

# الفصل الأول

علم التحرك الحراري (الثرموداينميك):

العلم الذي يبحث في العلاقة بين الحرارة والشغل (الحركة) ويمكن دراسة هذا العلم بطريقتين الأولى احصائية وبهذه الطريقة تتم دراسة حركة الجزيئات الخاصة بالمادة دراسة مجهرية (**microscopic**) والثانية تتم بدراسة المادة كوحدة واحدة متجانسة ويؤخذ بعين الاعتبار تكوينها الجزيئي فهي تعد دراسة منظورة او عيانية (**macroscopic**) .

فرع الفيزياء الذي يتعامل مع العلاقات بين الحرارة وأشكال أخرى من الطاقة على وجه الخصوص ، فإنه يصف كيف يتم تحويل الطاقة الحرارية من وإلى أشكال الطاقة الأخرى وكيف يؤثر على المادة.

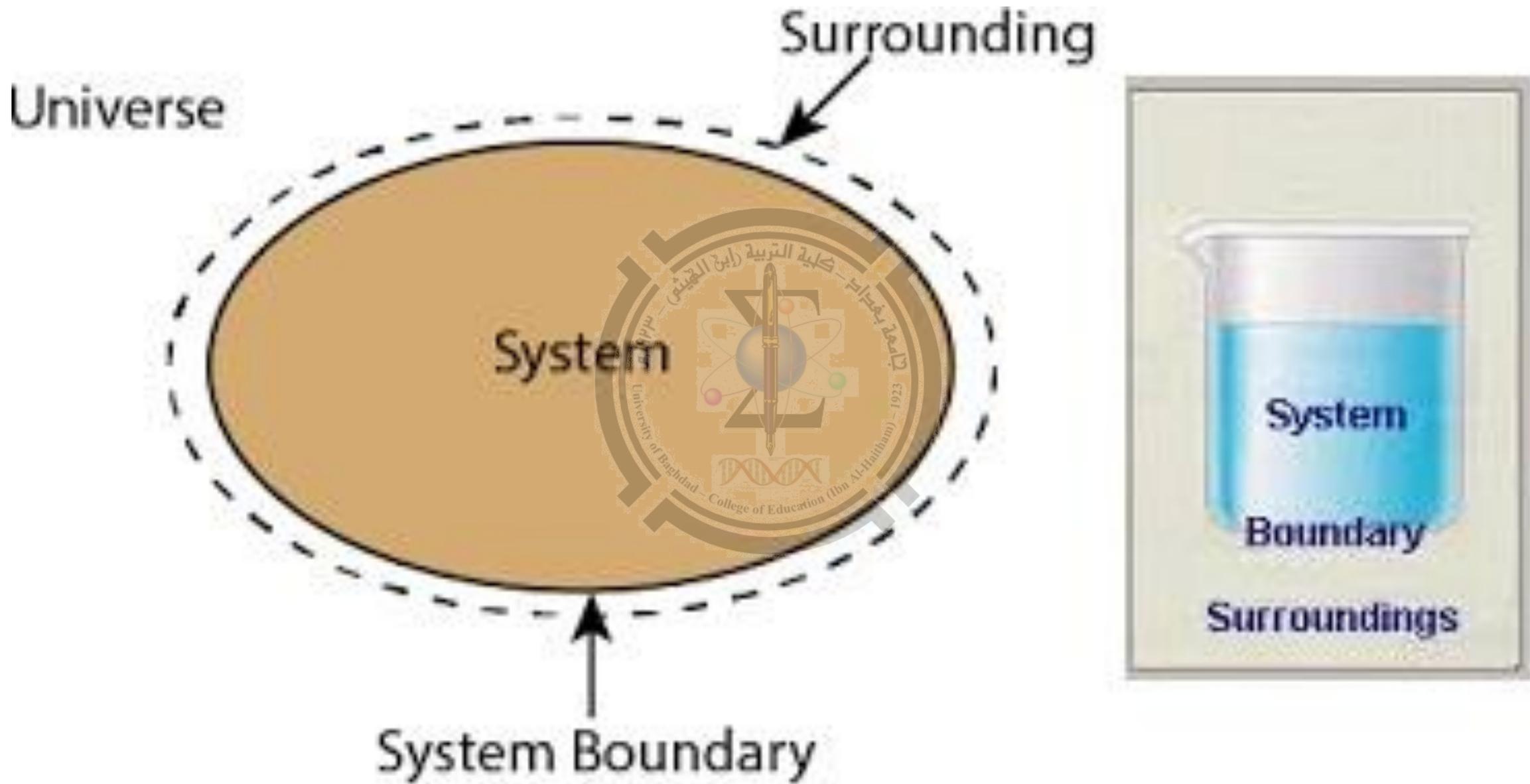
## النظام والمحيط

النظام هو الكمية من المادة التي تكون قيد الدراسة (أو أي جزء في الكون له حدود معلومة ويخضع للدراسة والتجربة). أما المحيط فهو كل شيء خارج النظام وله تأثير مباشر على سلوك النظام ويوجد بين النظام والمحيط حدود فاصلة (حاجز) وقد يكون ثابتا أو متحركا, عازلا للحرارة (كظيم adiabatic) أو موصلا للحرارة (منفذ للحرارة diathermic) ويسمى النظام والمحيط معا بالكون (universe)

المحيط



حدود المحيط



## انواع الانظمة الترموداينميكية :- *Types of thermodynamic systems*

النظام المعزول : isolated system

وهو النظام الذي لا يتم فيه انتقال المادة ولا الطاقة من النظام الى المحيط ولا العكس مثل الترموس حيث الماء البارد او أي سائل بدرجة حرارة عالية داخلها لا يتسرب منها ولا تتغير درجة حرارتها اي لا تخرج منها ولا تدخل اليها .

## النظام المفتوح : open system

معظم الانظمة الهندسية تكون من هذا النوع مثل السخان الكهربائي حيث يمكن للمادة (الماء) الدخول كماء بارد والخروج منه كماء حار او مثل الغاز في المكبس

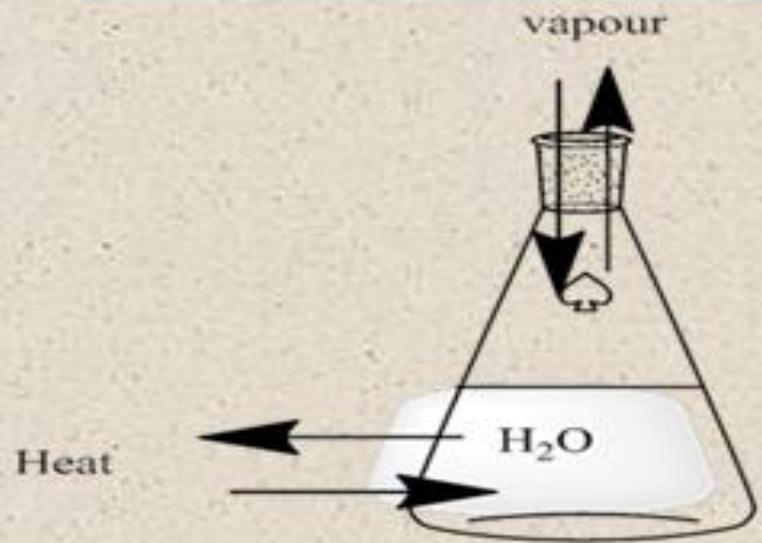


## النظام المغلق:- Closed system

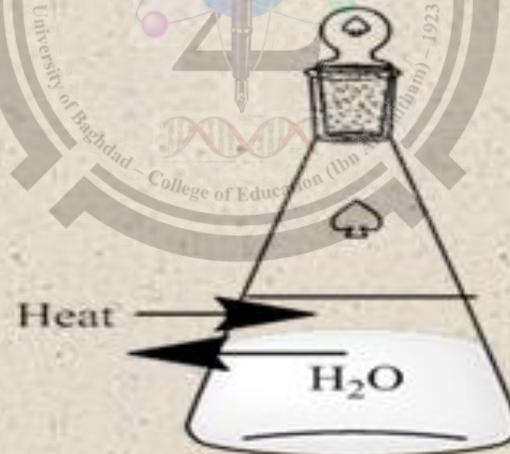
وهو النظام الذي يسمح للطاقة بالخروج والدخول ولايسمح للمادة بالخروج من النظام او الدخول اليه اي أنّ المادة داخل النظام تبقى ثابتة, مثل غاز محصور في مكبس جدرانه مغلقة ولكنها غير عازلة او مثل مكعبات الثلج المجمدة في اوعية بلاستيكية مغلقة توضع في الفريزر او اكياس الماء الطبية البلاستيكية المملوئة بمادة سائلة .

# النظام التيرموديناميكي وأنواعه

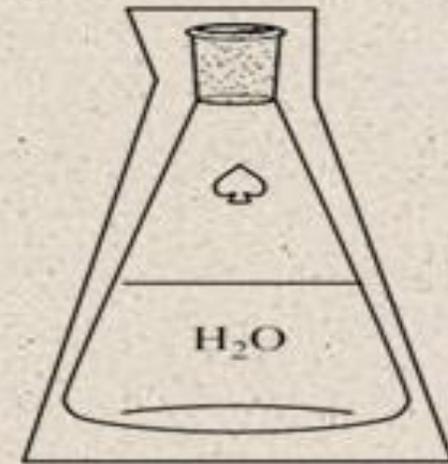
## Thermodynamic System and its Types



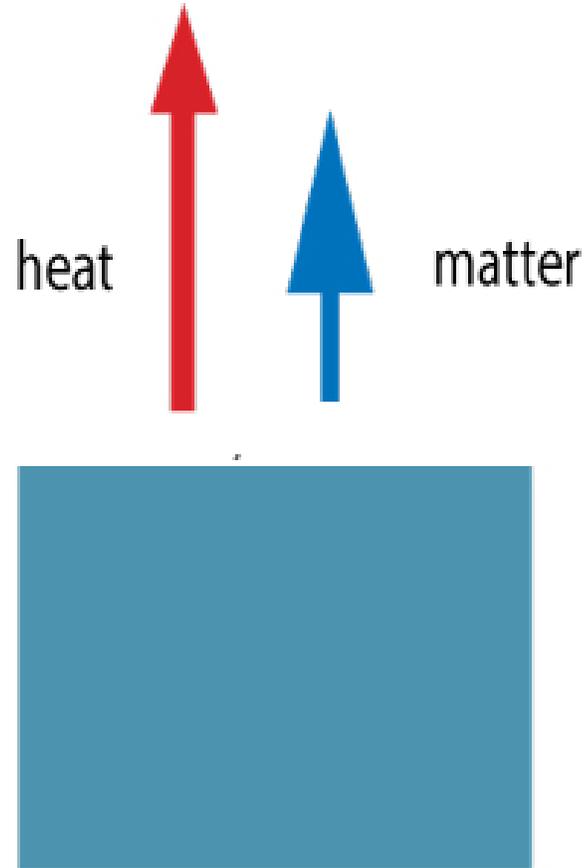
**Open system**  
a



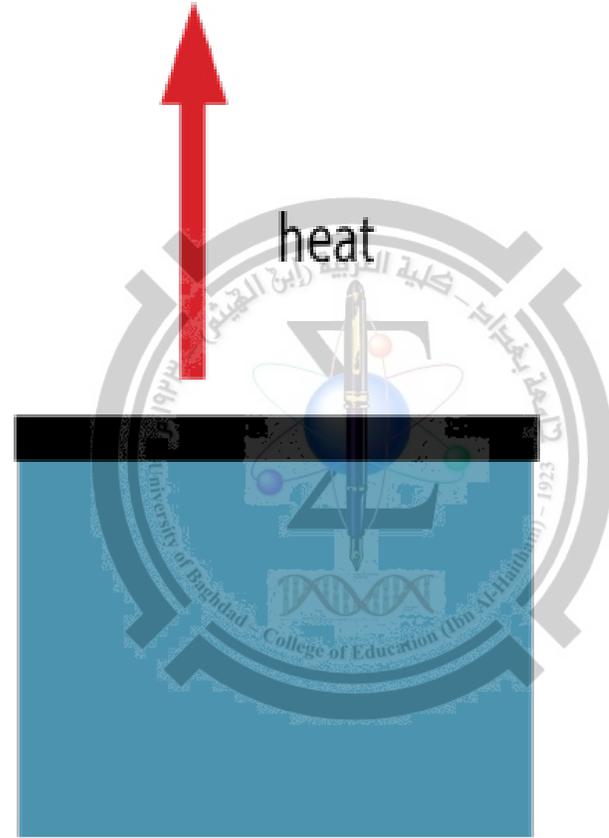
**Closed system**  
b



**Isolated system**  
c



OPEN SYSTEM



CLOSED SYSTEM



ISOLATED SYSTEM

والانظمة الثلاثة السابقة الذكر قد تكون حقيقية كمادة صلبة او سائلة او غازية او قد تكون انظمة مثالية او افتراضية لغرض الدراسة فقط.



## خصائص النظام

أ- الخصائص الضمنية: (intensive properties) وتسمى الخصائص المركزة التي لا تعتمد على كتلة النظام او حجمه مثل الكثافة والضغط ودرجة الحرارة والشد السطحي واللزوجة وغيرها فاذا كان لدينا نظام بدرجة حرارة معينة وقسمنا النظام الى جزئين تبقى درجة الحرارة والكثافة وغيرها كما هي بدون تتغير.

