

جامعة قاصدي مرياح ورقلة

كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم الفيزياء



مذكرة ماستر أكاديمي

مجال : علوم المادة

شعبة : فيزياء

تخصص : فيزياء طاوقية

مقدمة من طرف الطالبتين : مسعودي - حمدات

بعنوان :

دراسة نظرية وتجريبية للمحركات المكبسية

(دراسة طاوقية لمحرك ستيرلينغ)

نوقشت يوم 2024/06/26 أمام لجنة المناقشة المكونة من :

رئيسا	أستاذ	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	سوداني محمد البار
مناقشا	أستاذ محاضر - أ-	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	بالحاج محمد مصطفى
مشرفا	أستاذ محاضر - ب-	جامعة قاصدي مرياح - ورقلة	تخة محمد

الموسم الجامعي : 2024-2024

كلمة شكر

نشكر الله ونحمده حمدا كثيرا مباركا على هذه النعمة الطيبة والنافعة نعمة العلم والبصيرة.

لا بد لنا ونحن نخطو خطواتنا الأخيرة في الحياة الجامعية من وقفة نعود إلى أعوام قضيناها في رحاب الجامعة مع أساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين بذلك جهودا كبيرة في بناء جيل الغد لتبعث ... الأمة من جديد

كن عالما .. فإن لم تستطع فكن متعلما ، فإن لم تستطع فأحب العلماء ، فإن لم تستطع فلا تبغضهم"
وقبل أن نمضي نقدم أسمى آيات الشكر الجزيل والامتنان والثناء الخالص والتقدير، إلى نبع العون إلى من وجهنا دون وهن إلى أستاذنا الفاضل المشرف محمد تخته الذي نقول له بشرك قول رسول الله صلى الله عليه وسلم:

إن الحوت في البحر ، والطير في السماء ، ليصلون على مُعَلِّم الناس الخير"
إلى الذين مهدوا لنا طريق كما يشرفنا أن نتقدم بالشكر الجزيل إلى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة العلم إلى جميع أساتذتنا الأفاضل

ونخص بالذكر الأستاذ بالحاج محمد مصطفى و الأستاذ محسن حسين

الذين قبلا الإشراف على تقييم هذا العمل

وكذلك نشكر كل من ساعد على إتمام هذا البحث وقدم لنا العون ومد لنا يد المساعدة وزودنا بالمعلومات اللازمة لإتمام هذا البحث كل مسؤولي المخبر و العاملين به ونخص بالذكر
الأستاذ حوتي محمد.

إلى من زرعوا التفاؤل في دربنا وقدموا لنا المساعدات والتسهيلات والأفكار والمعلومات فلهم منا
كل الشكر

حمدات إيمان-مسعودي هاجر

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

(قل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

صدق الله العظيم

من هذا المنطلق القويم نهدي هذا العمل المتواضع :

..إلى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة .. ونصح الأمة .. إلى نبي الرحمة ونور العالمين

سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

إلى من جمع مجموعة من الأوراق المبعثرة في شكل مذكرة الأستاذ الفاضل تحه محمد.

إلى كل من في الوجود بعد الله ورسوله إلى الوالدين الكريمين.

إلى العائلتين الكريمتين (حمدات و مسعودي) .

إلى كل الإخوة والأخوات .

إلى كل زملاء والأصدقاء .

إلى كل الأساتذة الكرام

فهرس العناوين

I	تشكرات
II	إهداء
III	فهرس العناوين
X	فهرس الأشكال
VIII	فهرس الجداول
XI	قائمة الرموز والمصطلحات
XIV	المقدمة العامة

الفصل الأول : وصف أجزاء المحرك الحراري المكبسي

2	(1) المقدمة
3	(2) النشأة التاريخية للمحركات الحرارية المكبسية
5	(3) تعريف المحرك الحراري
5	(1-3) هيكل المحرك
6	(2-3) رأس المحرك
7	(3-3) وجه أو عازل رأس المحرك
8	(4-3) مقعد الصمامات
9	(5-3) أدلة الصمامات
9	(6-3) نوابض الصمام
9	(7-3) ذراع الدفع
9	(8-3) الرافعة القلابة (العصافير)
9	(9-3) طبقة حماية الصمام
10	(10-3) كتلة الصمامات
12	(11-3) المكبس
13	(12-3) حلقات (شنابر) المكبس
15	(13-3) بنز (مسمار) المكبس

17	..... ذراع التوصيل (14-3)
17	..... علبة المرفق (15-3)
18	..... عمود المرفق (16-3)
18	..... كراسي عمود المرفق (17-3)
19	..... الحذافة (18-3)
20	..... (4) تصنيف المحركات حسب نوع الاحتراق
20	..... (1-4) محركات الاحتراق الداخلي
20	..... (2-4) محركات الاحتراق الخارجي
20	..... (5) التصنيف حسب نوع الاشتعال
20	..... (1-5) محرك الإشعال بالشرارة
20	..... (2-5) محرك الاشتعال الذاتي
20	..... (6) التصنيف حسب نوع الحقن
20	..... (1-6) محركات الحقن المباشر
20	..... (2-6) محركات الحقن غير المباشر
21	..... الخاتمة (7)
21	..... (8) مراجع الفصل الأول

الفصل الثاني : دراسة نظرية لدورات الهواء القياسية

24	..... (1) مقدمة
24	..... (2) دراسة دورات الهواء القياسية من حيث الإجراءات
24	..... (1-2) دورة كارنو
24	..... (2-2) دورة أوتو
25	..... (3-2) دورة ديزل
25	..... (4-2) دورة ستيرلينغ
25	..... (5-2) دورة إيريكسون
26	..... (6-2) دورة برايتون

26	.....(3) تصنيف الدورات حسب مبدأ انتاج العمل
26	.....(4) تصنيف الدورات حسب مقدار الكفاءة وقابلية التنفيذ كمحرك
27	.....(5) الفرضيات المعتمدة في الدراسة
27	.....(6) الأهداف من إستعمال دورات الهواء القياسية
27	.....(7) دراسة دورات الهواء من حيث الكفاءة
27	.....(1-7) دورة كارنو
30	.....(2-7) دورة أوتو
33	.....(3-7) دورة ديزل
38	.....(4-7) دورة ستيرلينغ
39	.....(5-7) دورة إيريكسون
41	.....(8) مراجع الفصل الثاني

الفصل الثالث : الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ

44	.....(1) الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ
44	.....(1-1) الأهداف من التجربة
44	.....(2-1) مبدأ العمل
45	.....(3-1) الأجهزة المستعملة
47	.....(4-1) المسائل و المقادير الفيزيائية المراد قياسها
47	.....(5-1) الإجراءات المتبعة في التجربة
53	.....(2) بعض الحسابات النظرية الخاصة بمردود محرك ستيرلينغ و تطبيقها في التجربة
54	.....(1-2) طرق حساب مردود الدورة القياسية بوجود مسترجع مثالي
	.....(2-2) طريقة حساب مردود الدورة القياسية بعدم وجود مسترجع مثالي أو وجود مسترجع غير مثالي
57	.....(3) الطرق التجريبية لحساب الاعمال الميكانيكية المنتجة و الفعالة و الضائعة في محرك ستيرلينغ
61	.....(1-3) طريقة حساب العمل الميكانيكي W_{PV} المنتج من طرف الدورة و المحسوب من المخطط PV في شاشة راسم الاهتزاز المهبطي
62	.....(2-3) طريقة حساب العمل الميكانيكي الفعال W_m المنتج من طرف الدورة و المحسوب بجهاز قياس العزم الحركي
63	.....

63	3-3) طريقة حساب العمل الميكانيكي الضائع W_{fr} بفعل الاحتكاكات و اللاعكوسية في المحرك.....
63	3-4) طريقة حساب الحرارة المستهلكة P_H من محرك ستيرلينغ خلال التجربة.....
65	3-5) النتائج التجريبية الخاصة بحساب العمل الميكانيكي الفعال و العمل الميكانيكي الضائع.....
69	3-6) طريقة حساب الإستطاعة الكهربائية P_e المنتجة في الدارة الكهربائية.....
69	3-7) النتائج التجريبية الخاصة بحساب الاستطاعة الكهربائية الناتجة من المولد الكهربائي.....
71	3-8) حساب عدد مولات الهواء داخل محرك ستيرلينغ.....
72	3-9) حساب كفاءة محرك ستيرلينغ حسب الاعمال المنتجة و الحرارة المستهلكة.....
74	4) مراجع الفصل الثالث.....

فهرس الأشكال

الفصل الأول : وصف أجزاء المحرك الحراري المكبسي

6	.....الأجزاء الأساسية للمحرك الحراري	الشكل (1-1)
6	.....شكل عام لرأس المحرك	الشكل (2-1)
7	.....شكل عام لعازل رأس المحرك	الشكل (3-1)
8	.....شكل عام لصمام و عمود الكامات(الحدبات)	الشكل (4-1)
9	.....مخطط للرافعة القلابة مع ذراع الدفع الخاص بالصمامات	الشكل (5-1)
10	.....مظهر عام لهيكل المحرك	الشكل (6-1)
12	.....طريقة تبريد الإسطوانة حسب نوع الجلب (الأسطوانة الداعمة)	الشكل (7-1)
13	.....أجزاء المكبس	الشكل (8-1)
15	.....أشكال بنز (مسمار) المكبس	الشكل (9-1)
	.....أجزاء ذراع التوصيل	الشكل -1
16		(10
	.....ينز المكبس مرتبط بالنهاية الصغرى لذراع التوصيل	الشكل -1
16		(11
	.....مقاطع توضيحية لساق ذراع التوصيل	الشكل -1
17		(12
	.....علبة المرفق وحوض الزيت	الشكل -1
17		(13
	.....شكل توضيحي للإجهادات المؤثرة على عمود المرفق	الشكل -1
		(14
18		

19	الشكل (1-1) مقاطع توضح شكل كرسي عمود المرفق.....	(15)
19	الشكل (1-1) مظهر عام للحذافة.....	(16)

الفصل الثاني : دراسة نظرية لدورات الهواء القياسية

27	الشكل (2-1) مخطط دورة كارنو وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة متناظرة) ...	
29	الشكل (2-2) مخطط يوضح تغيرات كفاءة دورة كارنو بدلالة النسب الأربعة الخاصة بالمقادير الفيزيائية.....	
30	الشكل (2-3) مخطط دورة أوتو وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة متناظرة).....	
32	الشكل (2-4) مخطط يوضح تغيرات كفاءة دورة أوتو بدلالة النسب الأربعة الخاصة بالمقادير الفيزيائية.....	
32	الشكل (2-5) مخطط دورة ديزل وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة غير متناظرة).....	
38	الشكل (2-6) مخطط دورة ستيرلينغ وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة متناظرة).....	
40	الشكل (2-7) مخطط دورة إيريكسون وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة متناظرة).....	

الفصل الثالث : الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ

46	الشكل (3-1) محرك ستيرلينغ.....	
46	الشكل (3-2) وحدة بها محرك و مولد كهربائي.....	
46	الشكل (3-3) جهاز قياس العزم الحركي.....	
46	الشكل (3-4) موقد للكحول.....	
46	الشكل (3-5) وحدة قياس $PVnT$	
46	الشكل (3-6) وحدة قياس PV	
46	الشكل (3-7) حقنة طبية.....	
46	الشكل (3-8) معدلة كهربائية.....	
46	الشكل (3-9) فولتметр أمبيرمتر.....	
46	الشكل (3-3) أسلاك توصيل.....	

46	.....راسم الاهتزاز المهبطي	الشكل (3-)
		(11)
46	.....كابل تحويل	الشكل (3-)
		(12)
46	.....مزدوجات الحرارة من نوع K	الشكل (3-)
		(13)
46	.....أنبوب مدرج 50 ml	الشكل (3-)
		(14)
46	.....قارورة من الكحول	الشكل (3-)
		(15)
	.....تجربة ستيرلنغ مع جميع اللواحق التابعة للمحرك	الشكل (3-)
48		(16)
	تغيرات فرق الكمون في راسم الاهتزاز المهبطي بدلالة الضغط في وحدة	الشكل (3-)
50	.....القياس PV	(17)
	الدارة الكهربائية المزودة بفولطمتر و أمبيرمتر و معدلة لحساب الطاقة	الشكل (3-)
52	.....الكهربائية الفعالة	(18)
	دورة الهواء القياسية ستيرلنغ في مخطط TS و مخطط PV	الشكل (3-)
53		(19)
	تمثيل دورة كارنو في مخطط Pv	الشكل (3-)
58		(20)
	مقارنة بين دورتين (a) و (b) في المخطط الحقيقي ل PV	الشكل (3-)
64		(21)
	طريقة إيجاد الاجراءات ثابتة درجة الحرارة في المخطط الحقيقي ل PV	الشكل (3-)
65		(22)
	تغيرات درجة الحرارة T_H و T_L بدلالة عدد الدورات التي ينتجها	الشكل (3-)
66	.....المحرك	(23)
	تغيرات الفرق في درجة الحرارة ($T_H - T_L$) بدلالة عدد الدورات التي	الشكل (3-)
67	.....ينتجها المحرك	(24)

	الشكل (3-)	تغيرات العزم الحركي بدلالة عدد الدورات التي ينتجها المحرك
68	(25)	
	الشكل (3-)	تغيرات الطاقة المنتجة و الفعالة و الضائعة في محرك ستيرلينغ بدلالة عدد
68	(26)	الدورات التي ينتجها المحرك.....
	الشكل (3-)	المولد الكهربائي ذو البكرتين بكرة صغيرة و بكرة كبيرة.....
69	(27)	
	الشكل (3-)	تغيرات الاستطاعة المنتجة الفعلية P_m و الاستطاعة الكهربائية في الدارة
70	(28)	الكهربائية.....
	الشكل (3-)	تغيرات Q_H بدلالة الفرق في درجة الحرارة $T_H - T_L$
71	(29)	
	الشكل (3-)	طريقة رسم خط متساوي درجة الحرارة المتوسطة و تعيين النقطتين 1 و 2
72	(30)	كمثال.....

فهرس الجداول

الفصل الأول : وصف أجزاء المحرك الحراري المكبسي	
14	جدول (1-1) مختلف أشكال شنابر المكبس في المحرك الحراري
الفصل الثاني : دراسة نظرية لدورات الهواء القياسية	
26	جدول (1-2) تصنيف الدورات حسب قابلية التنفيذ
الفصل الثالث : الدراسة التجريبية لمحرك ستيرلينغ	
	معايرة وحدة القياس PV لحساب العلاقة بين الضغط و فرق الكمون
49	جدول (1-3) في شاشة راسم الاهتزاز
	تغيرات العمل الميكانيكي الفعال و العمل الميكانيكي الضائع بدلالة
65	جدول (2-3) عدد الدورات
	القيم التجريبية للاستطاعة الكهربائية الناتجة من استعمال البكرة
69	جدول (3-3) الكبيرة للمولد الكهربائي
	القيم التجريبية للاستطاعة الكهربائية الناتجة من استعمال البكرة
70	جدول (4-3) الصغيرة للمولد الكهربائي
	القيم التجريبية الخاصة بحساب كفاءة محرك ستيرلينغ حسب الاعمال
74	جدول (5-3) المنتجة و الحرارة المستهلكة

قائمة الرموز و الاصطلاحات

الرموز	الاصطلاحات (الرموز اللاتينية)	الوحدة
A	المساحة.....	m^2
c_p	الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت.....	$J / (Kg. ^\circ C)$
c_v	الحرارة النوعية تحت حجم ثابت.....	$J / (Kg. ^\circ C)$
g	تسارع الجاذبية الأرضية.....	m / s^2
M_a	الكتلة المولية للهواء.....	g/mol
\dot{m}	التدفق الكتلي.....	Kg/m^3
n	عدد المولات.....	mol
P_g	الضغط الجزئي للغاز.....	Pa
P_v	الضغط الجزئي للبخار.....	Pa
P_{atm}	الضغط الجوي.....	Pa
$P_{vap(Sat)}$	الضغط الجزئي للبخار المشبع.....	Pa
Q	الطاقة الحرارية.....	J
R	الثابت العام للغازات المثالية.....	$J/mol. K$
\bar{R}	الثابت الخاص للغاز المثالي.....	$J/kg. K$
r	نسبة المقدار الفيزيائي.....	—
t	الزمن.....	s
T	درجة الحرارة.....	$^\circ C$
U	السرعة.....	m/s
V	الحجم.....	m^3
W	العمل الميكانيكي.....	J
الرموز الإغريقية		
λ	التوصيلية الحرارية.....	$W/m. ^\circ C$
μ	اللزوجة التحريكية.....	$Pa. s$

Kg/m^3	..... الكتلة الحجمية	ρ
$W/m^2.K^4$	..... ثابت ستيفان-بولتزمان	σ
-	..... نسبة السعات الحرارية	γ
-	..... المردود الطاقوي	η

الدليل السفلي

-	..... الوسط الخارجي (المحيط Ambiente)	a
-	..... الهواء الرطب داخل خلية التقطير	ah
-	..... التبادل الحراري بالتبخير بين الماء و الغطاء الزجاجي	$ev, w - g$
-	..... الكلي (Total)	t
-	..... الماء (Water)	w

المقدمة العامة

منذ القدم اجتهد الانسان في تحسين طريقة حياته بوسائل وأدوات كان يخترعها ويطورها من جيل إلى جيل، فالانسان الأول اكتشف النار وكان لها أثر كبير في تغيير نمط حياته، فأصبح يستخدمها في الطهي والتدفئة والإنارة في الليل، وبقي الانسان دهرا وهو يستخدم النار الناتجة من اشتعال الاخشاب وبعض الزيوت بطريقة بدائية إلى أن أدرك في حقبة من الحقب أن النار هي طاقة يمكن التحكم فيها وتسخيرها في أشياء أكثر فائدة. في الحضارات القديمة مثل الفرعونية والبابلية اكتشف الانسان مصادر أخرى للطاقة كطاقة الرياح لتحريك السفن بالرياح التجارية والماء الساقط من الشلالات لتدوير بعض الآلات البسيطة التي كانت تستخدم في طحن الحبوب وغيرها، وزاد هذا التطور عندما أدرك أهمية العجلة الدائرية التي سهلت تحريك العربات بالحيوانات كالأحصنة والبغال والبقر.

لم يتوقف الانسان على تطوير تلك الآلات التي كانت تقوم بأعمال شاقة كنقل البضائع وحمل الأثقال حتى وان كانت تلك الآلات تعتمد على الجهود العضلي للإنسان أو للحيوانات التي استأنسها، لكن ظهرت أفكار جديدة لاستغلال بعض الطاقات الكامنة في المواد التي المحيط، فطاقة بخار الماء استخدمت من طرف العالم جيمس واط في تحريك آله البخارية التي جعلت من وسائل النقل كالقطارات والبواخر تختصر الوقت والجهد، وتغير من نمط الحياة الاستهلاكية في المدن والتجمعات السكانية الكبيرة.

طاقة الهواء والمتمثلة في أبسط شكل لها في طاقة الرياح، جعلت من المخترعين مثل العالم ستيرلنغ سنة يفكر في تصنيع محرك يعمل بتمدد الهواء عند تعرضه لمصدر حراري، وصنع محركا يعمل بهذه التقنية واستخدم لأغراض رفع أثقال كطرق المعادن، ولم يكن له القدرة على تحريك عربة مربوطة بها لعدم وجود قوة انفجارية في هذا المحرك وأصبحت الريادة للمحركات البخارية وسيطرت على المشهد العام وكانت لها شعبية، إلى ان جاء عهد المحركات الانفجارية ذات الاحتراق الداخلي، التي أحدثت ثورة في عالة

الصناعة ونقل البضائع والأشخاص، ومن بين تلك المحركات محرك أوتو وديزل التي تعمل بالوقود الاحفوري كبتزول أو غاز.

ظهرت في الآونة الأخيرة فعالية للمحركات الكهربائية رغم مرور أكثر من قرن من إختراعها وتطويرها، فأصبحت العربات الكهربائية والهجينة منتشرة بكثرة وتكاد تكون لها شعبية تنافس المحركات الحرارية التقليدية وذلك لبرساطتها وعدم إصدارها لضجيج عند تشغيلها ولكفائتها مع وجود بعض العيوب كالشحن الطويل لبطارية السيارة، وثقل البطارية على جسم السيارة.

في هذا البحث دراسة حول المحركات الحرارية المكبسية الترددية بشكل عام وتطورها وتعريفها لأجزائها الأساسية والمواد المصنع منها، وهذا الجزء من البحث سوف يكون بالتفصيل في الفصل الأول، أما الفصل الثاني فهو دراسة نظرية لدورات الهواء القياسية المعروفة بإجراءاتها الخاصة، ونقصد بالدورات الهواء القياسية هي الدورات التي تحمل معالم واضحة لإجراءاتها سواء كانت ثلاثا أوأربعا أوأكثر من ذلك، والهواء هو مائع التشغيل الذي يتعرض للإنضغاطات والتمددات في الدورة كغاز مثالي وذلك لتبسيط الدراسة. تكمن أهمية دراسة هذه الدورات في معرفة الكفاءة وتقييم المحرك الذي يعمل تبعا لهذه لدورة من الدورات، والتقييم يكون كئفيا وليس كئفيا، وذلك لعدم تطابق المحرك في الواقع الحقيقي مع الدورة في واقعها النظري المثالي، وفي الفصل الثالث تمت الدراسة التجريبية على محرك بسيط وصغير يعمل تبعا لدورة ستيرلينغ به مسترجع ، وهذا المحرك مجهز بمجموعة من اللواحق المساعدة لضبط المقادير الفيزيائية كالضغط والحجم ودرجة الحرارة وكمية الحرارة المعطاة للمحرك، وهذا كله من أجل تحديد كفاءة هذا المحرك وتقييم أداءه الطاقوي في شقه الميكانيكي والحراري.

الفصل الأول

وصف أجزاء المحرك الحراري المكبسي

(1) المقدمة :

أصبحت المحركات بكل أنواعها ضرورة لا بد منها في حياتنا اليومية، وأهم المحركات المنتشرة في الوقت الحالي هي المحركات الحرارية التي تعمل بالوقود الاحفوري كالبنزين والغاز وغيرها. تحرق المحركات الحرارية الوقود والمواد المؤكسدة في مساحة ضيقة تسمى غرفة الاحتراق، وينتج عن هذا التفاعل الطارد للحرارة غازات ساخنة عالية الضغط. تعد المحركات الحرارية أحد أهم مصادر الطاقة لأنها تحول الطاقة الحرارية إلى عمل، ومن الضروري التعميم بأن المحرك الحراري لم يظهر مباشرة كما نراه في الواقع كما يعتقد البعض، ولا نتيجة لاختراع سهل. كما أنه ليس نتيجة اختراع شخص واحد، بل نتيجة عمل وتجارب العديد من العلماء على مدى مئات السنين. فعلى مدى مئات السنين، تم اختراع الاختراع تلو الآخر، وقام البعض بتطوير اختراعاتهم. إلى الصورة التي نراها اليوم (Amaral et al. 2024).

