الفصل الرابع

مبادئ الديناميك الحراري لمحركات الاحتراق الداخلي

Principles of Internal Combustion Engine Thermodynamics

الفصل الرابع
Chapter 4

مبادئ الديناميك الحراري لمحركات الاحتراق الداخلي
Principles of Internal Combustion Engine Thermodynamics

❖ 4.1 المقدمة Introduction

يعرف علم الديناميك الحراري بصورة عامة على أنه دراسة الطاقة وتحويلها من شكل الى آخر وعلاقتها بخواص المادة. إما من الناحية الهندسية فإن دراسة الديناميك الحراري لها هدفان الأول منها هو دراسة صفات المادة وهي في حالة الاتزان (equilibrium state) أي دراستها وهي في حالتها الأصلية دون تغيير إما الثاني منها هو وصف العمليات التي تقوم بها الطاقة الحرارية أو الشغل في تغيير صفات المادة. وهذا يعني أن الديناميك الحراري يتضمن دراسة الحرارة (Heat) والشغل (Work) والطاقة (Energy) وصفات المادة (Properties of matter) والعلاقة بينهما.

تعمل محركات الاحتراق الداخلي بمبدأ الديناميك الحراري الذي يتضمن رفع درجة حرارة الهواء أو الخليط من خلال كبسهما داخل الأسطوانة وهذه العملية يصاحبها انخفاض في حجميهما داخل هذه الأسطوانة. يحقن الوقود داخل الأسطوانة في محركات الديزل أو تتولد الشرارة في محركات البنزين عندها يحترق الوقود وتتحول طاقته الكيميائية الى طاقة حرارية. وهذه العملية تتضمن إضافة حرارة الى الأسطوانة والتي يطلق عليها في علم الديناميك الحراري إضافة حرارة الى النظام. يحول المحرك الطاقة الحرارية الى طاقة ميكانيكية ويلفظ جزء منها الى خارج الاسطوانة (خارج النظام).

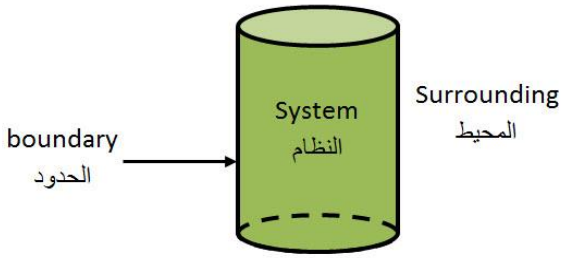
في هذا الفصل سوف نتطرق الى الديناميك الحراري لدورتي محركات الاحتراق بالشرارة والضغط ولكفاءتيهما الحراريتين. ولفهم الديناميك الحراري للمحركات لابد من الإلمام ببعض المفاهيم الأساسية والمصطلحات التي لها علاقة بالديناميك الحراري.

❖ 4.2 مصطلحات الديناميك الحراري

1. النظام **System**

هي كمية المادة الموجودة في حيز محدد أو منطقة محددة اختيرت للدراسة ويطلق عليها

بالنظام. إما المادة أو المواد التي تقع خارج النظام تسمى المحيط (Surroundings) (شكل 4.1)



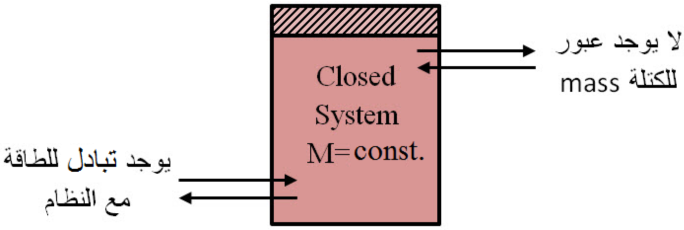
شكل (4.1) **: النظام والمحيط** (surroundings) **والحدود التي تفصل بينهما**

2. الحدّ **Boundary**

هو سطح حقيقي أو خيالي يفصل النظام عن المحيط به (surroundings) وهذا الحد الفاصل إما ثابت أو متحرك. من الناحية الرياضية ليس للحدّ كتلة (Mass) أو حجم (Volume) وسمكه صفراً (Zero thickness).

3. النظام المغلق أو الكتلة المسيطر عليها **Closed System Or Control Mass**

هو نظام يحتوي على كتلة ثابتة لا تستطيع هذه الكتلة عبور الحدّ الفاصل بين النظام ومحيطة. أما طاقة النظام تستطيع عبور هذا الحدّ بشكل حرارة أو شغل فضلاً عن ذلك قد يتغير حجم النظام (حجم النظام غير ثابت) (شكل 4.2).

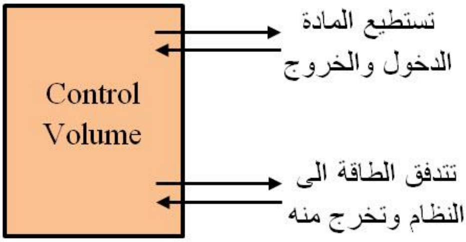


شكل (4.2) **: نظام مغلق لا تستطيع الكتلة الدخول أو الخروج منة بينما الطاقة تدخل وتخرج منة.**

4. النظام المفتوح أو الحجم المسيطر عليه

Open System Or Control Volume

وهو نظام تتدفق فيه الكتلة (Mass flow) ومن الأمثلة علية هي ضاغطة جهاز التبريد (Compressor). في هذا النظام تستطيع الكتلة والطاقة عبور الحدّ الفاصل بين النظام ومحيطه. أما الحجم فمسيطر عليه (control volume) (شكل 4.3).



شكل (4.3) **: الكتلة والطاقة تستطيع العبور من والى النظام إما الحجم فمسيطر عليه**

5. النظام المعزول **Isolated System**

هو نظام معزول عن محيطه بشكل تام لا يتبادل مع المحيط الكتلة والطاقة.

6. النظام غير المرن **Rigid System**

هو نظام مغلق معزول عن محيطة إلا أنه يتبادل معه الحرارة فقط.

7. التوازن الحراري **Thermal Equilibrium**

هي الحالة التي تكون فيها درجة حرارة النظام ثابتة في جميع أجزائه.

8. التوان الميكانيكي **Mechanical Equilibrium**

عندما يكون الضغط متساوياً عند جميع نقاط النظام يسمى هذا النظام بالمتوازن ميكانيكياً إلا أن الضغط قد يتغير داخل النظام بسبب الجاذبية الأرضية.

9. التوازن الكيميائي **Chemical Equilibrium**

عندما لا تتغير المكونات الكيميائية للنظام مع الزمن (لا تحدث تفاعلات كيميائية) يطلق على هذا النظام بالنظام المتوازن كيميائياً.

10. عمليات التوازن التقريبية أو الظاهرية **Quasi-Equilibrium Process**

وهي عملية بطيئة يقوم النظام فيها بموازنة نفسه ليصبح قريباً من حالة التوازن. تعدّ عملية مثالية إلا أنها ليست كذلك أي شبه متوازنة.

11. الحرارة الثابتة **Isothermal**

وهي عملية تبقى فيها درجة الحرارة ثابتة.

12. الضغط الثابت **Isobaric**

وهي عملية يبقى فيها الضغط ثابتاً

13. الحجم الثابت **Isometric**

وهي عملية يبقى فيها الحجم النوعي (Specific volume) ثابتاً.

14. الطاقة الداخلية **Internal Energy**

وهي مجموع الطاقة التي مصدرها التركيب الداخلي للمادة (الطاقة التي تحتويها المادة).

15. الانثلبية (الكلية (H) **أو (لكل وحدة كتلة** h) **Enthalpy**

هي مجموع الطاقة الداخلية للمادة (u) والطاقة المتأتية من تغير الضغط والحجم (pv) اللذان ينتجان الشغل. h=u+pv أو (u+pv).

16. الانتروبي **Entropy**

هي طاقة النظام التي لا يمكن استخدامها لإنجاز شغل.

