دقيقة ' فان محرك ستيرلينغ يقوم بحرق الوقود بشكل باستمرار ومن المعروف انه من الأسهل استمرار اشتعال الوقود بشكل متواصل لإنتاج عوادم غازات غير ضارة عن جعل الوقود يحترق بشكل متقطع ' وللدبرهان على ذلك بشكل بسيط بان تجعل عود ثقاب يشتعل لثوان معدودة ومن ثم تنفخ عليه لينطفئ فلاحظ أن كثيراً من الدخان سينتج بعد الإطفاء أكثر من الدخان المنبعث فيما لو كان العود مستمرا بالاشتعال.

كما أن محرك ستيرلينغ يتميز بانخفاض الضجيج الصادر عنه والتالي هو مناسب للعمل عند توليد الطاقة بالقرب من المكاتب والمجمعات والأماكن التي تتطلب نسبة ضجيج قليلة.

من شرح عمل محركي ستيرلينغ الوارد أعلاه أن التحليل الكيفي لمحرك ستيرلينغ لا يعطي الوضوح نفسه الذي يعطيه التحليل الكيفي لمحرك الاحتراق الداخلي ' والسبب الرئيسي في هذا هو التعامل مع جزئيين متغيري النسبة من مائع التشغيل يخضع احدهما للتبريد في الوقت الذي يخضع فيه الثاني للتسخين ' ومن بين الأسباب الأخرى :

-إمكانية انخفاض الضغط أثناء التمدد إلى ما دون الضغط الجوي فقط في شوط السحب

-بعض الغموض في تحديد بداية ونهاية عمليتي التسخين والتبريد في بعض التصاميم . [3]

الفصل الثالث

الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ

يحتوي هذا الفصل على الدراسة التجريبية و إجراءاتها لمحرك

ستيرلينغ ، وحسابات المردود النظري والمثالي

- الدراسة التجريبية
 - بعض الحسابات النظرية الخاصة بمردود محرك ستيرلينغ و تطبيقها في التجربة
 - الطرق التجريبية لحساب الاعمال الميكانيكية المنتجة و الفعالة و الضائعة في محرك ستيرلينغ
-

1) الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ :

1.1) الأهداف من التجربة : نقوم بدراسة المواضيع التالية

- القانون الأول و الثاني في الترموديناميك.
- انعكاسية الدورات الحرارية الخاصة بمحرك ستيرلينغ.
- دراسة الإجراءات الثابتة الحجم و الثابتة درجة الحرارة و مقارنتها بالإجراءات الحرارية الحقيقية في محرك ستيرلينغ.
- تمدد و انضغاط الغاز داخل محرك ستيرلينغ.
- حساب الكفاءة الفعلية لمحرك ستيرلينغ الحقيقي بادخال الاحتكاكات و مسببات عدم الانعكاسية في المحرك.
- تحول الحرارة إلى عمل .

2.1) مبدأ العمل : بالاعتماد على محرك ستيرلينغ من نوع γ كما هو موضح في الشكل (3-1) ، نلاحظ وجود أداة قياس العزم

الحركي (Torque meter) الذي يعطينا قيمة العمل المقدم من طرف المحرك انطلاقا من معرفة عدد الدورات في الدقيقة التي نحولها إلى عدد الدورات في الثانية و التي تمثل تواتر المحرك ، وكذلك بالاعتماد على راسم الاهتزاز المهبطي الذي يعطينا الدورة الحقيقية في المخطط PV و التي نحسب منها العمل باستخدام المساحات، يمكن المقارنة بين العمليتين المحسوبين لمعرفة العمل الضائع بالاحتكاك، و يوجد مع محرك ستيرلينغ جهاز قياس درجات الحرارة T_H للمصدر الساخن و T_L للمصدر البارد ، و نعتبر المصدر الساخن هو مادة الكحول التي عند احتراقها تعطينا قيمة من الطاقة على شكل حرارة و المقدرة ب :

$$\text{specific thermal power } h = 25 \text{kJ/g}$$

أي كل غرام من الكحول يعطي 25 كيلوجول من الحرارة ، وإذا أردنا قياس الاستطاعة الحرارية المقدمة من طرف الكحول نقوم بالعملية التالية :

$$Q_H = \frac{\text{الحرارة النوعية الكتلية} \times \text{كتلة الكحول}}{\text{الزمن المستغرق}} = \frac{\Delta m \cdot h}{\Delta t} = \frac{\rho \cdot \Delta V \cdot h}{\Delta t}$$

حيث ρ الكتلة الحجمية للكحول التي تساوي $\rho = 0.83 \text{ g/ml}$.

و من بين الطرق لحساب العمل المقدم هو ربط المحرك بمولد كهربائي يغذي دائرة كهربائية بها فولطمتر و أمبيرمتر ، نحسب الإستطاعة الكهربائية انطلاقا من العلاقة التالية

$$P_e = V \cdot I$$

3.1) الأجهزة المستعملة : كل الأجهزة مصنعة من طرف الشركة الألمانية PHYWE

- الشكل (3-1) : محرك ستيرلينغ من نوع γ شفاف مصنوع من الزجاج.
- الشكل (3-2) : وحدة بها محرك و مولد كهربائي.

- الشكل (3-3) : جهاز قياس العزم الحركي (Torque meter).
- الشكل (4-3) : موقد للكحول .
- الشكل (5-3) : وحدة قياس بها الأجهزة التالية : قياس التواتر f ، و جهاز قياس $PVnT$.
- الشكل (6-3) : وحدة قياس PV المربوطة بأسطوانة المحرك.
- الشكل (7-3) : حقنة طبية من النوع الكبير $20ml$.
- الشكل (8-3) : معدلة كهربائية.
- الشكل (9-3) : فولطمتر أمبيرمتر .
- الشكل (10-3) : أسلاك توصيل بألوان مختلفة .
- الشكل (11-3) : راسم الاهتزاز المهبطي.
- الشكل (12-3) : كابل تحويل من نوع BNC للربط بين راسم الاهتزاز المهبطي و وحدة قياس PV .
- الشكل (13-3) : مزدوجات الحرارة من نوع $K (+NiKr - NiAl)$ ذات رأس سلكي.
- الشكل (14-3) : أنبوب مدرج $50 ml$ من نوع الزجاج.
- الشكل (15-3) : قارورة من الكحول بسعة $1000 ml$.

		
الشكل (3-3) : جهاز قياس العزم الحركي	الشكل (2-3) : وحدة بها محرك و مولد كهربائي	الشكل (1-3) : محرك سترلينغ
		
الشكل (6-3) : وحدة قياس PV	الشكل (5-3) : وحدة قياس $PVnT$	الشكل (4-3) : موقد للكحول

4.1 المسائل و المقادير الفيزيائية المراد قياسها :

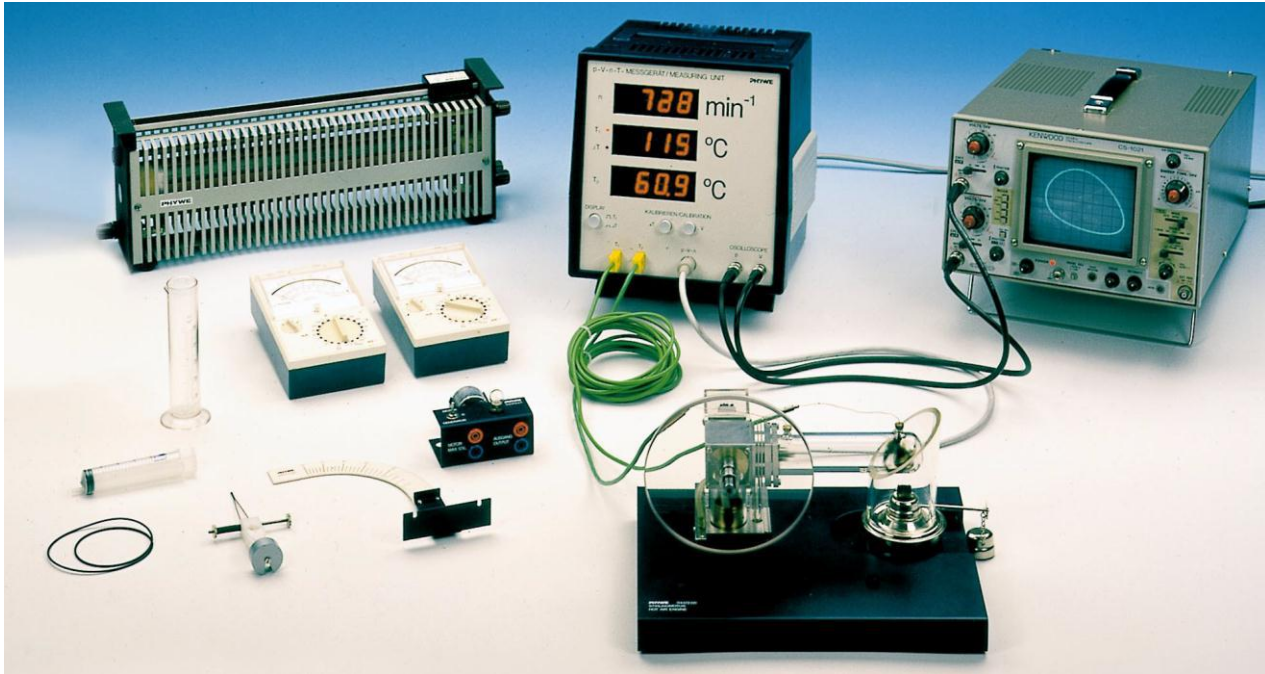
- تحديد الكفاءة الحرارية للمحركات .
- معايرة وحدة قياس PV المربوطة بأسطوانة المحرك.
- تحديد الطاقة الكلية المنتجة من طرف المحرك باستخدام المساحة الموجودة داخل الدورة في مخطط PV في راسم الاهتزاز المهبطي و التي على شكل ليساجو، وذلك بمساعدة أوراق شفافة و ورق مليمترى.
- تقريب قيمة العمل الميكانيكي المقدم من طرف المحرك.
- و حساب العلاقة بين العمل الميكانيكي و تواتر المحرك f ، و ذلك بمساعدة (Torque meter).
- تقريب قيمة الإستطاعة الكهربائية بدلالة تواتر المحرك f ، وذلك بمساعدة الدارة الكهربائية.
- و في العموم تقريب قيمة الكفاءة الطاقوية للمحرك من معرفة المقادير السابقة.

5.1) الإجراءات المتبعة في التجربة : التجربة موضحة في الشكل (3-16) توضع التجربة على طاولة من النوع الكبير وذلك لكثرة اللوحات الموجودة بها . تربط الواح مع بعضها البعض مثل وحدة القياس $PVnT$ مع وحدة القياس PV و راسم الاهتزاز المهبطي وكذلك توضع المزدوجات الحرارية في مكانها، T_H عند الجزء الساخن و T_L عند الجزء البارد من الألمنيوم . نتأكد من ربط الوحدة $PVnT$ مع راسم الاهتزاز المهبطي كما يلي : القناة X مع الحجم و القناة Y مع الضغط. و بعد ذلك نتأكد من الوحدة $PVnT$ تعطينا العرض الخاص بدرجات الحرارة كما يلي : T_1 تمثل درجة الحرارة المرتفعة T_H و T_2 تعطينا درجة الحرارة المنخفضة T_L ، ومن الممكن عرض الفرق في درجة الحرارة ΔT في مكان T_2 . ودرجات الحرارة كلها مقاسة بالوحدة $^{\circ}C$.

بعد تثبيت أسلاك التوصيل نتأكد من المكبس في وضع الحجم الأصغري V_{min} عندها نثبت وضعية النقطة المضاءة في راسم الاهتزاز المهبطي في الصفر . عند تحريك محور المحرك نلاحظ أن النقطة تتحرك على المحور X من الحجم V_{min} إلى غاية الحجم V_{max} لكن التدرجات الموجودة في شاشة راسم الاهتزاز تقاس بالفولط أما في الواقع فيقاس بوحدة الحجم. لدينا حسب المصنع للجهاز

$$V_{min} = 32 \text{ cm}^2 , V_{max} = 44 \text{ cm}^2$$

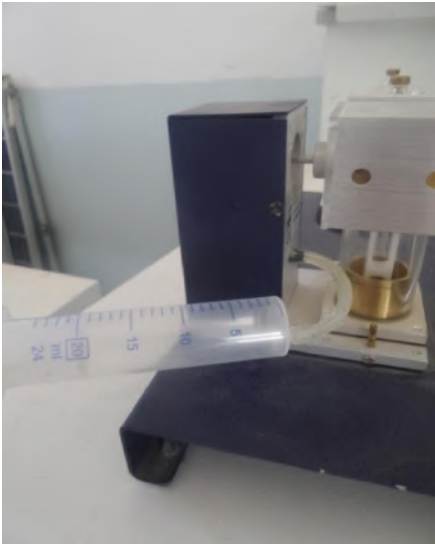
و في هذه الحالة عند عدم تسخين المحرك نلاحظ أن درجات الحرارة متساوية $T_H = T_L$ ، وعدد الدورات $n = 0$ و النقطة المضئية ثابتة في الوسط.