في الواقع، لطالما انعكست التطورات في العلوم الميكانيكية والعلوم الفيزيائية والرياضيات على الصناعة بشكل عام وعلى صناعة السيارات بشكل خاص. ففي صناعة السيارات على وجه الخصوص، يعكس اختراع السيارة العديد من التطورات والابتكارات التي حدثت في هذه الصناعة. وقد تم حتى الآن تسجيل أكثر من 100 ألف براءة اختراع تميز السيارات (Yadav et al. 2021).

ونتيجة لهذا التطوير المستمر والمتواصل في محركات الحرارة تم تحسين المحركات. وقد تم تحسين المحركات لزيادة قدرتها وكفاءتها إلى أقصى حد من خلال إجراء العديد من التعديلات على كتلة الأسطوانة والعمود المرفقي وعمود الحدبات والعمود المرفقي. فيما يتعلق بالمواد المستخدمة في التصميم والتقنية المستخدمة، مثل السباكة والتشكيل وأعمدة الكرنك الأنابيب والتشكيل وعمليات التصنيع الأخرى، مثل استخدام أنظمة حقن الوقود والإشعال الحديثة أنظمة التبريد والتشحيم وغيرها (Yu et al. 2010).

تم تطوير شكل السيارة ليشبه شكل الجناح أو الجسيمات الهوائية، وقد ساهمت هذه التقنية الحديثة في تقليل فقد القدرة الناتج عن مقاومة تيارات الهواء لحركة المركبة، وكذلك في فصل تيارات الهواء إلى الخلف خارج المركبة، مما يقلل من تكون الدوامات الهوائية خلال جسم المركبة. وهذا يساهم في تحسين حركة المركبة بشكل كبير (Son et al. 2022).

(2) النشأة التاريخية للمحركات الحرارية المكبسية :

شهد عالم النقل ثورة هائلة مع ظهور محركات الاحتراق الداخلي، تلك المحركات التي ساهمت بشكل كبير في تقدم الحضارة الحديثة.

- **1335م** : يعتبر البعض اختراع "غويدو دانيغانو" لعربة تعمل بالبخار أول تصميم لمحرك احتراق داخلي، لكن ظلت هذه التصميمات حبيسة الورق (Brancaleoni et al. 2024).
- **1680م** : اخترع "كريستيان هويغنز" محركًا يعمل بالبارود، ولكن لم يلقَ هذا الاختراع رواجًا كبيرًا لعدم كفاءته (Tissot et al. 2024).
- **1791م** : سجل "جون باربر" براءة اختراع محرك غازي يعمل بطاقة الرياح، وهو عبارة عن طارة تحيطها ريش يسلط عليها قوة من الغازات الناتجة عن احتراق مزيج من الهواء والغاز (Wu et al. 2024).
- **1860** : أنتج البلجيكي جيان جوزيف إتيان لينوار (1822-1900) محرك احتراق داخلي غازي، مشابه للمحرك الأفقي البخاري ذو الأسطوانات مزدوجة الفعل، وكان أول محرك احتراق داخلي يُنتج بكميات لا بأس بها .
- **1862** : حصل الفرنسي ألفونس بو دو روشا، مهندس سكك حديد بروفانس، على براءة اختراع لدورة الأربعة أشواط مع ضغط مسبق، والتي تُطبَّق عالميًا في الوقت الحاضر (Zhao et al. 2020).
- **1864** : حاز نيكولاس أوتو على براءة اختراع أول محرك احتراق داخلي غازي له في إنجلترا وبلدان أخرى. كان أوتو أول من صنع وبيع هذا النوع من المحرك اللانضغاطي ذو المكبس الحر، والذي كسب دعم شركة يوجين أنجن بسبب كفاءته المرتفعة ثم كسب دعم معظم من في السوق، والذي كان معتمداً وقتها على المحركات الصغيرة الثابتة المشغلة بغاز الإضاءة. تعاونت شركة يوجين أنجن مع أوتو في التصميم وبدأوا التصنيع في عام 1864. (Alles 1991).
- **1865** : بير هوجو بدأ إنتاج محرك هوجو، المشابه لمحرك لينوار، ولكن أكثر اعتمادية وله اقتصاديات أعلى في استهلاك الوقود (Marjanen et al. 2022).
- **1866** : صنع المهندس الألمانيان أوتو ولانجن محركهما الذي استخدم في الغاز كوقود، صمم هذا المحرك بوضع راسي حيث نقلت حركة الكباس إلى مجموعة تروس مركبة على محور حدافتين عن طريق سقاطة في

عمود الكباس وكانت الشحنة تدخل عن طريق فتحة بالأسفل عندما يتحرك الكباس لأعلى ثم تشتعل فتسبب قوة تمدد الغازات رفع الكباس لأعلى لإتمام مشواره وعندما تنخفض درجة حرارة الغازات يحدث تفريغ داخل الأسطوانة بأسفل الكباس، فيدفع الضغط الجوي الكباس لأسفل كما تسبب الطاقة المخزونة في الحدافتين في ارتفاع الكباس حتى يسمح بدخول الشحنة الجديدة وتكرر العملية السابقة بانتظام وقد كان لهذا المحرك ضوضاء مستمرة أثناء تشغيله مع ذلك فقد انتشر استعماله.

● **1870:** استخدم سيجفريد ماركوس أول محرك بنزين متنقل وأول محرك احتراق داخلي حديث في عربة يد في فيينا.

● **1872:** اخترع جورج برايتون في أمريكا محرك يحدث فيه الاحتراق بثبوت الضغط، وكان أول محرك احتراق داخلي ذو وقود سائل يتم إنتاجه تجارياً (Shaitelman 2015).

● **1876:** طبق الدكتور نيكولاس أوجست اوتو نظريات دي روشاس الذي أشار إلى إتمام الدورة في أربعة أشواط لكباس كما سبق ذكر ذلك وقد اخرج المحرك الشهير نسبة اليه ومن ثم أخذت المحركات الحديثة جميع نظرياتها من خلال هذا المحرك.

● **1878:** صمم دوجالد كلرك أول محرك ثنائي الشوط يستخدم عملية الانضغاط داخل الأسطوانة ونال دوجالد براءة اختراع على ذلك في إنجلترا في عام 1881.

● **1879:** نال كارل بينز براءة اختراع محرك احتراق داخلي غازي ثنائي الشوط. صمم وصنع بنز لاحقاً محرك رباعي الأشواط استخدمه في سيارته، التي ظهرت في عام 1885 ونال براءة اختراعها في عام 1886، وأصبحت أول سيارات يتم إنتاجها.

● **1883:** تمكن العالم ماييش من تصميم وبناء أول محرك ديزل بشركة N.A.M في ألمانيا وزود المحرك بصمامات لدخول الهواء وأخرى لخروج العادم وكان يتم الدورة في أربعة أشواط.

● **1884:** اخترع المهندس البريطاني إدوار بتلر أول محرك احتراق داخلي يعمل بالبنزين. اخترع بتلر أيضاً شمعة احتراق وشمعة اشعال وملف اشعال وحقن رشاشة، وكان أول من استخدم لفظ بتول للتعبير عن البنزين كوقود للمحركات.

● **1886 و 1891:** ظهرت المحركات التي صممها اكرويد وقد كان أول محرك يعمل بالوقود السائل (البتول) وقد استعيض فيها عن الإشعال بمصدر لهب خارجي باستخدام الراس المتوج وهي عبارة عن غرفة لتبخير الوقود السائل ليسيل اشعاله في الأسطوانة وذلك بحقنه على السطح الداخلي لغرفة الإحتراق، وقد اعتبر هذا المحرك افضل ما وصلت اليه الجهود لما فيه من مزايا استخدام الوقود السائل واستعمال الراس المتوهج

وقد ظهرت في نفس الوقت محركات أخرى بنيت فكرتها على تحضير الشحنة في جهاز خاص يسمى بالمغذي وذلك بتشبيع الهواء الذي يمتصه المحرك في مشوار السحب بالوقود السائل وكان الغرض من ذلك هو انتاج محركات خفيفة الوزن بالنسبة للقدره المتولده منها لكي تكون مناسبة للاستعمال في طرق المواصلات، وقد استخدمت في تشغيل هذه المحركات في المركبات الخفيفة التي استخدمت زيوت البترول مثل البنزين والنفط.

● **1892**: طور رودولف ديزل أول محرك اشعال بالانضغاط ذو شحنة مضغوطة استيخدم فيه الفحم المسحوق كوقود بدل من الوقود السائل وقد بنى نظريته على أساس بأن يضغط الهواء في أسطوانة المحرك لدرجة تكفي لرفع درجة حرارته إلى الحد الذي يمكن من إشعال الفحم المسحوق عند حقنه داخل الأسطوانة ومع الاستمرار في حقن الفحم يستمر الاشتعال أثناء حركة الكباس إلى خارج الأسطوانة بمقدار 1:10 من مشواره فيحترق الوقود تحت ضغط ثابت.

● **1896**: اخترع كارل بينز محرك مسطح، والمعروف أيضاً بالمحرك الأفقي المتعكس، والذي تصل فيه المكابس إلى النقطة الميتة العليا في نفس التوقيت فيعمل ذلك على ائزان كمية الحركة لكل منهما.

● **1897**: تمكن العالم الألماني ديزل باستبدال مسحوق الفحم بنوع آخر من الوقود باستخدام الزيت الثقيل في تشغيله لسهولته عن استخدام مسحوق الفحم وقد نجح في ذلك نجاحاً عظيماً وقد كان الهواء يضغط داخل الأسطوانة حتى ترتفع درجة حرارته إلى 551 درجة مئوية ثم يحقن الوقود على شكل رذاذ رفيع بواسطة حاقن الهواء الذي يزيد ضغطه عند الضغط داخل الأسطوانة بمقدار كبير فيشتعل ويستمر الاشتعال طوال فترة الحقن التي تبلغ 1:11 من الشوط بضغط ثابت وقد استغنى في هذا المحرك عن المغذي وجهاز الإشعال، وفي محرك اوتو استعيض عنها بمضخة هواء ذات ضغط عالي لحقن الوقود.

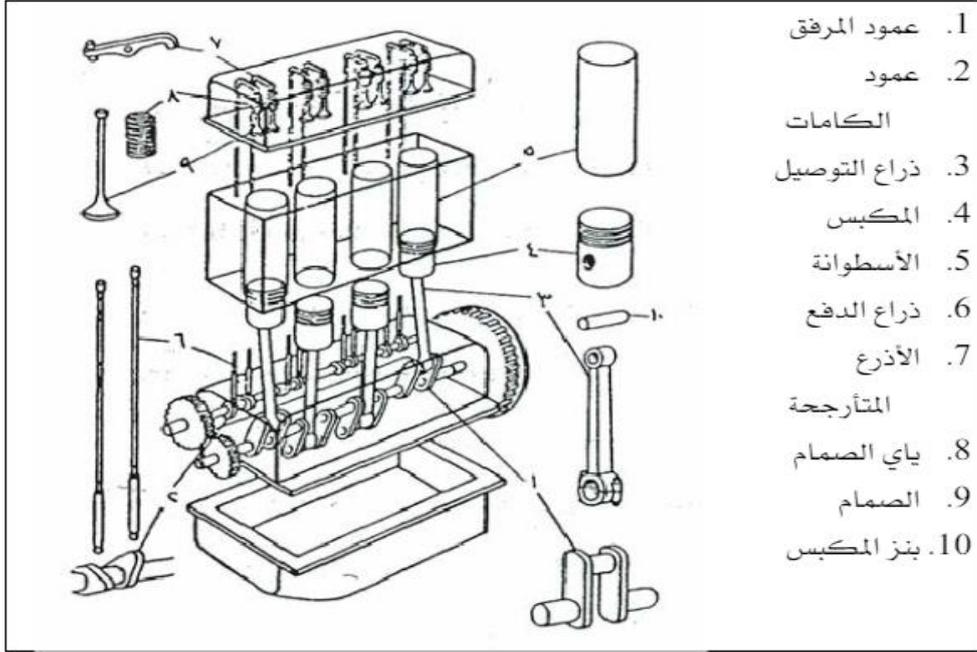
(3) تعريف المحرك الحراري :

بشكل عام تُستخدم المحركات الحرارية بنوعها المكبسية والتوربينية لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية. وعموماً يُمَيِّز هذه المحركات إلى نوعين. المحركات ذات الاحتراق الداخلي حيث يتم تجديد النظام في كل دورة، حيث يكون النظام على اتصال مع مصدر حراري واحد فقط (الجو)، كما هو الحال في محركات البنزين والديزل. والمحركات ذات الاحتراق الخارجي حيث يتم إعادة تدوير النظام (الهواء) بدون تجديد، مما يتطلب وجود مصدري حرارة، كما هو الحال في الآلات البخارية ومحرك ستيرلينج (Ergin 2024; Bataineh 2024)

3-1) هيكل المحرك :

يتكون المحرك من - رأس المحرك- كتلة الأسطوانات - علبة المرفق

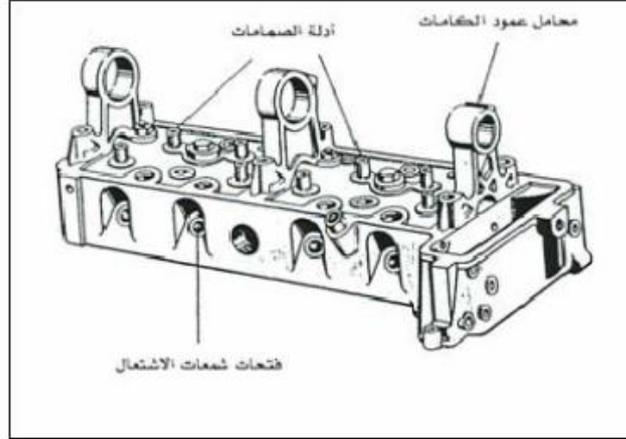
وكل جزء اساسي يحتوي على العديد من الأجزاء الثانوية والشكل التالي يوضح أجزاء المحرك



الشكل (1-1): الأجزاء الأساسية للمحرك الحراري

3-2) رأس المحرك: ويحتوي على غرفة الاحتراق وغرف السحب والعامد ونوابض الإرجاع لها وعمود

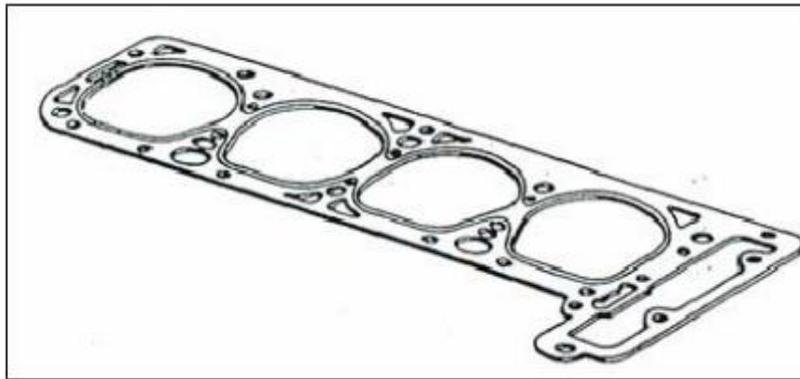
الكامات (إذا كان من النوع العلوي)، وإذا كان من النوع السفلي فتتركب على رأس الروافع المتأرجحة، وتتركب شمعات الإشتعال في ثقوب ملولبة خاصة بها موجودة في رأس المحرك، ويصنع رأس المحرك لجميع الأسطوانات من كتلة واحدة من سبيكة الألومنيوم لتحسين عملية إنتقال الحرارة، ويثبت رأس المحرك بكتلة الأسطوانات بواسطة مسامير ملولبة. ويتم الربط طبقاً لتعليمات الشركة المنتجة.



الشكل (1-2): شكل عام لرأس المحرك

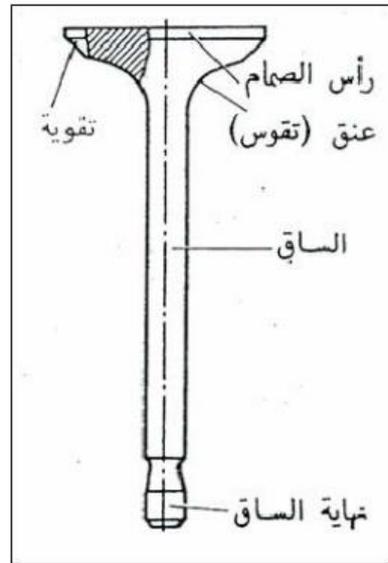
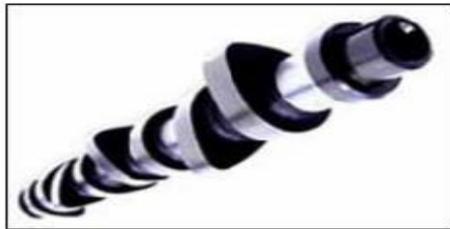
رأس المحرك له غطاء يحمي الأجزاء الداخلية المثبتة فيه من الغبار أو التلف كما يمنع تطاير الزيت. ويصنع غطاء رأس المحرك من ألواح من الفولاذ أو من سبائك الألومنيوم ، ويوضع وجهه أو عازل من الفلين بين رأس المحرك والغطاء لمنع التسرب بينهما.

3-3) وجه أو عازل رأس المحرك : يستعمل وجه الرأس لمنع تسرب الغازات من غرفة الإحتراق وحتى لا تنفذ مياه التبريد إلى داخل الأسطوانات. ويجب أن يكون المنع تاما كما يجب ألا يتأثر الوجه بدرجة الحرارة العالية وأن يتمتع بمقاومة عالية للإجهادات الدائمة. ويتكون الوجه من لوح معدني مغطى بطبقة من الأسبستوس المعالج وتكون حواف الوجه المتصلة بغرف الإحتراق مغطاة بالمعدن لمقاومة التلف نتيجة الإحتراق والضغط العالي (Frank et al. 2024).



الشكل (1-3): شكل عام لعازل رأس المحرك

- **عمود الكامات:** تصنع أعمدة الكامات بالصب من الفولاذ. ومن وظائف عمود الكامات، وفتح الصمامات بالإرتفاع المناسب في التوقيت الصحيح. وكذا ضبط عملية غلق الصمامات، وتركب أعمدة الكامات على رأس المحرك أو في علبة المرفق وعندما يقع عمود الكامات في الأسفل يتم تشغيل الصمامات بواسطة الإصبع الغماز وذراع الدفع والرافعة القلابة. أما عندما يقع عمود الكامات في الأعلى فيتم تشغيل الصمامات بواسطة الرافعة القلابة مباشرة.
- **الصمامات:** لكل أسطوانة من أسطوانات المحرك صمامان على الأقل:
 - صمام السحب:** الذي يتحكم في دخول الشحنة (الخليط).
 - صمام الخروج:** الذي يتحكم في خروج غازات العادم.
 ويتكون الصمام من رأس الصمام وساق الصمام. ويساعد السطح المخروطي الذي يشكله رأس الصمام على ضبط تمركز الصمام ويتيح إحكاما جيدا ضد تسرب الغازات وتبلغ زاوية مقعد الصمام 45° وتسمى الإستدارة بين رأس الصمام وساقه بالعنق الذي يهيء ظروفًا مناسبة لسريان الغازات . ويساعد ساق الصمام على توجيهه ، كما تسري الحرارة من خلاله إلى دليل الصمام .



الشكل (1-4): شكل عام لصمام و عمود الكامات (الحدبات)

نظرا لأن سرعة دخول الشحنة أقل من سرعة خروج غازات العادم . فإن رأس صمام السحب يكون أكبر من نظيره في صمام العادم وفي بعض المحركات يوجد صماما سحب وصمام عادم، وتتعرض الصمامات

لأحمال ميكانيكية صدمية و كذلك لتأثيرات حرارية عالية إذ تصل درجة حرارة التشغيل في صمام السحب الى 350°م. أما في صمام العادم إلى نحو 700°م. وعند درجات الحرارة العالية هذه يتعرض الصمام للتآكل بالصدأ وعلى ذلك تستعمل سبيكة الفولاذ المضاف إليه كروم وسيليكون ومنجنيز لصمامات السحب و صمامات العادم (الخروج)، ولوقاية مقعد صمام العادم من الصدأ و الإحتراق، يقوى مقعد الصمام بتغطيته بطبقة لحام سطحية من سبيكة خاصة وهناك الصمامات ذات الجذع المجوف أو الصمامات المملوءة بالصوديوم والتي تتمتع بجودة موصليتها الحرارية إلا أنها غالية الثمن فتستعمل في المحركات عالية القدرة.

3-4) مقعد الصمامات: يصدم قرص الصمام عند مقعده بمعدل (50:30) صدمة في الثانية وبقوة

تصل إلى نحو 60 نيوتن ويتيح سطح مقعد الصمام الضيق احكاما جيدا، ولمنع دق الصمامات يجب تصليد معدن مقعد الصمام بدرجة خاصة فيفرز مقعد الصمام أو يخزط مباشرة في رؤوس الأسطوانات المصنوعة من حديد الزهر الرمادي.

3-5) أدلة الصمامات: وهي توجه حركة الصمامات . كما انها تنقل الحرارة من الصمامات إلى رأس

المحرك وهي تشكل في الأسطوانات المصنوعة من حديد الزهر الرمادي ويمكن أن تتركب بحيث يمكن استبدالها.