ب- الخصائص غير الضمنية او الشاملة: (extensive properties) وهي الخصائص التي تعتمد على كتلة النظام مثل الطول والمساحة السطحية والحجم والوزن والشحنة الكهربائية والطاقة الداخلية . تسمى النسبة بين الخاصية غير الضمنية وكتلة النظام الكمية النوعية مثل

الحرارة النوعية  $(\frac{Q}{m})$  والحجم النوعي  $(\frac{V}{m})$  وكما يأتي بعض العلاقات التالية:

$$v = \frac{V}{m}$$

الحجم النوعي

$$v = \frac{v}{n}$$

الحجم النوعي المولي

$$n = \frac{m}{M}$$

عدد المولات = n



حيث  $m$  تمثل الكتلة,  $M$  تمثل الوزن الجزيئي

$$\text{حيث } N = \text{عدد الجزيئات} \quad n = \frac{N}{N_A}$$

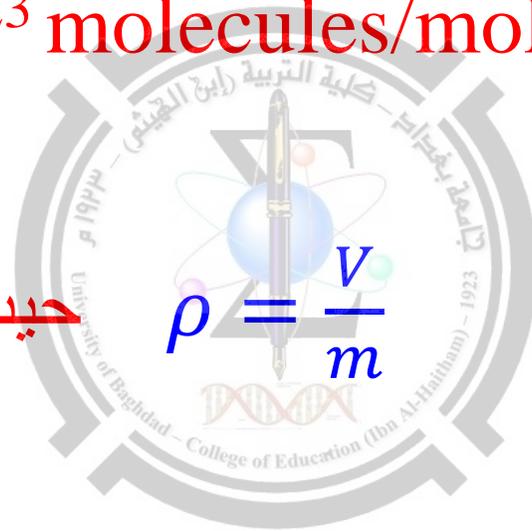
$$6.025 \times 10^{23} \text{ molecules/mole} = N_A = \text{عدد افوكادرو وقيمته}$$

$$v = \frac{1}{\rho}$$

حيث

$$\rho = \frac{v}{m}$$

الحجم النوعي =  $1/\rho$  الكثافة



$$P = \frac{W}{A}$$

ملاحظة: ان حاصل قسمة اي خاصيتين غير ضمنتين هو خاصية ضمنية مثل حاصل قسمة الوزن على المساحة حيث أن  $W$  و  $A$  كميتين غير ضمنتين بينما الضغط  $P$  كمية ضمنية

وإذا كان كتلة الجزيء الواحد  $M^*$  وكتلة الوزن الجزيئي  $M$  فإن  $M = M^* \cdot N_A$



## التوازن الحراري الحراري :- *Thermodynamic equilibrium*

ان حدوث حالة التوازن لنظام يعتمد على الانظمة المجاورة له وعلى طبيعة الجدران التي تفصله عنها والتي قد تكون موصلة للحرارة او غير موصلة (عازلة). فاذا كان هنالك نظامين A,B يفصل بينهما جدار عازل للحرارة (اديباتيكي), وفي حالة ثانية يفصل بينهما جدار موصل للحرارة (دايثرمي), نجد ان النظامين في الحالة الاولى بوجود الجدار العازل يبقيان على حالهما اي ان احداثياتهما لا تتغير بشرط ان يتحمل الجدار العازل فرق الضغط ودرجة الحرارة للنظامين. اما النظامين في الحالة الثانية أي بوجود الجدار الموصل للحرارة فإن النظامين سيصلان بعد وقت معين الى حالة توازن وتصبح احداثيات كل منهما مساوية لإحداثيات الاخر.

ولكي يكون النظام في حالة توازن ثرموداينميكي يجب ان تتوفر الشروط التالية:

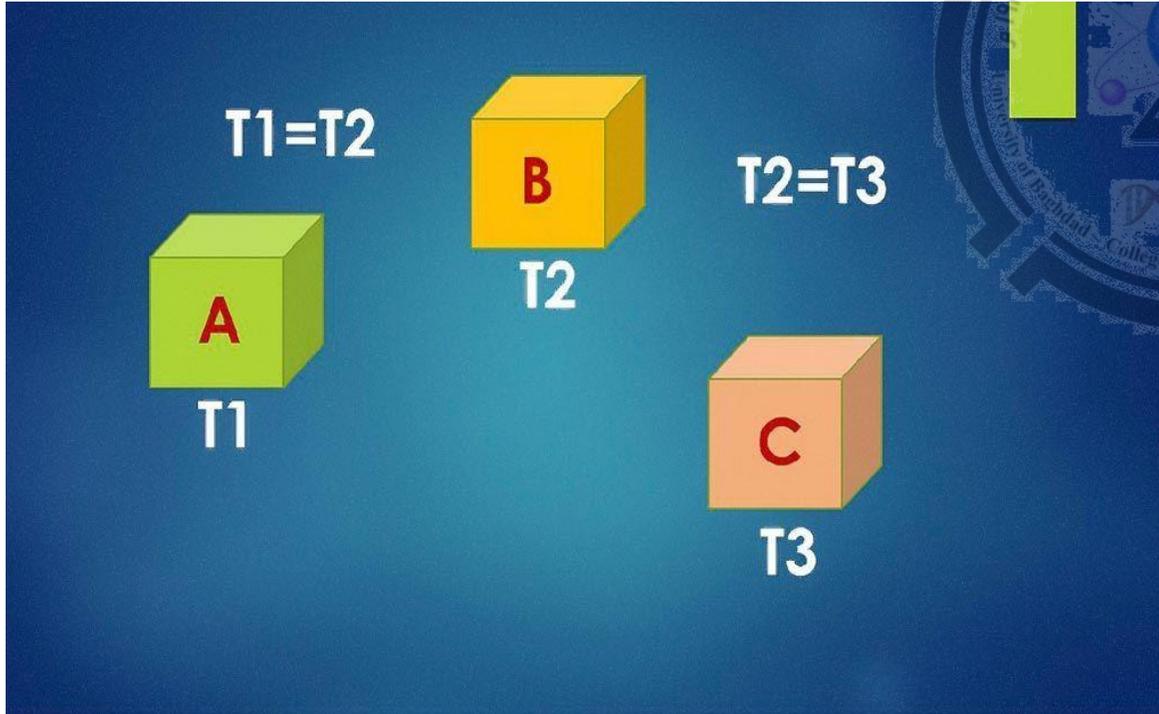
1- يجب ان يكون النظام في حالة اتزان ميكانيكي مثلا في مكبس فإن ضغط المكبس يساوي ضغط الغاز على المكبس نفسه.

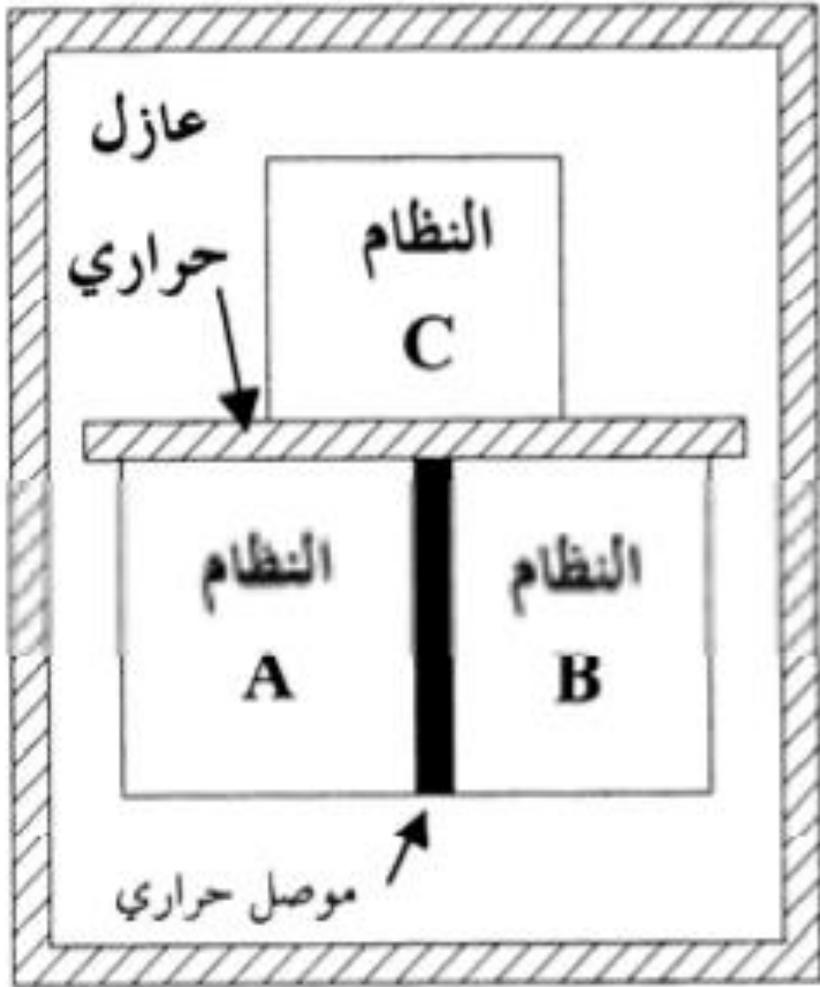
2- يجب ان يكون النظام في حالة توازن كيميائي بين مكوناته (لا تتفاعل المكونات فيما بينها).

3- يجب ان يكون النظام في حالة توازن حراري

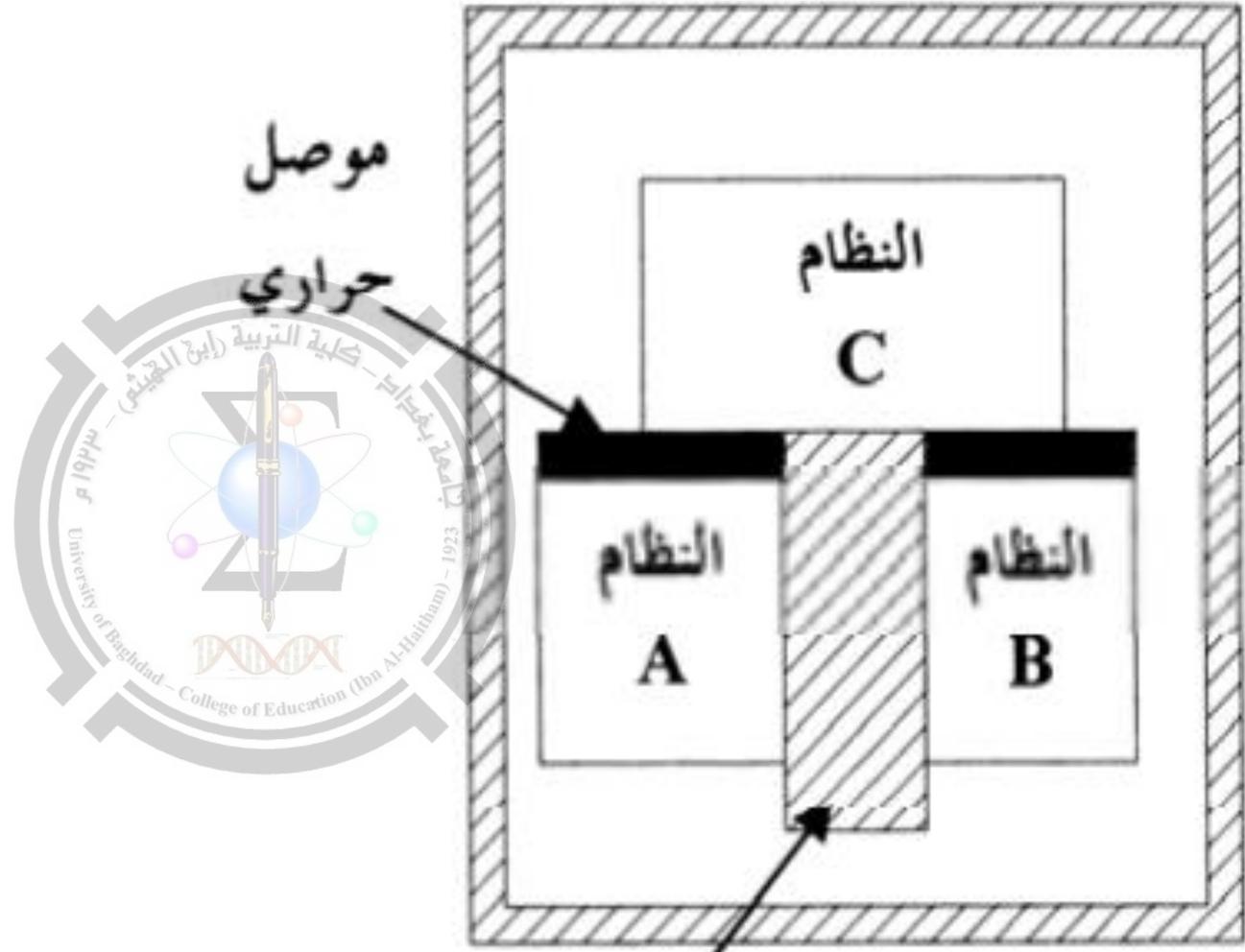
## القانون الصفري للثرموداينميك: - *Zero Law of Thermodynamic*

اذا توازن نظامان توازنا حراريا مع نظام ثالث فإن النظامين يكونان في حالة توازن حراري مع بعضهما البعض, اي يكونان بدرجة حرارة واحدة كما في الشكل ادناه بينما الشكل لا يمثل القانون الصفري.





(b)



(a)

## العمليات الترموداينميكية :- *Thermodynamic process*

1- عملية ترموداينميكية بثبوت درجة الحرارة ( *isothermal process* ) حيث ينتقل النظام من حالة الى اخرى مع بقاء درجة الحرارة ثابتة مثل انصهار الجليد بدرجة الصفر المئوي وتحوله الى ماء بنفس الدرجة او العكس.

2- عملية ترموداينميكية بثبوت الضغط ( *isobaric process* ) حيث ينتقل النظام من حالة الى اخرى مع بقاء الضغط ثابت مثل تسخين الماء في وعاء مفتوح تحت ضغط ثابت كان يكون تحت الضغط الجوي الاعتيادي.

3- عملية ثرموداينميكية بثبوت الحجم ( **isochoric process** ) حيث ينتقل من حالة الى اخرى **بثبوت الحجم** اي أن النظام لا يتمدد مثل تسخين الماء في وعاء محكم الغلق لايسمح له بالتمدد.



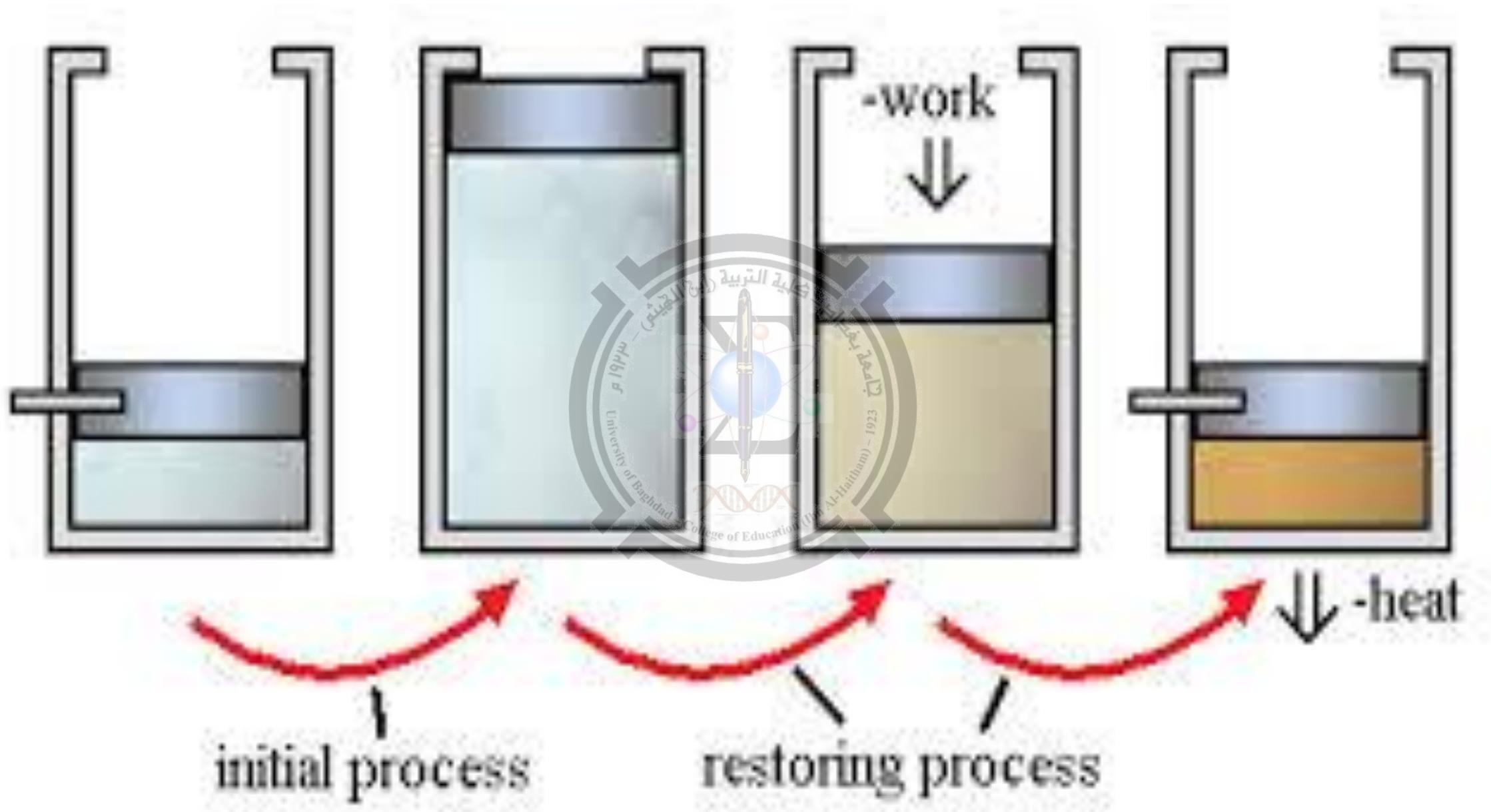
4- العملية الاديباتيكية (الكظيمة) ( **adiabatic process** ) وهي العملية التي تحدث في نظام معين دون اي تتم عملية دخول وخروج حرارة من والى النظام.