الشكل (3-16) : تجربة ستيرلينغ مع جميع اللوحات التابعة للمحرك

1.5.1) الحرارة المنتجة من طرف المحروقات : يجب قياس حجم الكحول قبل و بعد انتهاء التجربة التي تستغرق 60 دقيقة ، وذلك بمساعدة الأنبوب المدرج و ساعة لقياس الزمن .

2.5.1) معايرة الضغط في وحدة قياس PV المربوطة بأسطوانة المحرك : نستعمل لمعايرة الضغط و الحجم الحقنة الهوائية 20 ml التي تعمل عمل مضخة تزيد من قيمة الضغط في حالة نقصان الحجم و تنقص من الضغط في حالة زيادة الحجم حسب العلاقة الخاصة بقانون بول ماريوت للغازات المثالية : $P.V = Cte$



أول شيء يجب أن يتم هو نزع الأنبوب الواصل بين أسطوانة المحرك و وحدة قياس PV و الموضحة في الشكل (3-6) ، بحيث نترك الأنبوب متصل بوحدة القياس و الجزء الآخر المتصل بالأسطوانة نلصقه في الحقنة الهوائية، في البداية يدخل الهواء للوحدة وتكون قيمته الضغط الجوي الذي يساوي $P_0 = 1013hpa$ ، و نثبت الحقنة في 20 ml توافق قيمة الضغط الجوي، وبعدها نبدأ في تغيير الحجم إلى 19 ml و نحسب دوما قيمة فرق الكمون في الشاشة الخاصة براسم الاهتزاز ، حتى نصل إلى قيمة الحجم 15 ml يصبح لدينا جدول به 7 أسطر خاص بمعايرة وحدة قياس PV في حالة الانضغاط .المرحلة الثانية من المعايرة يتم فيها نزع الحقنة الهوائية من الأنبوب

الواصل و نثبت الحقنة في 15 ml التي توافق في هذه الحالة الضغط الجوي $P_0 = 1013hpa$ و نحسب الكمون الخاص في شاشة راسم الاهتزاز و بعد ذلك نقوم بزيادة الحجم و ندون في كل مرة الحجم و فرق الكمون و نحصل في الاخير على جدول به 7 أسطر خاص بمعايرة وحدة قياس PV في حالة التمدد ، والنتائج مدونة في الجدول (3-1) و ذلك بعد الاعتماد على العلاقة

$$P.V = Cte = 1013 \times 20 = 20260 \text{ في حالة الإنضغاط}$$

$$P.V = Cte = 1013 \times 15 = 15195 \text{ في حالة التمدد}$$

حالة الانضغاط				حالة التمدد			
V ml	P hPa	P - P ₀ hPa	U volts	V ml	P hPa	P - P ₀ hPa	U volts
20	1013	0	2.35	15	1013	0	2.35
19	1066	53	2.51	16	950	- 63	2.15
18	1126	113	2.71	17	894	- 119	1.99
17	1192	179	2.89	18	844	- 169	1.85
16	1266	253	3.10	19	800	- 213	1.71
15	1351	338	3.40	20	760	- 253	1.59

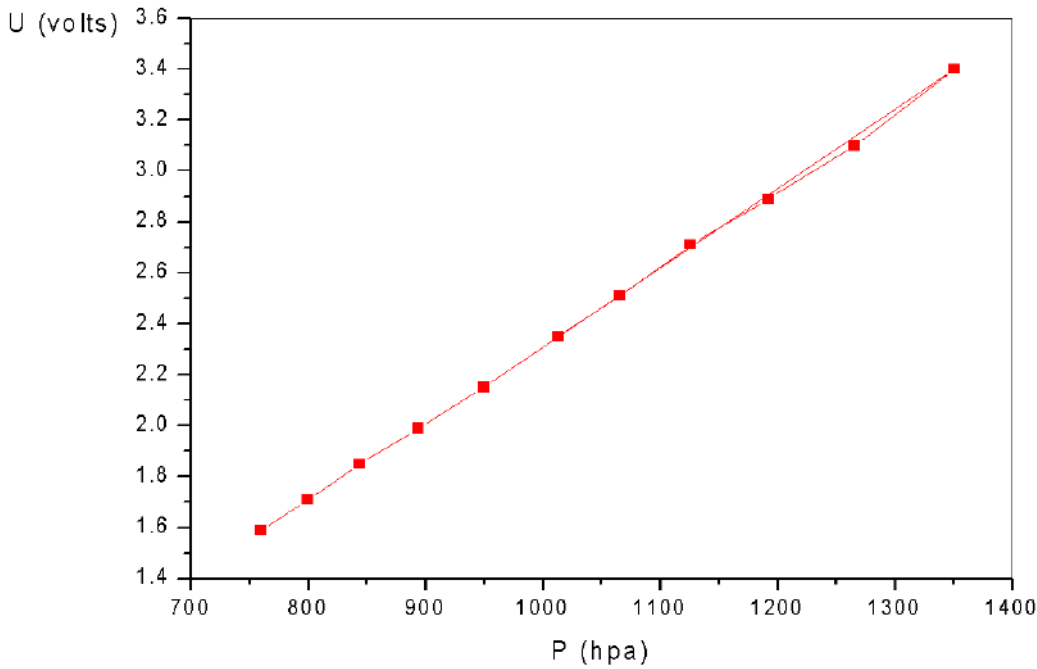
الجدول (3-1) : معايرة وحدة القياس PV لحساب العلاقة بين الضغط و فرق الكمون في شاشة راسم الاهتزاز

و نلاحظ في الجدول أن مقدار الضغط مستنتج من قيمة الحجم الموافقة له و مقدار الثابت Cte الخاص بحالة الانضغاط أو التمدد ، وأن الفرق في الضغط في حالة الانضغاط يزداد كلما قل الحجم ، وينقص هذا الفرق في حالة التمدد بزيادة الحجم، وهذا يتطابق مع مبدأ بول ماريوت للغازات المثالية.

بعد رسم تغيرات U بدلالة P نحصل على المنحني في الشكل (3-17) و نستخرج قيمة التناسب فنجد العلاقة التالية :

$$\frac{\Delta U}{\Delta P} = 3,04.10^{-3} \quad \left(\frac{\text{volts}}{\text{hpa}} \right)$$

و هذا المقدار يعطينا فكرة عن التناسب بين الضغط في المكبس و الكمون في راسم الاهتزاز المهبطي ، حيث أن كل $3,04.10^{-3}$ فولط تمثل 1 هيكتوباسكال .



الشكل (3-17) : تغيرات فرق الكمون في راسم الاهتزاز المهبطي بدلالة الضغط في وحدة القياس PV

الملاحظة : نلاحظ ان البيان على شكل خط مستقيم حيث يتزايد فرق الكمون بزيادة الضغط (تناسب طردي)

في القناة Y الخاصة براسم الاهتزاز المهبطي لها المعيار $0,2 V/div$ ، وأعطت وحدة القياس $PVnT$ المتصلة براسم الاهتزاز

المهبطي شكل ليساجو له القيم التالية : و من الجدول (3-1) الخاصة بالانضغاط و التمدد الذي تم بحقنة الهواء

$$\begin{cases} P_{min} = 760 \text{ hpa} \rightarrow U_{min} = 1,59 \text{ V} \\ P_{max} = 1351 \text{ hpa} \rightarrow U_{max} = 3,40 \text{ V} \\ \Delta P = P_{max} - P_{min} = 591 \text{ hpa} \\ \Delta U = U_{max} - U_{min} \rightarrow \Delta U = 1,81 \text{ V} \end{cases}$$

و منه سلم الرسم الخاص بالمحور Y هو :

$$\frac{\Delta P}{\Delta U} = \frac{591}{1,81} = 327 \left(\frac{\text{hpa}}{\text{V}} \right)$$

و المقدار $\frac{\Delta P}{\Delta U}$ يعطينا فكرة عن كل 1 فولط يوجد فيه 327 هيكثوباسكال من الضغط في أسطوانة المحرك.

و يمكن تمثيل السلم بالتدرجات في المخطط PV :

$$\frac{\Delta V}{\Delta U} = 327. (0,2 V/div) = 65,4 \left(\frac{hpa}{div} \right)$$

3.5.1 معايرة الحجم في وحدة قياس PV المربوطة بأسطوانة المحرك : نستعمل الحجم الأصغري و الحجم الأعظمي :

$$V_{min} = 32 \text{ cm}^2 , V_{max} = 44 \text{ cm}^2$$

في القناة X الخاصة براسم الاهتزاز المهبطي لها المعيار $0,5 V/div$ ، وأعطت وحدة القياس $PVnT$ المتصلة براسم الاهتزاز

المهبطي شكل ليساجو له القيم التالية :

$$\begin{cases} V_{min} = 32 \text{ cm}^3 \rightarrow U_{min} = 0 \text{ V} \\ V_{max} = 44 \text{ cm}^3 \rightarrow U_{max} = 5 \text{ V} \\ \Delta V = V_{max} - V_{min} = 12 \text{ cm}^3 \\ \Delta U = U_{max} - U_{min} \rightarrow \Delta U = 5 \text{ V} \end{cases}$$

و منه سلم الرسم الخاص بالمحور X هو :

$$\frac{\Delta V}{\Delta U} = \frac{12}{5} = 2,4 \left(\frac{\text{cm}^3}{V} \right)$$

و المقدار $\frac{\Delta V}{\Delta U}$ يعطينا فكرة عن كل 1 فولط يوجد فيه 2,4 سنتيمتر مكعب من الحجم في أسطوانة المحرك.

و يمكن تمثيل السلم بالتدرجات في المخطط PV :

$$\frac{\Delta V}{\Delta U} = 2,4. (0,5 V/div) = 1,2 \left(\frac{\text{cm}^3}{div} \right)$$

4.5.1 تمثيل و رسم المخطط PV : في هذه الحالة نستعمل راسم الاهتزاز المهبطي في نمط XY ، مع وجود معيار

للسلم. الفرق في درجة الحرارة يبلغ لأقصى درجة حرارة $80^\circ C$ ، وعند بداية حركة المحرك نشغل المؤقت لحساب الزمن المستغرق في

التجربة ، عند الوصول لنهاية التجربة يكون المحرك قد وصل لـ 900 دورة في الدقيقة، و دورة ستيرلينغ موضحة في شاشة الراسم.

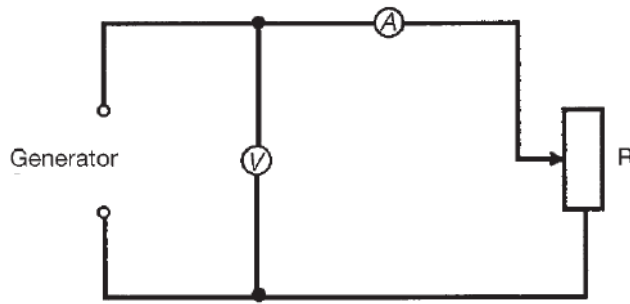
يجب قياس درجات الحرارة و عدد الدورات في الدقيقة عند الثبات.

تسجل درجات الحرارة والتواتر. و الكمون الأعظمي و الأصغري الخاصة بالضغط موضحة على شاشة الراسم . ترسم الدورة على

الورق الشفاف ، تحول القيم من الورق الشفاف إلى الورق المليميتر.

5.5.1 الطاقة الميكانيكية الفعالة : نستعمل لحساب هذه الطاقة أداة قياس العزم الحركي (Torque meter) ، وهي عبارة عن ذراع مدعوم بكتلة في الأسفل و مؤشر في الأعلى يعطي قيمه على إطار مدرج ، ملتصق في محور المحرك ، يثبت هذا الذراع ببرغي يغير الاحتكاك ، ويجب أن يكون الذراع يتحرك بطريقة تجعله ثابت في قيمة معينة من السلم.