17. الأدباتيكية (Adiabatic) **ثابت الحرارة (لا اكتساب ولا فقدان)**

وهي عملية تجرى على الغاز أو أي مائع أخر لا يكتسب فيها النظام ولا يفقد حرارة كعملية ضغط الهواء داخل أسطوانة المحرك (هي الحالة التي تكون فيها درجة الحرارة النظام ثابتة في جميع أجزائه).

18. الحجم الثابت **Isochoric**

وهي عملية يبقى فيها حجم المائع (الغاز) ثابتاً أثناء العمليات الديناميكية.

19. متساوي الأنتروبية **Isentropic**

عملية تبقى فيها الطاقة الداخلية للنظام ثابتة (ثبوت Entropy).

20. متساوي الانثلبية **Isenthalpic**

وهي العملية التي تبقى فيها الطاقة الداخلية (u) والشغل ثابتين (ثبوت Enthalpy).

❖ 4.3 الغاز المثالي The Ideal Gas

يعبر عن الغاز المثالي كالهواء مثلاً بكتلته أو الحجم الذي يشغله أو الضغط والحرارة التي يتواجد فيهما ويعبر عنه بالمعادلة (4.1). تظهر هذه المعادلة أن حاصل ضرب الضغط في الحجم يتناسب مع حرارة الهواء عند ثبوت الكتلة.

$$\frac{P.V}{T} = M.R \qquad ....(4.1)$$

إذ أن: P = الضغط (Pa) أو (N/m^2)

V = الحجم (m^3)

T = درجة الحرارة المطلقة (K) أو ($^0C+273$)

M = الكتلة (kg)

R = ثابت الغاز (J/kg.k)

ويعبر عن درجة الحرارة المطلقة بالمعادلة (4.2)

$$T= 273 + t \qquad ....(4.2)$$

إذ أن: t = درجة الحرارة (المئوية) السليزية

أما كثافة الغاز فيعبر عنها بالمعادلة (4.3)

$$\rho = \frac{M}{V} \qquad ....(4.3)$$

إذ أن: ρ = كثافة الغاز (kg/m^3)

وبتعويض المعادلة (4.1) في المعادلة (4.3) عندها يعبر عن كثافة الغاز بالمعادلة (4.4).

$$\rho = \frac{P}{R.T} \qquad ....(4.4)$$

يحسب ثابت الغاز النوعي (R) من كتلة الغاز المولارية (M) معبراً عنها بالــ kg/kmol ومن ثابت الغاز العام (R_0). يعبر عن R بالمعادلة (4.5).

$$R = \frac{R_0}{M} \qquad ....(4.5)$$

إن قيمة R للغاز المثالي هي 8314.3 J/kgK

كما يعبر عن الغاز المثالي بأستخدام معدل تدفق الكتلة (M) في الثانية (kg/s) أو باستخدام معدل تدفق الحجم (V_t) في الثانية (m^3/sec) ويعبر عنة بالمعادلة (4.6).

$$P.V_t = M_t.R.T \qquad ....(4.6)$$

❖ 4.4 العمليات الديناميكية الحرارية للغاز
The Thermodynamic Processes For Gases

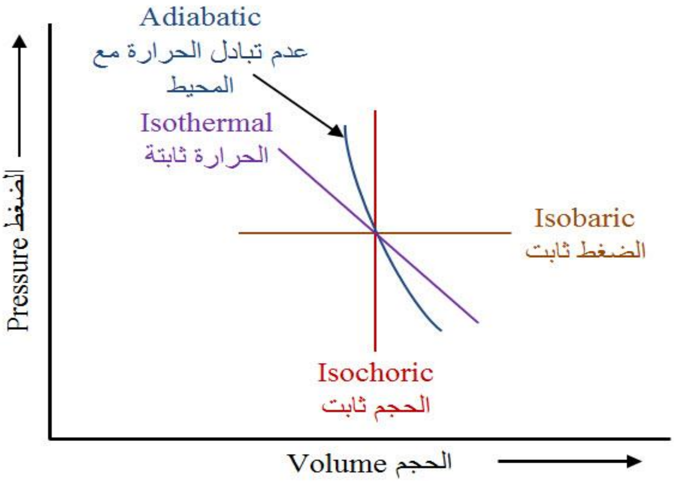
يتعرض الغاز الى أربعة عمليات مختلفة (شكل 4.3) وهي:

1. عندما يكون الحجم ثابتاً (Isochoric) يعبر عن العملية الثرموديناميكية بالمعادلة (4.7).

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \qquad ....(4.7)$$

2. عندما يكون الضغط ثابتاً (Isobaric) يعبر عن العملية الثرموديناميكية بالمعادلة (4.8).

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \qquad ....(4.8)$$



شكل (4.4) **: العمليات الديناميكية المختلفة**

3. وعندما تكون درجة الحرارة ثابتة (Isothermal) يعبر عن العملية الثرموديناميكية بالمعادلة (4.9).

$$P_1V_1 = P_2V_2 \qquad ....(4.9)$$

4. وعندما تكون العمليات متعددة يتغير فيها الضغط والحجم وهذا التغيير من النوع الأدياباتيكي أي التي لا يكتسب فيها النظام ولا يفقد أية حرارة يعبر عنها بالمعادلة (4.10).

$$P_1V_1^{\,k} = P_2V_2^{\,k} \qquad ....(4.10)$$

الأس (k) في المعادلة (4.10) هو عبارة عن النسبة بين الحرارة النوعية عند ثبوت الضغط والحرارة النوعية عند ثبوت الحجم ويعبر عنها بالمعالة (4.11).

$$k = \frac{c_P}{c_V} \qquad ....(4.11)$$

إذ أن: c_p = الحرارة النوعية عند ثبوت الضغط (kJ/kgK)

c_V = الحرارة النوعية عند ثبوت الحجم (kJ/kgK)

4.5 المعادلة البديلة للغاز عند تغيير حالته
(Alternative Gas Equation during a Change Of State)

تستخدم المعادلة البديلة عندما تتغير الحالة التي يوجد فيها الغاز الى حالة أخرى نتيجة تأثير عامل واحد أو عاملين. إن العوامل المؤثرة على الغاز هي الضغط والحجم والحرارة. والمعادلة البديلة هي (4.12).

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \qquad ....(4.12)$$

تستخدم هذه المعادلة لحساب القيم الاولية أو النهائية للعوامل الثلاثة. فعند ثبات أحد العوامل فان تأثيره يختفي لهذا يرفع من المعادلة ويحسب العاملان الآخرين.

4.6 قانوني الديناميك الحراري The Two Laws Of Thermodynamics

الديناميك الحراري هو دراسة كافة التغييرات التي تطرأ على الطاقة والعوامل التي لها علاقة بهذا التغيير كالضغط والحجم والشغل المنجز نتيجة هذا التغيير. فضلاً عن ذلك يتضمن دراسة فقدان واكتساب الحرارة التي لها التأثير الأساسي بتحديد الشغل الميكانيكي كما هو الحال في محركات الاحتراق الداخلي. تعتمد مبادئ الديناميك الحراري على قانونين أساسيين هما:

4.6.1 القانون الاول The First Law of Thermodynamics

يطلق على هذا القانون بقانون حفظ الطاقة (Energy conservation)والذي ينص أن الطاقة لا يمكن فنائها ولكن يمكن تحويلها من شكل الى آخر. وإن طاقة النظام المغلق المعزول ثابتة.

4.6.2 القانون الثاني The Second Law of Thermodynamics

هو القانون الذي يتعامل مع الطاقة المتوفرة لإنجاز الشغل. وهذه الطاقة هي الحرارة التي قيمتها أعلى من حرارة محيط النظام وتعد مقياس للحرارة التي يمكن تحويلها الى شغل.

يبين القانون الثاني محدودية أداء محركات الاحتراق الداخلي والذي يعني عدم قابليتها على تحويل كل الطاقة الحرارة الناتجة من حرق الوقود الى شغل لأن جزءاً كبيراً منها يطرد مع العادم والإشعاع وماء التبريد.