3-6) نوابض الصمام: مهمة نوابض الصمام هي إغلاقه بسرعة بعد زوال تأثير الكامة عليه. لذا

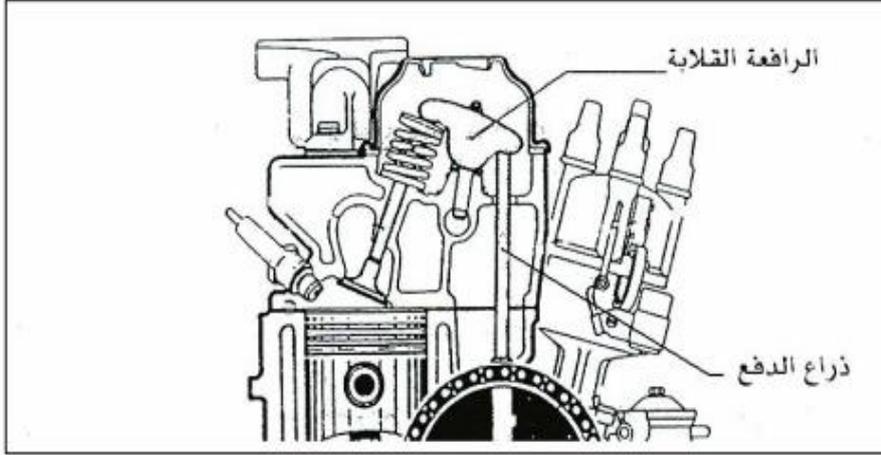
تتطلب زيادة سرعة المحرك استعمال نابض صمام قوي أو نابضين متداخلين .وتصنع نوابض الصمامات على شكل نوابض حلزونية مصلدة ،تخلو سطوحها من المسام والخزوز.

3-7) ذراع الدفع : يقوم ذراع الدفع بنقل الحركة إلى رافعة الصمام في حالة عمود الكامات السفلى

ويصنع ذراع الدفع الطويل من انبوب فولاذي لتقليل الوزن بينما يصنع ذراع الدفع القصير مصمتا. ويكون الجزء السفلي لذراع الدفع على شكل رأس كروي عند موضع اتصاله بالإصبع الغماز بينما يكون الجزء العلوي على شكل مقعر عند موضع اتصاله بالرافعة القلابة. ويتم تصليد (تقوية) كل من سطح الرأس الكروي و سطح المقعر.

3-8) الرافعة القلابة (العصافير) : تنقل الحركة من ذراع الدفع أو من عمود الكامات إلى الصمام و

تصنع من الفولاذ . وفي حالة وجود عمود حدبات علوي تتركب رافعات مرتكزة في احدى نهايتها تسمى بالرافعات المتأرجحة .



الشكل (1-5): مخطط للرافعة القلابية مع ذراع الدفع الخاص بالصمامات

3-9) طبقة حماية الصمام : يتمدد الصمام أثناء التشغيل نتيجة ارتفاع درجة حرارته. ولكي يغلق الصمام إغلاقاً محكماً و صحيحاً (حتى في الحالة الساخنة) يترك خلوص بين ساق الصمام والرافعة وكذلك بين الساق والأصبع الغماز. و تكون طبقة حماية الصمام لها قيم بين (0.1 : 0.4مم) وكثيراً ما تزيد هذه الطبقة في صمام العادم عنها في صمام السحب .وإذا كانت الطبقة ذات سمك صغير، فإن الصمام لا يغلق تماماً في الحالة الساخنة مما يؤدي إلى تسرب هواء غير نقي من خلال صمام العادم. وبالتالي يقل الانضغاط وتنخفض قدرة المحرك . ومن ناحية أخرى يتمكن اللهب من الوصول إلى المغذي من خلال صمام السحب أثناء شوط القدرة مما يؤدي إلى احتراق المغذي. وكذلك فإن عدم استقرار صمام العادم استقراراً جيداً على مقعده يؤدي إلى انخفاض التبدد الحراري ومن ثم إلى احتراق صمام العادم.

أما إذا كانت الطبقة ذات سمك كبير فإن الصمامات لا تفتح بطول الفترة اللازمة وبالامتداد الكافي مما يؤدي إلى ضعف شحن الأسطوانات ونقص قدرة المحرك ، كما تزيد ضوضاء الصمامات .

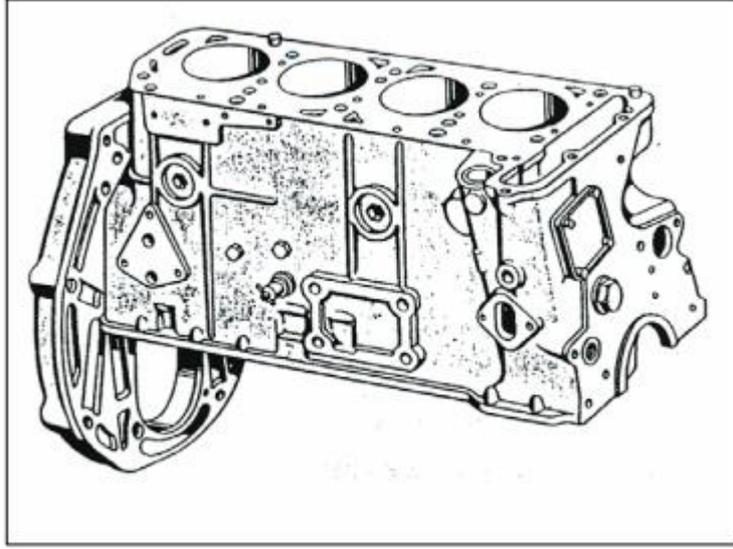
3-10) كتلة الصمامات: تعمل الأسطوانات على تكوين غرفة الاحتراق وتلقي ونقل الضغط والحرارة

الناشئين من الاحتراق وتوجيه المكبس أثناء حركته الترددية وتحمل القوى و الإجهادات التالية :

الضغط العالي : يصل في محركات البنزين ما بين (40:60) بار.وفي محركات الديزل ما بين (50:80) بار .

الحرارة العالية : تصل في لحظة الاشتعال 2000°م وعند جدران أسطوانات المحركات المبردة بالماء من (80 :

120)°م . بينما عند جدران أسطوانات المحركات المبردة بالهواء من (100:220)°م .



الشكل (1-6): مظهر عام لهيكل المحرك

الاحتكاك : يكون أقوى ما يمكن عندما يكون المكبس في منتصف الشوط حيث يدفع ذراع التوصيل (الذي يكون في وضع مائل) المكبس إلى أعلى ضاغظاً إياه بقوة على جدران الاسطوانات وينشأ عن هذا الضغط قوى احتكاك كبيرة .

الأسطوانات من حديد الزهر الرمادي ويجب أن تتوفر فيها الشروط التالية:

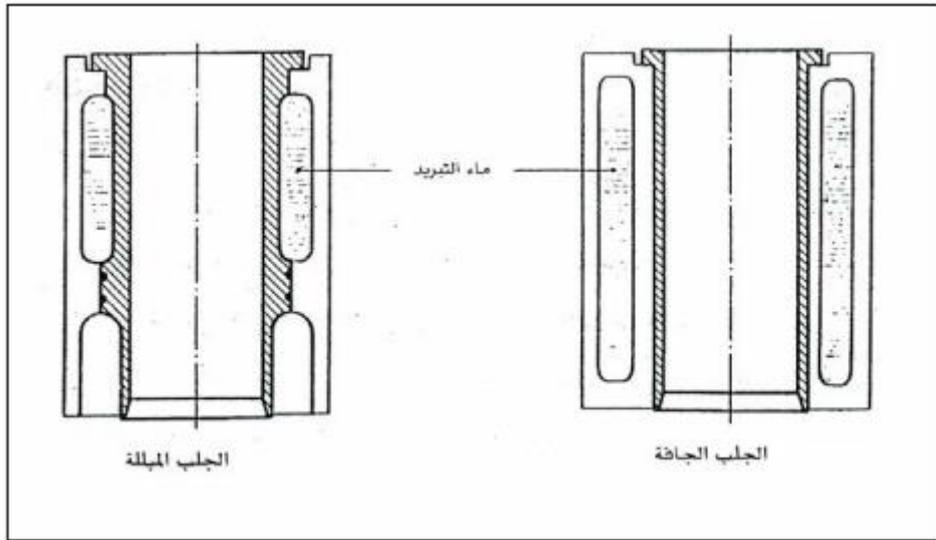
- مقاومة إجهادات ضغوط كبيرة في كل الظروف
- خواص انزلاق جيدة مع قدرة تلاصق جيدة مع وسيط التزيت.
- مقاومة عالية للتلف.
- مقاومة عالية للصدأ.
- موصلية حرارية جيدة.
- خفة الوزن وسهولة التشغيل.

تبلغ سرعة المكبس وكذا قوة المكبس الجانبية المؤثرة عمودياً على سطح الأسطوانة أكبر قيمها عند حوالي منتصف المسافة بين النقطة الميتة العليا والنقطة الميتة السفلى. وبالرغم من هذا فإن القيمة الكبرى لتآكل الأسطوانة تظهر عند النقطة الميتة العليا ثم يتناقص بتدرج كبير حتى النهاية السفلى لمنطقة شنابر المكبس. ويعمل هذا بالآتي :

- يكون التزيت في منطقة شنابر المكبس أسوأ ما يمكن

- يزال غشاء الزيت الموجود على جدار الأسطوانة بواسطة الوقود المتكاثف فوق سطح الأسطوانة عند بدء إدارة المحرك البارد في الشتاء ونتيجة لذلك ينشأ احتكاك جاف .
- تكون آثار الكبريت الطفيفة الموجودة في الوقود أحماضاً عند اتحادها ببخار الماء فتسبب تآكل الجزء العلوي لسطح الأسطوانة .

ويؤدي التآكل الكبير للأسطوانة إلى اتساع طبقة الحماية بينها وبين المكبس، وبالتالي تقل قدرة المكبس على إحكام منع التسرب وينتج عن هذا انخفاض ضغط شوط الانضغاط وعليه تقل قدرة المحرك . كما يزيد معدل استهلاك زيت التزييت مع ظهور دخان أزرق بغازات العادم ولذا يتم إجراء إصلاح أو خراط الأسطوانة وفي بعض المحركات تكون الأسطوانات على شكل جلب (أسطوانة داعمة) جافة أو مبللة وتكون الجلب الجافة رقيقة الجدران ذات شفة في أعلاها . ولا تلامس الجلب الجافة مياه التبريد أما الجلب المبللة فتحاط بمياه التبريد ويتم منع التسرب بين الجلبة وكتلة الأسطوانات من أسفل بواسطة حلقات مطاطية ومن أعلى بكبسها على وجه رأس المحرك. وتصنع الجلب المبللة من حديد الزهر. وتتميز الجلب المبللة بأنها سهلة التغيير. ولكن يعيب الجلب المبللة أنه في حالة تلف إحكام حلقات منع التسرب تصل مياه التبريد إلى داخل علبة المرفق.

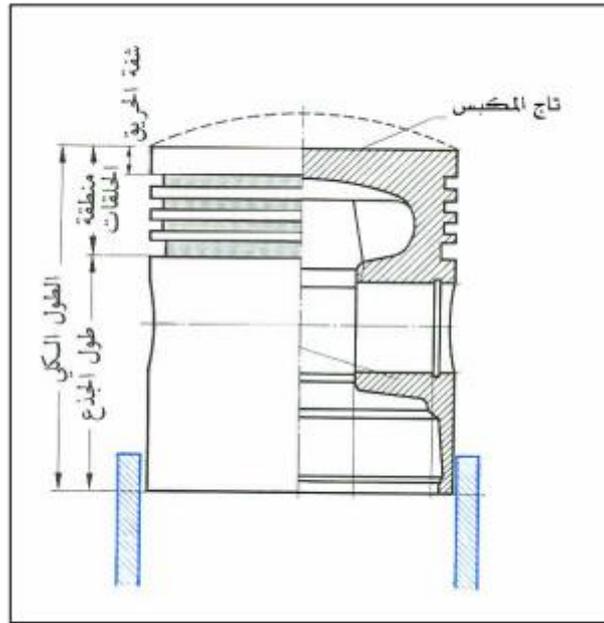


الشكل (1-7): طريقة تبريد الإسطوانة حسب نوع الجلب (الأسطوانة الداعمة)

11-3) المكبس: وتصنع المكابس عادة من سبائك الألومنيوم حيث تصب في قوالب وتبرد فجأة . أما في المحركات المعرضة لإجهادات العالية (عالية السرعة) فتتم صناعة المكابس بالكبس لزيادة المتانة والصلابة . ويتكون المكبس من الأجزاء الآتية :

- رأس المكبس وشفة الحريق (تاج المكبس) .
- منطقة الشنابر .
- جذع المكبس وبنز المكبس .

ويكون رأس المكبس في محركات البنزين الرباعي الأشواط إما مستويًا أو محدبًا بدرجة خفيفة . وتؤثر طريقة الكسح بدرجة كبيرة على شكل رأس المكبس في المحركات ثنائية الشوط . ويعتمد سمك رأس المكبس على مقدار ضغط الاحتراق . أما ارتفاع منطقة الشنابر فيتوقف على عدد وأبعاد الشنابر ويعرف الجزء من رأس المكبس حتى أول شنبر بشفة الحريق (تاج المكبس) . كما أن وظيفة جذع المكبس هي توجيه حركة المكبس داخل الأسطوانة ونقل القوى الجانبية إلى جدار الأسطوانة . وتتحكم الفتحات والنهاية السفلى لجذع المكبس في سريان الغاز في المحركات ثنائية الشوط . أما بنز المكبس فينقل القوة المؤثرة على المكبس إلى ذراع التوصيل .



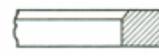
الشكل (1-8): أجزاء المكبس

3-12) حلقات (شنابر) المكبس : فكرة حلقات المكبس ظهرت لمعالجة مشاكل انخفاض الضغط في محركات السيارات ولمنع وجود أي تسرب يسبب انخفاض الضغط داخل المحرك، كما تقوم حلقات المكبس أيضاً بمنع تسرب الزيت إلى غرفة الاحتراق، وتزيل الترسبات التي توجد على جدار الاسطوانة، ويوجد نوعين من الحلقات في محركات السيارات وهي كالتالي :

أولاً : شنابر إحكام الضغط : وظيفة هذه الحلقات هي احكام الضغط داخل غرفة الاحتراق ، حيث تقوم بمنع تسرب خليط الوقود والهواء الى أسفل المحرك ، وتوجد في اغلب المحركات حلقتين للضغط في كل مكبس وهي الحلقات الأولى والثانية أعلى المكبس .

ثانياً : شنابر كشط الزيت : وظيفة حلقات الزيت هي ازالة الزيت الزائد من جدران الاسطوانة ، حيث يمر هذا الزيت من خلال شقوق من الحلقة الى فتحات داخل تجاويف المكبس ، ومنها يعود الى وعاء الزيت (الكارتير) ولحلقه الزيت وظيفة اخرى وهي منع دخول الزيت الى غرفة الاحتراق حتى لا يحترق مع الهواء والوقود ، ومكان حلقة الزيت في المكبس هي الحلقة الثالثة . وتستعمل عادة شنبران أو ثلاث شنابر انضغاط وشنبر كشط زيت واحد لمحركات أوتو أما بمحرك الديزل فيستعمل عدد أكبر من الشنابر ، ويجب أن يكون التلامس بين شنابر المكبس مع جدار الأسطوانة جيداً لضمان منع التسرب بصورة جيدة . ولهذا يجب أن تتصف هذه الشنابر بالمرونة مع الاحتفاظ بخواص انزلاق جيدة ، ويتعرض شنبر الضغط الأعلى لأصعب ظروف التحميل . الناتجة عن سوء التزييت ، وارتفاع درجة الحرارة ، وكذلك تعرضه للصدأ، ويمكن أن يطلى شنبر الضغط بطبقة من الكروم لتقليل معدل التلف بشنبر الضغط والشنابر الواقعة تحتها مباشرة. وتبلغ فتحة اتصال شنابر المكبس نحو 0.2 مم. مما يتيح لهذه الشنابر المرونة الكافية للانفراج . وتحد من تسرب الغازات خلالها في نفس الوقت . وغالباً ما تركيب شنابر مكابس المحركات رباعية الأشواط بحيث تكون الزاوية بين فتحة اتصال كل حلقتين متتاليتين 180° لتحقيق إعاقه أكبر لتسرب الغازات . أما في المحرك ثنائي الشوط فيتم تثبيت شنابر المكبس في مجاريها بمسامير لمنع دوران الشنبر ، وحتى لا تمسك فتحة اتصال إحدى الشنابر بإحدى شقوق الأسطوانة عند مرور المكبس بها

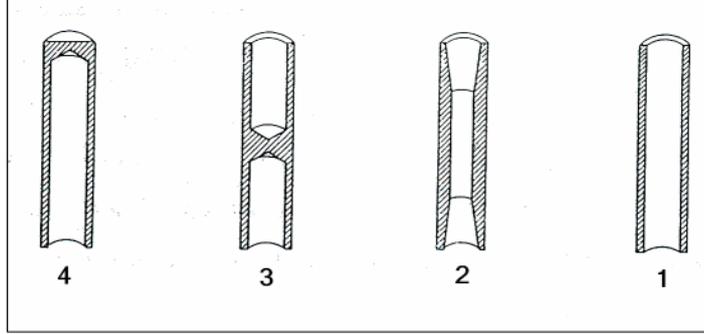
○ أشكال شنادبر المكبس :

شكلا مقطعا شنادبر المكبس	التسمية	خصائص الشنادبر
	شنادبر ذو مقطعا مستطيل (شنادبر انضغاط)	تصميم عادي
	شنادبر ذات مقطعا مستطيل بشطب داخلي	يميل سطح احتكاك الشنادبر قليلاً في الحالة المشدودة مما ينتج عنه كفاية عالية لمنع التسرب وكشط جيد للزيت ويركب في المجرى العلوي أو في المجريين العلويين
	شنادبر ذو مقطعا شبه منحرف	يحدث تغير مستمر لخلوص المجرى ، نتيجة لأي حركة في الاتجاه القطري لشنادبر المكبس وبذلك يمنع تراكم الزيت المتفحم على حواف المجاري
	شنادبر كشط زيت مشطوبة	ذو فعالية جيدة في كشط الزيت . لا يكشط الزيت من سطح جدار الأسطوانة عند صعود المكبس
	شنادبر ذو شق للزيت	تصميم عادي لشنادبر كشط الزيت
	شنادبر زيت ذو شق وناض ابنبوبي (حلزوني)	يضغط الناض ابنبوبي الشكل على شنادبر الزيت الرقيقة ذي الشق ، ضد سطح تحميل الأسطوانة

الجدول (1-1): مختلف أشكال شنادبر المكبس في المحرك الحراري

3-13) بنز (مسمار) المكبس : ينقل بنز المكبس القوة المؤثرة على المكبس إلى ذراع التوصيل. وهو يتعرض أساساً لإجهاد قص. تؤثر ضغوط سطحية على سطح انزلاق بنز المكبس عندما تكون حركته الانزلاقية ضئيلة ولا سيما عندما يكون التزييت رديئاً. لذا يحتاج بنز المكبس إلى قلب متين وسطح صلب. ويتحقق ذلك باستعمال فولاذ ذي سطح مصلب (مصلد) على أن يكون فولاداً غير سبائكي وفي نفس الوقت تتطلب قوى التسارع الكبيرة خفة وزن بنز المكبس. ويمكن تسهيل تركيب بنز المكبس بتسخين المكبس إلى درجة حرارة تتراوح بين (60 : 80) م° بوضعه فوق مسطح تسخين أو بغمره في

زيت نظيف ساخن . وإذا لم يكن بنز المكبس ثابتاً في عروة ذراع التوصيل ، يجب إحكامه ضد الإزاحة المحورية ويتم هذا بتركيب شنب إحكام أو يتم إدخال هذه الشناير في حوز.



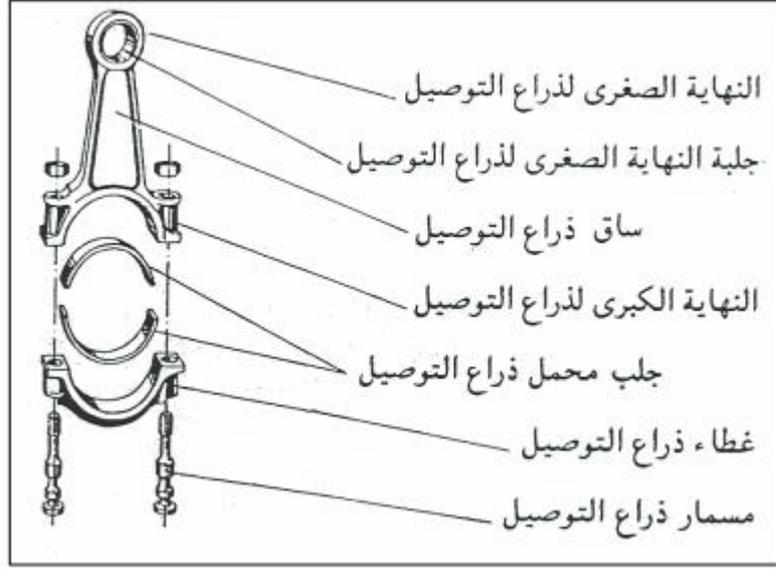
الشكل (1-9): أشكال بنز (مسمار) المكبس

1. بنز مكبس بثقب أسطواني نافذ . 2. بنز مكبس بثقب نافذ ونهايتين مخروطيتين .
3. بنز مكبس بثقب مسدود في الوسط . 4. بنز مكبس بثقب مسدود من طرف واحد .

3-14) ذراع التوصيل : يعمل ذراع التوصيل على نقل القوة من المكبس إلى عمود المرفق و توليد عزم على عمود المرفق و المساعدة في تحويل الحركة الترددية للمكبس إلى حركة دورانية ويتحمل الإجهادات التالية:

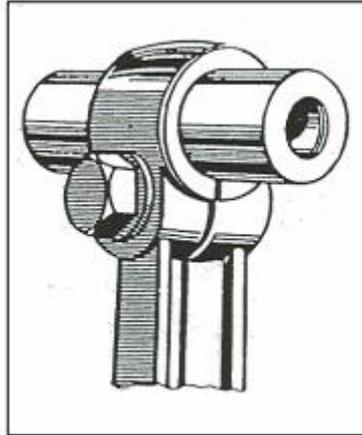
- **إجهاد ضغط :** ناشئ بسبب القوة الكبيرة المؤثرة على المكبس خلال مشاوير الضغط والقدرة والعامد .
- **إجهاد شد:** خلال مشوار السحب .
- **احتكاك :** في المحامل .

نظرا للإجهادات العالية والمتغيرة المؤثرة على ذراع التوصيل، يصنع هذا الذراع من سبائك الفولاذ المقوى، ويتكون ذراع التوصيل من النهاية الصغرى لذراع التوصيل مع جلبتها والساق والنهاية الكبرى لذراع التوصيل مع الغطاء وكذلك من المَحْمَل ومسامير الربط الملولبة.