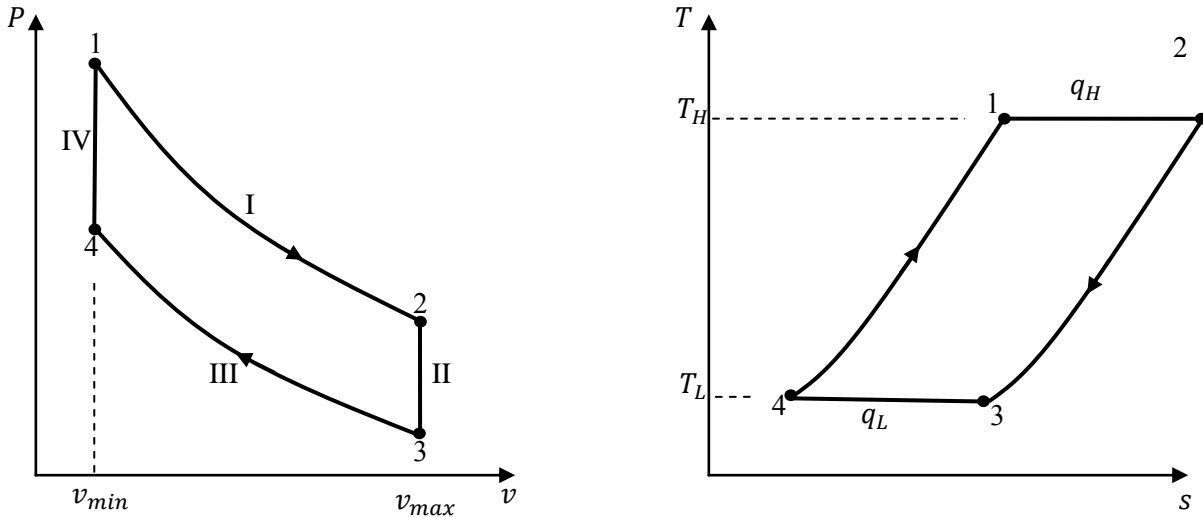
6.5.1 الطاقة الكهربائية الفعالة : نغير (Torque meter) و نضع مكانه وحدة بها محرك و مولد كهربائي الموضحة في الشكل (2-3) ، نلصق الدارة الكهربائية الموضحة في الشكل (3-18) في المولد الكهربائي، حيث نعدل من قيمة المقاومة لضبط شدة التيار الكهربائي و فرق الكمون ، حيث نحسب هذه القيم انطلاقا من معرفة عدد الدورات و درجات الحرارة الخاصة بالتجربة .



الشكل (3-18) : الدارة الكهربائية المزودة بفولطمتر و أمبيرمتر و معدلة لحساب الطاقة الكهربائية الفعالة

2) بعض الحسابات النظرية الخاصة بمردود محرك ستيرلينغ و تطبيقها في التجربة :

يمكن الاعتماد على المخطط PV أو مخطط TS لحساب مردود الدورة الذي يؤول إلى مردود الدورة المثالية لكارنو



الشكل (3-19) : دورة الهواء القياسية ستيرلينغ في مخطط TS و مخطط PV

نعمد في حساب المردود على طريقتين ، الطريقة البيانية بالمساحات التي تمثل حرارة و نستخدم المخطط TS ، والطريقة الثانية بالعلاقات و نستخدم العلاقة العامة للمردود و نعمد على المخطط PV الذي تمثل المساحات فيه عمل منجز أو مستهلك.

الطريقة البيانية : من المعلوم أن المساحة في المخطط TS تمثل حرارة حسب العلاقة التالية :

$$Q_{AB} = \int_{S_A}^{S_B} Tds \quad (joule) \dots \dots \dots (1)$$

$$q_{AB} = \int_{S_A}^{S_B} Tds \quad (joule/kg)$$

1.2 طرق حساب مردود الدورة القياسية بوجود مسترجع مثالي :

من المخطط TS نلاحظ أن الدورة تستهلك الحرارة q_H في الاجراء (1-2) و هي متصلة مع المصدر الساخن، و تطرد الحرارة q_L في الاجراء (3-4) و هي متصلة مع المصدر البارد . لكن الإجراء (2-3) و الاجراء (4-1) إجراءات ثابتة الحجم لديها قدرة استقبال حرارة و اعطاء حرارة ، حيث الاجراء (2-3) هو عبارة عن تبريد ثابت الحجم و بالتالي يعطي حرارة للوسط الخارجي، و الاجراء (1-4) هو عبارة عن تسخين ثابت الحجم يستهلك الحرارة من الوسط الخارجي، و لإلغاء تفاعل الدورة مع الوسط الخارجي في هذين الإجراءين ثابتي الحجم كان لابد من تركيب مبدل حراري يأخذ الحرارة من الاجراء (2-3) و يعطيها للإجراء (4-1)، وبالتالي تصبح الدورة لها اتصال مع الوسط الخارجي فقط بالإجراءين ثابتي درجة الحرارة و هما (1-2) و (3-4) ، والمحرك الذي يعمل بهذه الدورة يعمل بمصدرين فقط بدلا من أربع مصادر، و نقول أن المحرك يعمل بمسترجع مثالي .

و الملاحظ أن دورة كارنو و دورة ستيرلينغ يشتركان في وجود إجرائين ثابتي درجة الحرارة T_H ساخن و T_L بارد، و منه يمكن تحويل دورة ستيرلينغ التي تعمل بمبدل حراري مثالي إلى دورة كارنو باستخدام المساحات في المخطط TS ، حيث المساحة تحت الاجراء (2-3) و (3-4) و تمثل الحرارة المعطاة للمبدل هي نفسها المساحة تحت الاجراء (1-4) و التي تمثل حرارة مأخوذة من المبدل، عند تبديل المساحة الثانية في مكان المساحة الأولى تتحول الدورة من ستيرلينغ إلى كارنو، ويصبح مردودها أكبر مردود يمكن الحصول عليه.

$$\eta_{string} \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

بوجود مسترجع مثالي

الطريقة النظرية : باستخدام العلاقة العامة للمردود و التي هي :

$$\eta_{string} = \frac{\text{الطاقة المنتجة}}{\text{الطاقة المستهلكة}} = \frac{|w_{net}|}{|q_H|} = \frac{|q_H| - |q_L|}{|q_H|} = 1 - \frac{|q_L|}{|q_H|} \dots \dots \dots (2)$$

بالنسبة لدورة كارنو كما سلف الذكر في الفصول السابقة، نعلم على متراجحة كلازيوس :

$$\frac{|q_H|}{T_H} - \frac{|q_L|}{T_L} = 0 \Rightarrow \frac{|q_L|}{|q_H|} = \frac{T_L}{T_H} \dots \dots \dots (3)$$

و منه يصبح المردود الخاص بدورة كارنو المثالية :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{|q_L|}{|q_H|} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \dots \dots \dots (4)$$

أما الدورة العادية لستيرلينغ بدون مسترجع مثالي (أو بوجود مسترجع غير مثالي) سوف تخضع لمتراجحة كلازيوس بالشكل التالي :

$$\frac{|q_H|}{T_H} - \frac{|q_L|}{T_L} < 0 \Rightarrow \frac{|q_L|}{|q_H|} < \frac{T_L}{T_H} \dots \dots \dots (5)$$

و منه يمكن الوصول للمتراجحة التي تقارن η_{carnot} المثالي و $\eta_{strling}$ العادي :

$$\frac{|q_L|}{|q_H|} > \frac{T_L}{T_H} \Rightarrow \begin{cases} 1 - \frac{|q_L|}{|q_H|} < 1 - \frac{T_L}{T_H} \\ \eta_{strling} < \eta_{carnot} \end{cases} \dots \dots \dots (6)$$

و هذا يؤدي للحقيقة التالية التي ينص عليها مبدأ كارنو الأول : كل المحركات غير العكوسة يكون لها مردود أقل من المحرك العكوس و التي تعمل على نفس المصدرين الساخن والبارد.

بالنسبة لمحرك ستيرلينغ المثالي الذي يعمل بمسترجع مثالي، والذي يعطي مردودا مساويا لمحرك كارنو المثالي و العكوس يمكن استخدام الحسابات الخاصة بالعمل في كل اجراء للوصول لعبارة المردود $\eta_{strling}$ ، و باعتبار الهواء داخل المحرك غاز مثالي يخضع للعلاقة التالية $Pv = \bar{R}T$ حيث $\bar{R} = R/M$.

و لدينا الكتلة المولية $M = 29.10^{-3} \text{ kg/mole}$.

و الثابت العام للغازات المثالية $R = 8,31 \text{ J/mole.K}$ ، و منه تكون الأعمال في الإجراءات كما يلي :

الإجراء الأول (1-2) تمدد ثابت درجة الحرارة منتج للعمل w_1 و مستهلك للحرارة q_H من المصدر الساخن :

$$w_1 = \int_{v_1}^{v_2} -Pdv = \int_{v_{min}}^{v_{max}} -Pdv = - \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{\bar{R}.T_H}{v} dv \dots \dots \dots (7)$$

$$\Rightarrow w_1 = \bar{R}.T_H \ln\left(\frac{v_{min}}{v_{max}}\right) < 0 \quad (\text{منتج}) \dots \dots \dots (8)$$

$$q_H + w_1 = \Delta u_{12} = 0 \Rightarrow q_H = -w_1 = \bar{R} \cdot T_H \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right) > 0 \quad (\text{مستهلكة}) \dots \dots \dots (9)$$

ملاحظة : الطاقة الداخلية Δu_{12} في الاجراء (2-1) معدومة لأن المائع غاز مثالي و درجة الحرارة ثابتة ، وحسب مبدأ جول الطاقة الداخلية لغاز مثالي تتعلق بدرجة الحرارة فقط.

الإجراء الثاني (3-2) تبريد ثابت الحجم غير منتج و لا مستهلك للعمل بفضل ثبات الحجم، وغير منتج ولا مستهلك للحرارة للوسط الخارجي بفضل وجود مسترجع مثالي.

$$w_2 = \int_{v_2}^{v_3} -Pdv = \int_{v_{max}}^{v_{max}} -Pdv = 0 \dots \dots \dots (10)$$

الإجراء الثالث (4-3) انضغاط ثابت درجة الحرارة مستهلك للعمل w_3 و طارد للحرارة q_L للمصدر البارد :

$$w_3 = \int_{v_3}^{v_4} -Pdv = \int_{v_{max}}^{v_{min}} -Pdv = - \int_{v_{max}}^{v_{min}} \frac{\bar{R} \cdot T_L}{v} dv \dots \dots \dots (11)$$

$$\Rightarrow w_3 = \bar{R} \cdot T_L \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right) > 0 \quad (\text{مستهلك}) \dots \dots \dots (12)$$

$$q_L + w_3 = \Delta u_{34} = 0 \Rightarrow q_L = -w_3 = \bar{R} \cdot T_L \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right) > 0 \quad (\text{منتجة}) \dots \dots \dots (13)$$

ملاحظة : الطاقة الداخلية Δu_{34} في الاجراء (4-3) معدومة لأن المائع غاز مثالي و درجة الحرارة ثابتة ، وحسب مبدأ جول الطاقة الداخلية لغاز مثالي تتعلق بدرجة الحرارة فقط.