❖ 4.7 الحرارة النوعية Specific Heat

تعرف الحرارة النوعية على أنها كمية الحرارة المطلوبة لزيادة درجة حرارة وحدة الكتلة درجة حرارية واحدة. أو تعرف على أنها عدد السعرات الحرارية المطلوبة لزيادة درجة حرارة غرام واحد من المادة درجة مئوية واحدة (1calorie=4.184 J).

تتغير الحرارة النوعية للغاز مع تغيير درجة الحرارة والضغط بينما تبقى ثابتة للمواد الصلبة والسائلة عند تغيير درجة الحرارة وبغض النظر عن الضغط المسلط.

فعندما يزداد حجم الغاز يتحول جزء من الطاقة الحرارية الى شغل وجزء آخر يزيد من الطاقة الداخلية للنظام ويعبر عن هذه الحالة بالمعادلة (4.13).

$$Q = M.c\,(T_2-T_1) = (U_2-U_1)+W \qquad \text{............(4.13)}$$

إذ أن:

Q = الحرارة المكتسبة او كمية الحرارة المفقودة

M = كتلة الغاز

U_2 = الطاقة الحرارة القصوى

U_1 = الطاقة الحرارية الصغرى

c = الحرارة النوعية

W = الشغل المنجز

تظهر المعادلة (4.13) أن حرارة الغاز (الفرق بين U_2 و U_1) تزداد كلما قل الشغل أي كلما انخفضت الطاقة المستغلة للشغل وفي هذه الحالة تتحول الطاقة التي يوفرها انخفاض الشغل الى حرارة مما تسبب زيادة حرارة الغاز والعكس بالعكس.

مثال (1):

هواء في درجة حرارة 27^0C سخن الى درجة حرارة 927^0C عند حجم ثابت. أحسب الحرارة المضافة لكل كيلوغرام إذا كانت الحرارة النوعية للهواء C_V=0.718kJ/kgK.

الحل:

حسب القانون الاول للديناميك الحراري.

$$Q - W = U_2 - U_1$$

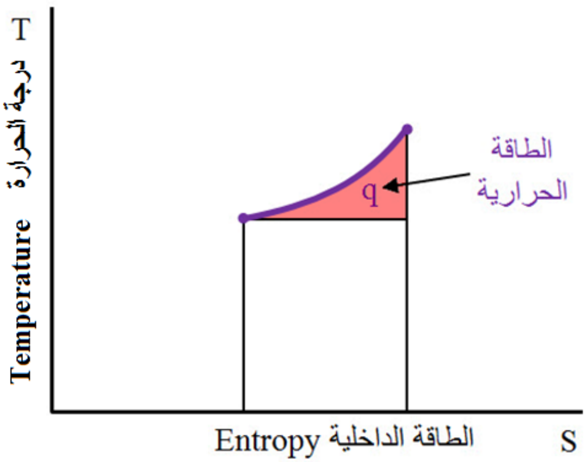
عند ثبوت الحجم فالشغل يساوي صفراً عندها

$$U_2 - U_1 = Q = M.c_V\,(T_2-T_1)$$
$$= 1x0.718\,(927-27) = 646.2kJ/kg$$

4.7.1 الحرارة التي لا يمكن استغلالها للشغل Entropy

هي الحرارة المتوفرة في النظام والتي لا يمكن استخدامها لإنجاز شغل. تستخدم الانتروبية (S) (Entropy) في الشكل (4.5) لتوضيح التغيير بحرارة النظام عند إضافة حرارة إليه كإضافة الحرارة الى الغاز عند تعرضه للضغط.

عندما تكون قيمة الانتروبية (Entropy) موجبة فهذا يعني هناك طاقة حرارية تضاف الى النظام (مثال على ذلك الغاز داخل الأسطوانة). أما إذا كانت قيمتها سالبة فأن النظام يفقد طاقة حرارية. وعندما تكون قيمتها صفراً فأن طاقة النظام تبقى ثابتة أي لا تضاف حرارة للنظام ولا تُفقد حرارة منه.



شكل (4.5): العلاقة بين الحرارة والطاقة الداخلية

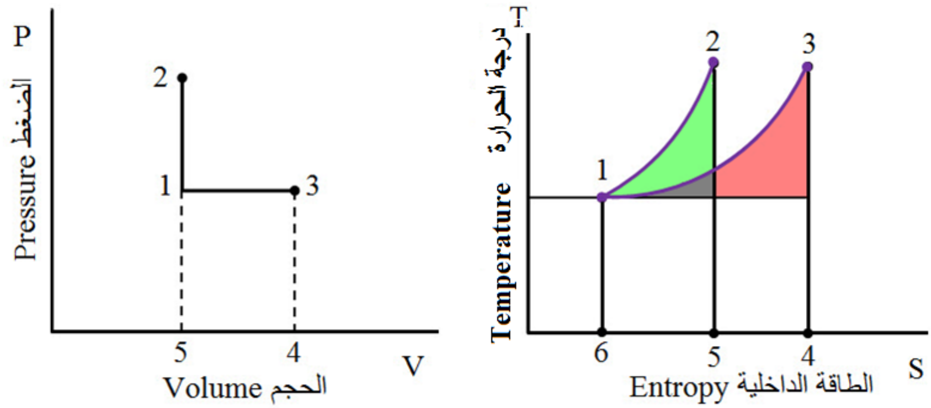
4.7.2 التغير في الطاقة الحرارية بثبوت الحجم

Change In Heat Energy At Constant Volume

يوضح الشكل (4.6) التغيير في الحرارة عند ثبوت الحجم (المستقيم 2-1). يعبر عن الحرارة المكتسبة بالمعادلة (4.14) وهي تساوي المساحة 6-5-2-1. وعندما تتغير الطاقة

الحرارية عند ثبوت الحجم فأن قيمة الشغل المنجز يساوي صفراً (W=0). لذلك لا توجد مساحة تمثل الشغل في الشكل P-V. وبسبب عدم وجود شغل عند ثبوت الحجم فأن المعادلة (4.13) تتغير لتصبح عواملها كما موضحة في المعادلة (4.14). وهذا يدل على ان الطاقة الحرارية المضافة تزيد من الطاقة الداخلية.

$$C_V (T_2 - T_1) = (U_2 - U_1) + 0 \qquad ....(4.14)$$



شكل (4.6) **: العلاقة بين الضغط والحجم والحرارة والطاقة الداخلية**

4.7.3 التغيير في الطاقة الحرارية عند ثبوت الضغط

Change In Heat Energy At Constant Pressure

عندما تزداد الحرارة أو تنقص عند ثبوت الضغط يزداد الحجم. وهذه الحالة يمكن تمثيلها بالخط (1-3) في الشكل (4.6). فعندما تكون هناك زيادة في الطاقة الحرارية فالطاقة المكتسبة يعبر عنها بالمعالة (4.15) وتمثلها المساحة 1-3-4-6.

$$Q = c_P (T_3 - T_1) \qquad ....(4.15)$$

تؤدي الزيادة في الحجم الى إنجاز شغل والذي يعبر عنه بالمعادلة (4.16).

$$W = P(V_3 - V_1) = area(1-3-4-5) \qquad ....(4.16)$$

وبتعويض المعادلتين (4.15) و (4.16) في المعادلة (4.13) نحصل على المعادلة (4.17).

$$C_P (T_3 - T_1) = C_V (T_3 - T_1) + P (T_3 - T_1)$$

ولكن

$$P_3.V_3 = R.T_3 \ : \ P_1.V_1 = R.T_1 \qquad ....(4.18)$$

وبتعويض المعادلة (4.18) في المعادلة (4.17) عندها تصبح كالآتي.

$$C_P (T_3 - T_1) = C_V (T_3 - T_1) + R (T_3 - T_1) \qquad ....(4.19)$$

وبتبسيط المعادلة (4.19) تصبح كالآتي:

$$c_P = c_V + R \qquad ....(4.20)$$

وبترتيب المعادلة (4.20)

$$c_P - c_V = R \qquad ....(4.21)$$

إذ أن: R = ثابت الغاز

4.8 ❖ التغييرات في التمدد الأدياباتيكي للغاز المثالي
Changes In An Adiabatic Expansion Of a Perfect Gas

تتغير قيم العوامل الثلاثة والتي هي الضغط (P) والحجم (V) ودرجة الحرارة (T) أثناء العملية الادياباتيكية (النظام لا يكتسب ولا يفقد طاقة حرارية) سواء كانت عملية كبس أو عملية تمدد. وهذه العوامل يعبر عنها بالمعادلتين (4.10) و (4.12). فاذا توفرت قيمتين لمتغيران في الحالة الأولية وقيمة واحدة في الحالة النهائية فيمكن حساب قيم المتغيرات الأخرى في الحالة النهائية. والمعادلات الآتية يمكن استخدامها في عملية الحسابات.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-k} \qquad ....(4.22)$$

$$T_2 = T_1\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-k} = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \qquad ....(4.23)$$

من المعادلة (4.10) يمكن الحصول على العلاقة الموضحة في المعادلة (4.24).