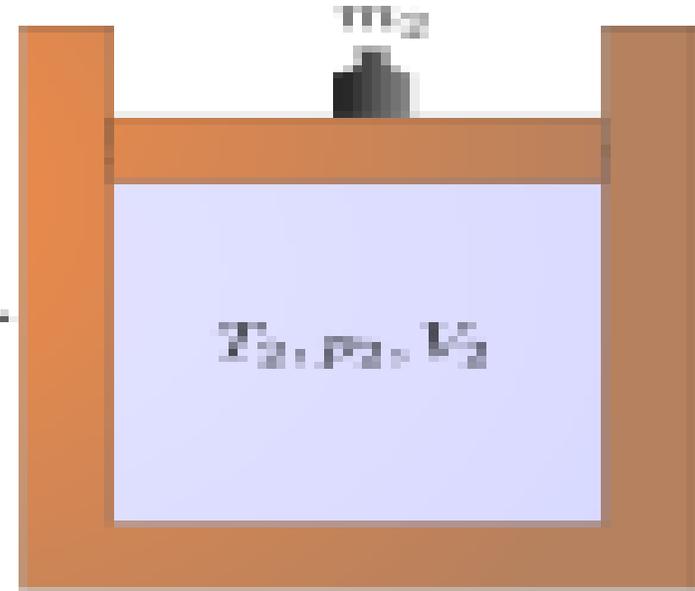
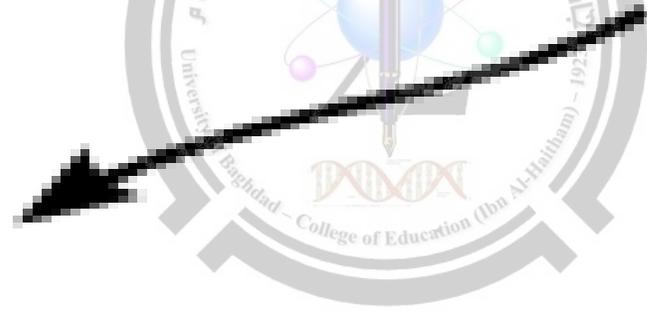
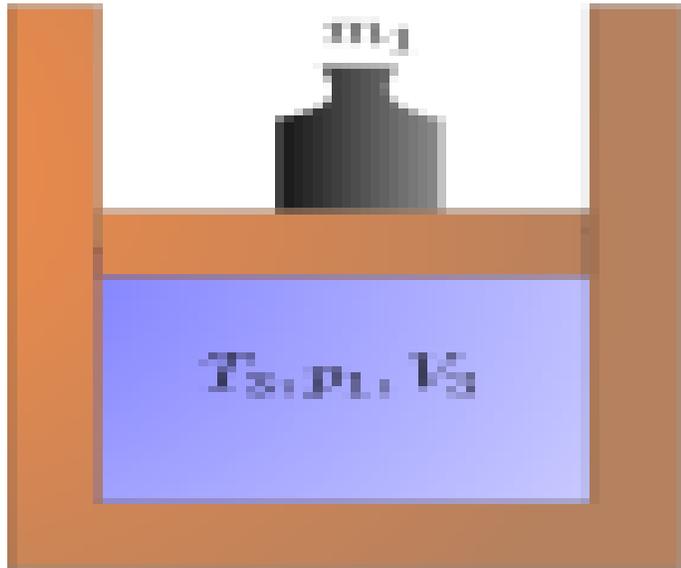
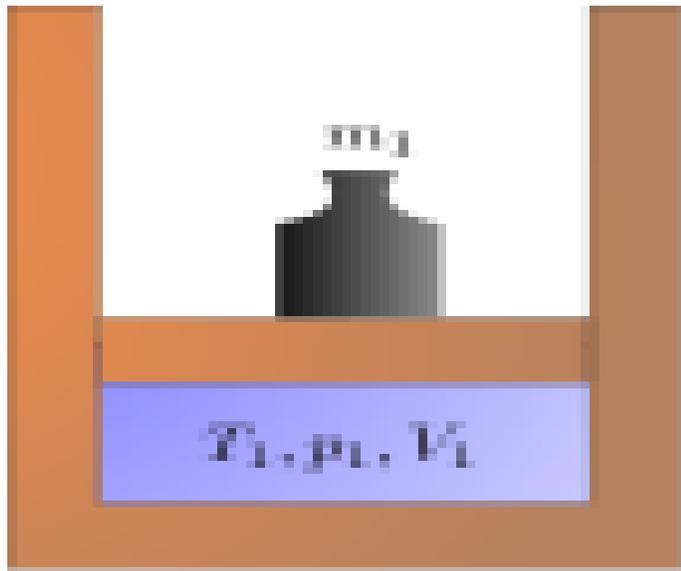
5- العملية الدورية ( **cyclic process** ) وهي العملية التي تتساوى فيها احداثيات النظام الابتدائية مع الاحداثيات النهائية كالضغط ودرجة الحرارة والحجم .

## العمليات العكسية وغير العكسية: Reversible and irreversible processes:

العملية العكسية (العكوس) هي العملية القابلة للعكس بحيث تكون الحالة النهائية للنظام مشابهة للحالة الابتدائية للنظام أي تعود الحالة الى وضعها الاصلي بدون تأثيرات ملحوظة في الكون ( النظام + المحيط )، وذلك لان التغيرات من الحالة الابتدائية الى الحالة النهائية تكون طفيفة جدا وهي حالات اتزان متعاقبة.

العملية غير العكسية هي عملية تلقائية مثل انتقال الحرارة من الجسم الاعلى درجة الى الاوطأ حيث ان كلا من الضغط ودرجة الحرارة والكثافة لكل جزء من النظام لا يكون منتظما وبذلك لايمكن عكس هذه العملية وهي عمليات عادة ما تتم بسرعة.





# الفصل الثاني



## معادلة الحالة: - Equation of state

تعريف معادلة الحالة: وهي العلاقة التي تربط الحد الأدنى من الخواص الفردية لتعيين حالة النظام.

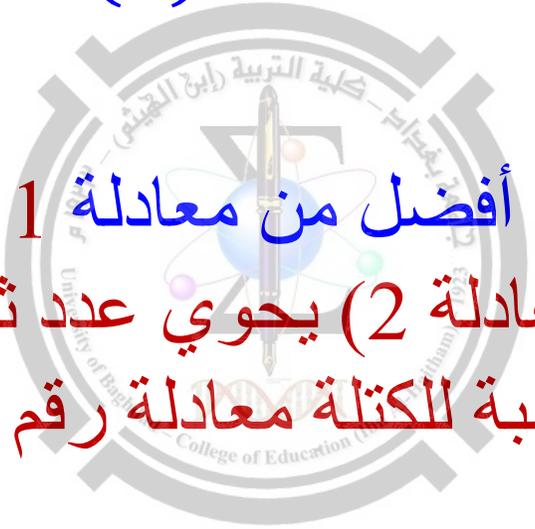
هناك أربعة خواص فردية هي الكتلة والضغط والحجم ودرجة الحرارة ويمكن ان تختزل الى ثلاث، الحجم النوعي (وذلك بقسمة الحجم على الكتلة) ودرجة الحرارة والضغط . فاذا تم تعيين خاصيتين تتعين الخاصية الثالثة وبذلك تتحدد حالة النظام.

ان ابسط معادلات الحالة هي معادلة الحالة للغاز المثالي:

$$f(P, V, T, m) = 0 \dots \dots \dots (1)$$

ويمكن استعمال عدد المولات بدل الكثافة فتصبح معادلة الحالة السابقة بالشكل الآتي:

$$f(P, V, T, n) = 0 \dots\dots\dots (2)$$



ملاحظة: ان المعادلة رقم 2 تعد أفضل من معادلة 1 والسبب هو ان المول الواحد (معادلة 2) يحوي عدد ثابت من الجزيئات وهو عدد افوكادرو بينما هذا لا يصح بالنسبة للكتلة معادلة رقم (1) حيث يتغير عدد الجزيئات بتغير الكتلة.

وإذا تمت كتابة معادلة (2) بدلالة الحجم النوعي حيث أن  $U = \frac{V}{n}$

حيث ستتضمن معادلة الحالة ثلاث متغيرات فقط فستصبح المعادلة بالشكل الآتي

$$f(P, v, T) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

إن هذه المعادلة كافية لتعيين حالة النظام البسيط مثل الغاز ولكنها لا تكفي لوصف حالة نظام معقد.



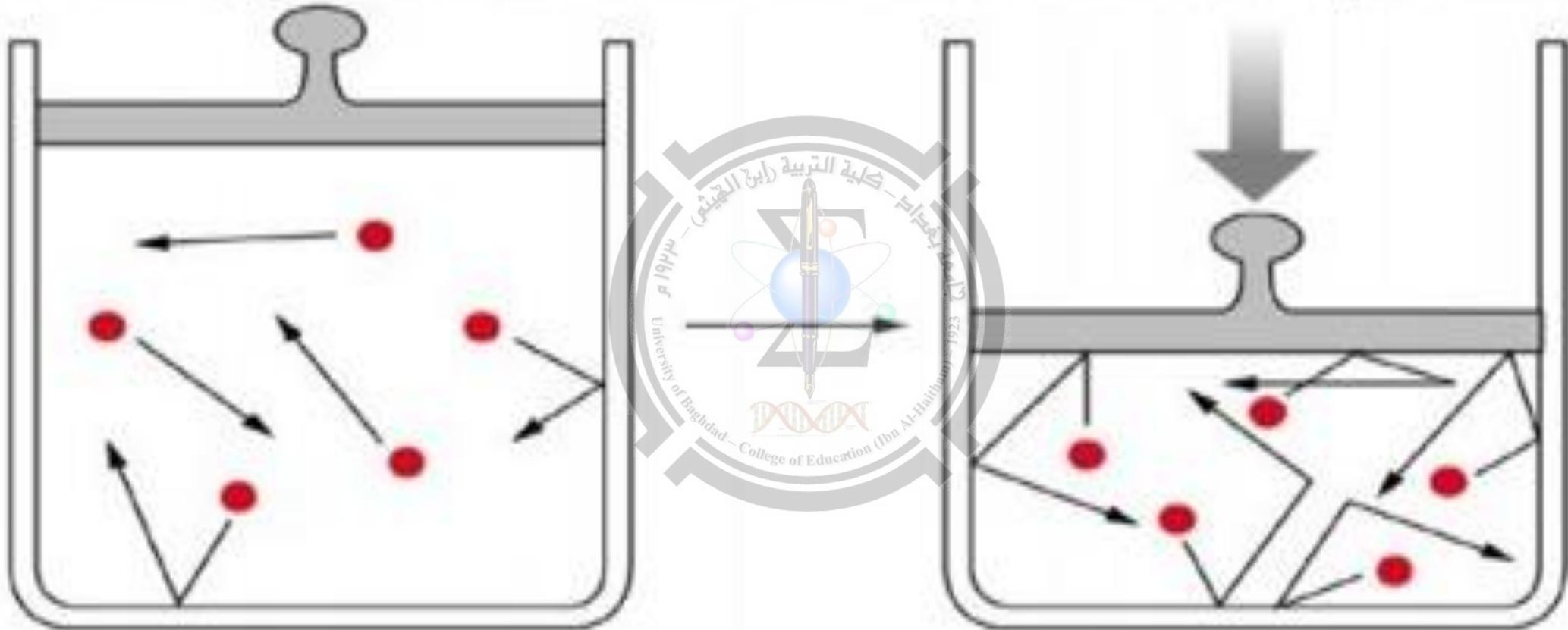
الغاز المثالي: - وهو غاز افتراضي غير حقيقي (أفترض) كتقريب لسلوك الغازات الحقيقية ومن أهم خصائصه ان جزيئاته لها شكل كروي ومهملة الحجم تامة المرونة وهي في حالة حركة عشوائية مستمرة كما انها مستقلة عن بعضها البعض أي لا توجد قوى متبادلة فيما بينها ويتبع الغاز المثالي القوانين الآتية:

قانون بويل: حيث يكون ضغط كتلة معينة من غاز متناسب عكسيا مع حجم الغاز بثبوت درجة الحرارة وكما في المعادلة الآتية

$$PV = \text{const} \dots \dots \dots (4) \quad (T = \text{constant})$$

## Boyle's Law: $P_1V_1 = P_2V_2$

Decreasing volume increases collisions and increases pressure.