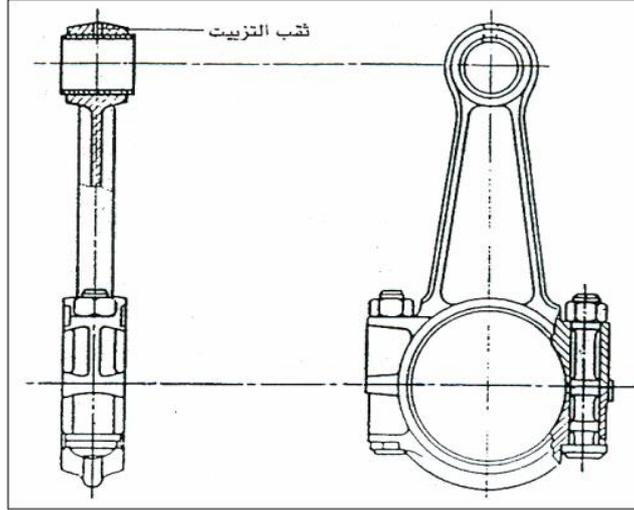
الشكل (1-10): أجزاء ذراع التوصيل

- النهاية الصغرى لذراع التوصيل : يركب بنز المكبس بداخل النهاية الصغرى لذراع التوصيل وتقوم الجلبة المصنوعة من البرونز والمكبوسة في النهاية الصغرى بتحسين خواص الانزلاق ويتم تزييت بنز المكبس من الزيت المتساقط من رأس المكبس والذي يصله من خلال ثقب النهاية الصغرى الذراع التوصيل ويرتكز بنز المكبس عادة في مَحْمَل عائم ويمكن تركيبه يدوياً في هذه الحالة .



الشكل (1-11): ينز المكبس مرتبط بالنهاية الصغرى لذراع التوصيل

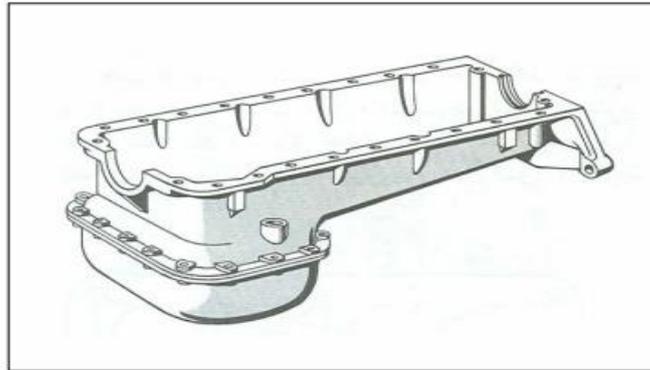
○ ساق ذراع التوصيل : مقطعه على شكل (I) ويمتاز هذا المقطع بمقاومة عالية للانبعاج



الشكل (1-12): مقاطع توضيحية لساق ذراع التوصيل

○ النهاية الكبرى لذراع التوصيل : تحيط هذه النهاية بعمود المرفق وتصنع من نصفي انزلاق وتصنع المحامل من سبيكة الألومنيوم وتدعم بقشرة من الفولاذ وأحياناً تبطن من البرونز والرصاص كمادة تحميل. ويتم تزييت المحمل في النهاية الكبرى لذراع التوصيل بواسطة ثقب في عمود المرفق، وتوجد في المحمل مجار دائرية لاستيعاب الزيت .

3-15) علبة المرفق : وتحتوي على عمود المرفق وحوض لزيت المحرك يصنع عادة من لوح فولاذي أو سبيكة الألومنيوم. وتثبت مع المحرك من الجزء العلوي. وتتم تهوية علبة المرفق بوصلها بأنبوب مع مجمع سحب الهواء من على غطاء رأس المحرك لتحاشي زيادة الضغط بها .



الشكل (1-13): علبة المرفق وحوض الزيت

3-16) عمود المرفق : يصنع عمود المرفق من قطعة واحدة مصنوعة من الصلب السبائكي المعامل حرارياً ذي مقاومة ميكانيكية عالية ويقوم عمود المرفق بتوليد الحركة الدائرية وتوليد عزم الدوران ونقله إلى القابض وتؤثر عليه الإجهادات التالية :

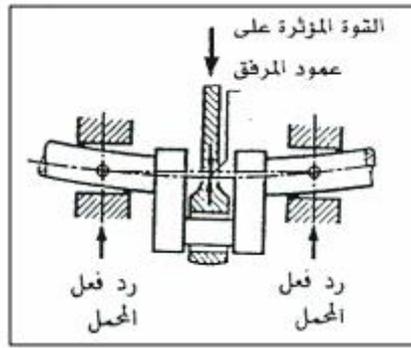
- إجهاد انحناء : يتوقف على قطر عمود المرفق والبعد بين المحامل .

-إجهاد التواء : تعتمد زاوية الالتواء على كل من طول عمود المرفق وقطره .

-اهتزاز التوائي : يتوقف على مادة تصنيع عمود المرفق وطوله وقطره .

-الاحتكاك : في مواقع المحامل .

يعتمد شكل عمود المرفق على عدد الأسطوانات وترتيبها وعدد محامل عمود المرفق وعلى تتابع الإشعال، ويتحدد طول عمود المرفق تبعاً لترتيب الأسطوانات. وتتميز أعمدة مرفق المحركات ذات الأسطوانات المتقابلة والتي على شكل (V) بقصرها وخفة وزنها عن تلك الخاصة بالمحركات المستقيمة.

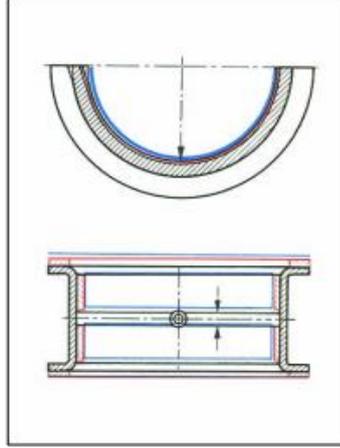


الشكل(1-14): شكل توضيحي للإجهادات المؤثرة على عمود المرفق

○ موازنة عمود المرفق : يدور عمود المرفق في محركات السيارات بسرعة تصل إلى نحو 100 دورة في الثانية . لذلك فإن أي اختلاف في توزيع الكتل يؤدي إلى توليد ارتجاجات شديدة عند هذه السرعة العالية. ولتفادي ذلك تتم موازنة أعمدة المرفق قبل تركيبها مما يعني تحقيق توزيع منتظم للأوزان ويفرق في هذا المجال بين التوازن الاستاتيكي والتوازن الديناميكي ويمكن تحديد مقدار وموقع عدم التوازن على ماكينات الموازنة. وتتم موازنة عمود المرفق بثقب فتحات في مرافق العمود.

3-17) كراسي عمود المرفق : يثبت عمود المرفق على كتلة الأسطوانات من الأسفل بكراسي تثبيت مبطنة بمحامل (سبائك) مصنوعة من الألمنيوم وتقع محامل عمود المرفق للمحركات في مستوى واحد

و يتقرب عمود المرفق لتزيت محامله . ويصل الزيت المدفوع من مضخة الزيت إلى المحامل المختلفة خلال هذه الثقوب ويصمم أحد المحامل ليتحمل القوى المحورية خاصة الناشئة عن القابض .



الشكل (15-1): مقاطع توضح شكل كرسي عمود المرفق

18-3) الحذافة : هي عجلة ثقيلة نسبياً مثبتة بالنهاية الخلفية لعمود المرفق تميل إلى مقاومة أي تغيير

في السرعة بسبب قصورها الذاتي ويعرف القصور الذاتي بأنه الخاصية التي تسبب مقاومة الجسم لأي

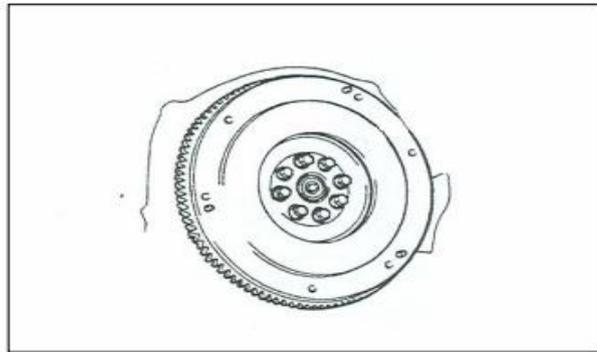
محاولة لتغيير السرعة أو اتجاه الحركة وتؤدي الحذافة الوظائف التالية :

○ تخزين الطاقة من الشوط الفعال شوط القدرة إلى الأشواط غير الفعالة (السحب - الضغط - العادم) التي تليه وبهذا يتحقق دوران هادئ للمحرك .

○ يثبت بها الترس الحلقي الخاص ببادئ تشغيل المحرك .

○ يركب عليها القابض .

وتصنع الحذافة من الفولاذ أو من حديد الزهر الرمادي الخاص .



الشكل (16-1): مظهر عام للحذافة

4) تصنيف المحركات حسب نوع الاحتراق:

4-1) محركات الاحتراق الداخلي: هذه هي محركات بنزين، تحتوي على نظام إشعال، حيث يمكن أن يتم خلط الهواء والبنزين إما عن طريق الكيرباتير أو عن طريق الحقن. أو الاحتراق يتم تشغيله من خلال حقن الديزل تحت ضغط في الهواء المضغوط بشدة، ويحدث اشتعال تلقائي في هذه الحالة.

4-2) محركات الاحتراق الخارجي: في هذه المحركات يتم الاحتراق خارج الأسطوانة مثل محرك ستيرغ والذي سوف نتطرق له في الفصل الثالث كمثال تجريبي لمحرك مكبسي ذو فعالية عالية.

5) التصنيف حسب نوع الاشتعال:

5-1) محرك الإشعال بالشرارة: ومنها محرك البنزين، حيث يتم تشغيل احتراق البنزين بواسطة شرارة من شمعة، يحتوي على نظام إشعال مُحكَّم، ويتم خلط الهواء والبنزين فيه في مرحلتين، إما عن طريق الكيرباتير أو الحقن. منذ عام 1993، تم تجهيز جميع السيارات الجديدة المباعة في أوروبا بنظام حقن.

5-2) محرك الاشتعال الذاتي: محركات الديزل، حيث يتم تشغيل احتراق الديزل بواسطة حقن الوقود تحت ضغط في الهواء المضغوط بشدة، ويحدث اشتعال ذاتي في هذه الحالة، مما يعني أن الخليط يشتعل تلقائيًا بالضغط..

6) التصنيف حسب نوع الحقن:

6-1) محركات الحقن المباشر: الحقن متصل مباشرة بغرفة الاحتراق، ويصب مباشرة في هذه الغرفة، وهو من النوع ذو الفتحات (عدة فتحات).

➤ الإيجابيات:

- كفاءة عالية، وبالتالي استهلاك منخفض إلى حد ما.
- بداية باردة جيدة.
- بساطة الإنتاج.

➤ السلبيات:

محرك يصدر ضجيجًا: يتميز بوجود دقة مميزة عند التشغيل البطيء وعند السرعات المنخفضة.

6-2) محركات الحقن غير المباشر:

تنقسم إلى ثلاث عائلات:

- حقن في غرفة الاحتراق المسبق.

- حقن في غرفة إضافية لاحتياط الهواء.
- حقن في غرفة التشويش.
- يُرش الديزل بواسطة حاقن، عادة ما يكون بإبرة، في غرفة مسبقة للاحتراق تقع في الرأس. الحل الأكثر شيوعاً لمحركات الحقن غير المباشر هو غرفة التشويش، خاصة على السيارات الخفيفة (بيجو، رينو، ستروين...). بالنسبة لهذا النوع من المحركات، يعد جهاز مساعدة في البدء ضرورياً (شمعات التسخين).

➤ الإيجابيات:

- ضغط الحقن أقل من الحقن المباشر، مما يجعل المحرك أقل ضجيجاً.
- احتراق أكثر سلاسة وأسرع. سرعات محرك أعلى.

➤ السلبيات:

- لا يمكن بدء التشغيل في البرد دون جهاز مساعد للبدء.

(7) الخاتمة :

المحرك الحراري هو آلة تستقبل الطاقة على شكل حرارة وتحوّلها إلى عمل ميكانيكي. إعادة تأهيل المحركات الحرارية وصيانة قطع الغيار اللازمة لتجديد المحركات تتطلب معرفة تقنية بجميع الأجزاء المتحركة والثابتة لهذا النظام مثل (المكبس، الذراع، عمود الكرنك، إلخ)، وفهم دورها ومواد تصنيعها لمعرفة ظروف التشغيل وعمر كل جزء. يعتمد مبدأ التشغيل على عدد الأسطوانات والدورة الديناميكية الحرارية، وكذلك أنواع الإشعال والاحتراق المختلفة التي تتغير وفقاً لنوع المحرك وخصائصه.

(8) مراجع الفصل الأول:

- Alles, Gregory D. 1991. "Rudolf Otto and the politics of Utopia." *Religion* 21 (3):235-256. doi: [https://doi.org/10.1016/0048-721X\(91\)90049-V](https://doi.org/10.1016/0048-721X(91)90049-V).
- Amaral, Lucimar Venancio, Augusto César Teixeira Malaquias, Marco A. Fraga, Ricardo Belchior Torres, Rita C. O. Sebastião, and Fabrício J. P. Pujatti. 2024. "Combustion and specific fuel consumption evaluation of a single-cylinder engine fueled with ethanol, gasoline, and a hydrogen-rich mixture." *Case Studies in Thermal Engineering* 57:104316. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104316>.
- Bataineh, Khaled. 2024. "Hybrid fuel-assisted solar-powered stirling engine for combined cooling, heating, and power systems: A review." *Energy* 300:131506. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131506>.
- Brancaleoni, Pier Paolo, Enrico Corti, Vittorio Ravaglioli, Davide Moro, and Giacomo Silvagni. 2024. "Innovative torque-based control strategy for hydrogen internal combustion engine." *International Journal of Hydrogen Energy* 73:203-220. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.481>.

- Ergin, Turgay. 2024. "Experimental optimization of displacer working gap in a gamma-type Stirling engine." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 52:101677. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101677>.
- Frank, Arthur L., and Nico van Zandwijk. 2024. "Asbestos history and use." *Lung Cancer* 193:107828. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2024.107828>.
- Marjanen, Petteri, Niina Kuittinen, Panu Karjalainen, Sanna Saarikoski, Mårten Westerholm, Rasmus Pettinen, Minna Aurela, Henna Lintusaari, Pauli Simonen, Lassi Markkula, Joni Kalliokoski, Hugo Wihersaari, Hilka Timonen, and Topi Rönkkö. 2022. "Exhaust emissions from a prototype non-road natural gas engine." *Fuel* 316:123387. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123387>.
- Shaitelman, S. F. 2015. "Global abnormalities in lymphatic function following systemic therapy in patients with breast cancer: Bains SK, Peters AM, Zammit C, et al (St George's, Univ of London, UK; Brighton and Sussex Univ Hosps NHS Trust, UK) *Br J Surg* 102:534-540, 2015." *Breast Diseases: A Year Book Quarterly* 26 (3):204-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.breastdis.2015.07.011>.
- Son, Onur, Zhijin Wang, and Ismet Gursul. 2022. "Dynamics of tip vortices on plunging wings." *Aerospace Science and Technology* 128:107761. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107761>.
- Tissot, I., B. Ottone Alves, T. Silva, F. Nogueira, and M. Manso. 2024. "In full swing: Analytical strategies for the conservation assessment of operating Industrial Heritage machinery." *Journal of Cultural Heritage* 66:398-406. doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.12.004>.
- Wu, Shen, Tie Li, Fuguo Xu, Run Chen, Xinyi Zhou, and Bing Wang. 2024. "Configuration size optimization of gas-electric hybrid power systems on ships considering energy density and engine load response." *Energy Conversion and Management* 301:118069. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118069>.
- Yadav, Shashidhar, and Manjunatha Gangappa. 2021. "INFLUENCE OF PATENTS ON SALES IN AUTOMOBILE COMPANIES."
- Yu, Zhiwei, and Xiaolei Xu. 2010. "Failure investigation of a truck diesel engine gear train consisting of crankshaft and camshaft gears." *Engineering Failure Analysis* 17 (2):537-545. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.003>.
- Zhao, Dongpeng, Shuai Deng, Li Zhao, Weicong Xu, Ruikai Zhao, and Wei Wang. 2020. "From 1 to N: A computer-aided case study of thermodynamic cycle construction based on thermodynamic process combination." *Energy* 210:118553. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118553>.

الفصل الثاني

دراسة نظرية لدورات الهواء القياسية

(1) مقدمة:

نقصد بالدورات القياسية للهواء، هي الدورات التي يمكن دراستها لمعرفة أداء أجهزة تعمل بالهواء (محركات + مضخات) أهم الدورات الترموديناميكية: هي دورة كارنو ودورة أوتو وديزل وستيرلنغ مع إيريكسون وجول برايتون. نعتبر الهواء غاز مثالي، والإجراءات في الدورات جميعها عكوسة.

(2) دراسة دورات الهواء القياسية من حيث الإجراءات:

(1-2) دورة كارنو: تتألف دورة كارنو من العمليات التالية:

1. تمدد غاز ايزوثيرمي عكوس: في هذه العملية يمتص الغاز المثالي كمية من الحرارة Q_H من المصدر عند درجة الحرارة المرتفعة ويتمدد ويقدم عمل للوسط المحيط مع ثبات في درجة الحرارة T_H .
 2. تمدد أديباتي عكوس: في هذه العملية يكون النظام معزول حرارياً، يتابع الغاز التمدد ويقدم عمل للوسط المحيط مما يسبب انخفاض درجة حرارة النظام الى درجة الحرارة المنخفضة T_L .
 3. انضغاط ايزوثيرمي عكوس: في هذه العملية يقدم الوسط المحيط العمل الى النظام عند درجة الحرارة T_L مما يسبب فقدان الحرارة Q_L من النظام الترموديناميكي.
 4. انضغاط اديباتي عكوس: في هذه العملية يستمر الوسط المحيط بتقديم العمل الى النظام مما يرفع درجة الحرارة الى T_H .
- تستعمل دورة كارنو في المحركات والمضخات فهي الدورة الوحيدة التي يمكن قلب إتجاهها، وهي مثالية لعدة أسباب، ومن أهم أسباب التي تجعلها مثالية:

الإجراء الأول: سحب حرارة من الوسط الخارجي في ثبوت درجة الحرارة، وهذا غير ممكن في الواقع.

الإجراء الثاني: عملية تبريد في حالة كظم للحرارة، وهذا غير ممكن في الواقع.

الإجراء الثاني: طرد حرارة إلى الوسط الخارجي في ثبوت درجة الحرارة، وهذا غير ممكن في الواقع.

الإجراء الرابع: عملية تسخين في حالة كظم للحرارة، وهذا غير ممكن في الواقع.

(2-2) دورة أوتو: دورة أوتو هي الدورة المطابقة لمحرك الاحتراق الداخلي ذات الإشعال بالشرارة (محركات

البنزين - محركات الغاز المسال)، (Chen, Shi, et al. 2023) والدورة تحوي الإجراءات

الأربع التالية:

1. انضغاط كظوم وبالتالي ثابت الانتروبي ثابت $S_L =$.
 2. إضافة الحرارة Q_H عند حجم ثابت (حجم أصغري v_{min})
 3. تمدد كظوم وبالتالي ثابت الانتروبي ثابت $S_H =$
 4. طرد الحرارة Q_L عند حجم ثابت (حجم أعظمي v_{max})
- (3-2) دورة ديزل: تستخدم عموماً في محركات الديزل وهي مشابهة لدورة أوتو ماعداً أنه يوجد عملية إعطاء حرارة عند ضغط ثابت بدلاً من عملية إعطاء الحرارة عند حجم ثابت في دورة أوتو (Xu et al. 2024). والدورة تحوي الإجراءات الأربع التالية:

1. انضغاط كظوم وبالتالي ثابت الانتروبي ثابت $S_L =$.
 2. إضافة الحرارة Q_H عند ضغط ثابت (ضغط أعظمي P_{max})
 3. تمدد كظوم وبالتالي ثابت الانتروبي ثابت $S_H =$
 4. طرد الحرارة Q_L عند حجم ثابت (حجم أعظمي v_{max})
- (4-2) دورة ستيرلينغ: وهي دورة ذات مردود عالي إذا زودت بمسترجع مثالي بين إجراء التسخين وإجراء التبريد تحت حجم ثابت، ويمكن تلخيص الإجراءات الأربعة كما يلي:

1. تسخين بتبادل حرارة Q_1 تحت حجم أصغري ثابت $v_{min} =$.
 2. إضافة الحرارة Q_H عند درجة حرارة ثابتة (T_H) .
 3. تبريد بتبادل حرارة Q_2 تحت حجم أعظمي ثابت $v_{max} =$.
 4. طرد الحرارة Q_L عند درجة حرارة ثابتة (T_L)
- بما أن الدورة تتبادل أربع مقادير للحرارة فيجب التخلص من إثنين ($Q_1 = Q_2$) وإبقاء إثنين (Q_L, Q_H)، ومن هذا المنطلق نستخدم المسترجع ذو حجم ثابت الذي يأخذ الحرارة من إجراء التبريد ويعطيه لإجراء التسخين. وهذه الدورة سوف تدرس في الفصل الثالث تجريبياً وباستخدام محرك يعمل تحت هذه الدورة.

- (5-2) دورة إيريكسون: وهي دورة ذات مردود عالي إذا زودت بمسترجع مثالي بين إجراء التسخين وإجراء التبريد تحت ضغط ثابت، ويمكن تلخيص الإجراءات الأربعة كما يلي:

1. تسخين بتبادل حرارة Q_1 تحت ضغط أعظمي ثابت $P_{max} =$

2. إضافة الحرارة Q_H عند درجة حرارة ثابتة (T_H) .

3. تبريد بتبادل حرارة Q_2 تحت ضغط أصغري ثابت P_{min} .

4. طرد الحرارة Q_L عند درجة حرارة ثابتة (T_L) .

بما أن الدورة تتبادل أربع مقادير للحرارة فيجب التخلص من إثنين $(Q_1 = Q_2)$ وإبقاء إثنين (Q_H, Q_L) ، ومن هذا المنطلق نستخدم المسترجع ذو ضغط ثابت الذي يأخذ الحرارة من إجراء التبريد ويعطيه لإجراء التسخين. وهذه الدورة سوف تدرس في الفصل الثالث تجريبيا وباستخدام محرك يعمل تحت هذه الدورة.