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}} \qquad ....(4.24)$$

وبتعويض المعادلة (4.24) في المعادلة (4.23).

$$T_2 = T_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad ....(4.25)$$

وبتبسيط المعادلة (4.25) عندها يعبر عن T_2 بالمعادلة (4.25)

$$T_2 = T_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1-\frac{1}{k}} \qquad ....(4.26)$$

من المعادلة (4.24) نسبة الضغط P_2 الى P_1 يعبر عنها بالمعادلة (4.27).

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k} \qquad ....(4.27)$$

ومن المعادلة (4.23) يعبر عن النسبة بين V_1 و V_2 بالمعادلة (4.28).

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \qquad ....(4.28)$$

وبتعويض المعادلة (4.28) في المعادلة (4.27) عندها يعبر عن P_2 بالمعادلة (4.29).

$$P_2 = P_1\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad ....(4.29)$$

ومن المعادلة (4.27) فأن النسبة بين V_1 و V_2 يعبر عنها بالمعادلة (4.30).

$$V_2 = V_1\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{k}} \qquad ....(4.30)$$

وبتعويض المعادلة (4.30) في المعادلة (4.29) فأن V_2 يعبر عنة بالمعادلة (4.31).

$$V_2 = V_1\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \qquad ....(4.31)$$

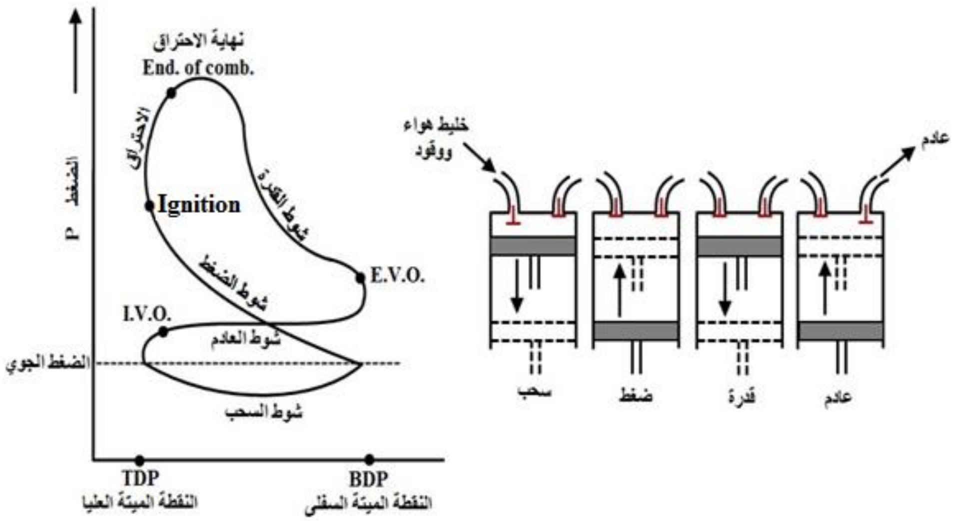
تستخدم هذه المعادلات لحساب عوامل تمدد الغاز المثالي الذي يتبع قانون $PV^n = const.$ والذي تستخدم فيه k بدل n.

4.9 دورة أوتو المثالية
The Ideal Cycle For An Otto Engine (Spark-Ignition Engine)

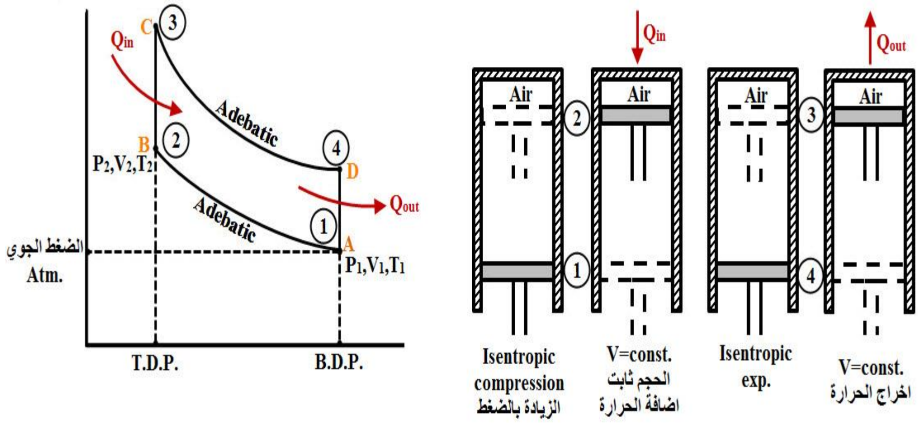
إن دورة أوتو الفعلية لا تتطابق مع دورة أوتو المثالية بصورة تامة لأن دورة أوتو المثالية تعتبر عملية كبس الهواء في شوط الضغط والتمدد في شوط القدرة من النوع الادياباتيكي (Adiabatic) أي أن الحرارة لا تتسرب من خلال جدران الأسطوانة. إلا أن الحرارة تتسرب فعلياً من الأسطوانة. فضلاً عن ذلك إن الاحتراق لا يحدث بثبوت

الحجم بنسبة 100% لهذا يجب أن تتوفر الافتراضات الآتية لغرض اعتبار الدورة مثالية (شكل 4.7a).

1. لا يوجد احتكاك بين المكبس والجدار الداخلي للأسطوانة.
2. يستخدم الهواء فقط داخل الأسطوانة.
3. القيم الاولية للضغط والحجم والحرارة عند النقطة الميتة السفلي هي P_1 و V_1 و T_1 على التوالي (شكل 4.7b).
4. لا يوجد فقدان في الحرارة من خلال جدران الأسطوانة خلال عمليتي الكبس AB والتمدد CD.
5. تضاف الحرارة الى النظام (الأسطوانة) بثبوت الحجم (BC) ويطرد جزء منها بثبوت الحجم أيضاً (DA).



(a) : **الأشواط الأربعة لدورة أوتو المثالية** (.I.V.O **فتح صمام السحب و** .E.V.O **فتح صمام العادم**)



(b) : دخول الطاقة وخروجها

شكل (4.7) : دورة أوتو المثالية لمحرك رباعي الأشواط

عندما يكبس الهواء في دورة أوتو المثالية بين النقطتين 1 و 2 (شوط الضغط) فان الطاقة الداخلية للنظام لا تتغير وهذا يعني أن الانتروبية (Entropy) ثابتة. إلا أن الحرارة تزداد دون فقدان جزء منها من خلال جدران الأسطوانة (افتراضا) ، يطلق على هذه العملية بالعملية الأدياباتيكية (Adiabatic) وهذا يعني أن العملية معزولة حرارياً (Isothermal) (شكل 4.7b).

يبدأ حرق الوقود من النقطة 2 وينتهي عند النقطة 3 وهذا الاحتراق يتم بثبوت الحجم ويضيف حرارة الى النظام. وعند نزول المكبس الى الأسفل تبدأ مرحلة التمدد (شوط القدرة) والمحصورة بين النقطتين 3 و 4. في هذه المرحلة يزداد الحجم وينخفض الضغط وهي عملية أدياباتيكية ولا يحدث فيها تغيير في الطاقة الداخلية. وعندما يصل المكبس الى النقطة 4 ينفتح صمام العادم ويطرد جزء من الحرارة بثبوت الحجم ويمثلها المستقيم(heat rejection at constant volume)4-1.