الإجراء الرابع (1-4) تسخين ثابت الحجم غير منتج و لا مستهلك للعمل بفضل ثبات الحجم، وغير منتج ولا مستهلك للحرارة مع الوسط الخارجي بفضل وجود مسترجع .

$$w_4 = \int_{v_4}^{v_1} -Pdv = \int_{v_{min}}^{v_{min}} -Pdv = 0 \dots \dots \dots (14)$$

من النتائج السابقة يمكن استنتاج ما يلي :

$$w_1 = \bar{R} \cdot T_H \ln \left(\frac{v_{min}}{v_{max}} \right) ; \quad w_3 = \bar{R} \cdot T_L \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right)$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_H > T_L \\ |w_1| (\text{منتج}) > |w_3| (\text{المستهلك}) \end{array} \right. \dots \dots \dots (15)$$

العمل الكلي $|w_{net}|$ يعطى بالعلاقة التالية :

$$|w_{net}| = |w_1 + w_3| = \left| \bar{R} \cdot T_H \ln \left(\frac{v_{min}}{v_{max}} \right) + \bar{R} \cdot T_L \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right) \right| \dots \dots \dots (16)$$

$$\Rightarrow |w_{net}| = \left| \bar{R} \cdot T_H \ln \left(\frac{v_{min}}{v_{max}} \right) - \bar{R} \cdot T_L \ln \left(\frac{v_{min}}{v_{max}} \right) \right| \dots \dots \dots (17)$$

$$\Rightarrow |w_{net}| = \left| \bar{R} \cdot (T_H - T_L) \ln \left(\frac{v_{min}}{v_{max}} \right) \right| = \bar{R} \cdot (T_H - T_L) \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right) \dots \dots \dots (18)$$

الحرارة المستهلكة من طرف الدورة هي :

$$q_H = \bar{R} \cdot T_H \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right) \dots \dots \dots (19)$$

و منه المردود الطاقوي للدورة :

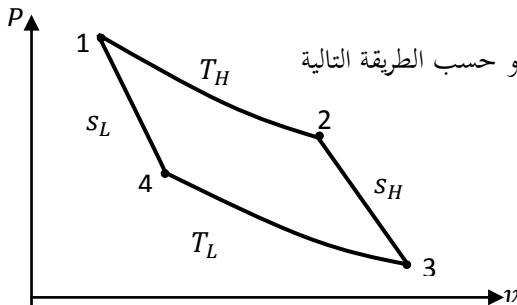
$$\eta_{stirling} = \frac{|w_{net}|}{|q_H|} = \frac{\bar{R} \cdot (T_H - T_L) \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right)}{\bar{R} \cdot T_H \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right)} = \frac{(T_H - T_L)}{T_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \dots (19)$$

و هو مردود كارنو الخاص بمحرك مثالي عكوس .

2.2 طريقة حساب مردود الدورة القياسية بعدم وجود مسترجع مثالي أو وجود مسترجع غير مثالي :

و حسب ما سبق المردود العام يعرف بالنسبة التالية :

$$\eta_{stirling} = \frac{\text{الطاقة المنتجة}}{\text{الطاقة المستهلكة}} = \frac{-W_{net}}{Q_H} = \frac{|W_{net}|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} \dots \dots \dots (20)$$



الشكل (3-20) : تمثيل دورة كارنو في مخطط Pv

1.2.2 حساب مردود الدورة المثالية لكارنو :

نعتمد على المخطط Pv لتوضيح إجراءات الدورة

دورة كارنو هي دورة انعكاسية و مثالية و بالتالي :

$$\begin{cases} w_{net} + q_H + q_L = 0 \\ \frac{q_H}{T_H} + \frac{q_L}{T_L} = 0 \end{cases} \dots \dots \dots (21)$$

$$\begin{cases} -|w_{net}| + |q_H| - |q_L| = 0 \\ + \frac{|q_H|}{T_H} - \frac{|q_L|}{T_L} = 0 \end{cases} \dots \dots \dots (22)$$

$$\begin{cases} \eta_{moteur} = \frac{-w_{net}}{q_H} = \frac{|w_{net}|}{|q_H|} = \frac{|q_H| - |q_L|}{|q_H|} = 1 - \frac{|q_L|}{|q_H|} \dots \dots \dots (23) \\ \frac{q_H}{T_H} = -\frac{q_L}{T_L} \Rightarrow \left| \frac{q_L}{q_H} \right| = \frac{T_L}{T_H} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \eta_{Carnot} = 1 + \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \dots \dots \dots (24)$$

ملاحظة : في دورة كارنو الحرارة q_H منتجة من طرف المحرك من النقطة 1 إلى النقطة 2 حيث : $q_H = q_{12}$

2.2.2 حساب مردود الدورة القياسية لستيرلينغ بعدم وجود مسترجع مثالي أو وجود مسترجع غير مثالي :

$$+|q_{tot}| - |w_{net}| = \Delta u = 0 \dots \dots \dots (25)$$

لدينا من المبدأ الأول :

$$\begin{cases} |q_{tot}| = +|q_H| - |q_L| > 0 \\ |q_H| = |q_{41}| + |q_{12}| = c_v (T_1 - T_4) - |w_{12}| \rightarrow iso(V) + iso(T) \dots \dots \dots (26) \\ |q_L| = |q_{23}| + |q_{34}| = c_v (T_2 - T_3) - |w_{34}| \rightarrow iso(V) + iso(T) \end{cases}$$

← هذه الطريقة ليست سريعة لأنها تحتاج أولاً لحساب العمل

حساب العمل :

$$\begin{cases} w_{34} = \bar{R} T_L \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right) \\ w_{41} = w_{23} = 0 \dots \dots \dots (27) \\ w_{12} = -\bar{R} T_H \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right) \end{cases}$$

$$\Rightarrow w_{net} = w_{12} + w_{23} + w_{34} + w_{41} \dots \dots \dots (28)$$

$$\Rightarrow w_{net} = \bar{R} T_L \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right) - \bar{R} T_H \ln\left(\frac{v_{max}}{v_{min}}\right) \dots \dots \dots (29)$$

$$\Rightarrow W_{net} = - \left[\bar{R} (T_H - T_L) \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right) \right] \dots \dots \dots (30)$$

$$\Rightarrow |W_{net}| = \left[\bar{R} (T_H - T_L) \ln \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right) \right] \dots \dots \dots (31)$$

حيث $\alpha = \frac{v_{max}}{v_{min}}$ تمثل نسبة الانضغاط الخاصة بالدورة ، و محصورة عدديا $1 \leq \frac{v_{max}}{v_{min}} < +\infty$

و منه $\alpha = \frac{v_{max}}{v_{min}} = 1$ تعطي محرك $v_{max} = v_{min}$ محرك خامل أو متوقف عن الحركة لا ينتج عمل ، وبالتالي

$$\eta_{Stirling} = 0 \text{ و منه المردود يصبح } |W_{net}| = 0$$

وكذلك $\alpha = \frac{v_{max}}{v_{min}} \rightarrow +\infty$ تعطي محركا له أحد الحالات :

1. الحجم $v_{max} \rightarrow +\infty$ و الحجم v_{min} محدود ، هذه الحالة تمثل محرك ضخم غير قابل للتنفيذ.

2. الحجم $v_{min} \rightarrow 0$ و الحجم v_{max} محدود ، هذه الحالة تمثل محرك له حجم أصغري منعدم و هي حالة غير قابلة للتنفيذ.

و هذه الحالات تعطي عملا منتج كما يلي : $|W_{net}| \rightarrow +\infty$ و منه $\eta_{Stirling} \rightarrow +\infty$

ولدينا كذلك :

$$\eta_{stirling} = \left| \frac{W_{net}}{q_H} \right| = \frac{|W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}|}{c_v(T_1 - T_4) + \bar{R}T_H \ln(\alpha)} \dots \dots \dots (32)$$

ومنه المردود يكون :

$$\eta_{Stirling} = \frac{|W_{12} + W_{34}|}{c_v (T_1 - T_4) + \bar{R}T_H \ln(\alpha)} \dots \dots \dots (33)$$

و منه لدينا :

$$\eta_{Stirling} = \left| \frac{W_{net}}{q_H} \right| = \frac{\bar{R}(T_H - T_L) \ln(\alpha)}{c_v(T_H - T_L) + \bar{R}T_H \ln(\alpha)} \dots \dots \dots (34)$$

نقسم البسط و المقام على المقدار $\bar{R}(T_H - T_L) \ln(\alpha)$ فينتج لنا ما يلي :

$$\eta_{Stirling} = \frac{1}{\left(\frac{c_v(T_H - T_L) + \bar{R}T_H \ln(\alpha)}{\bar{R}(T_H - T_L) \ln(\alpha)} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{c_v}{\bar{R} \ln(\alpha)} + \frac{T_H}{(T_H - T_L)} \right)} \dots \dots (35)$$

$$\eta_{Stirling} = \frac{1}{\left(\frac{c_v}{\bar{R} \ln(\alpha)} + \frac{T_H}{(T_H - T_L)} \right)} \dots \dots \dots (36)$$

و لدينا العلاقات التالية التي تربط بين γ و c_v و c_p و \bar{R} :

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \frac{c_p}{c_v} \\ \bar{R} = c_p - c_v \\ \frac{\bar{R}}{c_v} = \gamma - 1 \dots\dots\dots (37) \\ \frac{\bar{R}}{c_p} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \end{array} \right.$$

ومنه يكون المردود :

$$\eta_{Stirling} = \frac{1}{\frac{1}{(\gamma - 1) \ln \alpha} + \frac{T_H}{(T_H - T_L)}} \dots\dots\dots (38)$$

لكي يكون مردود ستيرلينغ بعدم وجود مسترجع (أو بوجود مسترجع غير مثالي) يقارب أو يساوي مردود دورة كارنو:

$$\eta_{stirling} \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \longrightarrow \eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \dots\dots\dots (39)$$

بعدم وجود مسترجع

أو وجود مسترجع غير مثالي

3.2.2) شروط تساوي مردود دورة ستيرلينغ القياسية بعدم وجود مسترجع بمردود دورة كارنو :

$$\frac{1}{(\gamma-1) \ln \alpha} = 0$$

يجب توفر الشروط التالية :
لتحقق هذه المعادلة لدينا أحد الحالات :

الحالة 1 : $\alpha = \frac{v_{max}}{v_{min}} \rightarrow +\infty$ تعطي محركا له أحد الحالات :

1. الحجم $\rightarrow +\infty$ و $v_{max} \rightarrow +\infty$ والحجم v_{min} محدود ، هذه الحالة تمثل محرك ضخم غير قابل للتنفيذ.

2. الحجم $v_{min} \rightarrow 0$ و الحجم v_{max} محدود ، هذه الحالة تمثل محرك له حجم أصغري منعدم و هي حالة غير قابلة للتنفيذ.

الحالة 2 : $\gamma = \frac{c_p}{c_v} \rightarrow +\infty$ يعني $c_p \rightarrow +\infty$ (أو) $c_v \rightarrow 0$.

3) الطرق التجريبية لحساب الاعمال الميكانيكية المنتجة و الفعالة و الضائعة في محرك ستيرلينغ :

لمعرفة اداء محرك ستيرلينغ الذي تمت عليه الدراسة كان لزاما علينا دراسة مجموعة من المقادير الطاقوية و هي كما يلي :

- العمل المثالي W_{ideal} الناتج من محرك كارنو المرافق لدورة ستيرلينغ و الذي له نفس المصادر T_L و T_H .
- العمل القياسي W_{net} الناتج من دورة ستيرلينغ.
- العمل الميكانيكي الحقيقي W_{PV} الناتج من الدورة PV في راسم الاهتزاز المهبطي ، والدورة على شكل إهليجي (بما يسمى بشكل ليساجو).
- العمل الميكانيكي الفعال W_m الناتج من محرك ستيرلينغ لتحريك الكتلة الملتصقة بجهاز قياس العزم الحركي.
- الإستطاعة الميكانيكية P_m الناتجة من محرك ستيرلينغ لتحريك الكتلة الملتصقة بجهاز قياس العزم الحركي.
- الاستطاعة الكهربائية الفعالة P_e الناتجة من المولد الكهربائي ذو بكرتين الملتصق بمحرك ستيرلينغ.
- الإستطاعة الحرارية P_H و الناتجة من الكحول والمستهلكة من طرف المحرك.