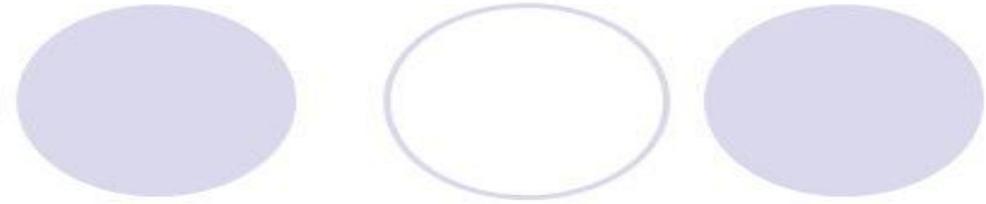
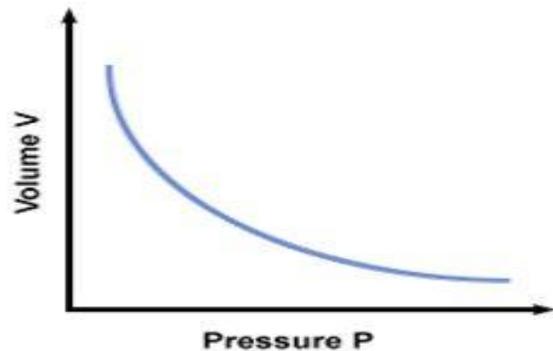
$V_1 = 1.0 \text{ L}$   
 $P_1 = 100 \text{ mm Hg}$

$V_2 = 0.5 \text{ L}$   
 $P_2 = 200 \text{ mm Hg}$

# Boyle's Law

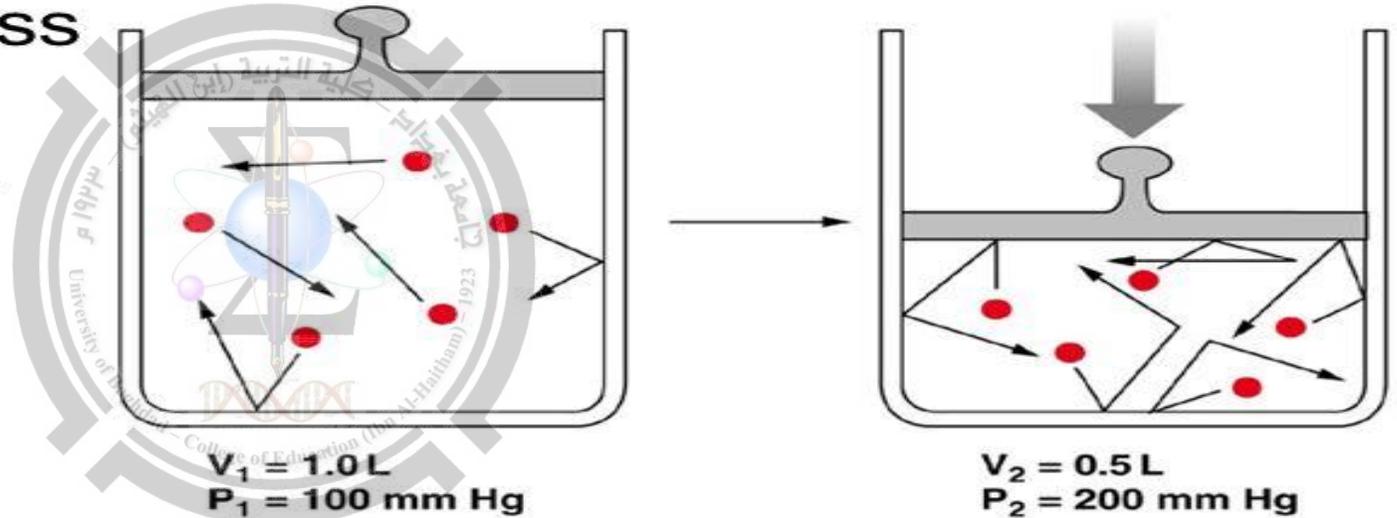
- At constant temperature, pressure and volume are indirectly related.

- $P_1V_1 = P_2V_2$



**Boyle's Law:  $P_1V_1 = P_2V_2$**

Decreasing volume increases collisions and increases pressure.



Copyright © 2007 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

Fig. 17-5

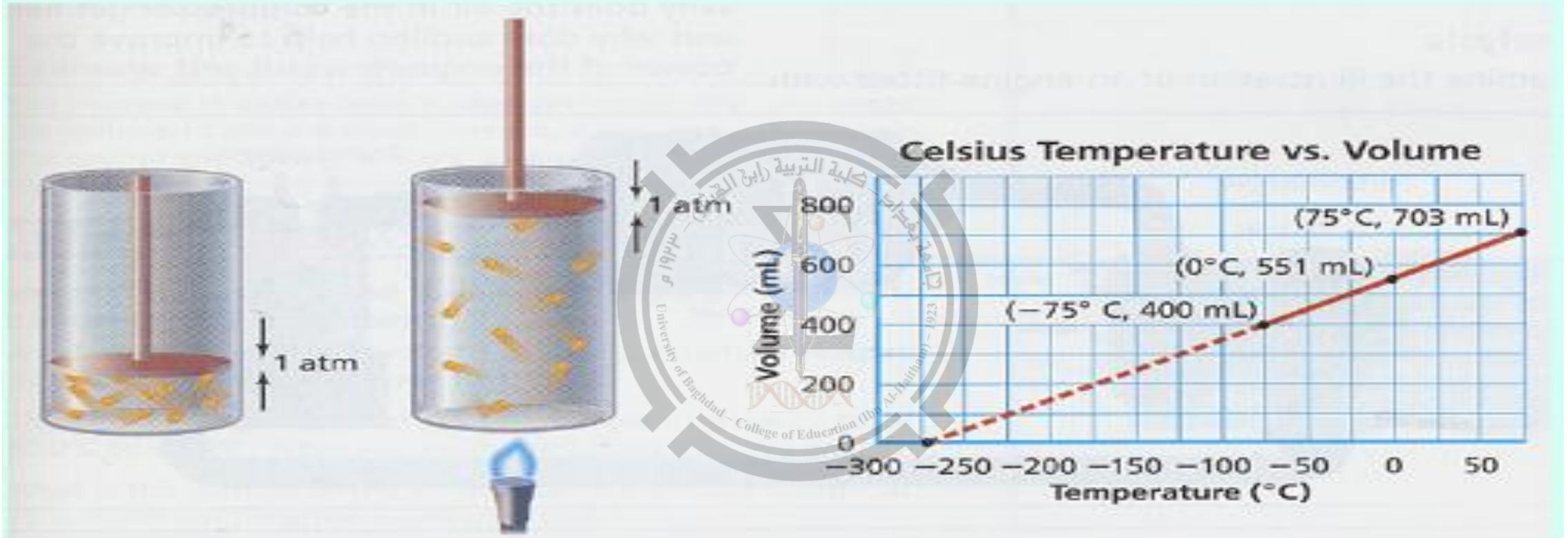
قانون شارل: حجم كتلة معينة من غاز يتناسب طرديا مع درجة الحرارة المطلقة عند ثبوت الضغط وكما في المعادلة الآتية:

$$\frac{V}{T} = \text{CONSTANT} \dots\dots\dots(5)$$

قانون غي لوساك: ضغط كتلة معينة من الغاز يتناسب طرديا مع درجة حرارة الغاز المطلقة عند ثبوت الحجم وكما في المعادلة الآتية:

$$\frac{P}{T} = \text{CONSTANT} \dots\dots\dots(6)$$

# Charles's Law



**As the temperature increases, the volume increases because the faster molecules collide harder and push each other farther apart.**

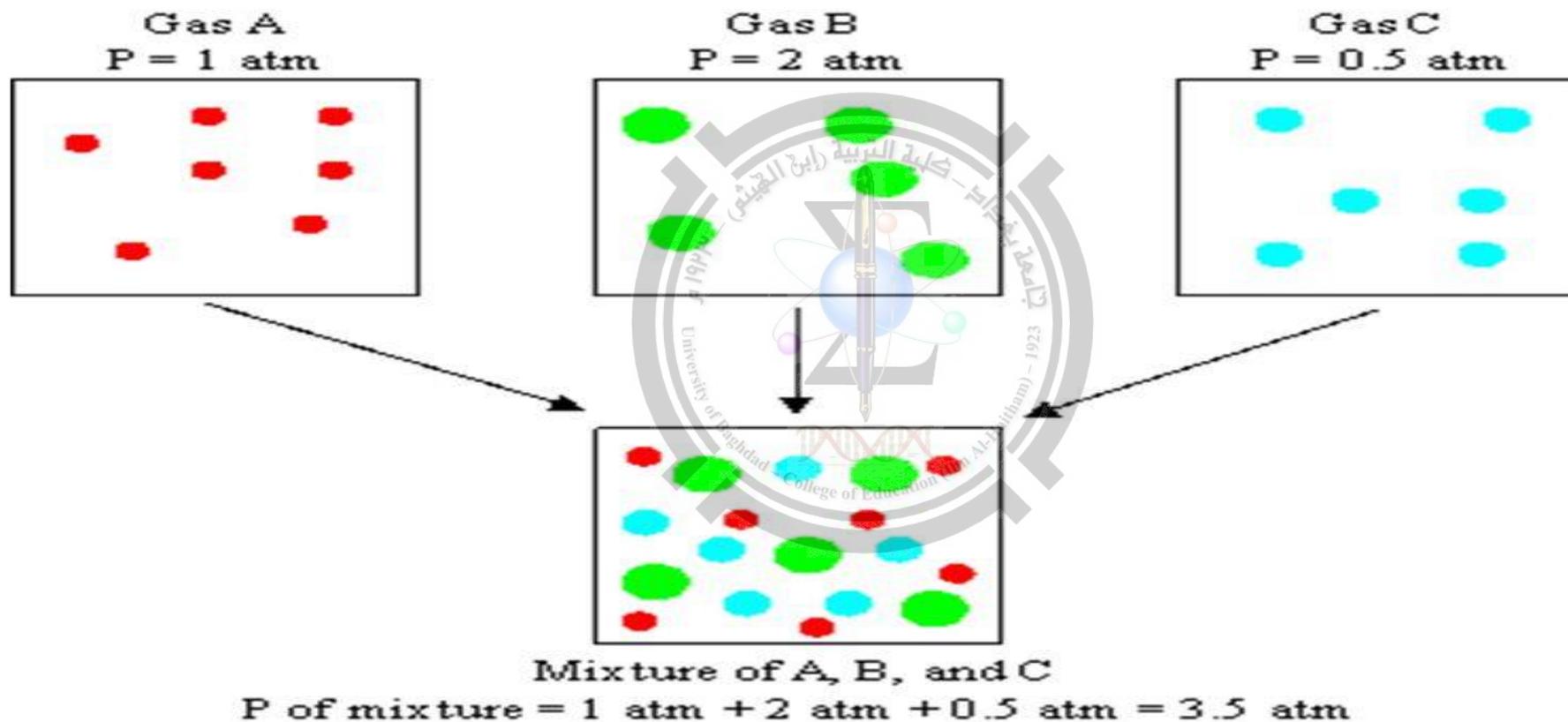
قانون دالتون: الضغط الكلي لمزيج من الغازات داخل وعاء يساوي مجموع الضغوط الجزيئية للغازات المكونة له وكما في المعادلة الآتية:

$$P = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n$$

قانون أفوكادرو: الحجم المتساوية من الغازات المختلفة تحت نفس الظروف من ضغط ودرجة حرارة تحتوي العدد نفسه من الجزيئات حيث يحتوي المول الواحد من عدد أفوكادرو من الجزيئات

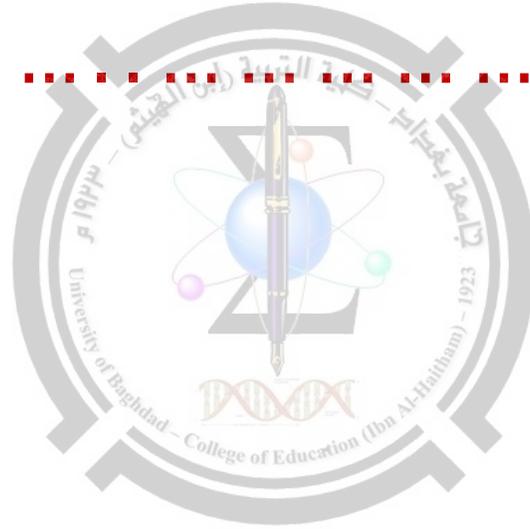
$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \frac{\text{molecules}}{\text{mole}}$$

# Dalton's Law of Partial Pressures



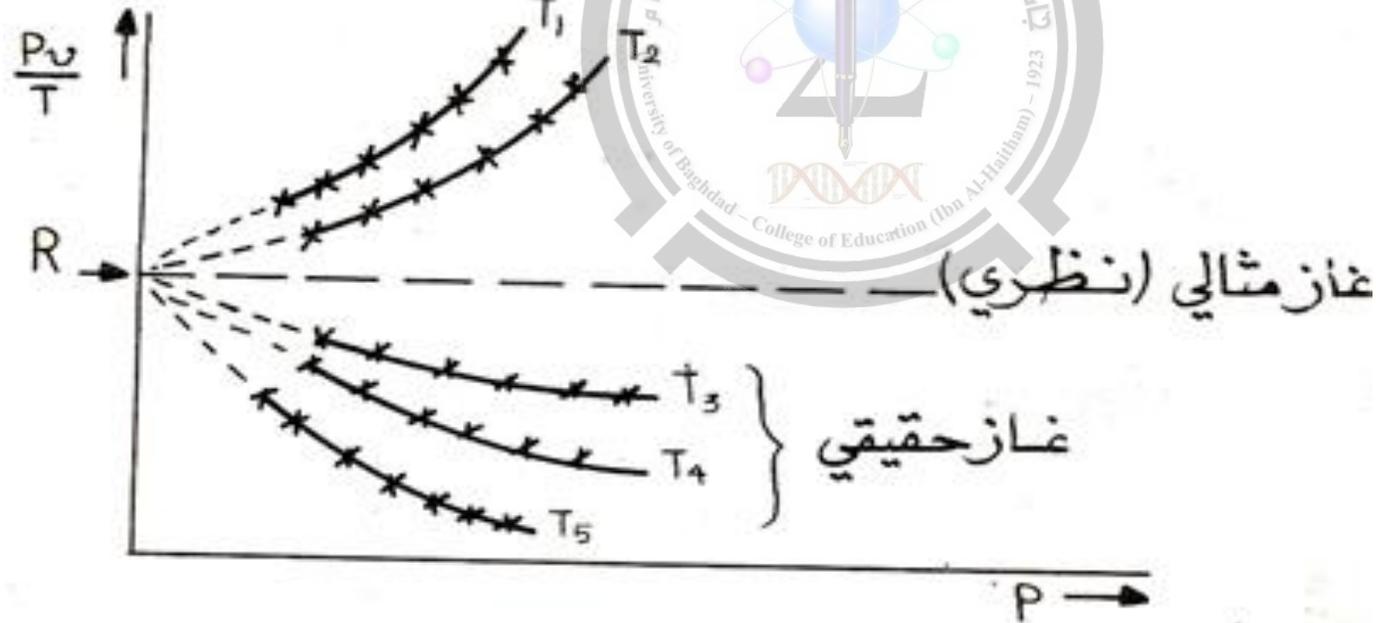
قانون جول: الطاقة الداخلية للغاز المثالي تعتمد على درجة حرارة الغاز فقط  
وكما في المعادلة الآتية

$$U = f(T) \dots\dots\dots (7)$$



## الطريقة التجريبية لاشتقاق معادلة الحالة للغاز المثالي

يؤخذ مول واحد من غاز حقيقي ويتم تغيير الضغط والحجم بثبوت  $T_1$  ثم نحسب  $(\frac{PV}{T})$  في كل قياس منفرد فنحصل على الرسم الآتي:



يمكن ملاحظة انه عندما الضغط يقترب من الصفر فإنّ.