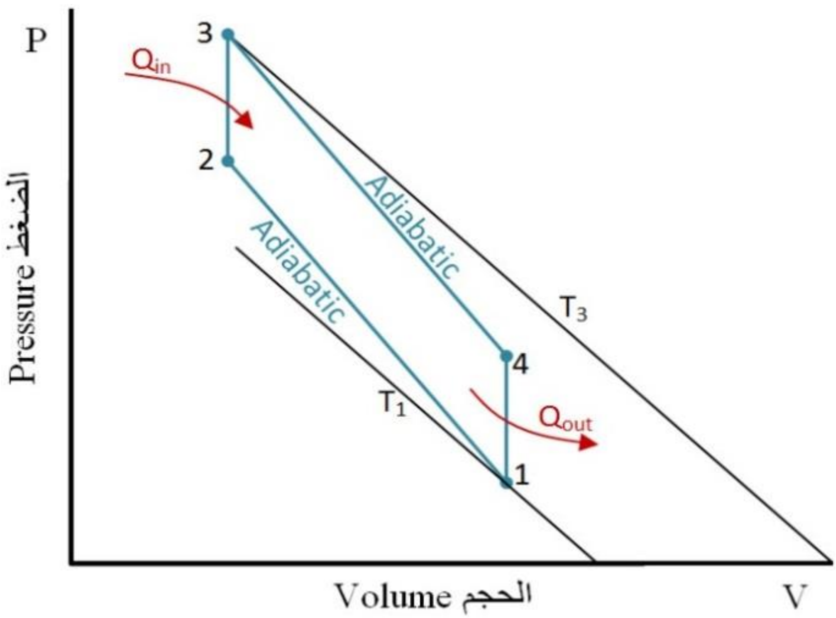
يمكن إعادة رسم العلاقة بين الضغط والحجم في الشكل (4.7) وفي الشكل (4.8) فضلاً عن ذلك يعاد رسم العلاقة بين الحرارة والـــ الانتروبية (S) (Entropy) والموضحة في الشكل (4.7) كما في الشكل (4.9). يعبر عن الكفاءة الحرارة لمحركات أوتو بالمعادلة (4.32).

$$\eta_{tho} = \frac{Q_i - Q_o}{Q_i} = 1 - \frac{Q_i}{Q_o} \qquad ....(4.32)$$

إذ أن: η_{tho} = الكفاءة الحرارية لمحركات أوتو

Q_i = الحرارة المضافة الى النظام من احتراق الوقود داخل الأسطوانة (kJ)

Q_o = الحرارة المطرودة من النظام (الأسطوانة) (kJ)



شكل (4.8) **: العلاقة بين الضغط والحجم لدورة أوتو المثالية**

يعبر عن الحرارة المضافة الى النظام (Q_i) بالمعادلة (4.33).

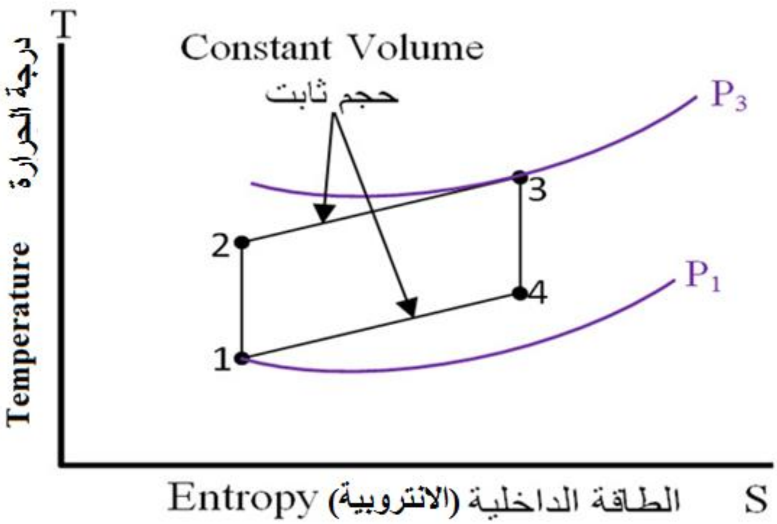
$$Q_i = M.c_v\,(T_3 - T_2) \qquad \text{............(4.33)}$$

أما الحرارة المطرودة من الاسطوانة (Q_o) فيعبر عنها بالمعادلة (4.34). وبمأنها حرارة مفقودة لهذا تُعطى أشاره سالبة.

$$Q_0 = M.c_v\,(T_1 - T_4) \qquad \text{............(4.34)}$$

وبترتيب المعادلة (4.34) نحصل على المعادلة (4.35).

$$Q_0 = M.c_v\,(T_4 - T_1) \qquad \text{............(4.35)}$$



شكل (4.9) **: العلاقة بين درجة الحرارة والطاقة الداخلية (الانتروبية** (Entropy **) لدورة أوتو المثالية.**

وبتعويض المعادلتين (4.33) و (4.35) في المعادلة (4.32) عندها يعبر عن الكفاءة الحرارية بالمعادلة (4.36).

$$\eta_{tho} = 1 - \frac{M.c_C\,(T_4 - T_1)}{M.c_C\,(T_3 - T_1)} \qquad ....(4.36)$$

وبتبسيط المعادلة (4.36).

$$\eta_{tho} = 1 - \frac{M.c_C\,(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1\left[\frac{T_4}{T_1} - 1\right]}{T_1\left[\frac{T_3}{T_2} - 1\right]} \qquad ....(4.37)$$

إلا أن:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \qquad ....(4.38)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1} \qquad ....(4.39)$$

إلا أن $V_3=V_2$ و $V_4=V_1$ عندها يمكن دمج المعادلتين (4.38) و (4.39)

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \qquad ....(4.40)$$

وبتعويض المعادلة (4.40) في المعادلة (4.37) عندها يعبر عن الكفاءة الحرارية لمحركات أوتو بالمعادلة (4.41) بعد حذف الأقواس من المعادلة (4.37).

$$\eta_{tho} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad ....(4.41)$$

وبتنظيم المعادلة (4.38) (قلبها) وتعويضها في المعادلة (4.41) عندها يعبر عن η_{tho} بالمعادلة (4.42).

$$\eta_{tho} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} \quad ....(4.42)$$

نسبة الأنضغاط لمحركات أوتو (r) يعبر عنها بالمعادلة (4.43).

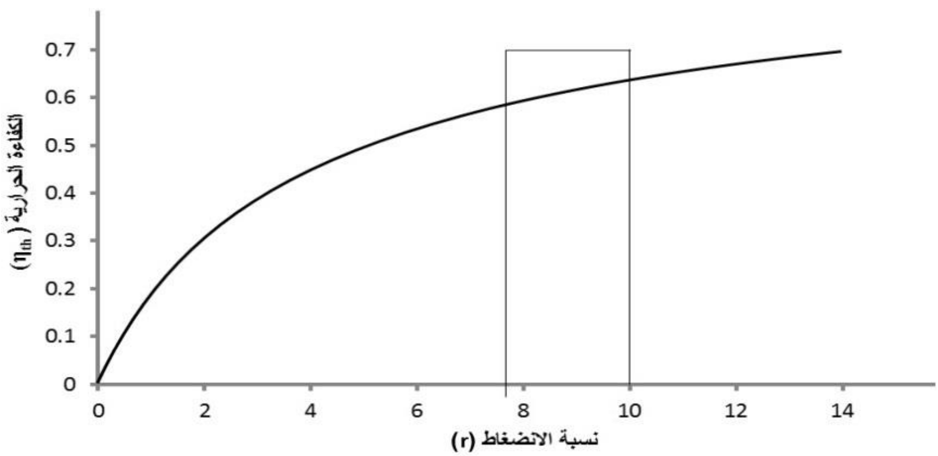
$$r = \frac{V_1}{V_2} \quad ....(4.43)$$

وبترتيب المعادلة (4.42) وتعويض المعادلة (4.43) في المعادلة (4.42) عندها يعبر عن η_{tho} بالمعادلة (4.44).