1.3 طريقة حساب العمل الميكانيكي W_{PV} المنتج من طرف الدورة و المحسوب من المخطط PV في شاشة راسم الاهتزاز المهبطي:

بعد ظهور شكل الدورة على شكل ليساجو في الشاشة و هو شكل إهليجي يختلف عن شكل الدورة القياسية لستيرلينغ، وبعد التحويل إلى ورق مليميترى سوف يكون لدينا دوما الفرق في الحجم هو 12 cm^3 مهما كانت حالة المحرك كعدد الدورات و درجات الحرارة T_L و T_H ، أما الضغط فيزداد البعد بين الضغط P_{min} و P_{max} ومنه نقيس الضغط المتوسط الفعال P_{moy} انطلاقا من النمط DC في راسم الاهتزاز المهبطي للقناة Y ثم نحسب P_{min} و P_{max} بالسنتيمتر و نحولها للبولط ثم نحولها للهيكتوباسكال و بعدها نحسب متوسط الفرق بين القيمتين بالطريقة التالية :

$$P_{moy} = \frac{(P_{max} - P_{min})}{2}$$

ثم نحسب العمل الميكانيكي W_{PV} بالعلاقة التالية :

$$W_{PV} = P_{moy} \cdot \Delta V$$

الوحدة الناتجة تكون كما يلي :

$$[W_{PV}]_{SI} = \text{hpa} \cdot \text{cm}^3 = 100\text{pa} \cdot 10^{-6}\text{m}^3 = 10^{-4}\text{J} = 10^{-1}\text{mJ}$$

و النتائج المحصل عليها تكون قريبة من قيمة العمل الميكانيكي الخاص بالدورة القياسية بنسبة % 10 و هو يعطينا قيمة قياسية لمراجعة كيفية و كمية لأداء المحرك .

2.3) طريقة حساب العمل الميكانيكي الفعال W_m المنتج من طرف الدورة و المحسوب بجهاز قياس العزم الحركي :

عند دوران المحرك بعدد من الدورات n نسجل قيمة العزم الحركي M التي يعطيها (Torque metre) و نحسب منها

$$W_m = 2\pi \cdot M \cdot n$$

و من عدد الدورات في الدقيقة يمكن الحصول على التواتر الذي هو عدد الدورات في الثانية: $f = n/60$

ثم نبحث عن الاستطاعة الميكانيكية الفعالة (الفعلية) المحسوبة بالواط و التي ينتجها المحرك بالعلاقة التالية :

$$P_m = W_m \cdot f$$

ندون القيم بعد مراقبة الجهاز ساعة كاملة من الوقت ، و نسجلها في الجدول (2-3).

3.3) طريقة حساب العمل الميكانيكي الضائع W_{fr} بفعل الاحتكاكات و اللاعكوسية في المحرك :

نعتمد على الفرق بين العمل المحسوب من مخطط PV و العمل المحسوب من العزم الحركي بالعلاقة التالية :

$$W_{fr} = W_{PV} - W_m$$

4.3) طريقة حساب الحرارة المستهلكة P_H من محرك ستيرلينغ خلال التجربة :

المدة المستغرقة من التجربة هي 60 دقيقة ، و حجم الكحول المستهلك يساوي 29 ميلي لتر ، مع الكتلة الحجمية للكحول المقدر بـ 0,83 غرام لكل ميلي لتر ، و لدينا الحرارة الكتلية المنتجة من الكحول تساوي 25 كيلوجول لكل غرام :

$$\Delta t = 3600s ; \Delta V_{alc} = 29 ml ; \rho = 0,83g/ml ; h = 25 kJ/g = 25000 J/g$$

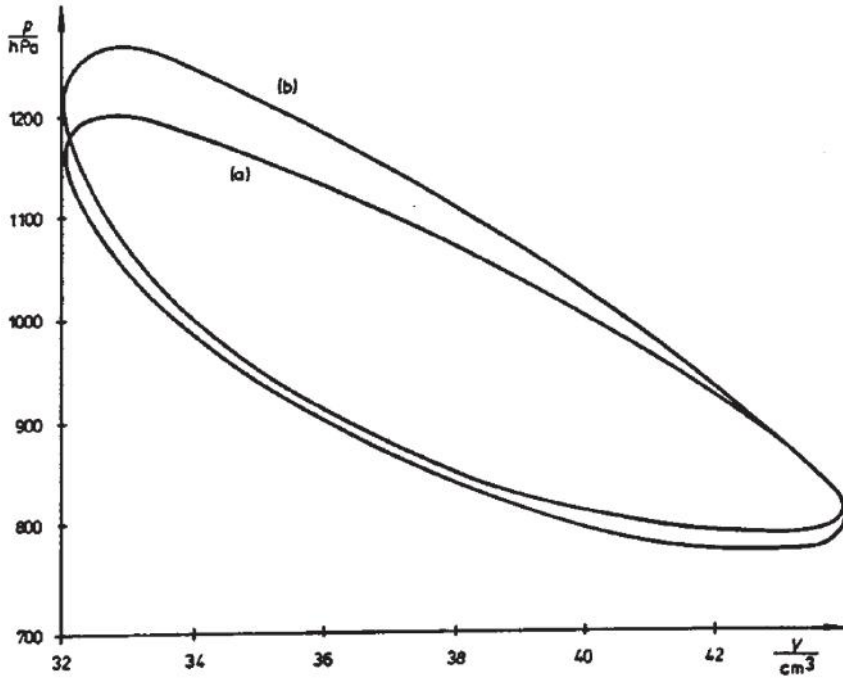
$$\Delta m = \rho \cdot \Delta V_{alc} = 0,83 \cdot 29 = 24,07g = 2,407 \cdot 10^{-2}kg ; \dot{m} = \Delta m / \Delta t$$

$$P_H = \dot{m} \cdot h = \frac{\rho \cdot \Delta V_{alc}}{\Delta t} \cdot h = \frac{0,83 \cdot 29}{3600} \cdot 2500 = 167 W$$

$$Q_H = \frac{P_H}{f} ; \text{exemple exp10} : Q_H = \frac{167}{9,3} = 17,95 J/Kg$$

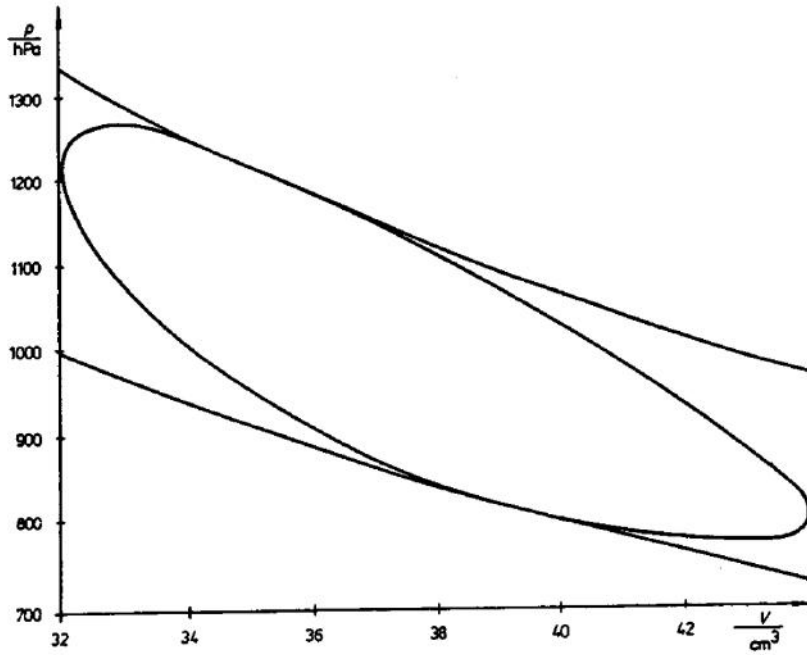
$$q_H = \frac{Q_H}{\Delta m_{air}} = \frac{Q_H}{\rho_{air} \cdot \Delta V_{air}} = \frac{Q_H}{\frac{M_{air}}{V_{mol}} \cdot \Delta V_{air}} = \frac{601200}{22,4 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 10^{-6}}$$

$$q_H = 38\,837\,209\,302.325 \frac{J}{kg} = 38,837 \frac{GJ}{kg}$$



الشكل (3-21) : مقارنة بين دورتين (a) و (b) في المخطط الحقيقي لـ PV

الملاحظة : نلاحظ ان الدورة (a) أصغر من الدورة (b) و السبب راجع لزيادة عدد الدورات في (b).



الشكل (3-22) : طريقة إيجاد الاجراءات ثابتة درجة الحرارة في المخطط الحقيقي لـ PV

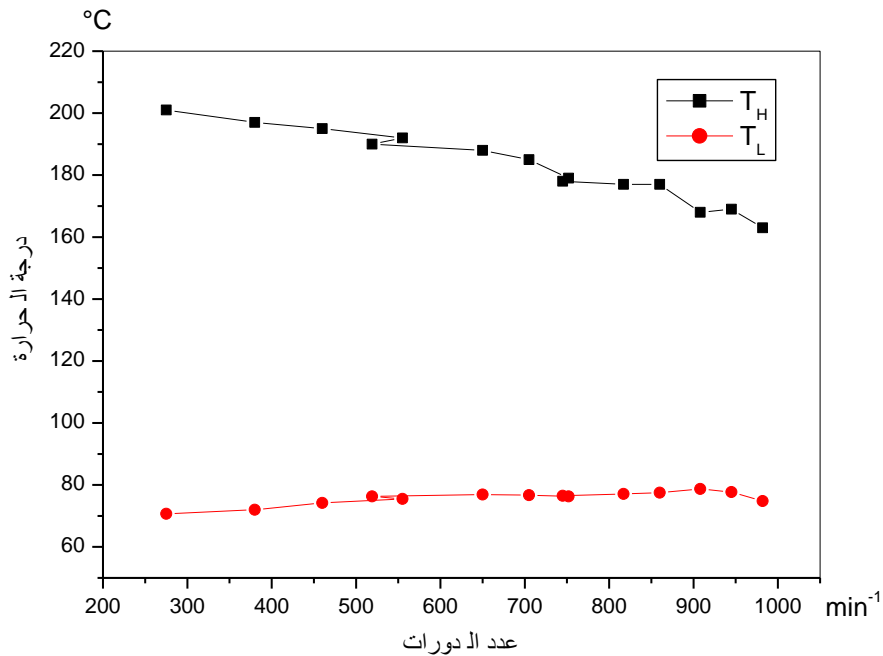
للحصول على دورة الهواء القياسية لستيرلينغ

5.3) النتائج التجريبية الخاصة بحساب العمل الميكانيكي الفعال و العمل الميكانيكي الضائع :

N° exp	$\frac{M}{10^{-3} Nm}$	$\frac{n}{min^{-1}}$	$\frac{T_H}{^{\circ}C}$	$\frac{T_L}{^{\circ}C}$	$\frac{\Delta T}{^{\circ}C}$	$\frac{W_m}{mJ}$	$\frac{f}{Hz}$	$\frac{P_m}{mW}$	$\frac{W_{PV}}{mJ}$	$\frac{W_{fr}}{mJ}$	$\frac{Q_H}{J}$
01	0	982	163	74.8	88.2	0	16.4	0	198	198	10.18
02	2.5	945	169	77.7	91.3	16	15.8	248	201	185	10.57
03	4.0	908	168	78.7	89.3	25	15.1	379	205	180	11.06
04	6.5	860	177	77.5	99.5	41	14.3	583	210	169	11.68
05	8.2	817	177	77.1	99.9	52	13.6	675	216	164	12.28
06	10.5	745	178	76.5	101.5	66	12.4	818	221	155	13.47
06	12.2	752	179	76.3	102.7	77	12.5	959	230	153	13.36
07	14.0	705	185	76.7	108.3	88	11.8	1038	238	150	14.15
08	15.0	650	188	76.9	111.1	94	10.8	1017	239	145	15.46
09	16.8	519	190	76.3	113.7	106	8.7	919	243	137	19.20
10	18.3	555	192	75.5	116.5	115	9.3	1064	245	130	17.96
11	19.5	460	195	74.2	120.8	122	7.7	939	246	124	21.69
12	22.0	380	197	72.0	125.0	138	6.3	871	247	109	26.51
13	22.4	275	201	70.7	130.3	141	4.6	647	235	94	36.30

الجدول (3-2) : تغيرات العمل الميكانيكي الفعال و العمل الميكانيكي الضائع بدلالة عدد الدورات

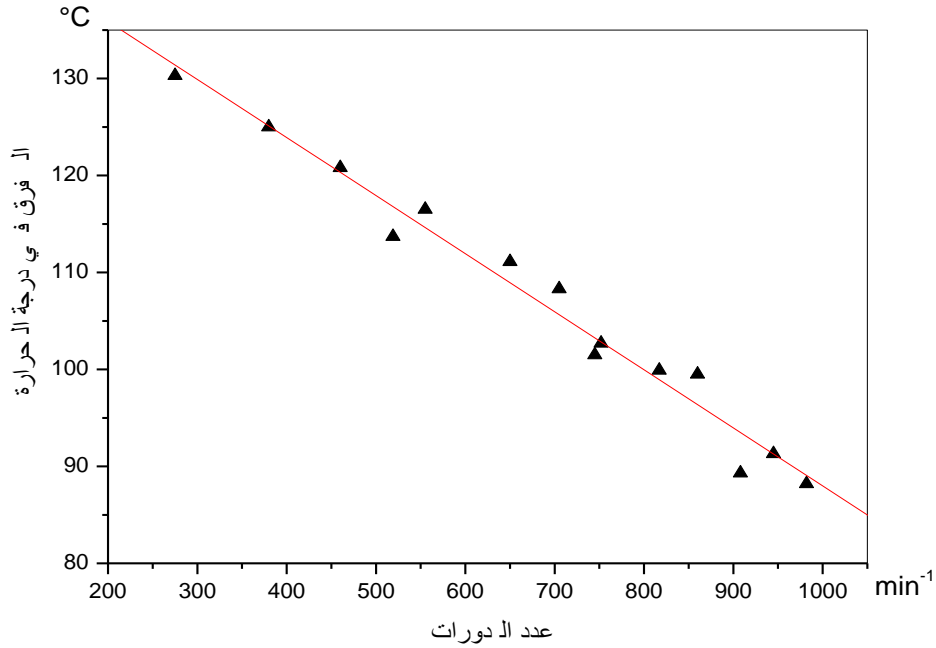
حسب الجدول نلاحظ أن العزم الحركي يزداد كلما زاد عدد الدورات في الدقيقة (أو التواتر).