(6-2) دورة برايتون : الدورة المثالية للمحركات التوربينية الغازية، وهي ليس محل دراسة البحث.

(3) تصنيف الدورات حسب مبدأ إنتاج العمل: ويمكن تصنيف الدورات حسب مايلي:

التصنيف 1: حسب مبدأ إنتاج أو استهلاك العمل ، أولا : محركات منتجة للعمل ، ثانيا: مضخات مستهلكة للعمل.

التصنيف 2: حسب مبدأ إنتاج العمل أولا: توربينة باستخدام التخلخل(انخفاض الضغط)، ثانيا : مكبسية باستخدام التمدد والانضغاط (زيادة ونقصان الحجم) .

التصنيف 3: حسب موقع الاحتراق، أولا: ذات إحتراق داخلي ، ثانيا : ذات إحتراق خارجي.

(4) تصنيف الدورات حسب مقدار الكفاءة وقابلية التنفيذ كمحرك:

يمكن تلخيص الإجراءات برموز، وتتلخص الدورات القياسية للمحركات إلى:

جدول(2-1): تصنيف الدورات حسب قابلية التنفيذ

النوع	التسمية (اختصار الإجراءات)	وصف مختصر للدورة
النوع 1 :	كارنو (STST)	(غير قابلة لتطبيق في الواقع، مثالية)
النوع 2 :	ستيرلينغ (VTVT)	(ذات كفاءة عالية وتعتمد على مسترجعات)
	ايركسون (PTPT)	(ذات كفاءة عالية وتعتمد على مسترجعات)
النوع 3:	أوتو (SVSV)	(قابلة للتطبيق ، محرك الاشتغال بالشمعة، مكبسي)
	ديزل (SPSV)	(قابلة للتطبيق ، محرك الاشتغال بالضغط، مكبسي)
	جول برايتون (SPSP)	(قابلة للتطبيق ، المحرك النفاث، توربيني)

النوع 3 يمكن تحويله الى النوع 1 بالمرور على النوع 2 وباستخدام مسترجعات (ذات (حجم ، ضغط) ثابت)

النوع 2 هي دورات ذات مردود عالي، وإذا كان المسترجع مثالي تصبح الدورة تقارب في أدائها النوع 1

(5) الفرضيات المعتمدة في الدراسة:

- مائع التشغيل هو كتلة ثابتة من الهواء.
- مائع التشغيل عبارة عن غاز.
- لا يوجد إجراء شحن وإجراء تصريف في الدورة.
- يستبدل إجراء الاحتراق بإجراء انتقال حرارة من مصدر خارجي.
- يتم انتقال الحرارة إلى المحيط بدلا من إجراء التصريف كما يحدث في المحرك الفعلي .
- كل الإجراءات انعكاسية.
- الحرارة النوعية الكتلية C_p ، C_v للهواء ثابتة.

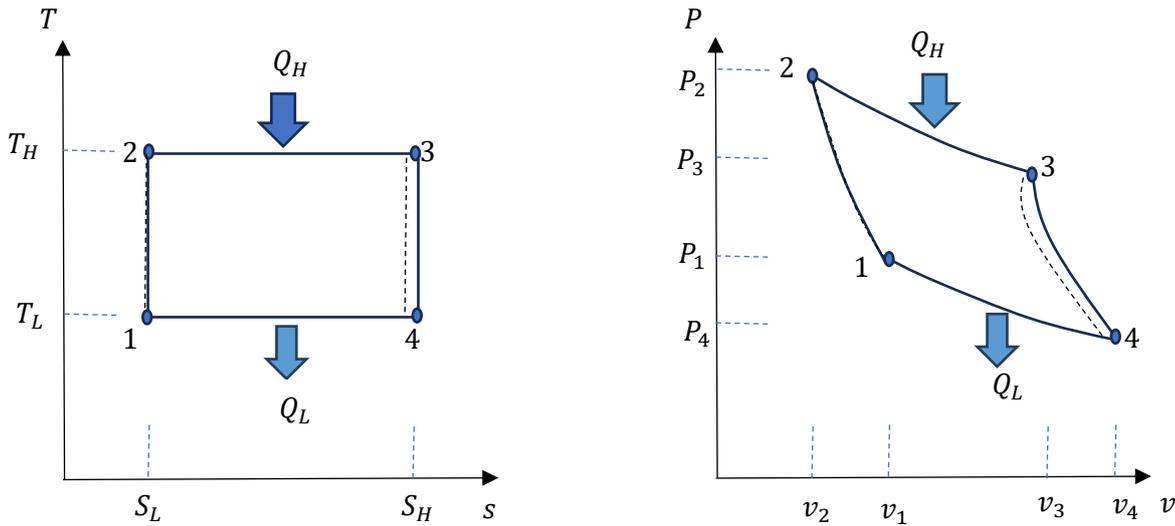
(6) الأهداف من إستعمال دورات الهواء القياسية:

- الفحص الكيفي لعدد من المتغيرات على الأداء، لكن معظم التغيرات تختلف كثيرا في القيم في المحرك الفعلي.
- دراسة الضغط المتوسط P_{moy} و يستخدم في المحركات الترددية وتعريفه حسب العلاقة:

$$W_{net} = P_{moy}(v_{max} - v_{min})$$

(7) دراسة دورات الهواء من حيث الكفاءة:

(1-7) دورة كارنو : (Chen, Xu, et al. 2023) ويمكن تلخيصها في المخططات التالية



الشكل (2-1): مخطط دورة كارنو وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة متناظرة)

$$T_L = T_1 = T_4 < T_2 = T_3 = T_H$$

$$V_{min} = V_2 < V_1 < V_3 < V_4 < V_{max}$$

$$S_L = S_1 = S_2 < S_3 = S_4 = S_H$$

$$P_{min} = P_4 < P_1 < P_3 < P_2 = P_{max}$$

الكفاءة بدلالة نسبة الحرارة r_Q :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} = 1 - (r_Q)^{-1} ; \quad r_Q = \frac{|Q_H|}{|Q_L|}$$

$$\Rightarrow \eta_{carnot} = 1 - (r_Q)^{-1}$$

الكفاءة بدلالة نسبة درجات الحرارة r_T :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - (r_T)^{-1} ; \quad r_T = \frac{T_H}{T_L}$$

$$\Rightarrow \eta_{carnot} = 1 - (r_T)^{-1}$$

الكفاءة بدلالة نسبة الضغوط r_p :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} ; \quad r_T = \frac{T_H}{T_L} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} ; \quad r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

$$\eta_{carnot} = 1 - (r_p)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

الكفاءة بدلالة نسبة الحجم (الانضغاط) r_v :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{1-\gamma} ; \quad r_T = \frac{T_H}{T_L} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{1-\gamma} ; \quad r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3}$$

$$\eta_{carnot} = 1 - (r_v)^{1-\gamma}$$

نتائج: مما سبق يمكن استنتاج أن الكفاءة تتزايد وتتناقص مع النسب الأربعة مع اختلاف في الأس فقط:

$$\eta_{carnot} = 1 - (r_Q)^{-1} = 1 - (r_T)^{-1} = 1 - (r_p)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 1 - (r_v)^{1-\gamma}$$

أولاً: تفسير حالة المحرك الخامل: عندما تكون أحد النسب تسوي 1، سوف تنعدم الكفاءة ويصبح المحرك

خاملاً (Daniarta et al. 2024)، ويمكن تفسير ذلك حسب النسبة المدروسة:

نسبة الحرارة: عندما تسوي 1، يصبح المحرك مرتبط بمصدر واحد للحرارة وهذا يتناقض مع انشاء محرك بالمبدأ

الثاني للترموديناميك كما ينص عليه كلفن - بلانك.

نسبة درجات الحرارة: عندما تسوي 1، يصبح المصدرين لهما نفس درجة الحرارة وهذا يعني أن المصدرين أصبحا مصدر واحد ويعود بنا التفسير إلى نفس التفسير السابق الخاص بنسبة الحرارة.

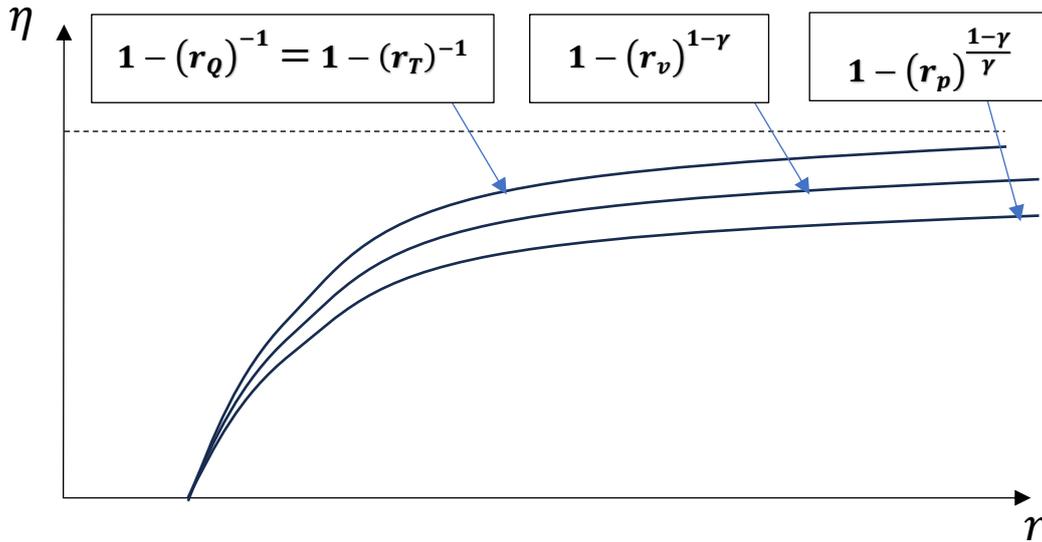
نسبة الضغوط: عندما تسوي 1، هذا يعني أن الضغوط في بداية ونهاية كل إجراء كظوم متساوية، يعني

المنتج من طرفها وبالتالي يصبح محرك كامل. $P_2 = P_1$ و $P_4 = P_3$ مما يجعل الدورة تختفي في المخطط $(P - v)$ واختفائه يؤدي إلى انعدام العمل

نسبة الحجم: عندما تسوي 1، نفس التفسير الخاص بنسبة الضغوط.

أولاً: تفسير حالة المحرك ذو الكفاءة العالية : عندما تكون أحد النسب تقوّل إلى ∞ ، سوف تقوّل الكفاءة إلى القيمة 1 ويصبح المحرك ذو كفاءة عالية، وهذه الحالة غير ممكنة حسب كلرنو الذي ينص على أن الكفاءة دائماً تكون أقل من 1 حتى بالنسبة لمحرك يعمل بدورة كلرنو (Qiao et al. 2023)، ولكي تكون النسب الأربع تقوّل إلى ∞ يكون فيها البسط كبيراً جداً أو المقام صغيراً جداً، وهذا غير ممكن في حالة الحرارة ودرجة الحرارة والضغوك وكذلك الحجم.

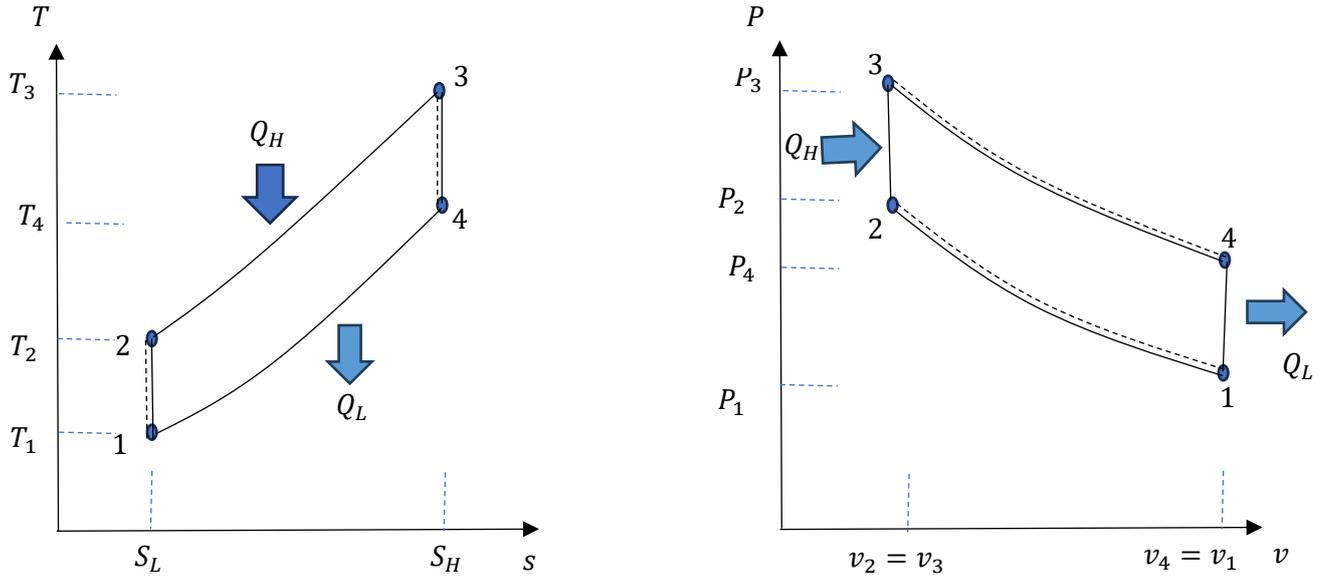
والشكل (2-2) يعطي تغيرات الكفاءة بالنسبة للنسب الأربع.



الشكل (2-2): مخطط يوضح تغيرات كفاءة دورة كارنو بدلالة النسب الأربع الخاصة بالمقادير

الفيزيائية

(2-7) دورة أوتو: ويمكن تلخيصها في المخططات التالية



الشكل (2-3): مخطط دورة أوتو وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة متناظرة)

(Ge et al. 2022)

$$T_{min} = T_1 < T_2 < T_4 < T_3 = T_{max}$$

$$V_{min} = V_2 = V_3 < V_4 = V_1 = V_{max}$$

$$S_L = S_1 = S_2 < S_3 = S_4 = S_H$$

$$P_{min} = P_1 < P_4 < P_2 < P_3 = P_{max}$$

الكفاءة بدلالة نسبة الحرارة r_Q :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} = 1 - (r_Q)^{-1} ; \quad r_Q = \frac{|Q_H|}{|Q_L|}$$

$$\Rightarrow \eta_{carnot} = 1 - (r_Q)^{-1}$$

الكفاءة بدلالة نسبة درجات الحرارة r_T :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

$$\left(\text{لدينا} \right) ; \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{\gamma-1} ; \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_{min}}{v_{max}} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} ; \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right) = \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)$$

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r_T)^{-1} \quad ; \quad r_T = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$\eta_{carnot} = 1 - (r_T)^{-1}$$

الكفاءة بدلالة نسبة الحجم (الإنضغاط) r_v :

من العلاقات السابقة لدينا العلاقة بين نسبة درجات الحرارة ونسبة الحجم:

$$(r_T)^{-1} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_{min}}{v_{max}} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_{max}}{v_{min}} \right)^{1-\gamma} = (r_v)^{1-\gamma}$$

$$\eta_{carnot} = 1 - (r_T)^{-1} = 1 - (r_v)^{1-\gamma} \quad ; \quad r_v = \frac{v_{max}}{v_{min}} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3}$$

$$\eta_{carnot} = 1 - (r_v)^{1-\gamma}$$

الكفاءة بدلالة نسبة الضغوط r_p :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad ; \quad r_T = \frac{T_H}{T_L} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad ; \quad r_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

$$\eta_{carnot} = 1 - (r_p)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

نتائج: مما سبق يمكن استنتاج أن الكفاءة تزايد وتتناقص مع النسب الأربعة مع اختلاف في الأس فقط:

$$\eta_{carnot} = 1 - (r_Q)^{-1} = 1 - (r_T)^{-1} = 1 - (r_p)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 1 - (r_v)^{1-\gamma}$$

أولاً: تفسير حالة المحرك الخامل : عندما تكون أحد النسب تسوي 1، سوف تنعدم الكفاءة ويصبح المحرك

خاملاً، ويمكن تفسير ذلك حسب النسبة المدروسة:

نسبة الحرارة : عندما تسوي 1، يصبح المحرك مرتبط بمصدر واحد للحرارة وهذا يتناقض مع انشاء محرك بالمبدأ

الثاني للترموديناميك كما ينص عليه كلفن- بلانك.

نسبة درجات الحرارة: عندما تسوي 1، يصبح المصدرين لهما نفس درجة الحرارة وهذا يعني أن المصدرين أصبحا

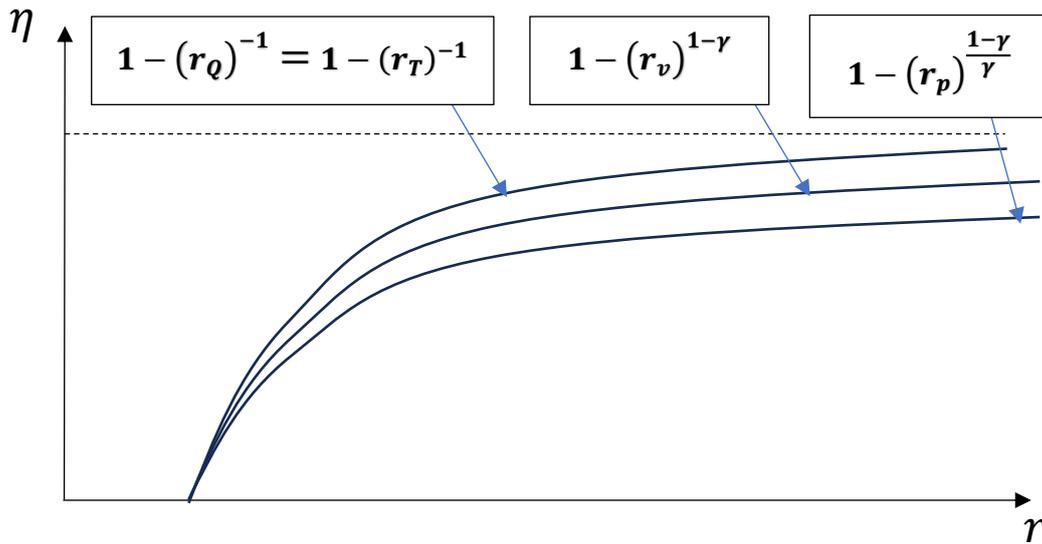
مصدر واحد ويعود بنا التفسير إلى نفس التفسير السابق الخاص بنسبة الحرارة.

نسبة الضغوط: عندما تسوي 1، هذا يعني أن الضغوط في بداية ونهاية كل إجراء كظوم متساوية، يعني

المنتج من طرفها وبالتالي يصبح محرك خامل. $P_4 = P_3$ و $P_2 = P_1$ مما يجعل الدورة تختفي في المخطط $(P - v)$ واختفائه يؤدي إلى انعدام العمل

نسبة الحجم: عندما تسوي 1، نفس التفسير الخاص بنسبة الضغوط.

أولاً: تفسير حالة المحرك ذو الكفاءة العالية : عندما تكون أحد النسب تؤول إلى ∞ ، سوف تؤول الكفاءة إلى القيمة 1 ويصبح المحرك ذو كفاءة عالية، وهذه الحالة غير ممكنة حسب كلرنو الذي ينص على أن الكفاءة دائماً تكون أقل من 1 حتى بالنسبة لمحرك يعمل بلورة كلرنو، ولكي تكون النسب الأربع تؤول إلى ∞ يكون فيها البسط كبيراً جداً أو المقام صغيراً جداً، وهذا غير ممكن في حالة الحرارة ودرجة الحرارة والضغوك وكذلك الحجم. والشكل (4-2) يعطي تغيرات كفاءة دورة أوتو بالنسبة للنسب الأربع.



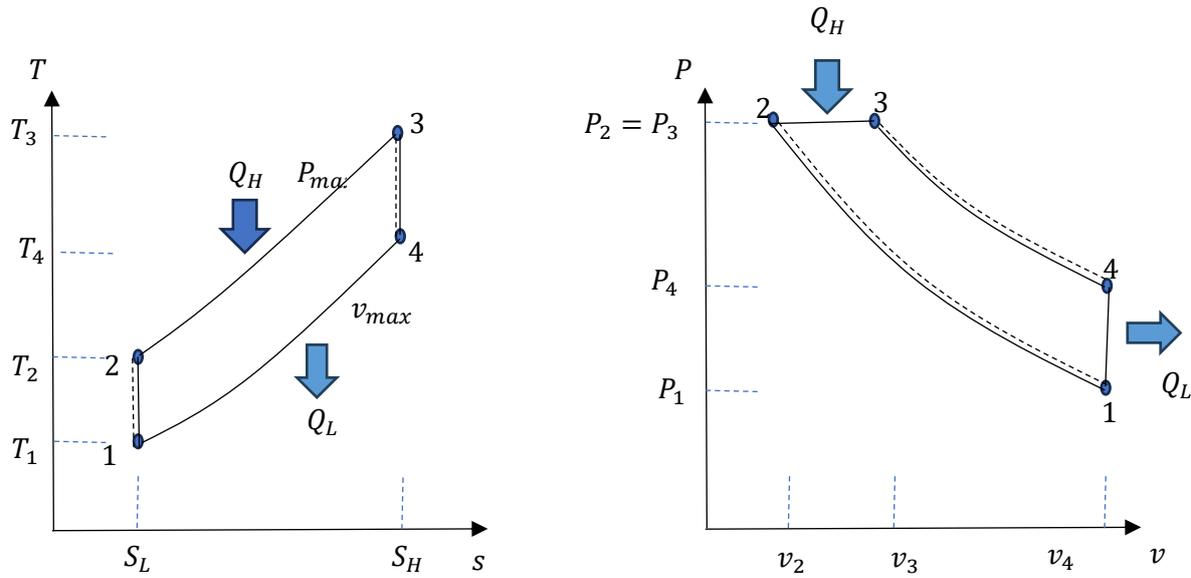
الشكل (4-2): مخطط يوضح تغيرات كفاءة دورة أوتو بدلالة النسب الأربع الخاصة بالمقادير

الفيزيائية

ملاحظات عامة في التشابه بين دورتي كارنو وديزل: من الدراسة السابقة لدورتي كارنو وأوتو يبدو ان الدورتين اتفقتا على نفس العلاقات الخاصة بتغير الكفاءة بدلالة النسب الأربع، والاختلاف الوحيد الذي يجعل دورة كارنو لها كفاءة أكبر من دورة أوتو هو الفارق الكبير بين قيم النسب لكل من الدوريتين، فنجد مقلا ان نسبة الحرارة لكارنو أكبر من نسبة الحرارة لدورة أوتو في نفس الشروط التشغيلية للدوريتين، ونفس الشيء بالنسبة للنسب الأخرى. والسبب الحقيقي في التشابه بين الدورتي في العلاقات الخاصة بالكفاءة

يعود للتساخ بين الدوري في وجود إجرائين كظومين في كلا لدورتين مع التناظر في الإجراءات في كل دورة، أي أن دورة كارنو بها إجرائين كظومين وإجرائين ثابت درجة الحرارة، وكذلك أوتو لها إجرائين كظومين وإجرائين ثابتي الحجم. بالنسبة للدورات التي تكون غير متناظرة سوف تكون العلاقات الخاصة بالكفاءة مختلفة عن كارنو وأوتو، وهذا ما سوف يدرس في دورة ديزل (Nyongesa et al. 2024).