$$\eta_{tho} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad ....(4.44)$$

أو يمكن التعبير عن الكفاءة الحرارية لمحركات أوتو بالمعادلة (4.45).

$$\eta_{\text{tho}} = 1 - \left(\frac{P_1}{P_1}\right)^{\frac{(K-1)}{K}} \quad ....(4.45)$$



شكل (4.10) **: العلاقة بين الكفاءة الحرارية لمحركات أوتو ونسبة الانضغاط**
(نسبة الانضغاط المثالية 7:1-10:1)

تظهر المعادلة (4.44) ان الكفاءة الحرارية لمحركات أوتو تزداد مع زيادة نسبة الانضغاط (r). إلا أن قيمة r يجب ان لا تتجاوز قيم معينة وهذه القيم يحددها نوع الوقود. فعند زيادة نسبة الانضغاط تزداد الحرارة في شوط الضغط مما قد يؤدي الى الاحتراق المبكر للوقود مسبباً فرقعة. يوضح الشكل (4.10) العلاقة بين الكفاءة الحرارية ونسبة الانضغاط. إن الكفاءة الحرارية لا تتجاوز 50% في أفضل حالات عمل المحرك وتنخفض كلما زادت السرعة وتقادم المحرك وقلت جودة الوقود وقد تصل بعض الاحيان الى 20-25%.

مثال (2) **:**

محرك بنزين، نسبة الانضغاط فيه9:1 والضغط الأولي داخل الاسطوانة p_1=95kPa والحرارة والحجم الأولين $T_1=17^oC$ وV_1=3.8L على التوالي. اضيفت حرارة مقدارها 7.5kJ. أحسب الحرارة والضغط والكفاءة الحرارية. أذا كانت الحرارة النوعية بثبوت الحجم c_V = 0.718kJ/kgK وقيمة k = 1.4.

الحل:

$$\frac{T_2}{T_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

$T_2 = T_1\,(r)^{K-1}$

$T_1 = 273+17 = 290K$

$T_2=290\,(9)^{1.4-1} = 698.4K$

$$\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k}\Rightarrow P_2=P_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k}$$

$P_2=95(9)^{1.4}= 2059kPa$

الحرارة التي تدخل النظام من العملية 2-3.

$Q = M.c_V(T_3-T_2)$

من القانون العام للغاز

$$\frac{P_1.V_1}{T_1}=M.R\Rightarrow\frac{V_1}{M}=\frac{R.T_1}{P_1}$$

$$v_1=\frac{V_1}{M}=\frac{R.T_1}{P_1}$$

$$v_1=\frac{0.287*290}{95}=0.875m^3/kg$$

كما أن:

$$q_i = \frac{Q_i}{M} = Q_i \frac{v_1}{V_1}$$

$$q_i = 7.5 \frac{0.875}{3.8 * 10^{-3}} = 1727 kJ/kg$$

$$T_3 = \frac{Q_i + T_2}{M.c_V} = T_2 + \frac{q_i}{c_V}$$

$$T_3 = 698.4 + \frac{1727}{0.718} = 3103.7K$$

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{T_3}{T_2} \Rightarrow P_3 = P_2 \frac{T_3}{T_2} = 9.15MPa$$

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = T_3 \left(\frac{1}{r}\right)^{k-1}$$

$$T_4 = 3103.7 \left(\frac{1}{9}\right)^{1.4-1} = 1288.8K$$

أما P_4 تحسب كالآتي

$$P_4 = P_3 \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{K} = P_3 \left(\frac{1}{r}\right)^{k}$$

$$P_4 = 9.15 \left(\frac{1}{9}\right)^{1.4} = 422kPa$$

الطاقة الحرارية المطرودة بالعملية 4-1 تحدث بثبوت الحجم وهذه الطاقة تحسب من المعادلة الآتية:

$Q_0 = m.c_v (T_4\text{-}T_1)$

$$q_0 = \frac{Q_0}{m} = c_v(T_4 - T_1)$$

q_0 = 0.718 (1288.8-290) = 717.1kJ/kg

التغيير في الطاقة الداخلية خلال دورة المحرك يساوي صفراً ($U_2\text{-}U_1\text{=}0$) ومن القانون الاول للديناميك الحراري فان الشغل الكلي يحسب كالآتي:

الشغل الكلي = الحرارة الكلية = الحرارة المضافة – الحرارة المطرودة

W = $q=q_i\text{-}q_o$

W = q = (1727-717.4) = 1009.9 kJ/kg

الكفاءة الحرارية:

$$\eta_{tho} = \frac{W}{q_i} = \frac{1009.6}{1727} = 0.585 = 58.5\%$$

معدل الضغط الفعال (Mean Effective Pressure)

$$MEP = \frac{W}{V_1 - V_2} = \frac{W}{V_1\left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right)}$$

$$MEP = \frac{W}{V_1\left(1 - \frac{1}{r}\right)} = \frac{1009.6}{0.875\left(1 - \frac{1}{9}\right)} = 1298 kPa$$

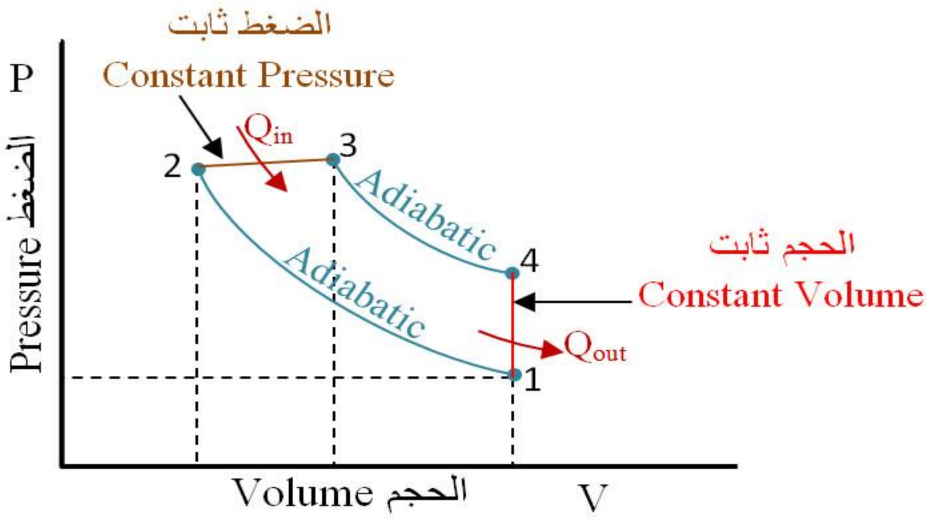
نسبة الشغل المرجع الى المحرك:

$$W_R = \frac{M.c_v(T_2 - T_4)}{M.c_v(T_3 - T_4)} = \frac{(T_2 - T_1)}{(T_3 - T_4)}$$