الشكل (3-23) : تغيرات درجة الحرارة T_H و T_L بدلالة عدد الدورات التي ينتجها المحرك

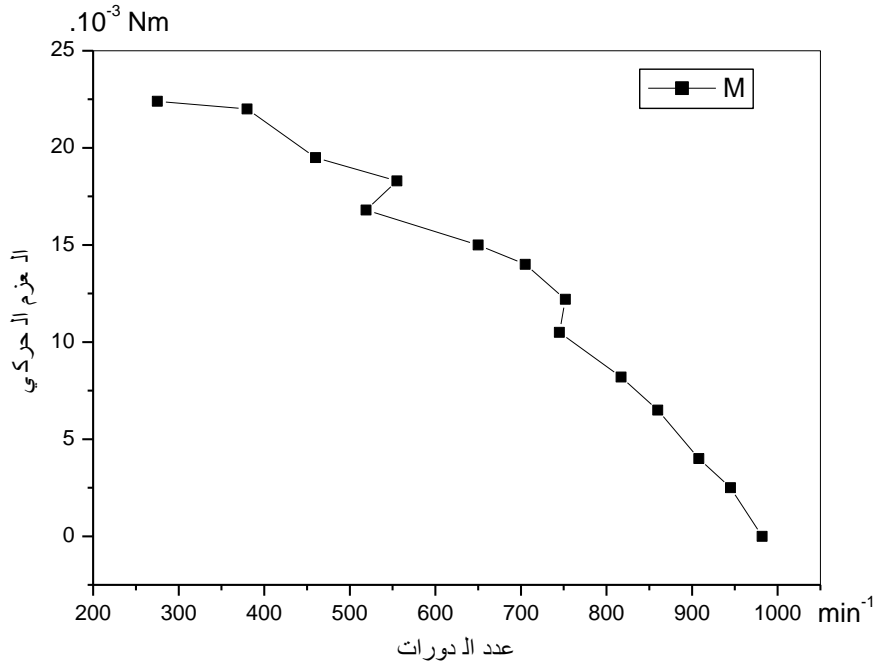
الملاحظة : نلاحظ ان درجة الحرارة الساخنة T_H تتناقص بشكل تدريجي (من 200 الى 170) ، كلما زادت عدد الدورات التي ينتجها المحرك .

أما درجة الحرارة الباردة T_L فتتزايد بشكل تدريجي (من 70 الى 80) ، كلما زادت عدد الدورات التي ينتجها المحرك .



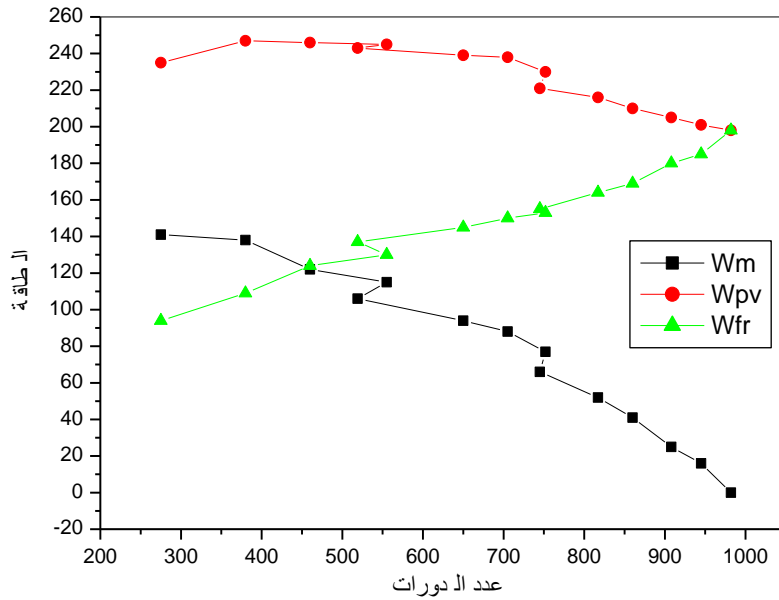
الشكل (3-24) : تغيرات الفرق في درجة الحرارة ($T_H - T_L$) بدلالة عدد الدورات التي ينتجها المحرك

الملاحظة : نلاحظ أن هناك تناسب عكسي بين الفرق في درجة الحرارة وعدد الدورات التي ينتجها المحرك أي كلما زاد عدد الدورات نقص الفرق في درجة الحرارة .



الشكل (3-25): تغيرات العزم الحركي بدلالة عدد الدورات التي ينتجها المحرك

الملاحظة: نلاحظ أن العزم الحركي يتناقص وبشكل غير منتظم كلما زاد عدد الدورات التي ينتجها المحرك.



الشكل (3-26): تغيرات الطاقة المنتجة و الفعالة و الضائعة في محرك ستيرلينغ بدلالة عدد الدورات التي ينتجها المحرك

الملاحظة : نلاحظ أن الطاقة المنتجة (من 240 الى 200) تتزايد قليلا ثم تتناقص بشكل تدريجي وهذا بزيادة عدد الدورات

أما الطاقة الفعالة فهي تتناسب عكسيا مع عدد الدورات ، حيث كلما زاد عدد الدورات نقصت الطاقة الفعالة

أما الطاقة الضائعة فهي تتناسب تناسبا طرديا مع عدد الدورات ، حيث كلما زاد عدد الدورات زادت الطاقة الضائعة

6.3 طريقة حساب الإستطاعة الكهربائية P_e المنتجة في الدارة الكهربائية :



نعتمد على الدارة الكهربائية الموضحة في الشكل (3-18) ، والعلاقة التي نحسب بها الاستطاعة المنتجة هي

$$P_e = U.I$$

حيث U فرق الكمون المحسوب من الفولطمتر ، و I شدة التيار المحسوبة من الأمبيرومتر ، والمولد له بكرتين بكرة صغيرة و بكرة كبيرة حسب الشكل (3-27) حيث ننجز تجربتين و النتائج مدونة في الجدولين (3-4) و(3-5) :

الشكل (3-27) : المولد الكهربائي ذو البكرتين بكرة صغيرة و بكرة كبيرة

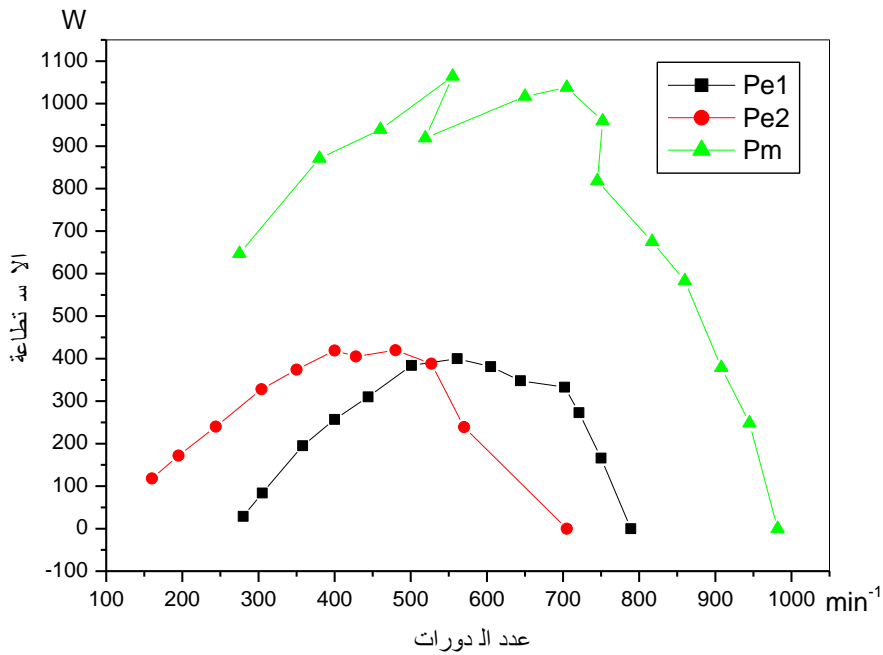
7.3 النتائج التجريبية الخاصة بحساب الاستطاعة الكهربائية الناتجة من المولد الكهربائي:

N° exp	$\frac{n}{min^{-1}}$	$\frac{T_H}{^{\circ}C}$	$\frac{T_L}{^{\circ}C}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{P_{e1}}{mW}$
01	789	155	78.9	0.0	8.5	0
02	750	159	78.9	21.5	7.7	166
03	721	167	78.7	39.0	7.0	273
04	702	168	77.9	50.5	6.6	333
05	644	166	77.1	60.0	5.8	348
06	605	167	74.1	74.0	5.15	381
06	561	173	75.5	93.0	4.4	400
07	501	177	75.4	118	3.25	384
08	444	181	73.6	124	2.5	310
09	400	185	73.6	135	1.9	257
10	358	192	72.2	150	1.3	195
11	305	196	71.3	162	0.52	84
12	280	197	70.9	168	0.17	29

الجدول (3-3) : القيم التجريبية للاستطاعة الكهربائية الناتجة من استعمال البكرة الكبيرة للمولد الكهربائي

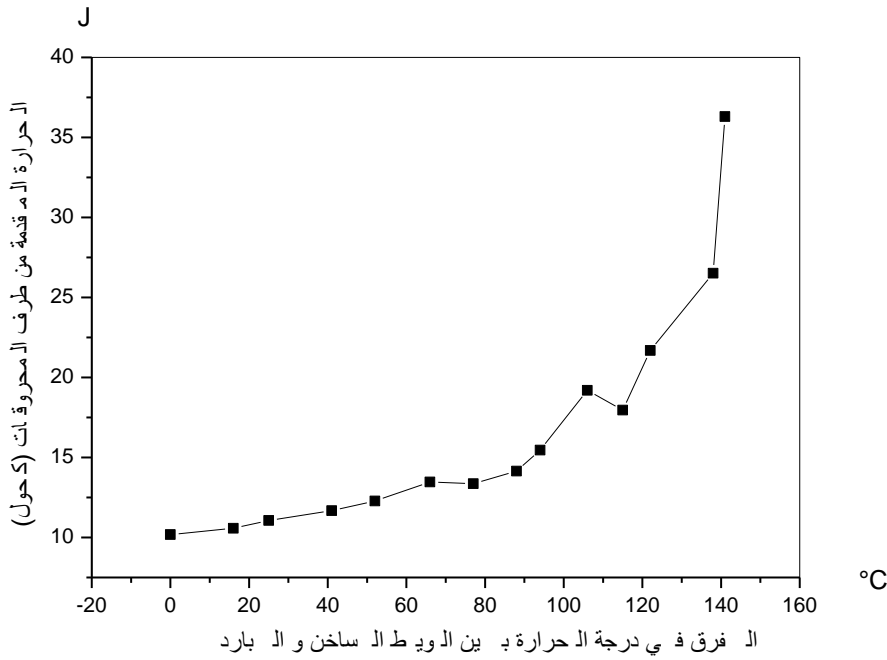
N° exp	$\frac{n}{min^{-1}}$	$\frac{T_H}{^{\circ}C}$	$\frac{T_L}{^{\circ}C}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{P_{e2}}{mW}$
01	705	151	70.9	0	12	0
02	570	157	71.1	26.0	9.2	239
03	527	158	70.1	48.5	8.0	388
04	480	161	68.9	60.0	7.0	420
05	428	168	69.1	67.5	6.0	405
06	400	169	68.5	79.0	5.3	419
06	350	174	67.5	84.0	4.5	374
07	304	176	66.4	91.0	3.6	328
08	244	177	65.2	96.0	2.5	240
09	195	178	64.2	93.0	1.85	172
10	160	185	64.8	91.0	1.3	118

الجدول (3-4): القيم التجريبية للاستطاعة الكهربائية الناتجة من استعمال البكرة الصغيرة للمولد الكهربائي



الشكل (3-28): تغيرات الاستطاعة المنتجة الفعلية P_m و الاستطاعة الكهربائية في الدارة الكهربائية

P_{e1} بكرة كبيرة و P_{e2} بكرة صغيرة للمولد الكهربائي المتصل بمحرك ستيرلينغ.