3-7 دورة ديزل: ويمكن تلخيصها في المخططات التالية



الشكل (2-5): مخطط دورة ديزل وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة غير متناظرة)

$$T_{min} = T_1 < T_2 < T_4 < T_3 = T_{max}$$

$$V_{min} = V_2 < V_3 < V_4 = V_1 = V_{max}$$

$$S_L = S_1 = S_2 < S_3 = S_4 = S_H$$

$$P_{min} = P_1 < P_4 < P_2 = P_3 = P_{max}$$

الكفاءة بدلالة نسبة الحرارة r_Q :

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} = 1 - (r_Q)^{-1} ; \quad r_Q = \frac{|Q_H|}{|Q_L|}$$

$$\Rightarrow \eta_{carnot} = 1 - (r_Q)^{-1}$$

الكفاءة بدلالة نسب الحجم a الكبيرة و b الصغيرة:

بما أن الدورة غير متناظرة في نوعية الإجراءات (إجرائين كظومين مع إجراء ثابت الحجم وإجراء ثابت الضغط) (Paudel et al. 2024) ينتج لنا نسبتين من نسب الحجم حسب الشكل (2-5) وهما كما يلي:

$$a = \frac{v_{max}}{v_{min}} = \frac{v_4}{v_2} = \frac{v_1}{v_2} \text{ : نسبة الحجم الكبيرة:}$$

$$b = \frac{v_{max}}{v_{moy}} = \frac{v_4}{v_3} = \frac{v_1}{v_3} \text{ : نسبة الحجم الصغيرة:}$$

ننطلق من العلاقة العامة للكفاءة:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

إذا اعتبرنا الهواء غاز مثالي فهو يخضع للعلاقة التالية:

$$Pv = \bar{R}T \Rightarrow T = \frac{Pv}{\bar{R}}$$

نطبق العلاقة السابقة على علاقة الكفاءة فينتج لنا:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\left(\frac{P_4 v_4}{\bar{R}} - \frac{P_1 v_1}{\bar{R}}\right)}{\left(\frac{P_3 v_3}{\bar{R}} - \frac{P_2 v_2}{\bar{R}}\right)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(P_4 v_4 - P_1 v_1)}{(P_3 v_3 - P_2 v_2)}$$

بعد توظيف القيم المتساوية للقيم للحجم والضغط:

$$v_1 = v_4 = v_{max}$$

$$P_2 = P_3 = P_{max}$$

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(P_4 v_4 - P_1 v_1)}{(P_3 v_3 - P_2 v_2)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\left(\frac{P_4}{P_{max}} - \frac{P_1}{P_{max}}\right)}{\left(\frac{v_3}{v_{max}} - \frac{v_2}{v_{max}}\right)}$$

نعيد ترتيب الرموز حسب الإجراءات الكظومة في الدورة:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\left(\frac{P_4}{P_3} - \frac{P_1}{P_2}\right)}{\left(\frac{v_3}{v_4} - \frac{v_2}{v_1}\right)}$$

ولدينا حسب الإجراءات الكظومة في الدورة:

$$\frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^\gamma = b^{-\gamma} \quad ; \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^\gamma = a^{-\gamma}$$

تصبح علاقة الكفاءة كما يلي:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(b^{-\gamma} - a^{-\gamma})}{(b^{-1} - a^{-1})}$$

الكفاءة بدلالة نسب الضغوط α الكبيرة و β الصغيرة

بما أن الدورة غير متناظرة في نوعية الإجراءات (إجرائين كظومين مع إجراء ثابت الحجم وإجراء ثابت الضغط) ينتج لنا نسبتين من نسب الضغوط حسب الشكل (2-5) وهما كما يلي:

$$\alpha = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_1} \quad \text{نسبة الحجم الكبيرة:}$$

$$\beta = \frac{P_{max}}{P_{moy}} = \frac{P_2}{P_4} = \frac{P_3}{P_4} \quad \text{نسبة الحجم الصغيرة:}$$

ننتقل من العلاقة الخاصة للكفاءة المستنتجة من نسب الحجم:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\left(\frac{P_4}{P_3} - \frac{P_1}{P_2}\right)}{\left(\frac{v_3}{v_4} - \frac{v_2}{v_1}\right)}$$

ولدينا حسب الإجراءات الكظومة في الدورة:

$$\frac{v_3}{v_4} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{1/\gamma} = \beta^{-1/\gamma} \quad ; \quad \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{1/\gamma} = \alpha^{-1/\gamma}$$

تصبح علاقة الكفاءة كما يلي:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(\beta^{-1} - \alpha^{-1})}{(\beta^{-1/\gamma} - \alpha^{-1/\gamma})}$$

الكفاءة بدلالة نسب درجات الحرارة c الكبيرة و d الصغيرة:

بما أن الدورة غير متناظرة في نوعية الإجراءات (إجرائين كظومين مع إجراء ثابت الحجم وإجراء ثابت الضغط) ينتج لنا نسبتين من نسب درجات الحرارة حسب الشكل (2-5) وهما كما يلي:

$$c = \frac{T_2}{T_1} \text{ نسبة الحجم الكبيرة:}$$

$$d = \frac{T_3}{T_4} \text{ نسبة الحجم الصغيرة:}$$

ملاحظة: كيف نميز بين c الكبيرة و d الصغيرة؟

أولاً: بما أن النسبتين غير متساويتين فلا بد من أن أحدهما أكبر من الثانية.

ثانياً: في الرسم التحويل (1-4) ثابت الحجم له ميل أكبر من التحويل (2-3) في المخطط (T-s)

و منه يصبح الفرق بين T_1 و T_2 أكبر من الفرق بين T_3 و T_4 .

ننطلق من العلاقة الخاصة للكفاءة المستنتجة من نسب الحجم:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\left(\frac{P_4}{P_3} - \frac{P_1}{P_2}\right)}{\left(\frac{v_3}{v_4} - \frac{v_2}{v_1}\right)}$$

ولدينا حسب الإجراءات الكظومة في الدورة:

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

$$\frac{v_3}{v_4} = \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} = d^{\frac{1}{1-\gamma}} \quad ; \quad \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} = c^{\frac{1}{1-\gamma}}$$

تصبح علاقة الكفاءة كما يلي:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\left(d^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - c^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}\right)}{\left(d^{\frac{1}{1-\gamma}} - c^{\frac{1}{1-\gamma}}\right)}$$

ملاحظة عامة: بالنسبة لدورة ديزل كانت عبارة كفاءتها بالنسب المختلفة كما يلي (Chen, Dou, et al. (2023):

(2023):

$$\eta_{carnot} = 1 - (r_Q)^{-1} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(b^{-\gamma} - a^{-\gamma})}{(b^{-1} - a^{-1})} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(\beta^{-1} - \alpha^{-1})}{\left(\beta^{\frac{1}{\gamma}} - \alpha^{\frac{1}{\gamma}}\right)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\left(d^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - c^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}\right)}{\left(d^{\frac{1}{1-\gamma}} - c^{\frac{1}{1-\gamma}}\right)}$$

تتفق هذه العبارة الأربع في شيء واحد هو أن الأسس دائما سالبة وهذا ما يثبت ان الكفاءة تزداد مع النسب بنفس الطريقة التي درست في دورة كارنو أوتو مع اختلاف واضح في عدد النسب لكل مقدار، فالحرارة لها نسبو واحدة r_0 أما المقادير الأخرى فنجد دوما نسبتين أحدهما كبيرة الأخرى صغيرة.

أسباب حيود محرك الإشتعال بالشرارة عن دورة أوتو ومحرك الإشتعال بالضغط عن دورة ديزل:

1. تزداد السعة C_p, C_v للغازات الحقيقية بزيادة درجة الحرارة
2. يستبدل إجراء الإحتراق الداخلي بإجراء تبادل خارجي وقد لا يكون الإحتراق تام.
3. تتضمن كل دورة ميكانيكية إجراء شحن و إجراء تصريف ومنه عند فتح الصمامات ينخفض الضغط
4. يلزم عمل إضافي لشحن الوقود في الأسطوانة.
5. يحدث إنتقال حرارة محسوس بين الغازات وجدران الأسطوانة.
6. هناك لا إنعكاسية مصاحبة لتدرج الضغط و درجة الحرارة.

العلاقة الخاصة بحساب القدرة الجبائية للمحركات (Xie et al. 2024):

$$P_f = \frac{C}{45} + \left(\frac{P_D}{40}\right)^{1.6}$$

هذه العلاقة تختلف من بلد إلى بلد، حيث P_f تحسب بالحصان البخاري وتكتب في البطاقة الرمادية للسيارة وتحسب الضرائب بها

P_f : Puissance Fiscale(CV)

الاستطاعة الجبائية (بالحصان البخاري)

P_D : Puissance dynamique(Kw)

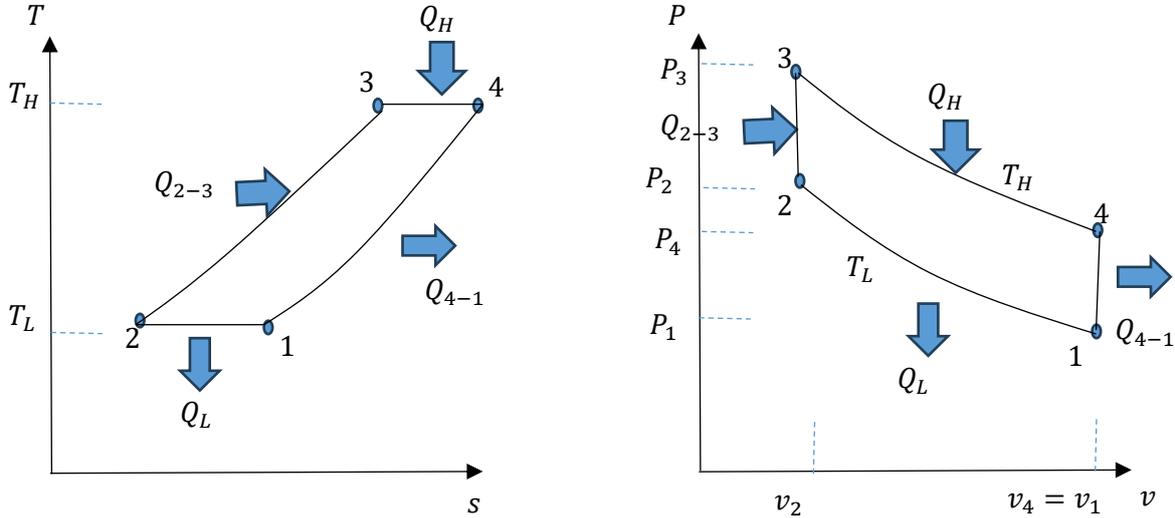
avec 4000 tr\min

الاستطاعة الديناميكية (كيلو واط) عند 4000 دورة\دقيقة

C : valeur normal crée d'émission de $CO_2(g\ km)$ ، وهي قيمة CO_2 المنبعثة ب(g\km)

4-7) دورة ستيرلينغ :

وتستعمل هذه الدورة في المحركات التي تعمل بمسترجع للحرارة، وهذا المبدأ مطبق كثيرا في التوربينات والمحركات الترددية (Pennington et al. 2019). والشكل التالي يبين الدورة في المخططين (P-V) (T-S)



الشكل (2-6): مخطط دورة ستيرلينغ وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة متناظرة)

$$T_L = T_1 = T_2 < T_4 = T_3 = T_H$$

$$V_{min} = V_2 < V_3 < V_4 = V_1 = V_{max}$$

$$S_L = S_2 < S_1 < S_3 < S_4 = S_H$$

$$P_{min} = P_1 < P_4 < P_2 = P_3 = P_{max}$$

دورة ستيرلينغ تعمل بمسترجع (مبادل حراري ذو حجم ثابت)

بما ان الدورة بها أربع إجراءات بها كلها غير كظومة، تصبح الدورة لها أربع مصادر للتبادل الحراري وهذا يتناقض مع نص القانون الثاني في الترموديناميك الذي يؤكد على ضرورة وجود مصدرين للتبادل الحراري الخارجي، الأول ساخن والثاني بارد، ومن هذا المنطلق يجب إبقاء مصدرين والتخلص من مصدرين (Pennington et al. 2019).

طريقة إختيار المصادر تتم حسب الأولوية لثبات درجة الحرارة:

الإجراء (1—2) ثابت درجة الحرارة، الحرارة Q_L تعتبر الحرارة المفقودة للمصدر البارد T_L .

الإجراء (3—4) ثابت درجة الحرارة، الحرارة Q_H تعتبر الحرارة المستهلكة من المصدر الساخن T_H .

الإجراء (2—3) ثابت الحجم، حرارة التسخين Q_{2-3} التي ترفع درجة الحرارة من T_L إلى T_H تعتبر حرارة داخلية ولا يوجد علاقة بينها وبين الوسط الخارجي، ويجب أن يتم الحصول عليها داخليا.

الإجراء (1—4) ثابت الحجم، حرارة التبريد Q_{4-1} التي تخفض درجة الحرارة من T_H إلى T_L تعتبر حرارة داخلية ولا يوجد علاقة بينها وبين الوسط الخارجي، ويجب أن يتم التخلص منها داخليا.

وبالتالي نلاحظ أن الإجراءين (2—3) و (1—4) الأول تسخين والثاني تبريد ويمثلان تبادل داخلي، من هنا ظهرت فكرة المسترجع الذي ينقل حرارة من إجراء التبريد إلى إجراء التسخين، وبالتالي يصبح الوسط الخارجي لا يتأثر بما التبادل الداخليين وكأن الدورة لديها إجراءين يتبادلان الحرارة خارجيا وفي ثبوت درجة الحرارة.

عند استخدام مسترجع مثالي (ينقل الحرارة بأمانة بدون ضياع) فإن الدورة يصبح لديها أربع إجراءات كما يلي:

الإجراء (2—1) ثابت درجة الحرارة T_L .

الإجراء (4—3) ثابت درجة الحرارة T_H .

الإجراء (3—2) ثابت الحجم يتحول كظوم بفضل المسترجع.

الإجراء (1—4) ثابت الحجم يتحول كظوم بفضل المسترجع.

مما سبق يمكن القول أن دورة ستيرلينغ باستخدام مسترجع مثالي تتحول إلى دورة كارنو.

يمكن استعمال الطريقة البيانية للحصول على نفس النتيجة، وذلك باستخدام المساحات في المخطط (T-s) التي حرارة:

الحرارة Q_{2-3} هي مساحة السطح تحت الاجراء (3—2).

الحرارة Q_{4-1} هي مساحة السطح تحت الاجراء (1—4).

إذا نقلنا المساحة الأولى إلى المساحة الثانية نحصل على مستطيل والذي يمثل دورة كارنو.

يمكن استخدام الطريقة العددية وهي موضحة في الفصل الثالث من هذه الدراسة.

5-7 دورة إيريكسون :

وتستعمل هذه الدورة في المحركات التي تعمل بمسترجع للحرارة، وهذا المبدأ مطبق كثيرا في التوربينات والمحركات الترددية

(Daniel et al. 2023). والشكل التالي يبين الدورة في المخططين (P-V) (T-S)

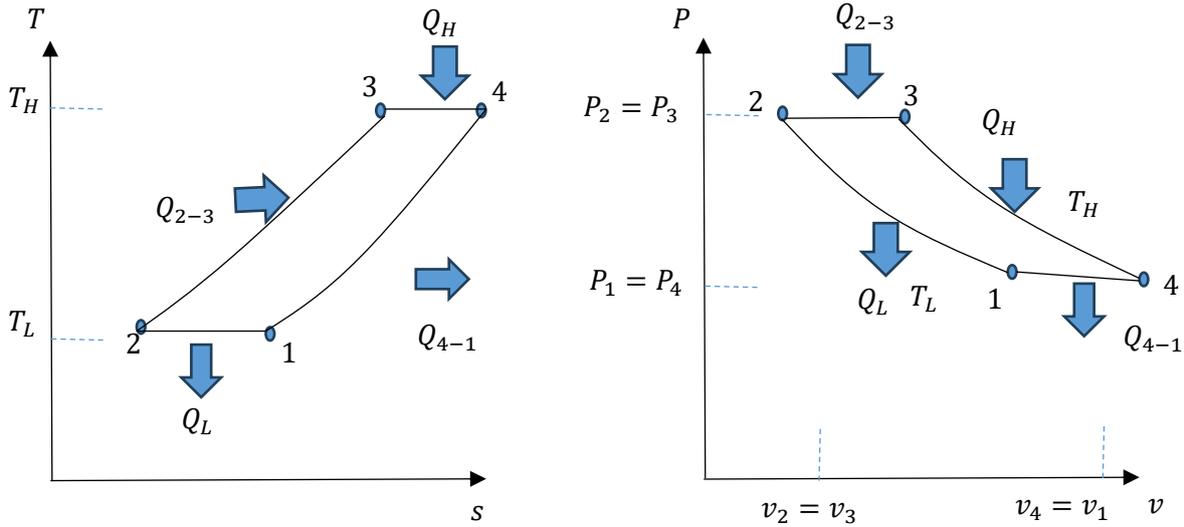
$$T_L = T_1 = T_2 < T_4 = T_3 = T_H$$

$$V_{min} = V_2 < V_3 < V_4 = V_1 = V_{max}$$

$$S_L = S_2 < S_2 < S_3 < S_4 = S_H$$

$$P_{min} = P_1 < P_4 < P_2 = P_3 = P_{max}$$

دورة إيريكسون تعمل بمسترجع (مبدل حراري ذو ضغط ثابت)



الشكل (2-7): مخطط دورة إيريكسون وتوضيح الإجراءات الخاصة بها (وهي دورة متناظرة)

بما أن الدورة بها أربع إجراءات بها كلها غير كظومة، تصبح الدورة لها أربع مصادر للتبادل الحراري وهذا يتناقض مع نص القانون الثاني في الترموديناميك الذي يؤكد على ضرورة وجود مصدرين للتبادل الحراري الخارجي، الأول ساخن والثاني بارد، ومن هذا المنطلق وجب إبقاء مصدرين والتخلص من مصدرين.

طريقة إختيار المصادر تتم حسب الأولوية لثبات درجة الحرارة:

الإجراء (1—2) ثابت درجة الحرارة، الحرارة Q_L تعتبر الحرارة المفقودة للمصدر البارد T_L .

الإجراء (3—4) ثابت درجة الحرارة، الحرارة Q_H تعتبر الحرارة المستهلكة من المصدر الساخن T_H .

الإجراء (2—3) ثابت الضغط، حرارة التسخين Q_{2-3} التي ترفع درجة الحرارة من T_L إلى T_H تعتبر حرارة داخلية ولا يوجد علاقة بينها وبين الوسط الخارجي، ويجب أن يتم الحصول عليها داخليا.

الإجراء (1—4) ثابت الضغط، حرارة التبريد Q_{4-1} التي تخفض درجة الحرارة من T_H إلى T_L تعتبر حرارة داخلية ولا يوجد علاقة بينها وبين الوسط الخارجي، ويجب أن يتم التخلص منها داخليا.

وبالتالي نلاحظ أن الإجراءات (2—3) و (1—4) الأول تسخين والثاني تبريد ويمثلان تبادل داخلي، من هنا ظهرت فكرة المسترجع الذي ينقل حرارة من إجراء التبريد إلى إجراء التسخين، وبالتالي يصبح الوسط الخارجي لا يتأثر بما التبادل الداخلي وكأن الدورة لديها إجراءات يتبادلان الحرارة خارجيا وفي ثبوت درجة الحرارة.

عند استخدام مسترجع مثالي (ينقل الحرارة بأمانة بدون ضياع) فإن الدورة يصبح لديها أربع إجراءات كما يلي:

الإجراء (1—2) ثابت درجة الحرارة T_L .

الإجراء (3—4) ثابت درجة الحرارة T_H .

الإجراء (2—3) ثابت الضغط يتحول كظوم بفضل المسترجع.

الإجراء (4—1) ثابت الضغط يتحول كظوم بفضل المسترجع.

مما سبق يمكن القول أن دورة ستيرلينغ باستخدام مسترجع مثالي تتحول إلى دورة كارنو.

يمكن استعمال الطريقة البيانية للحصول على نفس النتيجة، وذلك باستخدام المساحات في المخطط (T-s) التي حرارة:

الحرارة Q_{2-3} هي مساحة السطح تحت الاجراء (2—3).

الحرارة Q_{4-1} هي مساحة السطح تحت الاجراء (1—4).

إذا نقلنا المساحة الأولى إلى المساحة الثانية نحصل على مستطيل والذي يمثل دورة كارنو.

يمكن استخدام الطريقة العددية، وهي تشبه ما تم في دورة ستيرلينغ.