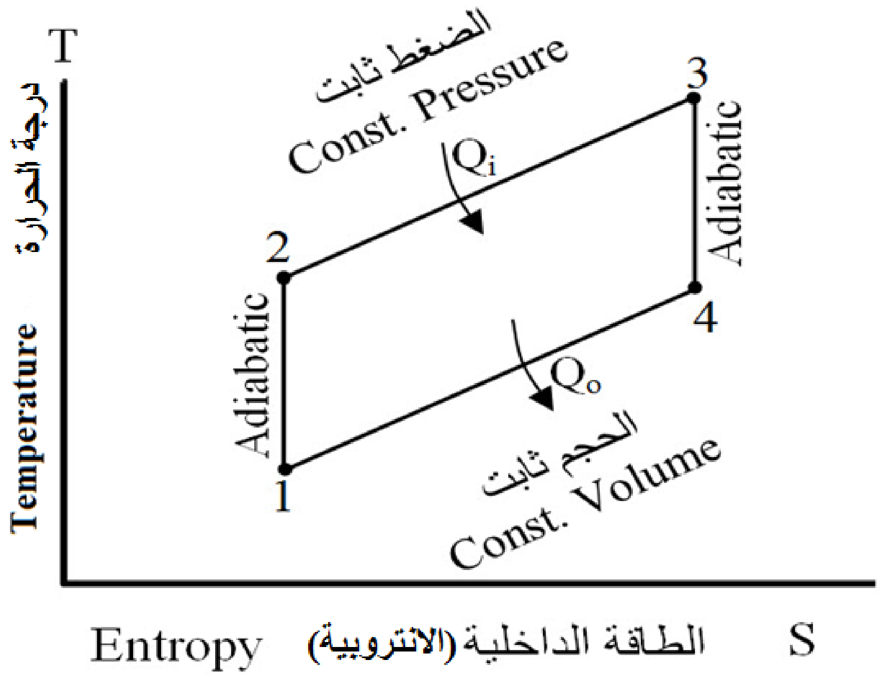
$$W_R = 0.225 = 22.5\ \%$$

❖ 4.10 دورة ديزل المثالية Ideal Diesel Cycle

تمر دورة ديزل المثالية بأربعة مراحل هي شوط الضغط الذي يكبس الهواء فيه. وعملية الكبس من النوع الأدياباتيكي (adiabatic) إذ لا يحصل فقدان بالحرارة من خلال جدران الاسطوانة وتبقى الطاقة الداخلية (الانتروبية Entropy) ثابتة لهذا تسمى هذه العملية بالمتساوية الانتروبية (Isentropic) وتمثلها العملية 1−2 (شكل 4.11). ومرحلة الاحتراق (2-3) التي تضيف للنظام (الاسطوانة) طاقة حرارية وتتم عملية الإضافة بثبوت الضغط. ومرحلة التمدد والتي تمثل شوط القدرة (3-4). في هذه المرحلة تبقى فيها الانتروبية (Entropy) ثابتة والعملية من النوع الادياباتيكي (adiabatic). أو مرحلة طرد الحرارة وتحدث عند ثبوت الحجم (4-1). ويمكن تمثيل المرحلة الرابعة في الشكل (4.12).



شكل (4.11) **: العلاقة بين الضغط والحجم لدورة ديزل المثالية.**



شكل (4.12) **: العلاقة بين درجة الحرارة والطاقة الداخلية لدورة ديزل المثالية.**

الكفاءة الحرارية لمحركات الديزل يعبر عنها بالمعادلة (4.46).

$$\eta_{thd} = \frac{Q_i - Q_o}{Q_o} = 1 - \frac{Q_o}{Q_i}$$ ....(4.46)

الحرارة المضافة للأسطوانة (3-2) بثبوت الضغط يعبر عنها بالمعادلة (4.47).

$Q_i = M.c_p (T_3 - T_2)$ ....(4.47)

الحرارة المطرودة من الاسطوانة (1-4) بثبوت الحجم يعبر عنها بالمعادلة (4.48).

$Q_0 = M.c_p (T_4 - T_1)$ ....(4.48)

إذ أن:
M = كتلة الهواء التي تحتويها الأسطوانة
c_P = الحرارة النوعية بثبوت الضغط
c_V = الحرارة النوعية بثبوت الحجم
T = درجة الحرارة المطلقة

وبتعويض المعادلة (4.47) والمعادلة (4.48) في المعدلة (4.46) عندها يعبر عن الكفاءة الحرارية لمحركات الديزل بالمعادلة (4.49).

$$\eta_{tho} = \frac{M.c_v(T_4 - T_1)}{M.c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_P(T_3 - T_2)}$$ ....(4.49)

ولكن

$$k = \frac{c_P}{c_V}$$ ....(4.50)

إذ أن:
k = نسبة الحرارة النوعية عند ثبوت الضغط الى الحرارة النوعية عند ثبوت الحجم

وبتعويض المعادلة (4.50) في المعادلة (4.49) عندها يعبر عن η_{thd} بالمعادلة (4.51).

$$\eta_{tho} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{K(T_3 - T_2)}$$ ....(4.51)

العلاقة بين الضغط والحجم والحرارة يعبر عنها بالمعادلة (4.52).

$$\frac{P_3.V_3}{T_3} = \frac{P_2.V_2}{T_2}$$ ....(4.52)

إلا أن $P_3=P_2$ للحالة (3-2) لهذا تصبح المعادلة (4.52) كالآتي:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2}$$ ....(4.53)

ويعبر عن نسبة القطع بالحرارة المضافة بالمعادلة (4.54).

$$r_c = \frac{V_3}{V_2}$$ ....(4.54)

وبتعويض المعادلة (4.54) في المعادلة (4.53).

$$\frac{T_3}{T_2} = r_c$$ ....(4.55)

تعرف r_c على أنها النسبة بين حجم الأسطوانة عند انتهاء حرق الوقود (V_3) وحجم الأسطوانة عند بداية الاحتراق (V_2). وهي الفترة التي تضاف فيها الحرارة الى الأسطوانة (النظام) عند ثبوت الضغط. كما أنها تمثل الفترة التي يحقن فيها الوقود داخل الأسطوانة لهذا فهي تمثل من ناحية الأخرى عدد الدرجات التي يدورها عمود المرفق خلال فترة حقن الوقود داخل الأسطوانة.

تُطرد الحرارة بثبوت الحجم في المرحلة (4-1). هذه المرحلة يمكن تمثيلها بالمعادلة (4.56).

$$\frac{P_4.V_4}{T_4} = \frac{P_1.V_1}{T_1}$$ ....(4.56)

إلا إن $V_4=V_1$ عندها تصبح المعادلة (4.56) كالآتي:

$$\frac{P_4}{T_4} = \frac{P_1}{T_1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{P_4}{P_1}$$ ....(4.57)

يعبر عن مرحلتي الكبس (1-2) والتمدد (3-4) واللذان هما من النوع الأدياباتيك بالمعادلتين (4.58) و (4.59) على التوالي.

$$P_1.V_1^{\ k} = P_2.V_2^{\ k}$$ ....(4.58)

$$P_4.V_4^{\ k} = P_3.V_3^{\ k}$$ ....(4.59)

إلا أن $P_2=P_3$ و $V_4=V_1$ وبقسمة المعادلة (4.59) على المعادلة (4.58).

$$\frac{P_4}{P_1} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^k$$ ....(4.60)

وبتعويض المعادلة (4.54) في المعادلة (4.60) فان.

$$\frac{P_4}{P_1} = r_c^{\ k}$$ ....(4.61)

وبتعويض المعادلة (4.57) في المعادلة (4.61) عندها.

$$\frac{T_4}{T_1} = r_c^{\ k}$$ ....(4.62)

وبترتيب المعادلة (4.51) عندها يعبر عن η_{thd} بالمعادلة (4.63).

$$\eta_{thd} = 1 - \frac{T_1\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{k.T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} \qquad \text{..........(4.63)}$$

يعبر عن نسبة الانضغاط بالمعادلة (4.64).

$$r = \frac{V_1}{V_2} \qquad \text{..........(4.64)}$$

وبتعويض المعادلة (4.64) في المعادلة (4.38) عندها.

$$\frac{T_2}{T_1} = (r)^{k-1} \qquad \text{..........(4.65)}$$

وبتعويض المعادلات (4.55) و (4.62) و (4.65) في المعادلة (4.63) عندها يعبر عن η_{thd}.

$$\eta_{tho} = 1 - \left[\frac{1(r_c^k - 1)}{r^{k-1} K\,(r_c - 1)}\right] \qquad \text{..........(4.66)}$$

تُظهر المعادلة (4.66) اذا كانت قيمة $r_c > 1$ونسبة الانضغاط ثابتة (r) فأن الكفاءة الحرارية لمحركات أوتو أعلى منها لمحركات الديزل. إلا أن نسبة الأنضغاط لمحركات الديزل أعلى منها لمحركات أوتو لهذا الكفاءة الحرارية لمحركات الديزل أعلى منها لمحركات أوتو (شكل 4.9).

مثال (3) **:**

محرك ديزل نسبة الانضغاط فيه 20:1. درجة الحرارة $20^{o}C$ و c_P=1.005kJ/kg.k و c_V=0.718kJ/kg.k و R=0.87kJ/kg.k و k=1.4. أحسب الحرارة المضافة والمطرودة والشغل المنجز والكفاءة الحرارية والضغط الفعال داخل الاسطوانة.