$$\text{when } P \rightarrow 0 \quad R = \lim_{P \rightarrow 0} \frac{Pv}{T}$$

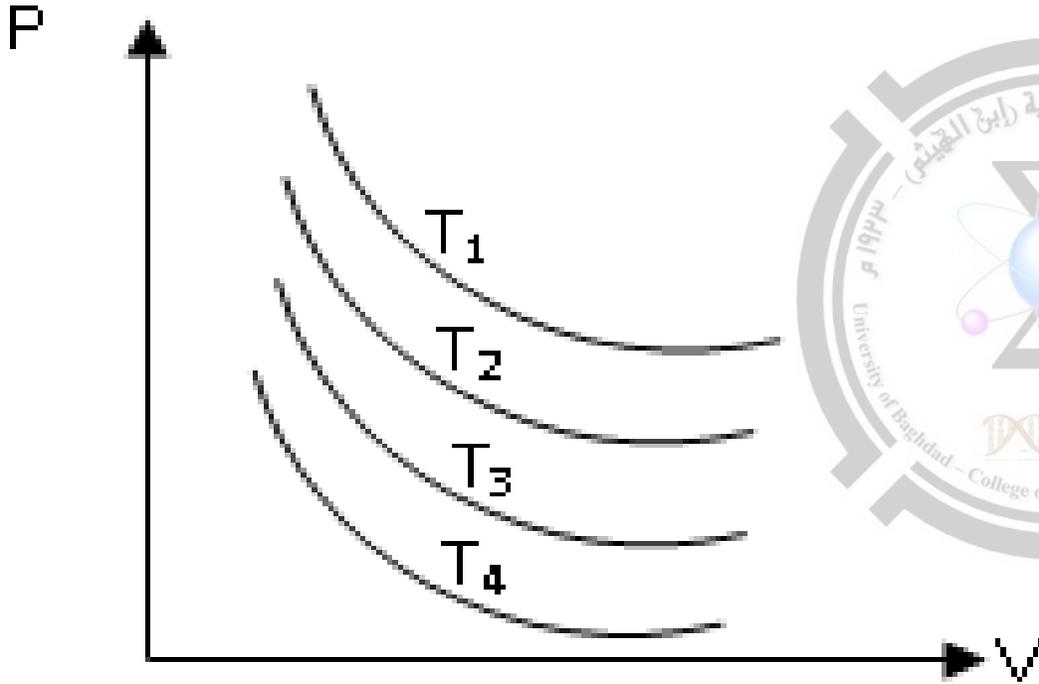
هذه المعادلة للغاز الحقيقي

R الثابت العام للغازات

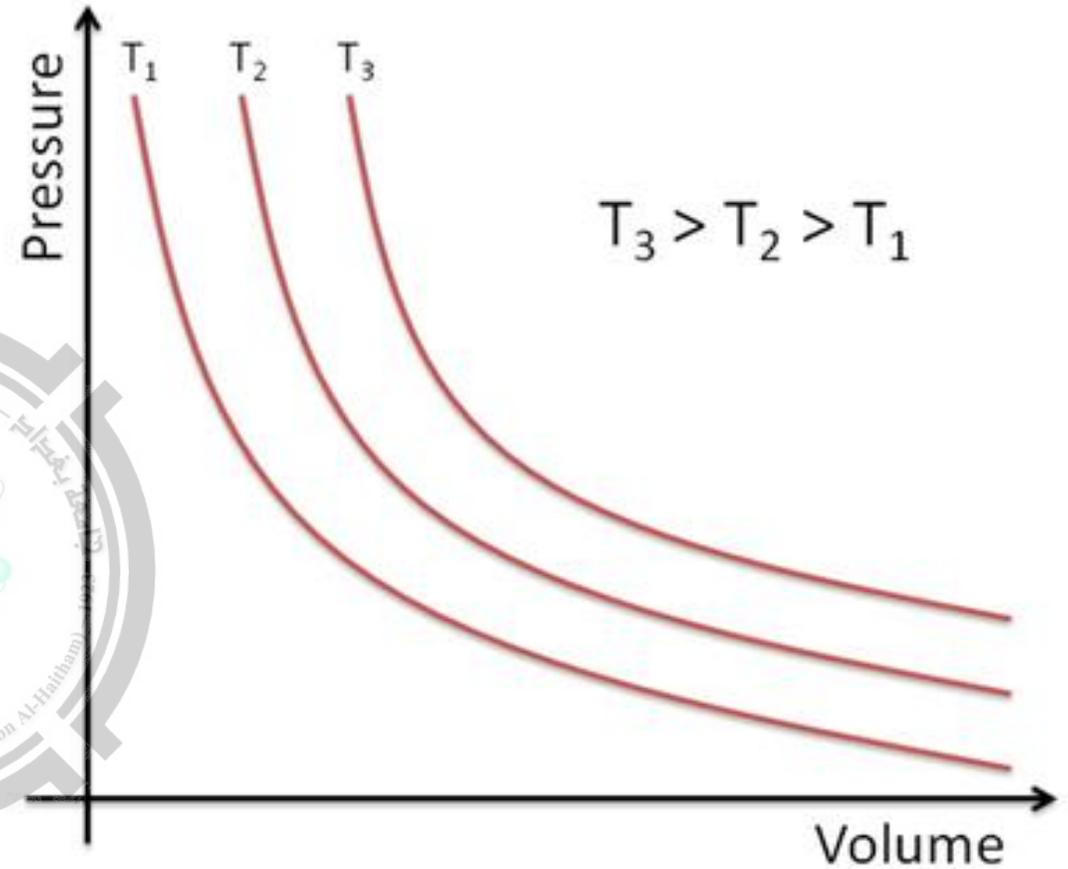
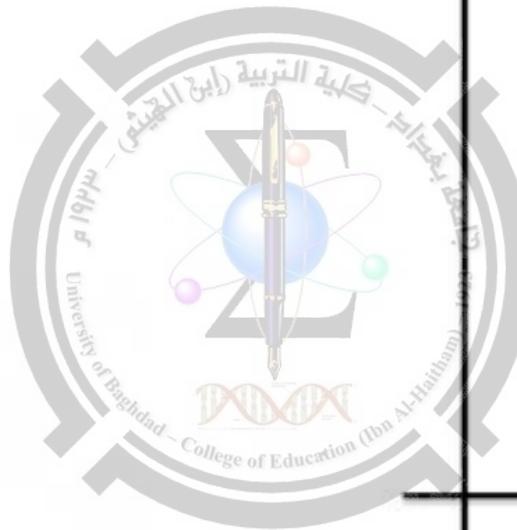
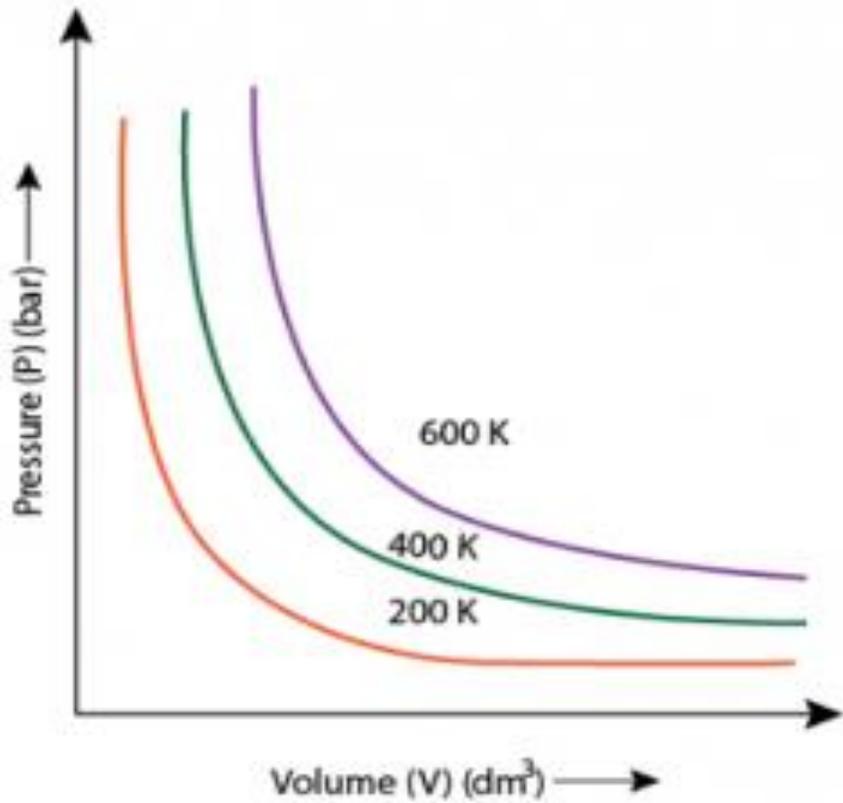
ما بالنسبة للغاز المثالي فإن معادلة الحالة له هي :

$$R = \frac{Pv}{T} \Rightarrow Pv = RT \dots\dots\dots (8)$$

ويمكن رسم العلاقة بين الضغط والحجم للغاز المثالي وبدرجات حرارية مختلفة والتي تمثل قانون بويل كما في الشكل



$$T_1 > T_2 > T_3 > T_4$$

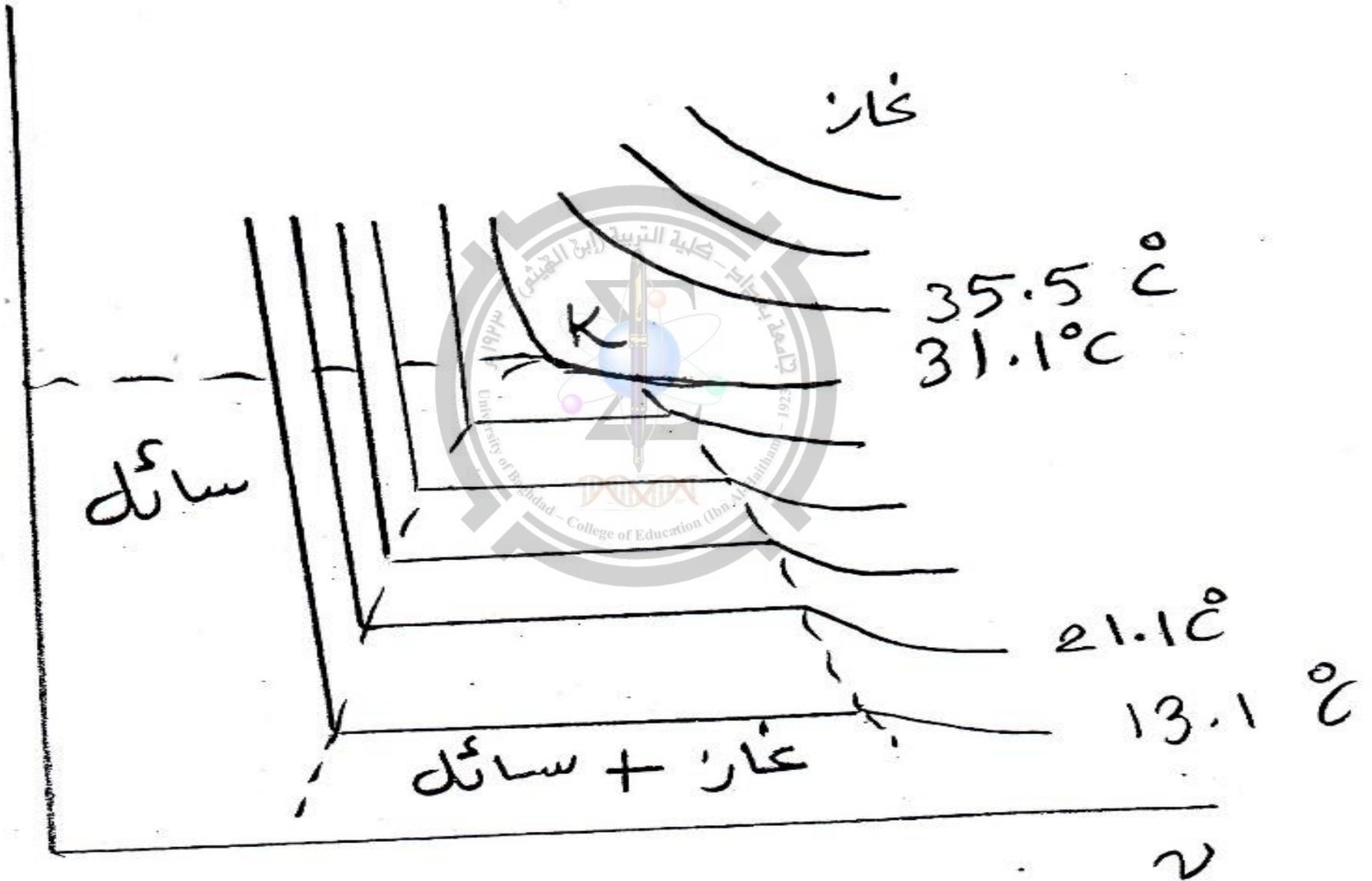


ملاحظة: تتم هذه العملية ببطء شديد لغرض حصول الاتزان بدرجة حرارية ثابتة

لقد وجد من بعض التجارب ان الغاز الحقيقي ينحرف في سلوكه عن الغاز المثالي، ويكون الانحراف كبيراً كلما زاد الضغط المسلط على الغاز وانخفضت درجة حرارته، بحيث لا تتجاوز الدرجة الحرجة وفي ظروف معينة تتحول الغازات الى سوائل

استعمل غاز ثنائي أوكسيد الكربون عند درجات حرارية مختلفة ورسمت العلاقة بين الضغط والحجم فكانت النتائج كما في الشكل الاتي

د



من الشكل السابق حيث (لا توجد منطقة افقية) أي ان الغاز لا يمكن اسالته وان حجم الغاز يقل كلما زاد الضغط، وتسمى النقطة **K** نقطة الانعطاف **Inflexion point**.  
وان المنحنيات فوق درجة  $31.1^{\circ}\text{C}$  تصبح خاضعة لقانون بويل.

ان هذه الدرجة الحرارية هي درجة الحرارة الحرجة وهي درجة الحرارة التي لايمكن فوقها اسالة الغاز مهما كان الضغط المسلط عليه كبير وان الحجم عندها يسمى الحجم الحرج والضغط عندها هو الضغط الحرج.

في المناطق الافقية من الرسم السابق (منطقة مختلطة بين الغاز والسائل) حيث لايمكن التمييز بين الحالتين الغازية والسائلة.

كما انه بالامكان اسالة الغاز بتسليط الضغط فقط عند درجة حرارة ادنى من  
الدرجة الحرجة , وكذلك تصبح كثافة البخار والسائل ذات قيمة واحدة عند الدرجة  
الحرجة

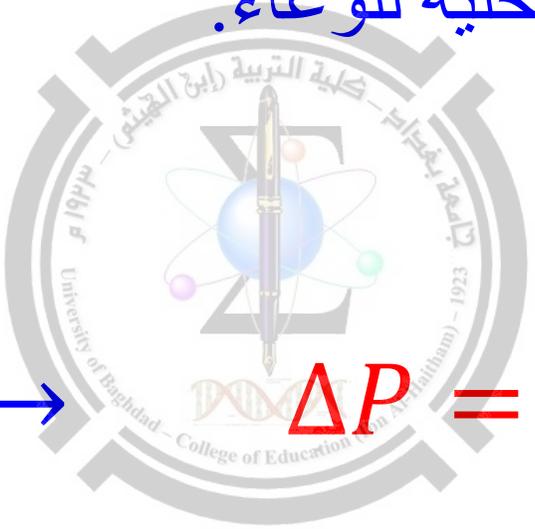


معادلة فان دير فالز للغازات الحقيقية:

ان تصادمات الجزيئات مع وحدة السطح الداخلي لوعاء في وحدة الزمن يمثل ضغط جزيئات الغاز على الجدران الداخلية للوعاء.