الشكل (3-29) : تغيرات Q_H بدلالة الفرق في درجة الحرارة $T_H - T_L$

الملاحظة : نلاحظ أن الحرارة المقدمة من طرف المحركات Q_H تتزايد بزيادة الفرق في درجة الحرارة

8.3 حساب عدد مولات الهواء داخل محرك ستيرلينغ :

من أجل معرفة عدد مولات الهواء الموجودة داخل المحرك يجب الاعتماد على العلاقة النظرية للغاز المثالي :

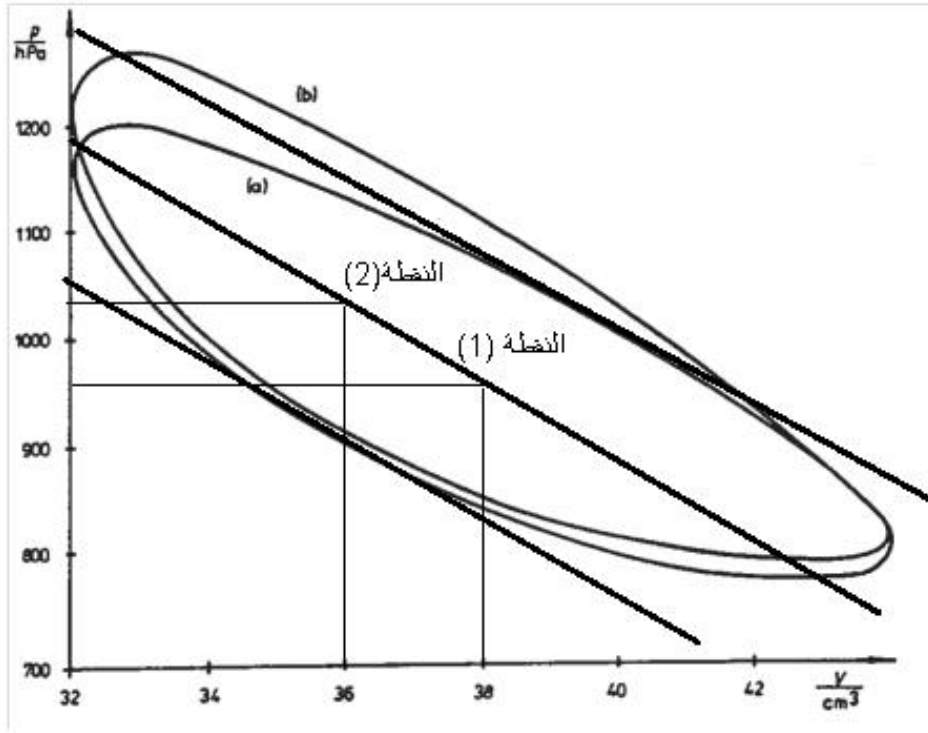
$$PV = nRT \ ; R = 8,31 \text{ J/K.mole}$$

و يجب أخذ قيمة من القيم الخاصة بمنحني PV لرسم الاهتزاز المهبطي، ونعتمد على الجدول (3-2) و نأخذ مثال و ليكن التجربة رقم 10 ، التي لها القيم التالية :

$$\begin{aligned} M &= 18,3 \cdot 10^{-3} \text{ Nm} \\ T_H &= 192 \text{ }^\circ\text{C} = 465\text{K} \\ T_L &= 75,5 \text{ }^\circ\text{C} = 349\text{K} \end{aligned}$$

نعيد رسم الشكل (3-22) ، والذي يمثل تجربتين ، التجربة (a) ، ونرسم خط في الوسط يعطينا قيمة درجة الحرارة المتوسطة T_m بين T_L و T_H :

$$T_m = \frac{T_L + T_H}{2} = \frac{465 + 349}{2} = 407\text{K}$$



الشكل (3-30) : طريقة رسم خط متساوي درجة الحرارة المتوسطة و تعيين النقطتين 1 و 2 كمثال .

تعيين نقطتين كمثال على الدراسة :

$$\text{النقطة 1 : } P = 969 \text{ hpa} , V = 38,0 \text{ cm}^3$$

$$\text{النقطة 2 : } P = 1017 \text{ hpa} , V = 36,8 \text{ cm}^3$$

$$\Rightarrow n = \frac{P.V}{R.T} = \frac{(969.100).(38.10^{-6})}{(8,31).(407)} = 1,08.10^{-3} \text{ moles}$$

9.3 حساب كفاءة محرك ستيرلينغ حسب الاعمال المنتجة و الحرارة المستهلكة :

نظرا لوجود مقادير طاقوية كثيرة في الدراسة يمكن ترتيب الأعمال المنتجة و الحرارة المستهلكة حسب ما يلي :

$$|W_m| < |W_{PV}| < |W_{net}| = |W_1 + W_3| < |W_{carnot}| < |Q_H| \dots \dots \dots (40)$$

و منه يمكن حساب نوعين من الكفاءات :

النوع الاول : يحسب بقسمة عمل على حرارة ، والنوع الثاني يحسب بقسمة عمل على عمل .

1.9.3 المردود الكلي : هو كفاءة المحرك في انتاج العمل الميكانيكي الفعال W_m من الحرارة المنتجة من طرف المحركات Q_H

$$\eta_{tot} = \frac{|W_m|}{Q_H} \dots \dots \dots (41)$$

2.9.3 مردود المحرك جهة التسخين : هو كفاءة المحرك التي تعطي فكرة عن أداء الوسط الخارجي جهة التسخين حيث نقسم العمل المنتج $|W_1|$ في حالة التمدد في اجراء سحب الحرارة في ثبوت درجة الحرارة على الحرارة المقدمة Q_H من طرف المصدر الساخن.

$$\eta_H = \frac{|W_1|}{Q_H} = \frac{nRT_H \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)}{Q_H} \dots \dots \dots (42)$$

3.9.3 المردود المثالي لكارنو : هو كفاءة المحرك في حالة وجود مسترجع مثالي ، وهي أكبر قيمة يمكن الحصول عليها.

$$\eta_c = \frac{|W_{carnot}|}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \dots \dots \dots (43)$$

4.9.3 المردود الداخلي للمحرك : هو كفاءة المحرك التي تعطي مقارنة بين عمل الدورة الحقيقية (شكل ليساجو) و الدورة القياسية لستيرلينغ.

$$\eta_i = \frac{|W_{PV}|}{|W_{net}|} = \frac{W_{PV}}{nR(T_H - T_L) \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)} \dots \dots \dots (44)$$

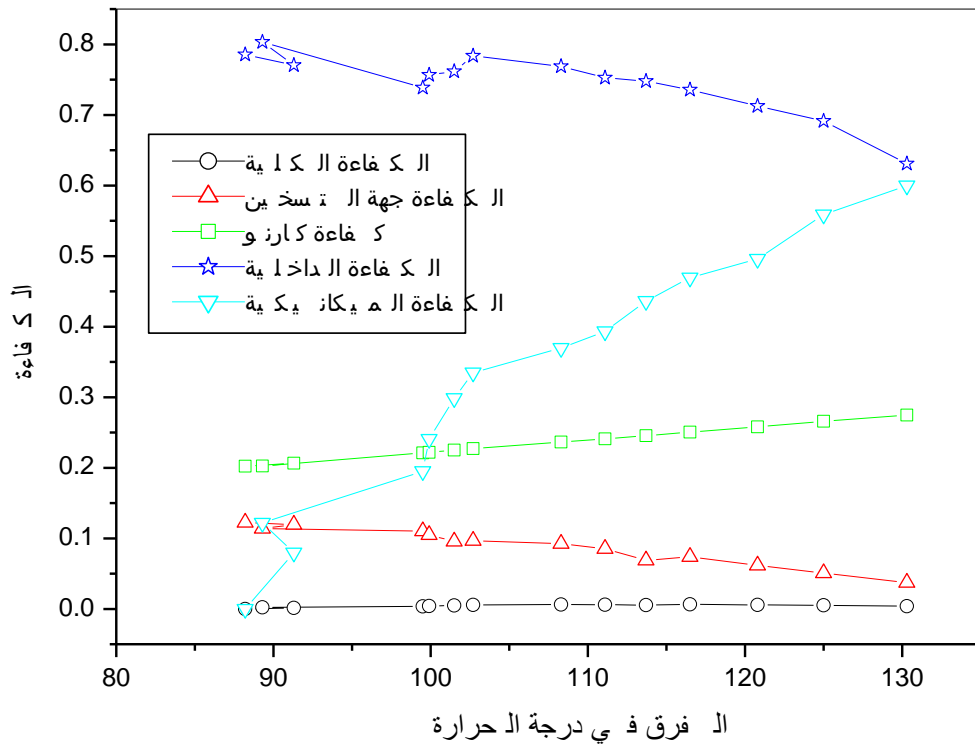
5.9.3 المردود الميكانيكي للمحرك : هو كفاءة المحرك التي تعطي مقارنة بين العمل الميكانيكي الفعال و العمل الميكانيكي الحقيقي الناتج من دورة PV في راسم الاهتزاز.

$$\eta_m = \frac{W_m}{W_{PV}}$$

10.3) النتائج التجريبية الخاصة بحساب كفاءة محرك ستيرلينغ حسب الاعمال المنتجة و الحرارة المستهلكة :

N° exp	$\frac{n}{min^{-1}}$	$\frac{T_H}{^{\circ}C}$	$\frac{T_L}{^{\circ}C}$	$\frac{\Delta T}{^{\circ}C}$	$\frac{W_m}{mJ}$	$\frac{f}{Hz}$	$\frac{W_{PV}}{mJ}$	$\frac{Q_H}{J}$	$\frac{W_1}{J}$	$\frac{W_{net}}{J}$	كفاءة من النوع الأول			كفاءة من النوع الثاني	
											η_{tot}	η_H	η_c	η_i	η_m
01	982	163	74.8	88.2	0	16.4	198	10.18	0.47	0.25	0.0000	0.1225	0.2022	0.7855	0.0000
02	945	169	77.7	91.3	16	15.8	201	10.57	0.48	0.26	0.0015	0.1196	0.2065	0.7703	0.0796
03	908	168	78.7	89.3	25	15.1	205	11.06	0.48	0.26	0.0023	0.1140	0.2024	0.8032	0.1220
04	860	177	77.5	99.5	41	14.3	210	11.68	0.51	0.28	0.0035	0.1102	0.2210	0.7385	0.1952
05	817	177	77.1	99.9	52	13.6	216	12.28	0.51	0.29	0.0042	0.1048	0.2219	0.7565	0.2407
06	745	178	76.5	101.5	66	12.4	221	13.47	0.51	0.29	0.0049	0.0957	0.2250	0.7618	0.2986
06	752	179	76.3	102.7	77	12.5	230	13.36	0.51	0.29	0.0058	0.0967	0.2271	0.7836	0.3348
07	705	185	76.7	108.3	88	11.8	238	14.15	0.53	0.31	0.0062	0.0925	0.2364	0.7689	0.3697
08	650	188	76.9	111.1	94	10.8	239	15.46	0.54	0.32	0.0061	0.0853	0.2409	0.7527	0.3933
09	519	190	76.3	113.7	106	8.7	243	19.20	0.54	0.32	0.0055	0.0689	0.2455	0.7478	0.4362
10	555	192	75.5	116.5	115	9.3	245	17.96	0.55	0.33	0.0064	0.0740	0.2505	0.7358	0.4694
11	460	195	74.2	120.8	122	7.7	246	21.69	0.56	0.35	0.0056	0.0617	0.2580	0.7125	0.4959
12	380	197	72.0	125.0	138	6.3	247	26.51	0.56	0.36	0.0052	0.0507	0.2659	0.6914	0.5587
13	275	201	70.7	130.3	141	4.6	235	36.30	0.57	0.37	0.0039	0.0373	0.2748	0.6310	0.6000