(8) مراجع الفصل الثاني:

- Chen, Lingen, Shuangshuang Shi, Yanlin Ge, and Huijun Feng. 2023. "Power density performances and multi-objective optimizations for an irreversible Otto cycle with five specific heat models of working fluid." *Energy* 282:128817. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128817>.
- Chen, Ruihua, Weicong Xu, Shuai Deng, Ruikai Zhao, Siyoung Q. Choi, and Li Zhao. 2023. "A contemporary description of the Carnot cycle featured by chemical work from equilibrium: The electrochemical Carnot cycle." *Energy* 280:1281-1288. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128168>.
- Chen, Yongqiang, Zhi Dou, Zhifang Zhou, and Jinguo Wang. 2023. "Volatilization behavior of diesel oil-water-glass bead system exposed to freeze-thaw cycles." *Water Research* 244:120433. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120433>.
- Daniarta, Sindu, Piotr Kolasinski, and Attila R. Imre. 2024. "Performance map and theoretical analysis of Carnot battery technology via novel reversible Rankine-based cycle." *Energy Reports* 11:4500-4514. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.024>.
- Daniel, Laurent, Benjamin Ducharne, Yuanyuan Liu, and Gael Sebald. 2023. "Choosing the best magnetostrictive material for energy harvesting applications: A simple criterion based on Ericsson cycles." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 587:171281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171281>.
- Ge, Yanlin, Lingen Chen, and Huijun Feng. 2022. "Optimal piston motion configuration for irreversible Otto cycle heat engine with maximum ecological function objective." *Energy Reports* 8:2875-2887. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.220>.
- Nyongesa, Antony John, Jeong Kuk Kim, and Won-Ju Lee. 2024. "Investigation on the combustion of ammonia using direct high/medium-pressure-Otto injection approach in a diesel two-stroke marine slow speed engine." *Journal of the Energy Institute* 114:101641. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101641>.
- Paudel, Bhuwan, Kasun Hewage, Sandun Wanniarachchi, Piyaruwan Perera, Gyan Chhipi-Shrestha, and Rehan Sadiq. 2024. "Life cycle thinking-based analysis of diesel and electric-powered buses for Canadian transit systems." *International Journal of Sustainable Transportation*. doi: <https://doi.org/10.1080/15568318.2024.2343727>.
- Pennington, Nick, Dongsheng Gu, Ashleigh Labbe, Aubrey Sherry, Kelsey Musall, William Thompson, Hannah Miller, Darian Flores, Dayong Gao, Brian Johnstone, and Erik Woods. 2019. "Evaluation Of A Sterling Cycle Controlled Rate Freezing Device For Simultaneous Cryopreservation Of Multiple Units." *Cryobiology* .91:195 doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2019.10.186>.
- Qiao, Hongna, Xiaohui Yu, and Bin Yang. 2023. "Working fluid design and performance optimization for the heat pump-organic Rankine cycle Carnot battery system based on the group contribution method." *Energy Conversion and Management* 293:117459. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117459>.
- Xie, Liangtao, Jianguo Yang, Nao Hu, Yu Fan, Sicong Sun, Fei Dong, and Jia Hu. 2024. "Characteristics of the S-CO₂ Brayton cycle for full-scale multi-condition diesel engines." *Applied Thermal Engineering* 236:121484. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121484>.
- Xu, Kaiyun, Yanlin Ge, Lingen Chen, and Huijun Feng. 2024. "A modified Diesel cycle via isothermal heat addition, its endoreversible modelling and multi-objective optimization." *Energy* 291:130289. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130289>.

الفصل الثالث

الدراسة التجريبية لمحرك سترينغ

(1) الدراسة التجريبية لمحرك سترلينغ :

(1.1) الأهداف من التجربة : نقوم بدراسة المواضيع التالية

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

كما هو موضح في الشكل (3-1) ، نلاحظ (2.1γ) مبدأ العمل : بالاعتماد على محرك سترلينغ من نوع (الذي يعطينا قيمة العمل المقدم من طرف المحرك انطلاقا Torque meter وجود أداة قياس العزم الحركي) من معرفة عدد الدورات في الدقيقة التي نحولها إلى عدد الدورات في الثانية و التي تمثل تواتر المحرك ، وكذلك و التي نحسب منها العمل PV بالاعتماد على راسم الاهتزاز المهبطي الذي يعطينا الدورة الحقيقية في المخطط باستخدام المساحات، يمكن المقارنة بين العملين المحسوبين لمعرفة العمل الضائع بالاحتكاك، و يوجد مع محرك للمصدر البارد ، ونعتبر المصدر الساخن هو T_L للمصدر الساخن و T_H سترلينغ جهاز قياس درجات الحرارة 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 :

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

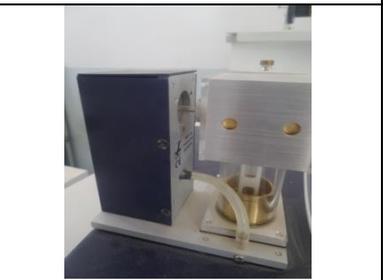
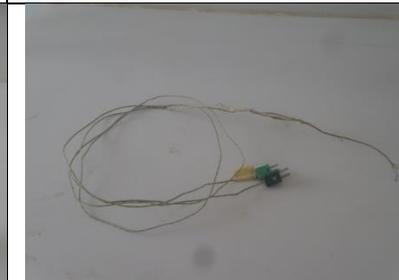
حيث ρ الكتلة الحجمية للكحول التي تساوي $\rho = 0.83 \text{ g/ml}$.

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

$$P_e = V \cdot I$$

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

- الشكل (3-1) : محرك سترلينغ 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 (3-4) : موقد للكحول .
- الشكل (3-5) : وحدة قياس بها الأجهزة التالية : قياس التواتر f ، و جهاز قياس $PVnT$.
- بالشكل (3-6) : وحدة قياس PV المربوطة بأسطوانة المحرك.
- الشكل (3-7) : حقنة طبية من النوع الكبير $20ml$.
- الشكل (3-8) : معدلة كهربائية.
- الشكل (3-9) : فولطمتر أمبيرمتر .
- الشكل (3-10) : أسلاك توصيل بألوان مختلفة .
- الشكل (3-11) : راسم الاهتزاز المهبطي .
- الشكل (3-12) : كابل تحويل من نوع BNC للربط بين راسم الاهتزاز المهبطي و وحدة قياس PV .
- الشكل (3-13) : مزدوجات الحرارة من نوع $(+NiKr - NiAl) K$ ذات رأس سلكي .
- الشكل (3-14) : أنبوب مدرج $50 ml$ من نوع الزجاج.
- الشكل (3-15) : 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 ستيرلينغ
		
الشكل (6-3) : وحدة قياس PV	الشكل (5-3) : وحدة قياس PVnT	الشكل (4-3) : موقد للكحول
		
الشكل (9-3) : فولطمتر أمبيرمتر	الشكل (8-3) : معدلة كهربائية.	الشكل (7-3) : حقنة طبية
		
الشكل (12-3) : كابل تحويل	الشكل (11-3) : راسم الاهتزاز المهبطي	الشكل (10-3) : أسلاك توصيل
		

الشكل (3-15) : قارورة من الكحول	الشكل (3-14) : أنبوب مدرج 50 ml	الشكل (3-13) : مزدوجات الحرارة من نوع K
---------------------------------	---------------------------------	---

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 مليمتري.
- 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.

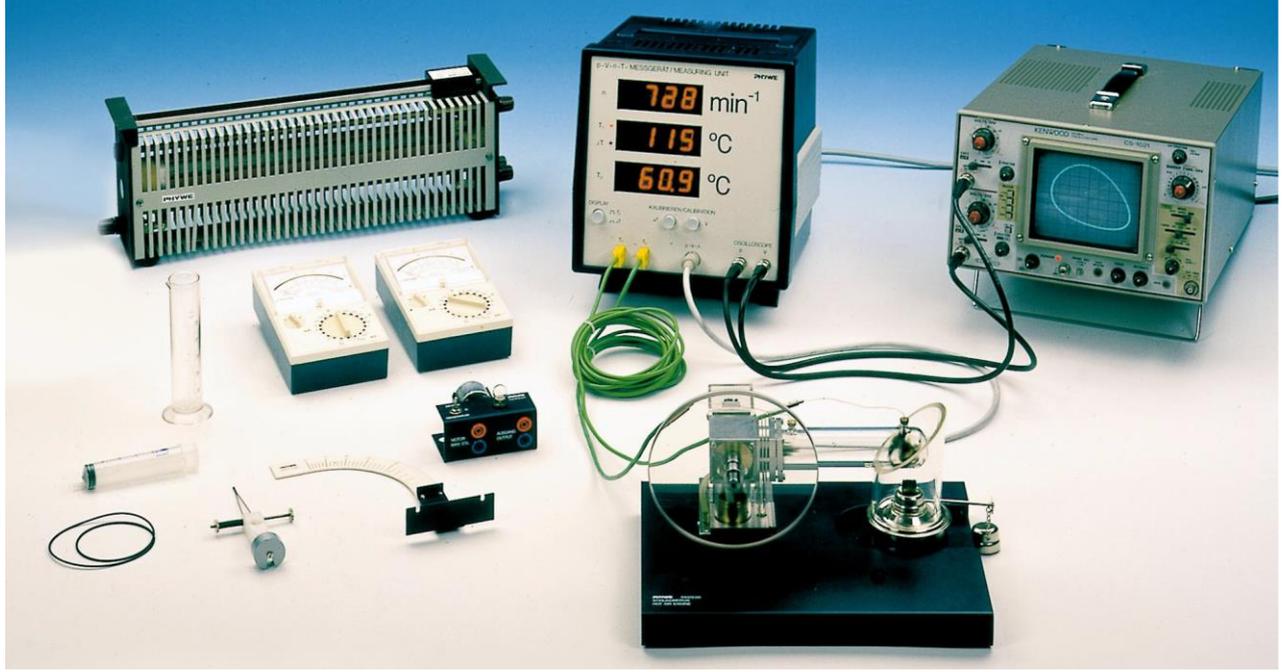
5.1 الإجراءات المتبعة في التجربة : التجربة موضحة في الشكل (3-16) توضع التجربة على طاولة

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

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

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

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



الشكل (3-16) : تجربة سترلينغ مع جميع اللواحق 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 .

المربوطة بأسطوانة المحرك : نستعمل معايرة الضغط و $(2.5.1PV)$ معايرة الضغط في وحدة قياس التي تعمل عمل مضخة تزيد من قيمة الضغط في حالة نقصان الحجم و تنقص 20 ml الحجم الحقنة الهوائية

من الضغط في حالة زيادة الحجم حسب العلاقة الخاصة بقانون بول

$$P.V = Cte \text{ ماريوت للغازات المثالية :}$$

أول شيء يجب أن يتم هو نزع الأنبوب الواصل بين أسطوانة المحرك و وحدة و الموضحة في الشكل (3-6) ، بحث نترك الانبوب متصل PV قياس بوحدة القياس و الجزء الآخر المتصل بالأسطوانة نلصقه في الحقنة الهوائية،

في البداية يدخل الهواء للوحدة و تكون قيمته الضغط الجوي الذي يساوي

توافق قيمة 20 ml ، و نثبت الحقنة في $P_0 = 1013\text{ hpa}$

و نحسب 19 ml الضغط الجوي، وبعدها نبدأ في تغيير الحجم إلى



يصبح لدينا 15 ml دوما قيمة فرق الكمون في الشاشة الخاصة براسم الاهتزاز ، حتى نصل إلى قيمة الحجم في حالة الانضغاط .المرحلة الثانية من المعايرة يتم فيها نزع PV جدول به 7 أسطر خاص بمعايرة وحدة قياس $P_0 =$ التي توافق في هذه الحالة الضغط الجوي 15 ml الحقنة الهوائية من الأنبوب الواصل و نثبت الحقنة في ونحسب الكمون الخاص في شاشة راسم الاهتزاز و بعد ذلك نقوم بزيادة الحجم و ندون في كل 1013 hpa في حالة PV مرة الحجم وفرق الكمون و نحصل في الاخير على جدول به 7 أسطر خاص بمعايرة وحدة قياس التمدد ، والنتائج مدونة في الجدول (3-1) و ذلك بعد الاعتماد على العلاقة

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

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

الجدول (3-1) : معايرة وحدة القياس PV لحساب العلاقة بين الضغط و فرق

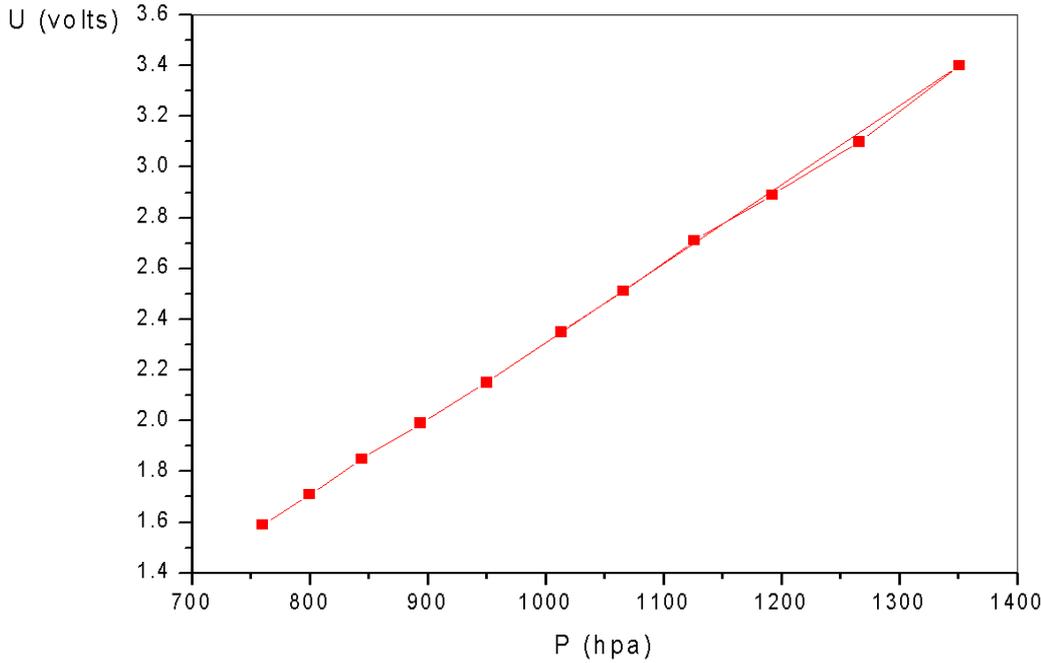
الكمون في شاشة راسم الاهتزاز

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

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 :

$$\frac{\Delta U}{\Delta P} = 3,04 \cdot 10^{-3} \left(\frac{volts}{hpa} \right)$$

و هذا المقدار يعطينا فكرة عن التناسب بين الضغط في المكبس و الكمون في راسم الاهتزاز المهبطي ، حيث أن كل $3,04 \cdot 10^{-3}$ 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 :

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

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

PV : و يمكن تمثيل السلم بالتدرجات في المخطط

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

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

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

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

PV : ويمكن تمثيل السلم بالتدرجات في المخطط

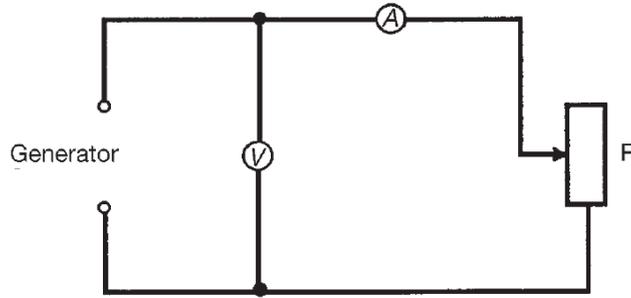
$$\frac{\Delta V}{\Delta U} = 2,4. (0,5 V/div) = 1,2 \left(\frac{\text{cm}^3}{div} \right)$$

XY ، في هذه الحالة نستعمل راسم الاهتزاز المهبطي في نمط **4.5.1PV** تمثيل و رسم المخطط ، وعند بداية حركة المحرك نشغل $80^\circ C$ مع وجود معيار للسلم. الفرق في درجة الحرارة يبلغ لأقصى درجة حرارة دورة في 900 المؤقت لحساب الزمن المستغرق في التجربة ، عند الوصول لنهاية التجربة يكون المحرك قد وصل لـ الدقيقة، و دورة سترلينغ 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 . (Pennington et al. 2019. ترسم الدورة على الورق الشفاف ، تحول القيم من الورق الشفاف إلى الورق المليميتر)

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

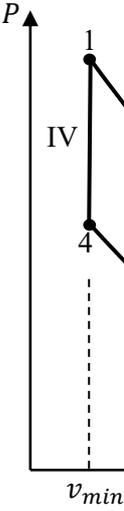
(و نضع مكانه وحدة بها محرك و مولد **6.5.1 Torque meter** الطاقة الكهربائية الفعالة : نغير) كهربائي الموضحة في الشكل (2-3) ، نلصق الدارة الكهربائية الموضحة في الشكل (3-18) في المولد الكهربائي، حيث نعدل من قيمة المقاومة لضبط شدة التيار الكهربائي و فرق الكمون ، حيث نحسب هذه القيم انطلاقا من Song et al. 2023. 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 سترلينغ و تطبيقها في التجربة :

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



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

TS ، نعتمد في حساب المردود على طريقتين ، الطريقة البيانية بالمساحات التي تمثل حرارة و نستخدم المخطط الذي تمثل المساحات PV والطريقة الثانية بالعلاقات و نستخدم العلاقة العامة للمردود و نعتمد على المخطط (Tao et al. 2023 . فيه عمل منجز أو مستهلك)

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

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

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

1.2 طرق حساب مردود الدورة القياسية بوجود مسترجع مثالي :

في الاجراء (1-2) و هي متصلة مع المصدر الساخن، q_H نلاحظ أن الدورة تستهلك الحرارة TS من المخطط في الاجراء (3-4) و هي متصلة مع المصدر البارد . لكن الإجراء (2-3) و الاجراء (4-1) و q_L تطرد الحرارة

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 (4-1) 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 (Wan et al. 2023). الدورة يعمل بمصدرين فقط بدلا من أربع مصادر، و نقول أن المحرك يعمل بمسترجع مثالي (

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

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

وجود 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 لسترلينغ بدون مسترجع مثالي (أو بوجود مسترجع غير مثالي) سوف تخضع لمتراجحة كلازيوس بالشكل التالي :

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

العادي η_{string} المثالي و η_{carnot} منه يمكن الوصول للمتراجحة التي تقارن

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

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

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

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

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

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

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

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

في الاجراء (2-1) معدومة لأن المائع غاز مثالي و درجة الحرارة ثابتة ، Δu_{12} ملاحظة : الطاقة الداخلية 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.

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

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

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

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

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

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

الإجراء الرابع (4-1) 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 :

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

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

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

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

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

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

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

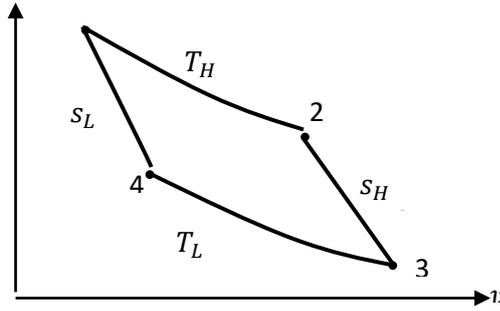
مثالي

و حسب ما سبق المردود العام يعرف بالنسبة التالية :

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

P

1



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

للتوصل إلى علاقة سترلينغ هذا يتطلب اللجوء إلى حساب مردود كارنو حسب الطريقة التالية :

1.2.2 حساب مردود الدورة المثالية لكارنو :

لتوضيح إجراءات الدورة Pv نعتمد على المخطط

دورة كارنو هي دورة انعكاسية و مثالية و بالتالي :

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

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

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

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

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

2.2.2 حساب مردود الدورة القياسية لسترلينغ بعدم وجود مسترجع مثالي أو وجود مسترجع

غير مثالي :

$$: \text{لدينا من المبدأ الأول : } (25) + |q_{tot}| - |w_{net}| = \Delta u =$$

0

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

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

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

$$\eta_{Stirling} = 0 \text{ و منه المردود يصبح } |w_{net}| = 0 \text{ ، وبالتالي}$$

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

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.

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

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} :

$$\begin{cases} \gamma = \frac{c_p}{c_v} \\ \bar{R} = c_p - c_v \\ \frac{\bar{R}}{c_v} = \gamma - 1 \dots \dots \dots (37) \\ \frac{\bar{R}}{c_p} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \end{cases}$$

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 سترلينغ بعدم وجود مسترجع (أو بوجود مسترجع غير مثالي) يقارب أو يساوي مردود دورة

كارنو:

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

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

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

يجب توفر الشروط التالية :

لتحقق هذه المعادلة لدينا أحد الحالات :

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

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.

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

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

لمعرفة اداء محرك سترلينغ 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 سترلينغ و الذي له نفس المصادر T_H و T_L .
- العمل القياسي W_{net} الناتج من دورة سترلينغ.
- 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 سترلينغ لتحريك الكتلة المتصلة بجهاز قياس العزم الحركي.
- الإستطاعة الميكانيكية P_m الناتجة من محرك سترلينغ لتحريك الكتلة المتصلة بجهاز قياس العزم الحركي.

- الاستطاعة الكهربائية الفعالة P_e الناتجة من المولد الكهربائي ذو بكرتين المتصق بمحرك سترلينغ.
- الإستطاعة الحرارية P_H و الناتجة من الكحول والمستهلكة من طرف المحرك.

المنتج من طرف الدورة و المحسوب من $1.3W_{PV}$ طريقة حساب العمل الميكانيكي

في شاشة راسم الاهتزاز المهبطي: PV المخطط

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

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

بالعلاقة التالية: W_{PV} ثم نحسب العمل الميكانيكي

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

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

المنتج من طرف الدورة و المحسوب بجهاز $2.3W_m$ طريقة حساب العمل الميكانيكي الفعال

قياس العزم الحركي :

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

بالعلاقة التالية: $W_m = 2\pi \cdot M$ و نحسب منها العمل الميكانيكي الفعال (الفعلي)

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

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 ، ونسجلها في الجدول (2-3).