فاذا كان لدينا غاز كثافته  $\rho$  فان:

$$\Delta P \propto \frac{1}{v^2}$$


$$\rightarrow \Delta P = \frac{a}{v^2}$$

حيث ان  $a$  مقدار ثابت يعتمد على طبيعة الغاز.

وبذلك فان الضغط المثالي(الصحيح) = الضغط الفعلي + مقدار التصحيح في الضغط

أي أنّ

$$Ideal\ pressure = P + \Delta P = P + \frac{a}{v^2} \dots \dots \dots (9)$$

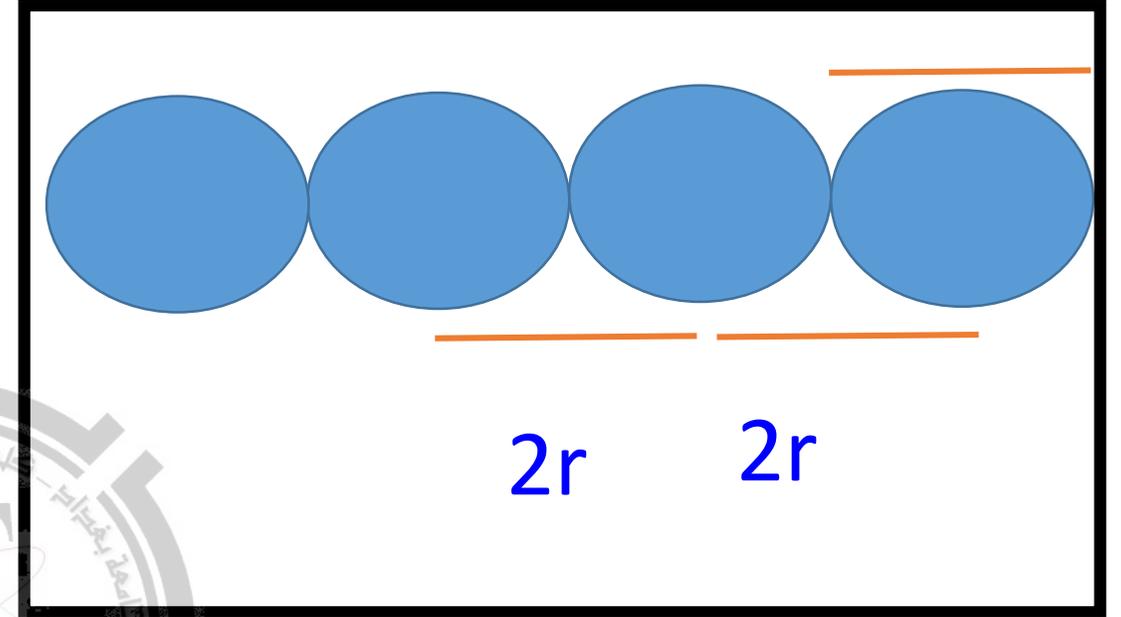
في الغاز المثالي لا يكون لجزيئة الغاز حجم , اما في الغاز الحقيقي فلها حجم مما يقلل من الحيز المتوفر للحركة لذلك يجب اجراء التصحيح في الحجم .

. فعلى فرض ان الجزيئة عبارة عن كرة نصف قطرها  $r$   
فإن حجم الجزيئة (الكروية) سيكون

$$\chi = \frac{4}{3} \pi r^3$$

و عند لحظة التصادم لجزيئة بأخرى ستكون المسافة الفاصلة بينهما هي (ضعف نصف القطر) أي ستكون المسافة  $2r$

وفي هذه الحالة لن تتمكن كلا الجزيئتين من الحركة ضمن الحجم الكروي والذي يسمى حجم كرة التأثير ويرمز له  $S$  والذي نصف قطره يساوي قطر الجزيء الواحد أي ضعف نصف قطر الجزيء الواحد  $2r$  كما في الشكل



$$S = \frac{4}{3}\pi(2r)^3 = 8\chi = 8\left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)$$

فإذا فرضنا أن حجم الوعاء يساوي  $V$  فإنّ الحجم المشغولة من قبل الجزيئات سيكون كالآتي

## ملاحظة

ان الحجم المتوفر للجزيئة الأولى  $V$

ان الحجم المتوفر للجزيئة الثانية  $V-S$

ان الحجم المتوفر للجزيئة الثالثة  $V-2S$

$$V - (N - 1)S$$

وهكذا الحجم المتوفر للجزيئة  $N$

ان معدل الحجم المتوفر لكل جزئ هو

$$\bar{V} = \frac{V + (V - S) + (V - 2S) + \dots + V - (N - 1)S}{N}$$

$$\bar{V} = \frac{NV - S((1 + 2 + 3 + \dots (N - 1)))}{N}$$

$$\bar{V} = V - \frac{S}{N} \left[ \sum_{i=1}^{N-1} i \right]$$



$$\left[ \sum_{i=1}^{N-1} i \right] = \frac{N}{2} (N-1)$$

$$\bar{V} = V - \frac{S}{N} \left[ \frac{N}{2} (N-1) \right]$$

$$\bar{V} = V - \frac{S N}{2} + \frac{S}{2}$$

$$\bar{V} = V - \frac{S N}{2}$$



$\frac{S}{2}$

إهمال المقدار المجاور لكونه صغير جدا

فيكون الحجم المتوفر لكل جزيء يساوي

$$S=8X$$

وبما ان

$$\bar{V} = V - 4NX$$

اذن سيكون معدل الحجم المتوفر لكل جزيء يساوي

ان المقدار  $4NX$  يمثل مقدار التصحيح في الحجم (الحجم غير المتوفر  
لحركة الجزيئات) والتي يساوي أربعة اضعاف حجم الجزيئة الواحدة ويرمز له  
بالرمز  $\Delta V$

$$\Delta V = 4NX$$

اذن ستصبح معادلة الحالة للغازات بعد تصحيحي الحجم والضغط كالآتي

$$\left( P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT$$

# الفصل الثالث



## التفاضلات الجزئية *Partial Derivative*

وهي تشمل ثلاث متغيرات وسيطة هي **الضغط والحجم ودرجة الحرارة** التي تتغير بصورة عامة اثناء اي عملية فاذا تعرض نظام لتغير صغير في حالته وانتقل من حالة **اتزان اولية الى حالة اتزان اخرى** قريبة من حالته الاولى فان جميع احداثياته الثلاث ستعاني تغيرا طفيفا. ان المعادلات الثلاث التي تمثل التغير في الضغط والحجم ودرجة الحرارة هي :-

$$P = f(V, T)$$

$$V = f(T, P)$$

$$T = f(P, V)$$

إذا كان لدينا ثلاث متغيرات ولنقل  $P, V, T$  تجمعهم علاقة رياضية او دالة بحيث  $f(P, V, T) = 0$  يمكن اعتبار اي اثنين من هذه المتغيرات مستقلين وبحسب النظرية الأساسية في حساب التفاضل الجزئي والتي يمكن ان تكتب:

$$dP = \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T dv + \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V dT \dots \dots (1)$$

$$V = \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T dP \dots \dots (2)$$

$$dT = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_V dP + \left( \frac{\partial T}{\partial V} \right)_P dV \dots \dots (3)$$

وبصورة عامة لأي متغير

$$x=f(y, z)$$

$$dx = \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z dy + \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y dz \dots\dots\dots (4)$$

$$y = f(x, z)$$

وكذلك اذا كان



$$dy = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z dx + \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x dz \dots\dots\dots(5)$$

بتعويض (5) في (4) ينتج :

$$dx = \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left[ \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_z dx + \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x dz \right] + \left( \frac{\partial x}{\partial z} \right)_y dz$$

$$dx = \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_z dx + \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x dz + \left( \frac{\partial x}{\partial z} \right)_y dz$$

$$dx = \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_z dx + \left[ \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x + \left( \frac{\partial x}{\partial z} \right)_y \right] dz \dots (6)$$

فإذا فرضنا ان :

$$\left[ \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x + \left( \frac{\partial x}{\partial z} \right)_y \right] dz = 0 \dots\dots\dots(7)$$

بما أنّ المتغيرين  $dx$  ,  $dz$  مستقلان لذا يمكن تحديد اي قيمة لهما على انفراد لذا فمن المعادلة ( 7 ) نستنتج



$$-\left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y dz = \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x dz$$

$$\therefore \left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y = -1$$

وبالعودة الى المتغيرات الترموداينميكية تصبح المعادلة الاخيرة:-

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V = -1$$

اذن تصبح المعادلة

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V = -1$$

إذا اخذنا مقلوب المعادلة الأخيرة ستصبح

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T = -1$$

تمثل علاقة دورية للتفاضل الجزئي للمتغيرات الثلاثة ونلاحظ ان كل تفاضل يحتوي على المتغيرات الثلاثة في ترتيب دوري.

بالعودة للمعادلة الآتية

$$dx = \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_z dx + \left[ \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial z} \right)_x + \left( \frac{\partial x}{\partial z} \right)_y \right] dz$$

$$dx = \left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_z dx$$

حيث ان الحد الأول يساوي صفر فتصبح المعادلة

وبعد الاختصار من الطرفين تصبح المعادلة

$$\left( \frac{\partial x}{\partial y} \right)_z \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_z = 1$$

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z = \frac{1}{\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z}$$

او تصبح بالصيغة الاتية

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T = 1 / \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$$



وبالعودة للمتغيرات الترموداينميكية  
فسنحصل على المعادلات الاتية:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = 1 / \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_V$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_P = 1 / \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

## معامل التمدد الحجمي $\beta$

هو مقدار التغير في الحجم لوحة الحجم بالنسبة الى التغير في درجة الحرارة بثبوت الضغط.

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$



## الانضغاطية الايزوثرمية ومعامل المرونة:

هو مقدار التغير في الحجم لوحدة الحجم بالنسبة الى مقدار التغير في الضغط بثبوت درجة الحرارة.

$$\kappa_{iso} = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

الاشارة السالبة تدل على تقلص الحجم بزيادة الضغط.

أما معامل المرونة فهو مقلوب الانضغاطية الايزوثرمية.

$$\beta = \frac{1}{\kappa_{iso}}$$

$$\frac{\beta}{\kappa} = \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$$

والنسبة بين معمل التمدد الحجمي والانضغاطية هي

والعلاقة الاخيرة يمكن استنتاجها من المعادلة المذكورة سابقا

$$\left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_V = -1$$

# الفصل الرابع



## الشغل

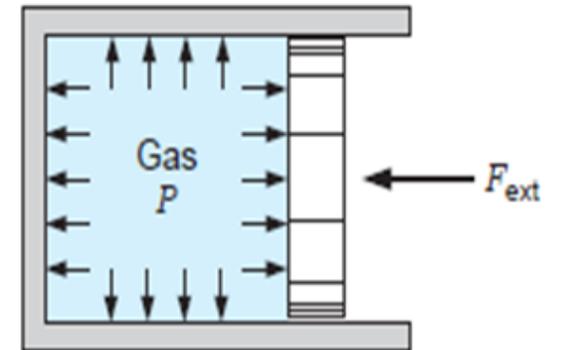
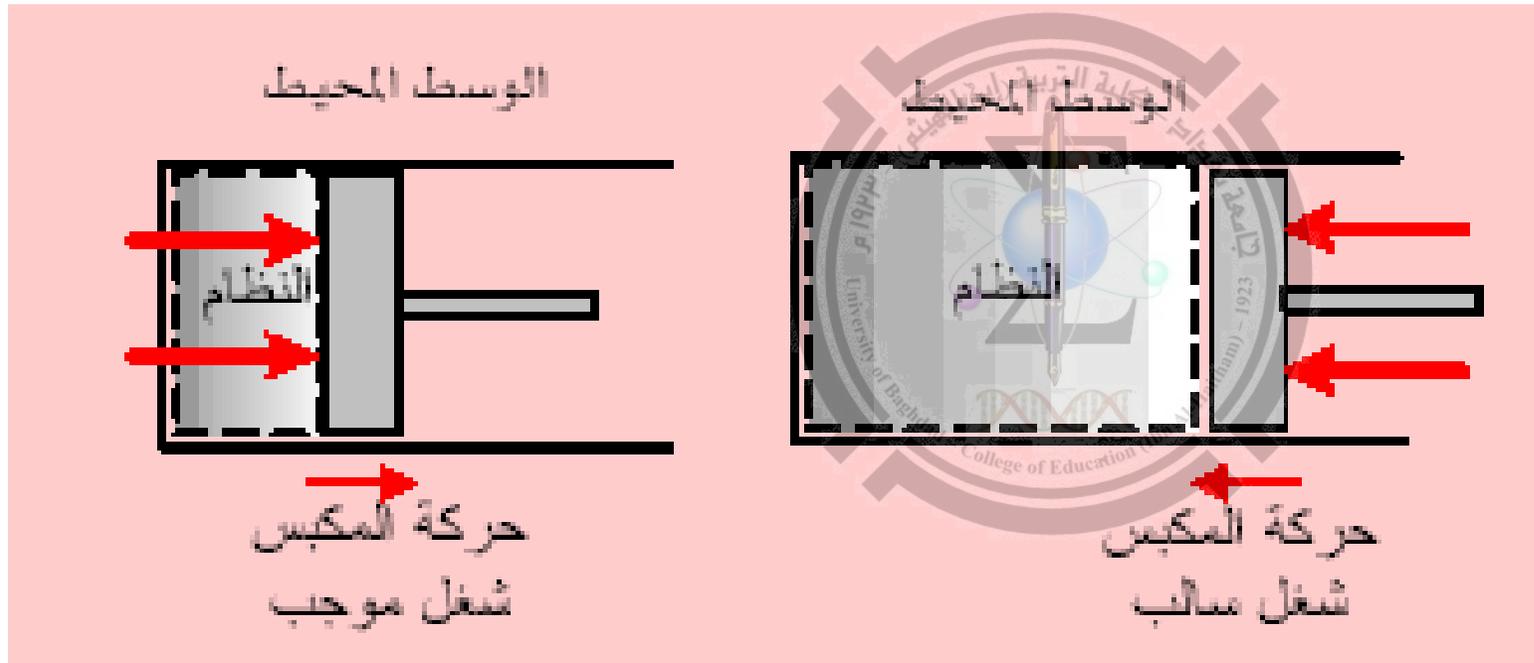
تعني كلمة الشغل تبادل الطاقة بين النظام ومحيطه. فعندما يقوم الغاز الساخن بدفع مكبس الاسطوانة في ماكينة سيارة فانه ينجز شغلا وعندما يكبس الغاز في عملية بواسطة المنفاخ فان الشغل ينجز على الهواء ويعتبر الشغل الاول موجب والشغل الثاني سالب.