الجدول (3-5): القيم التجريبية الخاصة بحساب كفاءة محرك ستيرلينغ حسب الاعمال المنتجة و الحرارة المستهلكة

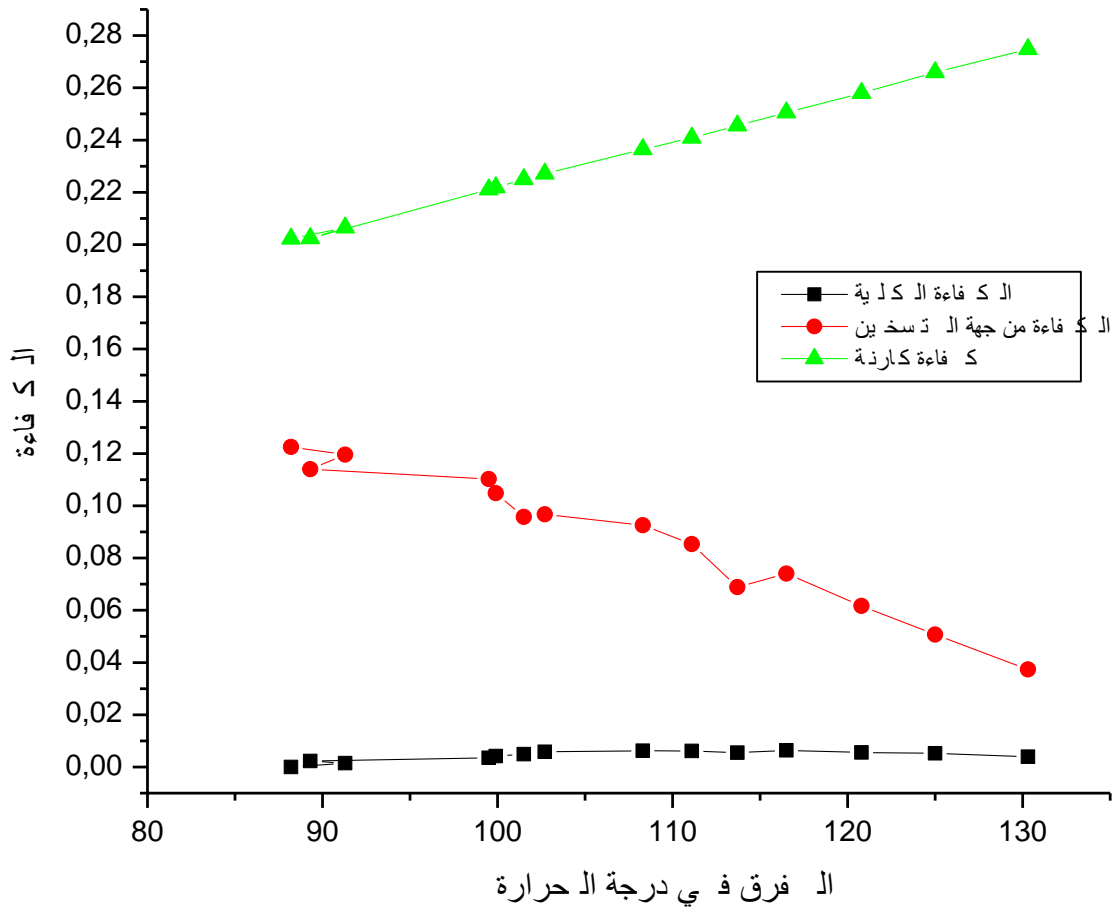


الشكل (3-31): تغيرات الكفاءة بأنواعها الأول والثاني بدلالة الفرق في درجة الحرارة .

من خلال المنحنى نستنتج مايلي :

تزداد كفاءة كارنو والكفاءة الميكانيكية والكفاءة الكلية مع زيادة الفرق في درجة الحرارة.

تنقص الكفاءة الداخلية والكفاءة جهة التسخين مع زيادة الفرق في درجة الحرارة.

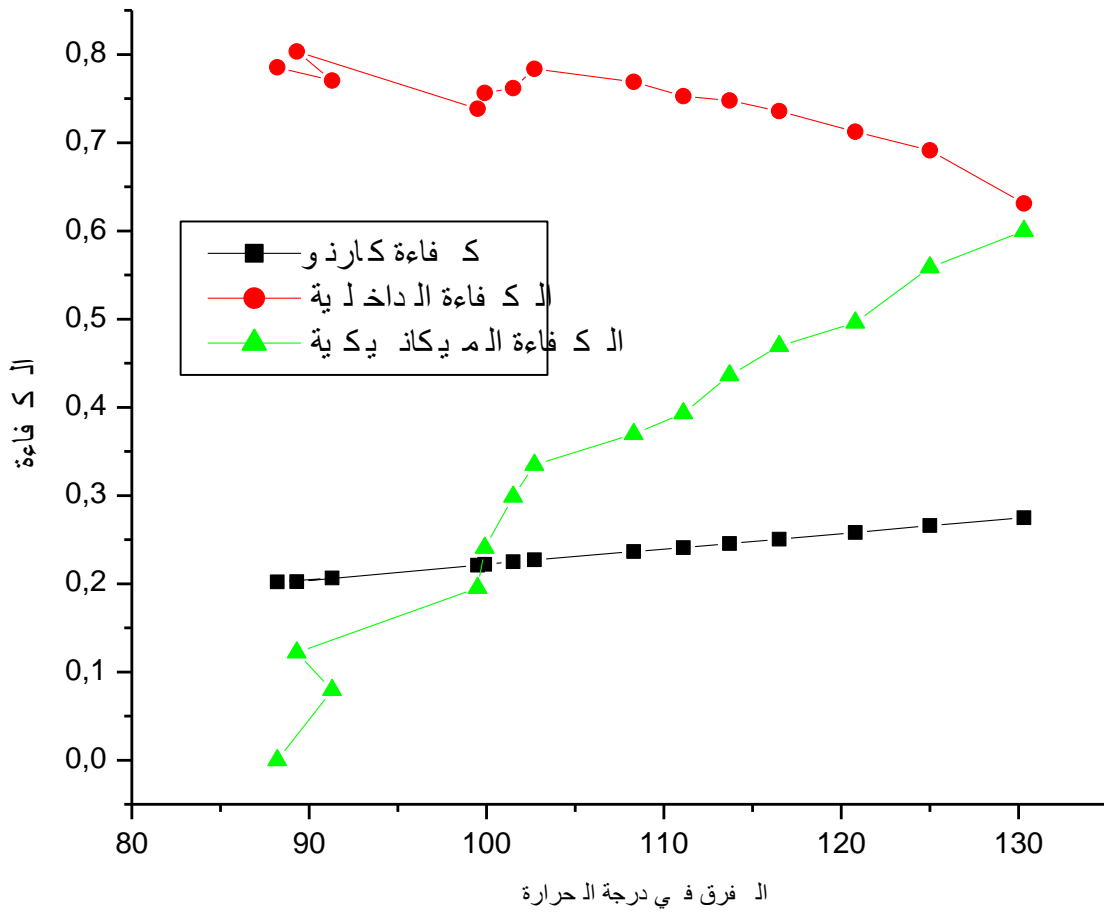


الشكل (3-32) : تغيرات الكفاءة النوع الأول بدلالة الفرق في درجة الحرارة .

من خلال المنحنى نستنتج مايلي :

تزداد كفاءة كارنو والكفاءة الكلية مع زيادة الفرق في درجة الحرارة.

تنقص الكفاءة جهة التسخين مع زيادة الفرق في درجة الحرارة.



الشكل (3-33) : تغيرات الكفاءة النوع الثاني بدلالة الفرق في درجة الحرارة .

من خلال المنحنى نستنتج مايلي :

تزداد كفاءة كارنو والكفاءة الميكانيكية مع زيادة الفرق في درجة الحرارة.

تنقص الكفاءة الداخلية مع زيادة الفرق في درجة الحرارة.

الخاتمة

في هذه المذكرة قمنا بدراسة محرك ستيرلينغ من حيث مبدأ عمله، أنواعه، واستخداماته كما قمنا بالمقارنة بين المردود المثالي والحقيقي لمحرك ستيرلينغ .

لإنجاز هذه الدراسة استخدمنا دورتين ستيرلينغ و كارنو التي تترجم مقدار العمل الناتج من خلال معادلات رياضية .

كانت الفروق بين النتائج المثالية كبيرة جدا مقارنة بالنتائج الحقيقية وهذا لوجود عدة معيقات أهمها وجود احتكاكات وعدم كون النظام غير معزول حراريا، وكذا لوجود عدة ارتيابات في دقة القياس وهذا عائد لعدم دقة الأجهزة وبساطة الأدوات المستعملة وكذا كمية المحروقات المتذبذبة .

في النهاية توصلنا إلى أن المردود المثالي (مردود كارنو) ذو كفاءة عالية وهو أقل من الواحد والمردود العادي والذي يجمع بين عدة كفاءات (المردود الميكانيكي، المردود جهة التسخين، المردود الداخلي، المردود الكهربائي، المردود الكلي) أقل من مردود كارنو .

قائمة المراجع :

[1] : كتاب الترموديناميك والميكانيك الإحصائي - باديس ابيديري - معهد الفيزياء جامعة باجي مختار - عنابة الجزائر -

ربيع 2015

[2] : مختصر قوانين الترموديناميك الطبعة الثانية (طبعة محسنة) - كلية الهندسة التقنية بطرطوس - إعداد محمد عبد

الله الحسن - سنة 2014

[3] : مشروع دراسة محرك ستيرلينغ - من إعداد الطلاب : محمد الزحيلي - ماهر القليح - ياسر الحمد - تحت اشراف

مفيد هلال - سنة 2006 - 2007

[4] : mémoire - l'application de l'énergie solaire au moteur stirling - réalisé

par - zaoui khalil et alami fayçal - encadré par le professeur C.PRAT année

scolaire 2014/2015

[5] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/moteurstirling.08/05/2017> a20:36min

[6]: phwe : physique with expériences

الملخص :

يهدف عملنا الى مقارنة المردود المثالي بالمردود العادي لمحرك ذو احتراق خارجي (محرك ستيرلينغ) ، حيث توصلنا من خلال الدراسة التجريبية إلى أنه يوجد فرق بين المردود المثالي و المردود العادي لمحرك ستيرلينغ ، حيث أن المردود المثالي الذي يمثل مردود كارنو η_{carnot} ذو كفاءة عالية أقل من الواحد ، و أكبر من المردود العادي الذي ينقسم إلى نوعين : النوع الأول يمثل المردود الكلي η_{tot} والمردود من جهة التسخين η_H وهو عمل على حرارة أي أثناء وجود ضياعات ، والنوع الثاني الذي يمثل المردود الداخلي η_i والمردود الميكانيكي η_m

$$|\eta_{tot}| < |\eta_H| < |\eta_{carnot}| < 1 < |\eta_i| < |\eta_m|$$

Résumé :

Notre travail a pour but de comparer le rendement normal par rapport le rendement idéal pour un moteur a combustion externe (moteur stirling) , ou nous sommes arrivés par l'étude expérimental qu'il ya une différence entre le rendement normal et le rendement idéal , sa chenet que le rendement carnot supérieur au rendement normal .

$$|\eta_{tot}| < |\eta_H| < |\eta_{carnot}| < 1 < |\eta_i| < |\eta_m|$$

Abstract :

This work aims to compare the ideal output and normal output of an external combustion engine (stirling engine) . in the empirical study , we have found that there is a great difference between the ideal output and normal output of the stirling engine in sense of the total return , the output from the heating side the mechanical output , and the internal output .

$$|\eta_{tot}| < |\eta_H| < |\eta_{carnot}| < 1 < |\eta_i| < |\eta_m|$$