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

المحرك:

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

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

من محرك سترلينغ خلال التجربة : $(4.3 P_H)$ طريقة حساب الحرارة المستهلكة

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

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

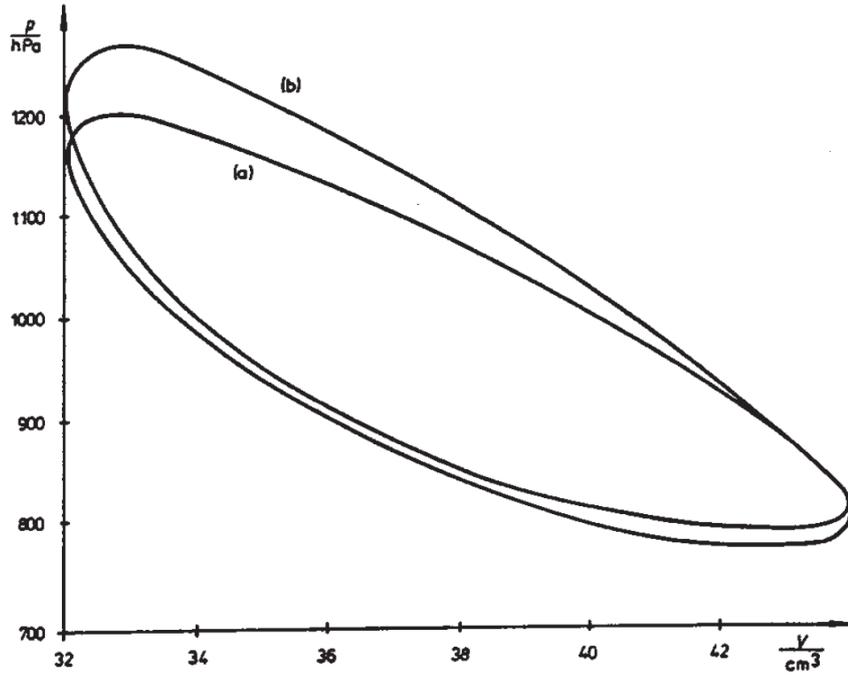
$$\Delta m = \rho \cdot \Delta V_{alc} = 0,83 \cdot 29 = 24,07g = 2,407 \cdot 10^{-2} kg ; \dot{m} = \Delta m / \Delta t$$

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

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

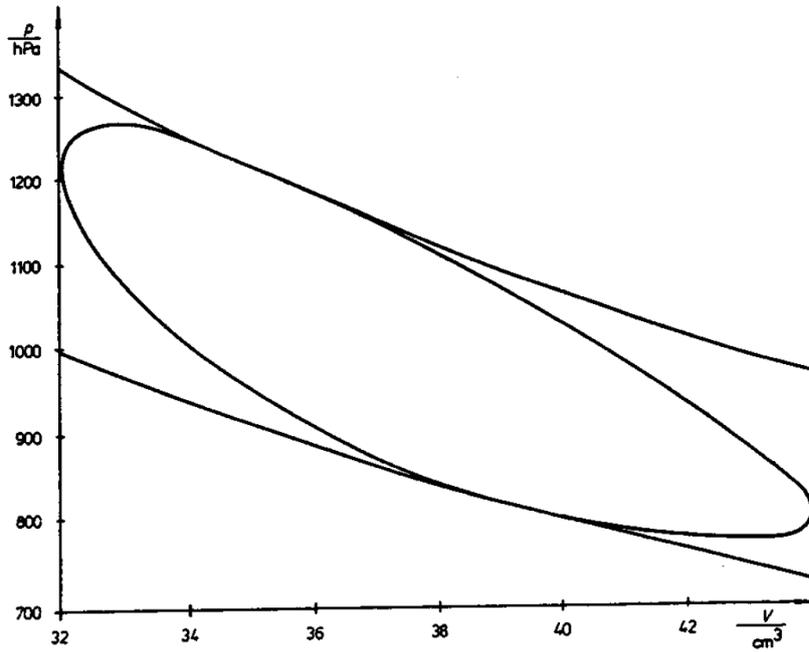
$$q_H = \frac{Q_H}{\Delta m_{air}} = \frac{Q_H}{\rho_{air} \cdot \Delta V_{air}} = \frac{Q_H}{\frac{M_{air}}{V_{mol}} \cdot \Delta V_{air}} = \frac{601200}{\frac{29 \cdot 10^{-3}}{22,4 \cdot 10^{-3}} \cdot 12 \cdot 10^{-6}}$$

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



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

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



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

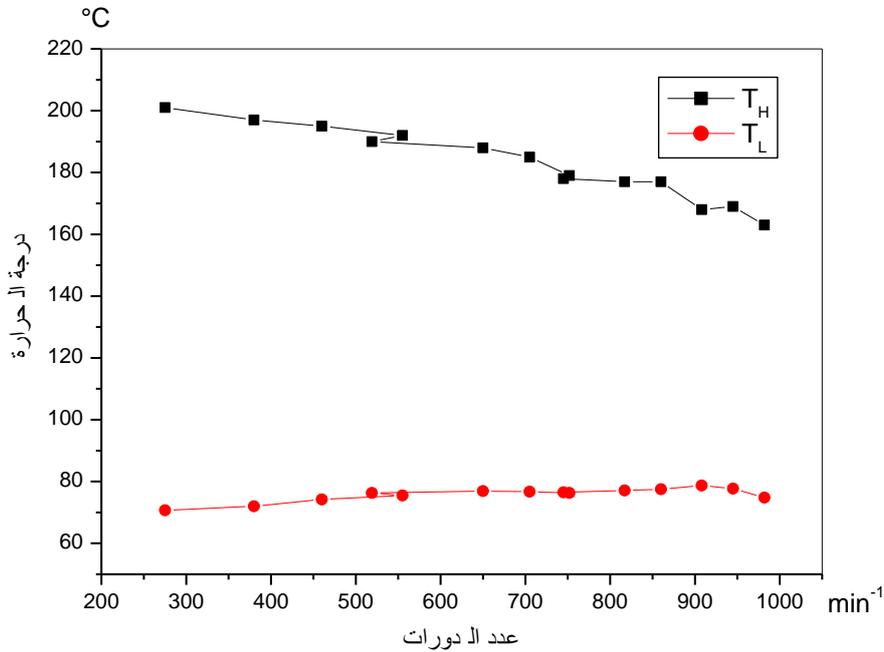
للحصول على دورة الهواء القياسية لسترلينغ

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

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

N° exp	$\frac{M}{10^{-3} Nm}$	$\frac{n}{min^{-1}}$	T_H $^{\circ}C$	T_L $^{\circ}C$	ΔT $^{\circ}C$	$\frac{W_m}{mJ}$	$\frac{f}{Hz}$	$\frac{P_m}{mW}$	$\frac{W_{PV}}{mJ}$	$\frac{W_{fr}}{mJ}$	$\frac{Q_H}{J}$
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

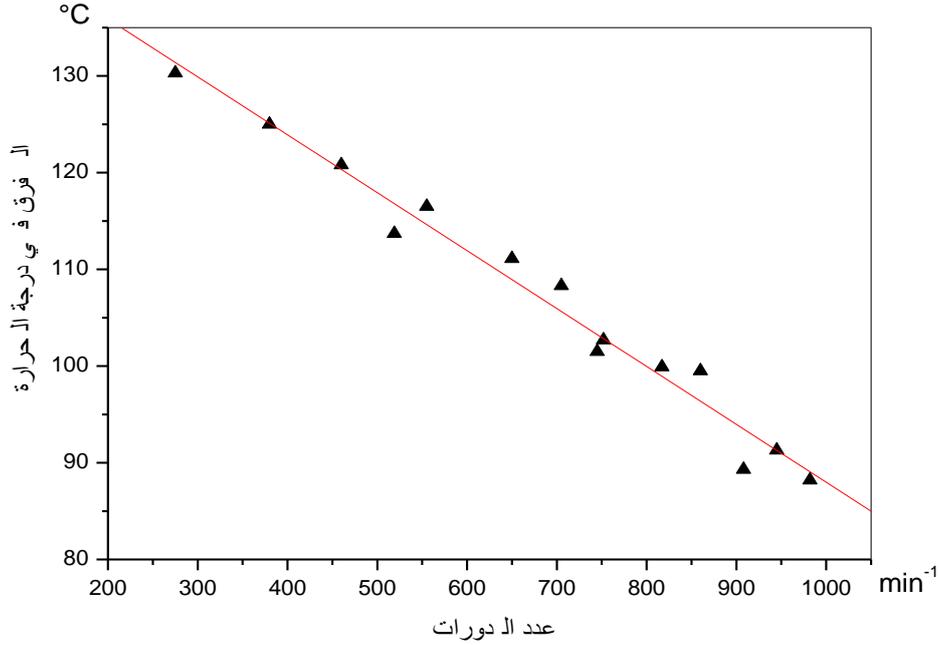
حسب الجدول نلاحظ أن العزم الحركي يزداد كلما زاد عدد الدورات في الدقيقة (أو التواتر).



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

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

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

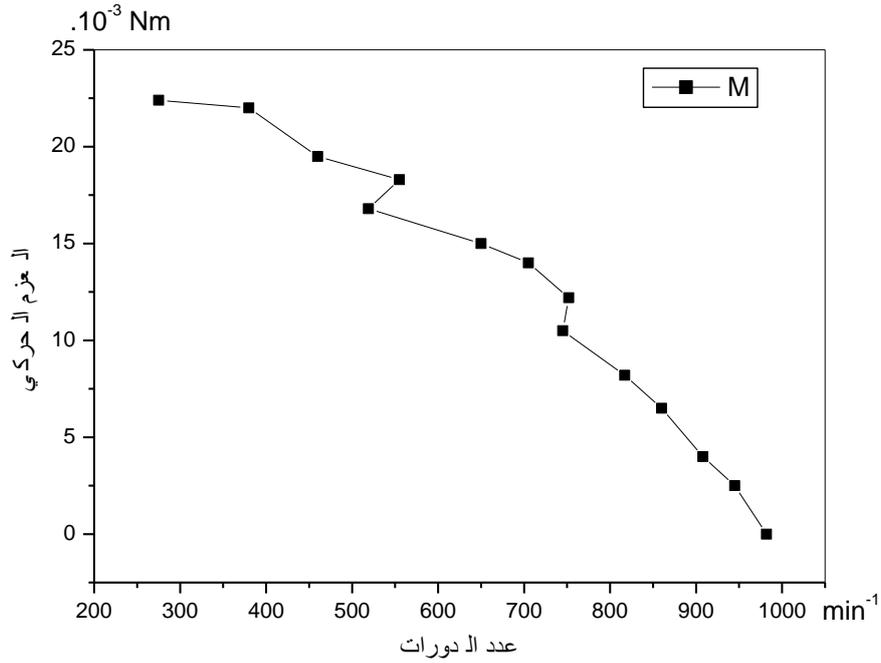


بدلالة عدد الدورات التي $(T_H - T_L)$ الشكل (3-24) : تغيرات الفرق في درجة الحرارة

ينتجها المحرك

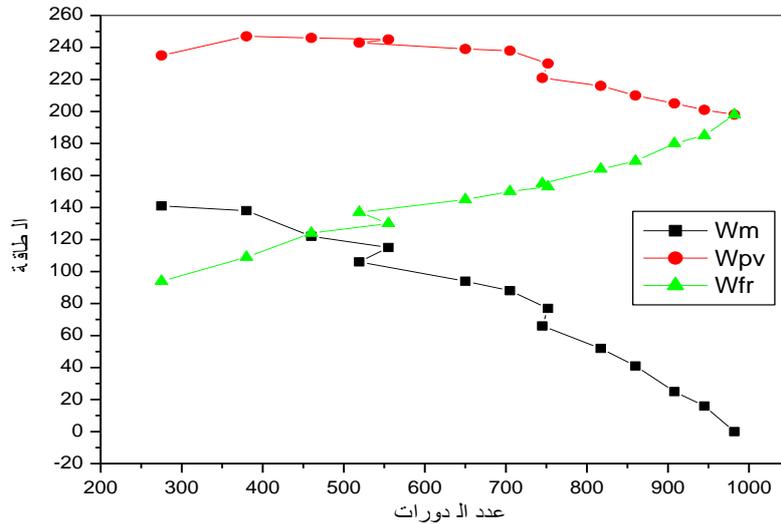
الملاحظة : نلاحظ أن هناك تناسب عكسي بين الفرق في درجة الحرارة وعدد الدورات التي ينتجها المحرك أي

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 سترلينغ 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

المنتجة في الدارة الكهربائية: P_e (6.3) طريقة حساب الإستطاعة الكهربائية



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

$$P_e = U . I$$

شدة I فرق الكمون المحسوب من الفولطمتر ، و U حيث 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:

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

للمولد الكهربائي

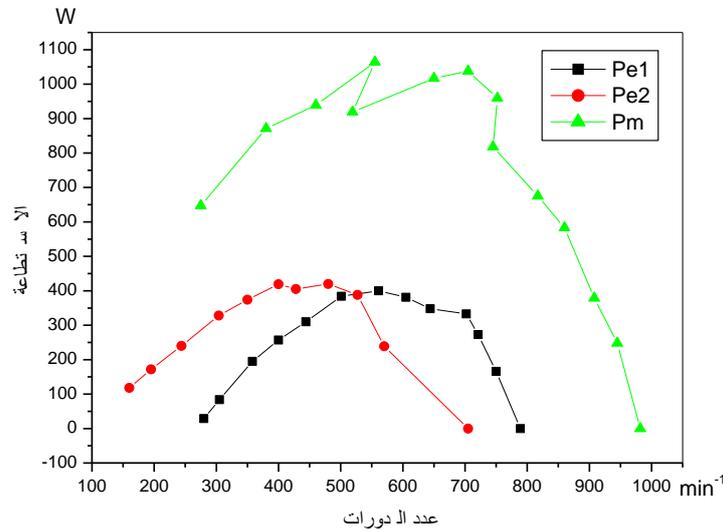
N° exp	$\frac{n}{min^{-1}}$	$\frac{T_H}{^{\circ}C}$	$\frac{T_L}{^{\circ}C}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{P_{e1}}{mW}$
01	789	155	78.9	0.0	8.5	0
02	750	159	78.9	21.5	7.7	166
03	721	167	78.7	39.0	7.0	273
04	702	168	77.9	50.5	6.6	333
05	644	166	77.1	60.0	5.8	348
06	605	167	74.1	74.0	5.15	381
06	561	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

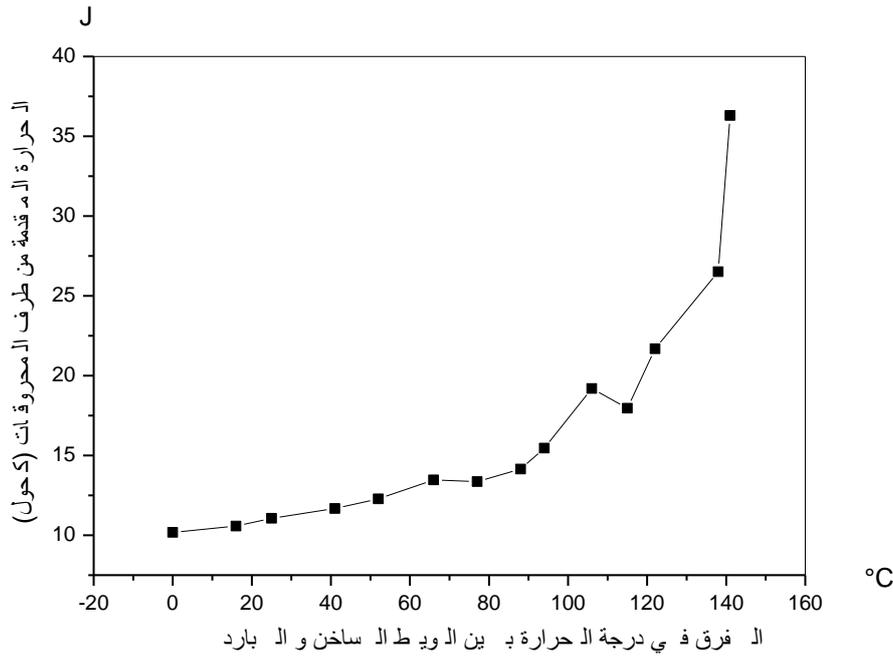
الجدول (3-4) : القيم التجريبية للاستطاعة الكهربائية الناتجة من استعمال البكرة الصغيرة

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



و الاستطاعة الكهربائية في الدارة P_m الشكل (3-28) : تغيرات الاستطاعة المنتجة الفعلية
بكرة صغيرة للمولد الكهربائي المتصل بمحرك سترلينغ. P_{e2} بكرة كبيرة و P_{e1} الكهربائية :



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

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

8.3 حساب عدد مولات الهواء داخل محرك سترلينغ :

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

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

لرسم الاهتزاز المهبطي، ونعتمد على الجدول (3-2) و نأخذ PV و يجب أخذ قيمة من القيم الخاصة بمنحني

مثال و ليكن التجربة رقم 10 ، التي لها القيم التالية :

$$M = 18,3 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}$$

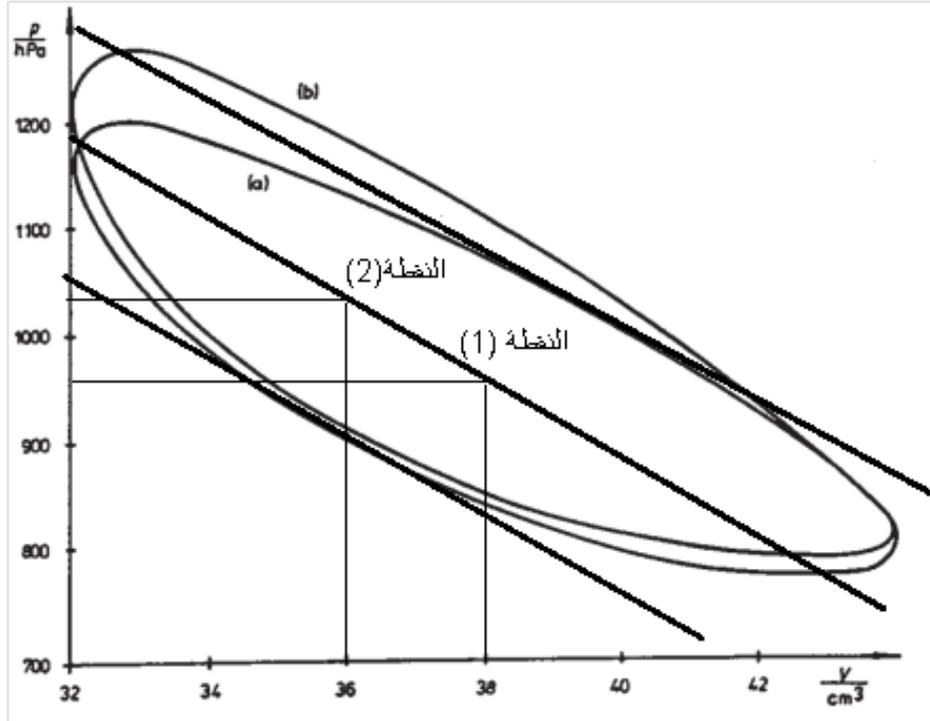
$$T_H = 192 \text{ }^\circ\text{C} = 465\text{K}$$

$$T_L = 75,5 \text{ }^\circ\text{C} = 349\text{K}$$

، ونرسم خط في الوسط يعطينا قيمة درجة (a) نعيد رسم الشكل (3-22) ، والذي يمثل تجربتين ، التجربة

: T_m الحرارة المتوسطة بين T_H و T_L :

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



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

نعين نقطتين كمثال على الدراسة :

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

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

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

9.3 حساب كفاءة محرك سترلينغ 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 .

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

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

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

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

(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 لسترلينغ.

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

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

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

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

N° exp	n min ⁻¹	T _H °C	T _L °C	ΔT °C	W _m mJ	f Hz	W _{PV} mJ	Q _H J	W ₁ J	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

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

4) مراجع الفصل الثالث:

- Pennington, Nick, Dongsheng Gu, Ashleigh Labbe, Aubrey Sherry, Kelsey Musall, William Thompson, Hannah Miller, Darian Flores, Dayong Gao, Brian Johnstone, and Erik Woods. 2019. "Evaluation Of A Sterling Cycle Controlled Rate Freezing Device For Simultaneous Cryopreservation Of Multiple Units." *Cryobiology* 91:195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2019.10.186>.
- Song, Dan, Kai Liu, Muhammad Ajmal Khan, Hu Luo, Li Zhang, Zongjie Zhou, Jianbo Zhang, Beenish Bashir, and Jianping Zhou. 2023. "Highly energy-efficient and safe-environment-friendly ultra short electrical arc machining for titanium alloy: Mechanism, characteristics, and parameter estimation." *Journal of Cleaner Production* 417:137842. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137842>.
- Tao, Yingle, Qiannan Wu, Cheng Huang, Dunru Zhu, and Haiqing Li. 2023. "Electrically heatable carbon scaffold accommodated monolithic metal–organic frameworks for energy-efficient atmospheric water harvesting." *Chemical Engineering Journal* 451:138547. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138547>.
- Wan, Song, Yong-xin Lin, Hang-wei Hu, Mi-lin Deng, Jian-bo Fan, and Ji-zheng He. 2023. "Excessive manure application stimulates nitrogen cycling but only weakly promotes crop yields in an acidic Ultisol: Results from a 20-year field experiment." *Journal of Integrative Agriculture*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.10.016>.

الملخص

إن الطاقة الحرارية هي من أهم الطاقات المستعملة في واقعنا الحالي، لذلك تمت دراسة محرك حراري بسيط لمعرفة أداءه وتقييمه انطلاقاً من الاستهلاك والإنتاج، وتم الاختيار على محرك غير انفجاري مكبسي هوائي ذو احتراق خارجي متوفر في المخبر، وكانت النتائج تؤكد أن المحرك يستخدم جزء من الطاقة الحرارية لإنتاج عمل ميكانيكي، ومنه كانت كفاءته أقل من 1 وهذا يؤكد نظرية كارنو لكفاءة المحركات الحرارية، ومن قيم الكفاءة اتضح أن محرك ستيرلينغ مزود بمسترجع غير مثالي له ضياع طاقي يجعل من المستحيل أن يعمل المحرك بدورة كارنو المثالية. وفي الأخير أعطت التجربة منهجاً يمكن استخدامه مع المحركات الأخرى لضبط القياسات وتقييم أداء أي محرك.

الكلمات المفتاحية : محرك ، حرارة، عمل، ستيرلينغ، كفاءة، كارنو، أوتو، ديزل، هواء، انضغاط، تمدد.

Abstract

Thermal energy is one of the most important energies used in our current reality. Therefore, a simple heat engine was studied to know its performance and evaluated based on consumption and production. The choice was made on a non-explosion pneumatic piston engine with external combustion available in the laboratory, and the results confirmed that the engine uses part of the energy. Heat to produce mechanical work, and its efficiency was less than 1. This confirms Carnot's theory of the efficiency of heat engines. From the efficiency values, it became clear that the Stirling engine is equipped with a non-ideal recuperator that has an energy loss that makes it impossible for the engine to operate in the ideal Carnot cycle. Finally, the experiment provided an approach that can be used with other engines to adjust measurements and evaluate the performance of any engine.

Keywords: engine, heat, work, Stirling, efficiency, Carnot, Otto, Diesel, air, compression, expansion.