الحل:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

$T_2 = (20 + 273)^{1.4-1} = 971.1K$

العملية 2-3: الضغط (P) ثابت فيها.

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{2200}{971.1} = 2.265$$

العملية 3-4 وهي من النوع الادياباتيكي (Adiabatic) أو الايزونتروبي (Isentropic).

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = T_4 = T_3\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = 2200\left(\frac{2.265}{20}\right)^{0.4} = 920.6k$$

وأن كمية الحرارة الداخلة

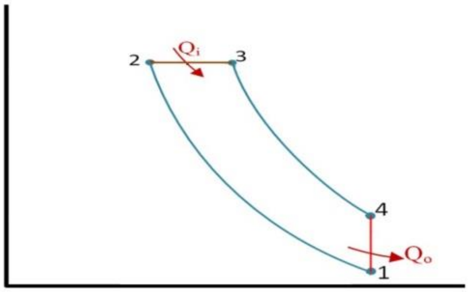
$Q_i = U_3 - U_2 = c_P(T_3 - T_2)$

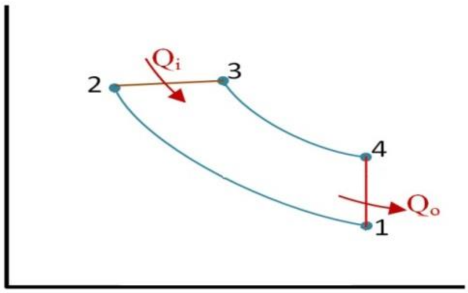
$Q_i = 1.005(2200-971.1) = 1235 kJ/kg$

وكمية الحرارة المطرودة

$Q_o = U_4 - U_1 = c_V(T_4 - T_1)$

$Q_o = 0.718\ (920.6-293) = 450.6 kJ/kg$





مع الشغل المنجز

$W = Q_i - Q_o$

$W = 1235-450.6 = 784.4 kJ/kg$

إذن تكون الكفاءة الحرارية

$$\eta_{thd} = \frac{W}{Q_i} = \frac{784.4}{1235} = 63.5\%$$

حجم الأسطوانة الكلي (V_1) يحسب كالآتي

$$\frac{P_1.V_1}{T_1} = R$$

$$V_1 = \frac{R.T_1}{P_1} \Rightarrow V_1 = \frac{0.287*293}{95} = 0.885 m^3/kg$$

نسبة الانضغاط (r)

$V_{max} = V_1 : V_{min} = V_2$

$$r = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{r} = \frac{0.885}{20} = 0.04425 m^3$$

معدل الضغط الفعال في الأسطوانة MEP

$$MEP = \frac{W}{V_1 - V_2} = \frac{W}{V_1 - \frac{V_1}{r}} = \frac{W}{V_1\left(1 - \frac{1}{r}\right)}$$

$$MEP = \frac{784.4}{0.885\left(1 - \frac{1}{20}\right)} = 933 kPa$$

مثال (4) **:**

محرك سداسي الأسطوانة حجمة اللتري 3.2L. نسبة الانضغاط 19:1. الضغط الأولي 95kPa وحرارة الهواء 67^0C وسرعة المحرك 1750rpm. المحرك يستخدم وقود قيمته الحرارية 42500kJ/kg. نسبة الهواء الى الوقود 28:1. كفاءة الاحتراق 98%. ثابت الحرارة النوعية 850K. أحسب الاتي: إذا كانت c_P=1.11kJ/kgK عند حرارة الهواء 850K و c_V=0.823kJ/kgk و R=0.287kJ/kgK و k=1.349

(1) الحرارة القصوى في الدورة الحرارية ونسبة القطع cut-off ratio (r_c)

(2) الشغل الكلي في الدورة والكفاءة الحرارية.

(3) معدل الضغط الفعال (MEP).

(4) القدرة الكلية للمحرك.

الحل:

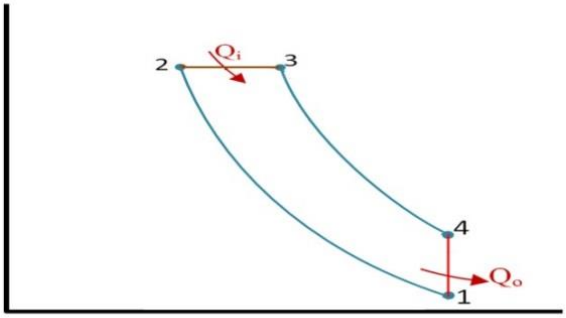
$$T_2 = T_1\left[\frac{V_1}{V_2}\right]^{k-1}$$

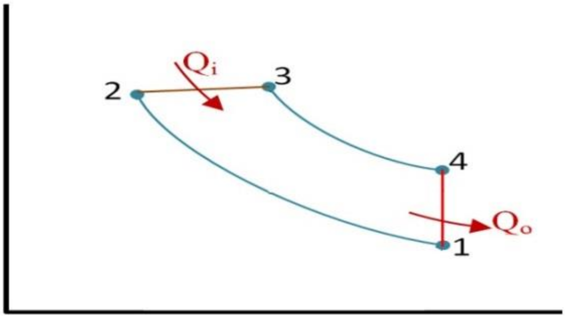
T2 = 340 [19]$^{1.349-1}$ = 950.1K

P2 = P1 $\left[\frac{V_1}{V_2}\right] \Longrightarrow P_2 = 95\,[19]^{1.349} = 5044kPa$

حجم غرفة الاحتراق:

$$r = \frac{V_C + V_S}{V_C}$$





$$19 = \frac{V_C + 0.0045}{V_C} \Rightarrow V_C = 0.0001778m^3$$

$$V_1 = V_C + V_S \Rightarrow V_1 = 0.0001778 + 0.0032 = 0.003378m^3$$

كتلة الهواء داخل الاسطوانة:

$$M = \frac{P_1.V_1}{R.T_1} \Rightarrow M = \frac{95 * 0.003378}{0.287 * 340} = 0.003288kg$$

كتلة الوقود خلال دورة واحدة:

$$AF = \frac{M_a}{M_f} = \frac{M - M_f}{M_f}$$

$$28 = \frac{0.003288 - M_f}{M_f} \Rightarrow M_f = 0.0001134kg$$

$$q_i = M_f * q_F * \eta_C$$

$$q_i = 0.0001134 * 42500 * 0.98 = 4.723kJ$$

$Q_i = M.c_v (T_3 - T_2)$

$4.723 = 0.003288 * 0.823 (T_3 - 950.1)$

T_3=2244k

تحسب r_c (cut-off ratio) كالآتي:

$$r_C = \frac{T_3}{T_2} = \frac{2244}{950.1} = 2.362$$

$$V_2 = \frac{V_1}{r} = \frac{0.003378}{19} = 0.0001778m^3$$

$V_3 = r_C*V_2 = 2.362*0.0001778 = 0.0004199m^3$

$V_4 = V_1 : P_3 = P_2$

العملية 3-4 (Adiabatic):

$$T_4 = T_3\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1}$$

$$T_4 = 2244\left(\frac{0.0004199}{0.003378}\right)^{1.349-1} = 1084k$$

$$P_4 = P_3\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k} = 5044\left(\frac{0.0004199}{0.003378}\right)^{1.349} = 302.9kPa$$

العملية 4-1 (طرد الحرارة مع ثبوت الحجم).

$q_0 = M.c_V (T_4-T_1)$

$q_0 = 0.003288 * 0.823(1084-340) = 2.013kJ$

الشغل النهائي:

$W = q_i-q_o = 4.723-2.013 = 2.710kJ$

الكفاءة الحرارية:

$$\eta_t = \frac{W}{q_i} = \frac{2.710}{4.723} = 0.5737 = 57.4\%$$

معدل الضغط المؤثر:

$$MEP = \frac{W_o}{V_1 - V_2}$$

$$MEP = \frac{2.710}{0.003378 - 0.0001778} = 847kPa$$