وقد يكون الشغل ميكانيكيا او كهربائيا وغيرها والذي في يهمننا في هذا في هذا الفصل هو الشغل الميكانيكي.

نفرض وجود نظام (بخار او غاز) في اسطوانة مكبس متحرك فاذا كان الضغط  $P$  داخل المكبس و  $A$  مساحة مقطع المكبس و فان القوة الداخلية التي يسلطها النظام على السطح الاسفل للمكبس  $F'$  :

$$F' = PA$$

القوة الخارجية =  $F$



القوة الداخلية =  $F'$

عند حدوث عملية تمدد عكوس تكون القوة الداخلية متوازنة عمليا مع القوى الخارجية اي محصلة القوى  $F - F' = 0$  تقريبا ويتحرك المكبس مسافة صغيرة  $ds$  الى الاعلى ويكون الشغل الذي ينجزه النظام على محيطه الخارجي هو  $dw$

$$dw = Fds = PAds$$

وبما ان  $Ads$  تمثل الزيادة الصغيرة في الحجم  $dv$  لذا

$$dw = Pdv$$

والشغل الكلي عند تغير الحجم من  $v_1$  الى  $v_2$

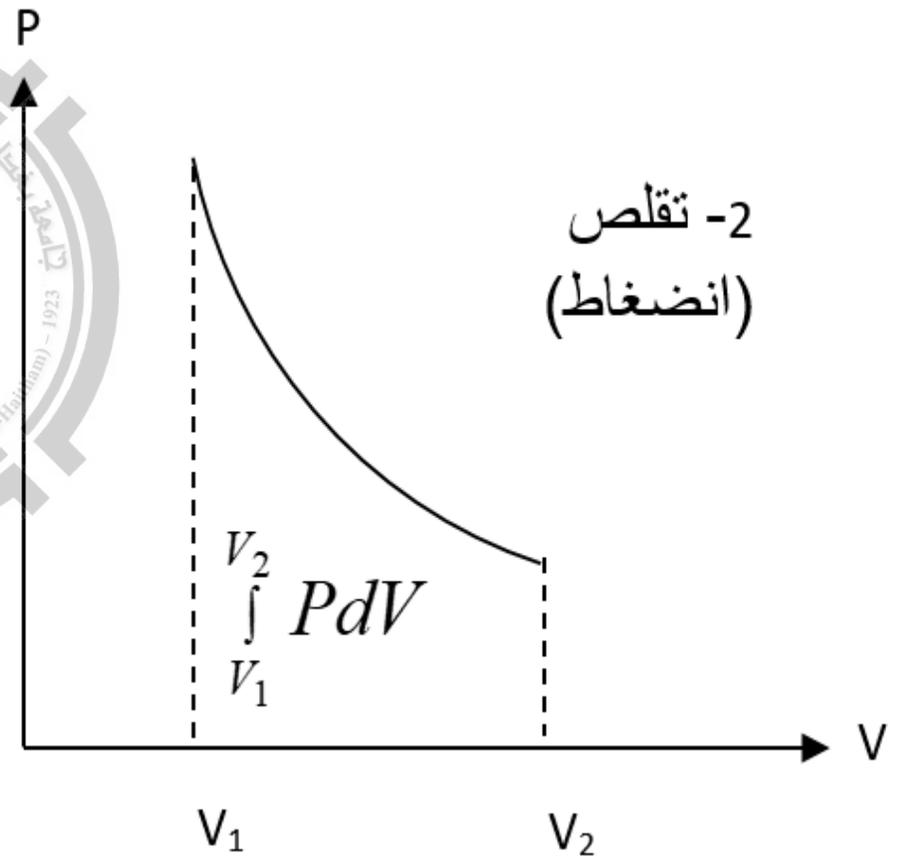
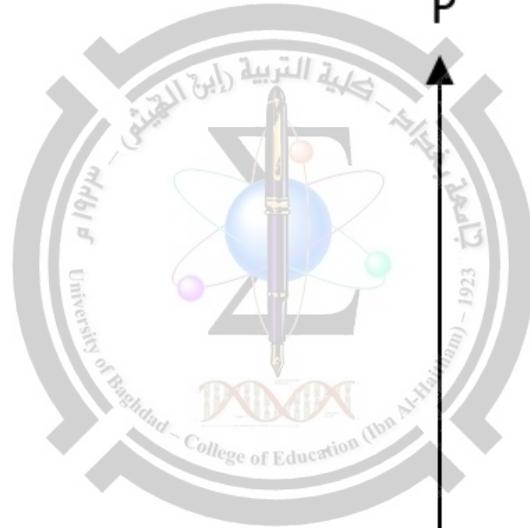
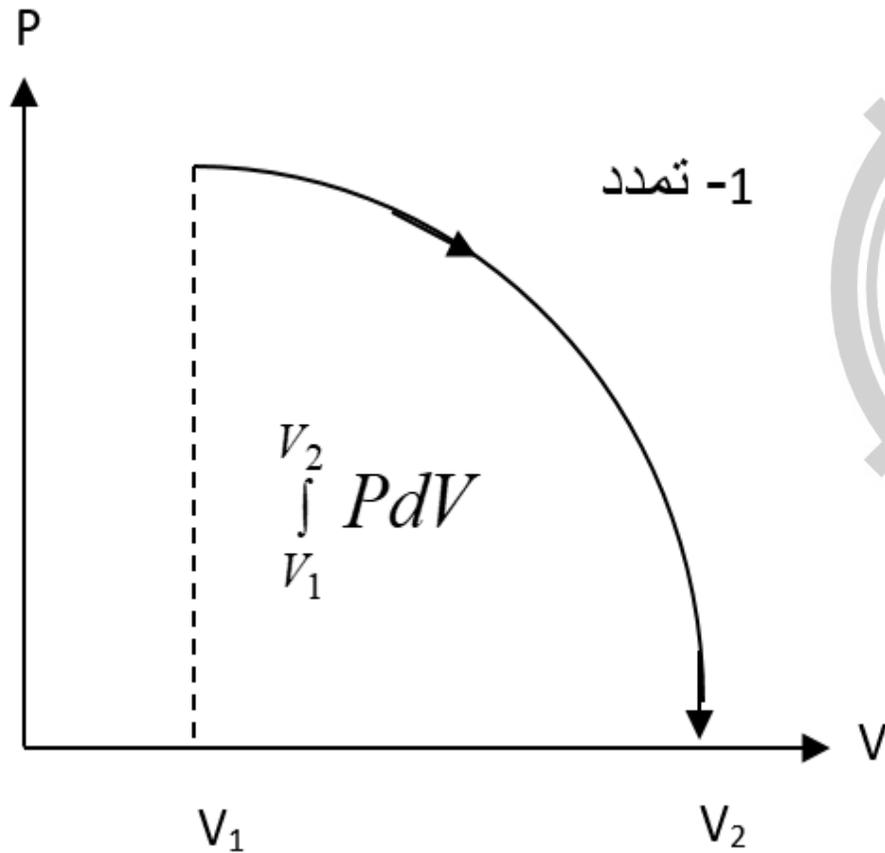
$$W = \int_{v_1}^{v_2} P dv$$

ووحدة الشغل الجول  $J = Nm$  وعند تكامل المعادلة الاخيرة عند ثبوت الضغط :

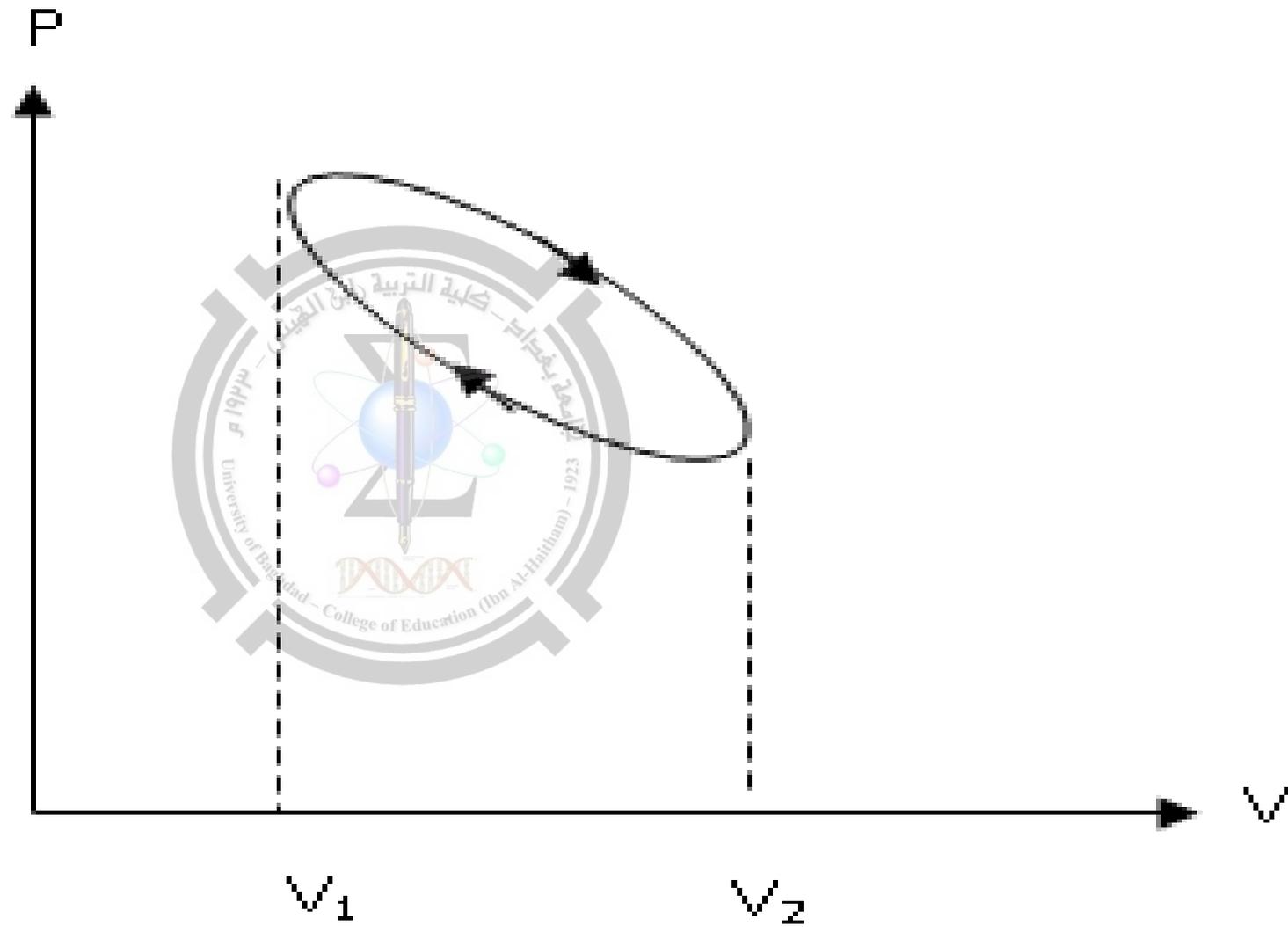
$$W = P \int_{v_1}^{v_2} dv = P(v_2 - v_1)$$

وهو يمثل الشغل لعملية ايزوباريك (ثبوت الضغط).  
والمخطط الاتي يمثل الشغل في مخطط P-V :-

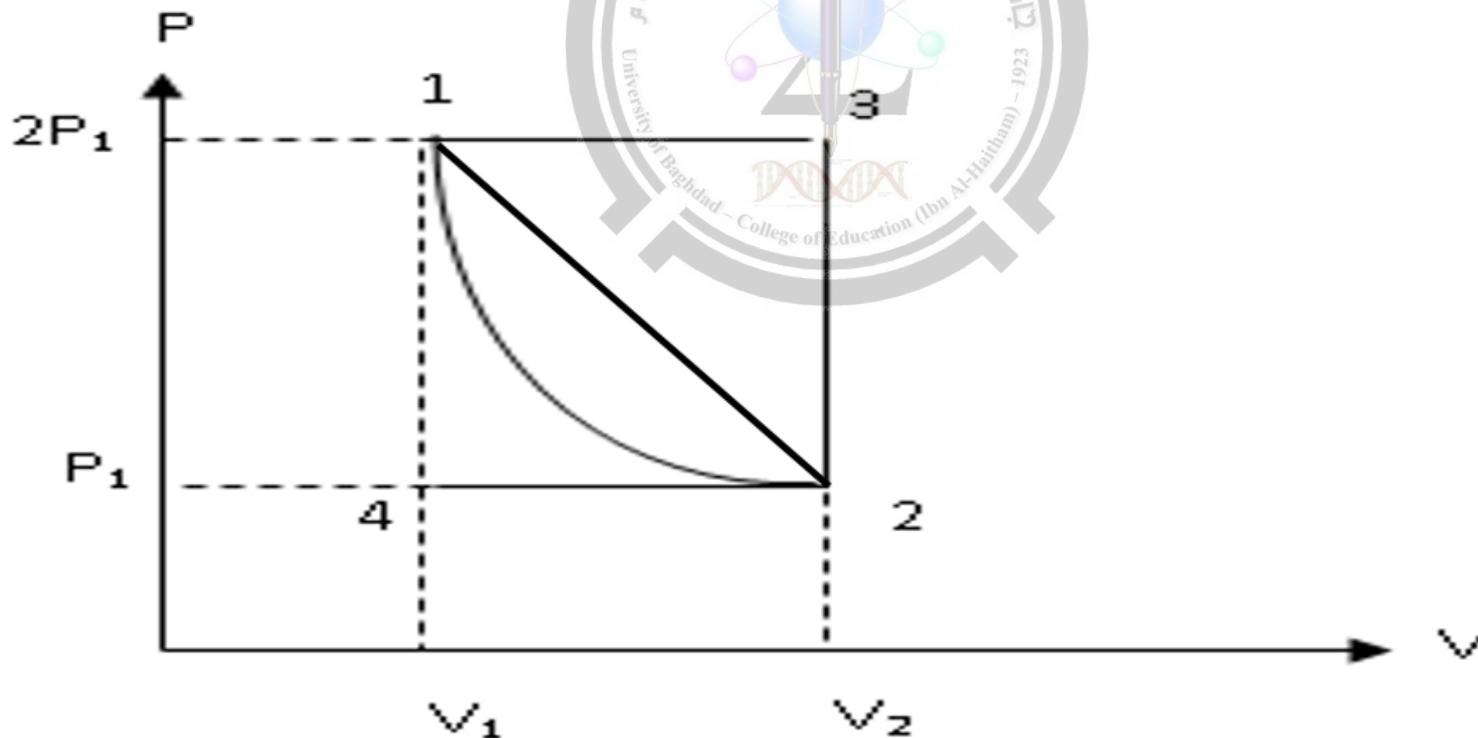
## والمخطط الاتي يمثل الشغل في مخطط P-V :-



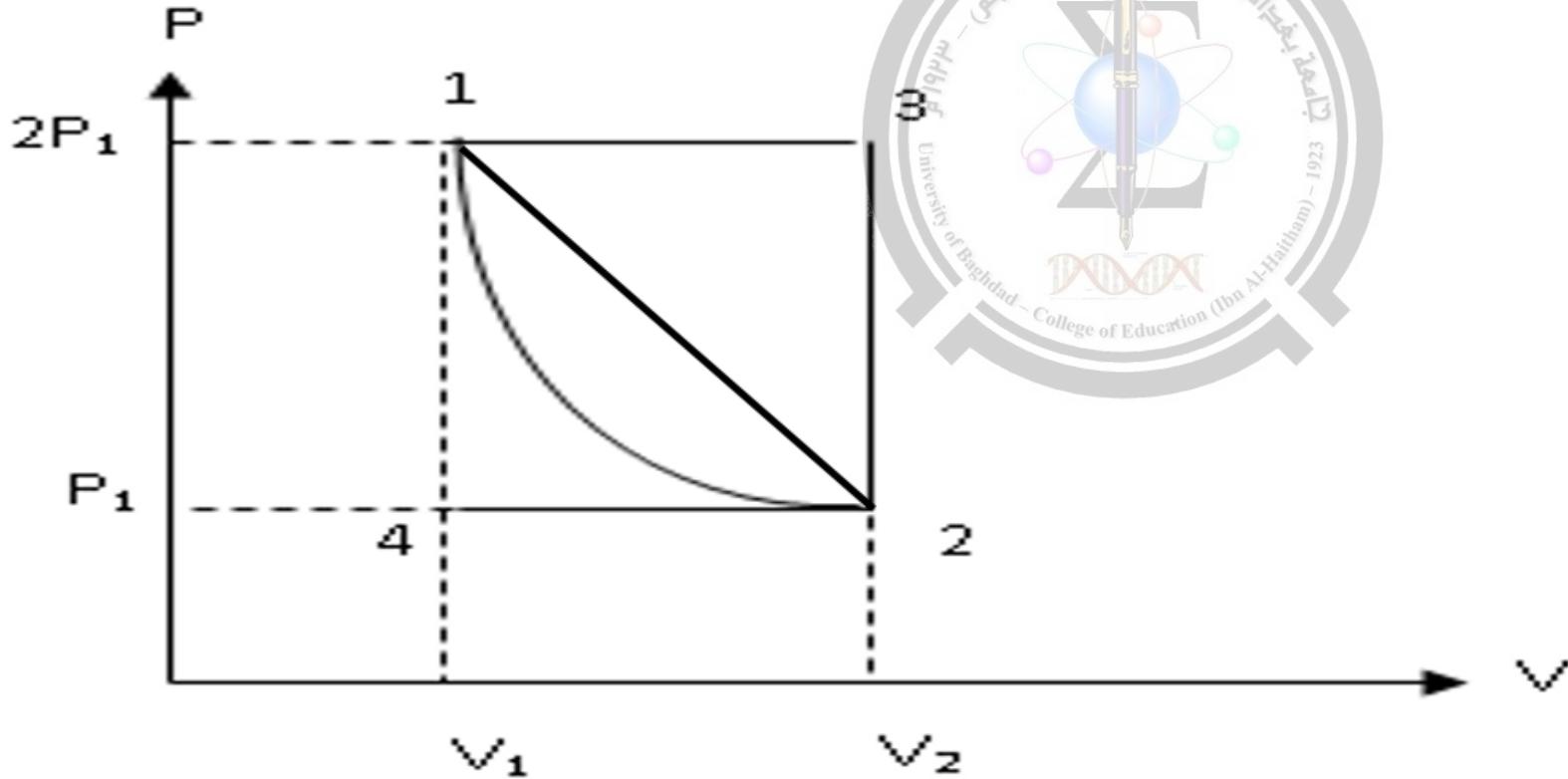
العمليتان معا  
تقلص وتمدد



ان الشغل المنجز خلال الدورة يعتمد على المسار. فالنقطتان (1) , (2) تمثلان حالتي التوازن الابتدائية والنهائية ويوجد عدة مسارات لتغيير الحالة الابتدائية (1) الى النهائية (2) بالنسبة للمسار الاول (2 → 3 → 1) فالعملية (1 → 3) هي عملية ثابتة الضغط والعملية (3 → 2) هي عملية ثابتة الحجم والشغل المنجز خلال هاتين العمليتين هو المساحة تحت الخط المستقيم (1 → 3) . كما في الشكل الآتي



اما المسار الثاني فهو  $(2 \rightarrow 4 \rightarrow 1)$  والذي يتكون من عمليتين الاولى **ثابتة الحجم**  $(1 \rightarrow 4)$  والثانية **ثابتة الضغط**  $(4 \rightarrow 2)$  و**صافي الشغل** هو المساحة تحت الخط المستقيم  $(2 \rightarrow 4)$ . اما المسار الثالث هو المستقيم  $(1 \rightarrow 2)$  و**الشغل المنجز** هو المساحة تحت هذا الخط ومن هذا يتضح ان الشغل يعتمد على المسار بين الحالة الابتدائية والنهائية.



## الشغل خلال عمليات ترموداينميكية مختلفة:-

1-الشغل المنجز خلال عملية ايزوثرمية (ثابت درجة الحرارة) لغاز مثالي:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} P dv \dots\dots\dots (6) \text{ at } T = \text{constant}$$

ولما كان الغاز مثاليا فان معادلة الحالة له هي

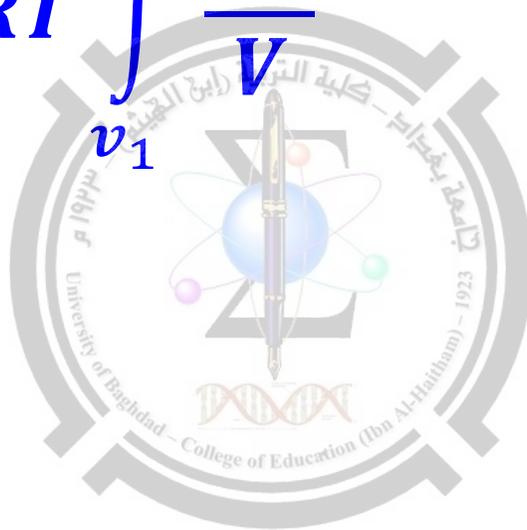
$$PV = nRT$$

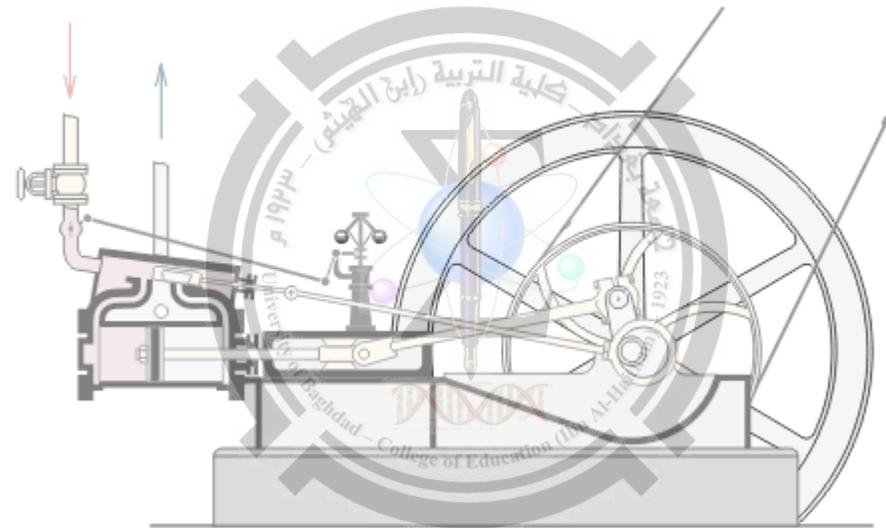
وبالتعويض عن قيمة P في المعادلة (6) ينتج :

$$W = \int_{v_1}^{v_2} \frac{nRT}{V} dv = nRT \int_{v_1}^{v_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

وبعد حل التكامل نحصل على :





## 2- الشغل الناتج عن عملية ايزوبار (ثابتة الضغط) لغاز مثالي:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} P dV = P(V_2 - V_1) , \quad P = \text{const.}$$

الشغل الناتج عن عملية ايزوكورك (ثبوت الحجم):

$$W = \int P dV = 0, \quad V = \text{constant}, V_2 = V_1$$

$$V_2 - V_1 = 0$$

## قانون الترموداينمك الحراري الأول

(هو تعبير لمبدأ حفظ الطاقة أي أن الطاقة تتغير من حالة إلى أخرى ومن طاقة كامنة إلى طاقة حركية ، وبتعبير آخر أن الطاقة لا تفنى ولا تُستحدث وإنما تتحول من صورة إلى أخرى . ويشخص القانون أن نقل الحرارة بين الأنظمة كنوع من أنواع نقل الطاقة . إن ارتفاع الطاقة الداخلية لنظام ترموديناميكي معين يساوي كمية الطاقة الحرارية المضافة للنظام ، مطروح منه الشغل الميكانيكي المبذول من النظام إلى الوسط المحيط .

ينص القانون الأول للترموداينمك على أن: "الطاقة لا تفنى ولا تستحدث من عدم ولكن تتحول من شكل إلى آخر".

## القانون الاول للثرموداينميك:

يمثل صيغة خاصة من **قانون حفظ الطاقة** لانه يتعامل مع الحرارة والشغل

القانون الاول للثرموديناميك عبارة عن شرح لمبدأ حفظ الطاقة فهو يؤكد على ان الطاقة الفائضة في النظام تساوي التغير في الطاقة الداخلية في النظام.

للطاقة الداخلية في مجال الثرموديناميك شكلين احدهما شغل مبذول من المحيط على النظام أو من النظام على المحيط و الثاني انتقال الحرارة بالتوصيل و الإشعاع

# الفصل الرابع



## الشغل

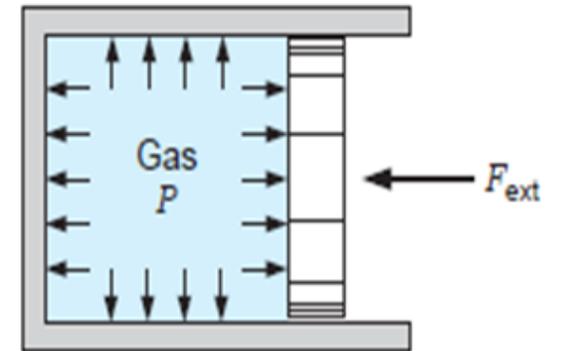
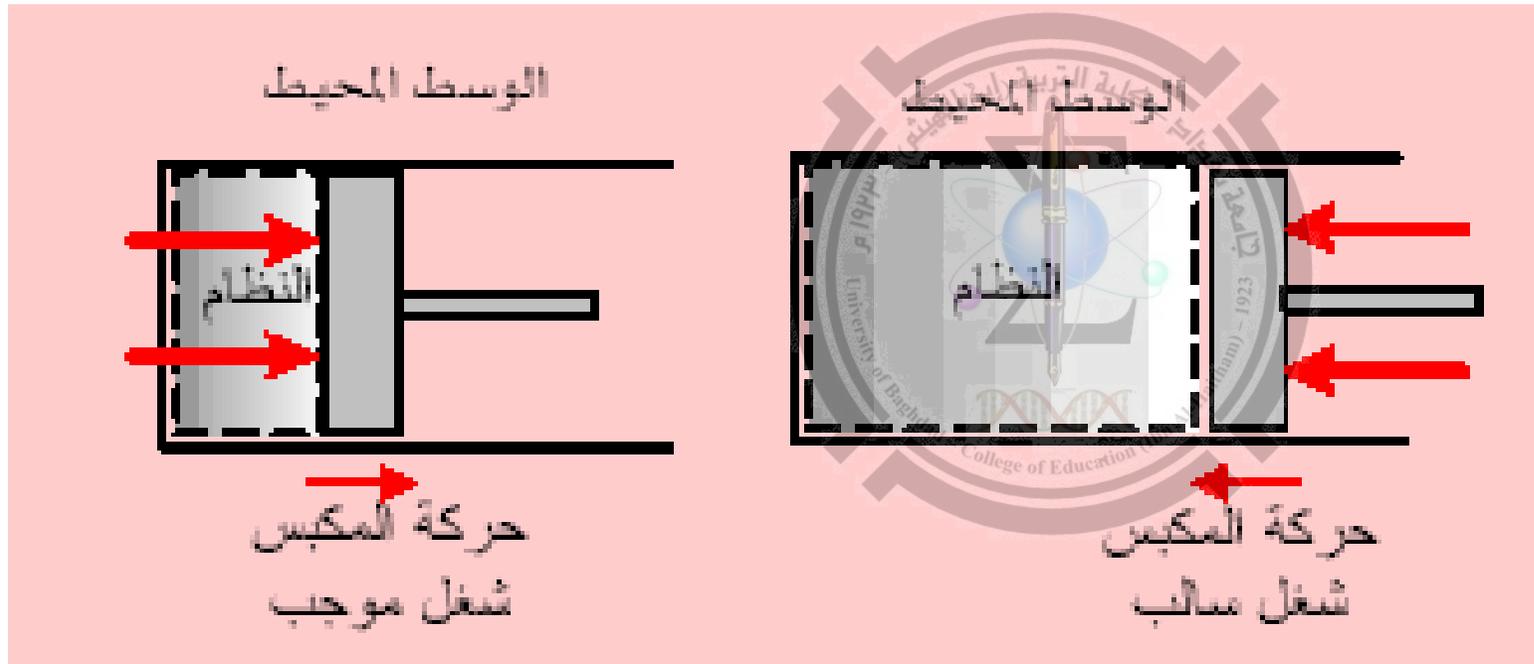
تعني كلمة الشغل تبادل الطاقة بين النظام ومحيطه. فعندما يقوم الغاز الساخن بدفع مكبس الاسطوانة في ماكينة سيارة فانه ينجز شغلا وعندما يكبس الغاز في عملية بواسطة المنفاخ فان الشغل ينجز على الهواء ويعتبر الشغل الاول موجب والشغل الثاني سالب.

وقد يكون الشغل ميكانيكيا او كهربائيا وغيرها والذي في يهمننا في هذا في هذا الفصل هو الشغل الميكانيكي.

نفرض وجود نظام (بخار او غاز) في اسطوانة مكبس متحرك فاذا كان الضغط  $P$  داخل المكبس و  $A$  مساحة مقطع المكبس و فان القوة الداخلية التي يسلطها النظام على السطح الاسفل للمكبس  $F'$  :

$$F' = PA$$

القوة الخارجية =  $F$



القوة الداخلية =  $F'$

عند حدوث عملية تمدد عكوس تكون القوة الداخلية متوازنة عمليا مع القوى الخارجية اي محصلة القوى  $F - F' = 0$  تقريبا ويتحرك المكبس مسافة صغيرة  $ds$  الى الاعلى ويكون الشغل الذي ينجزه النظام على محيطه الخارجي هو  $dw$

$$dw = Fds = PAds$$

وبما ان  $Ads$  تمثل الزيادة الصغيرة في الحجم  $dv$  لذا

$$dw = Pdv$$

والشغل الكلي عند تغير الحجم من  $v_1$  الى  $v_2$

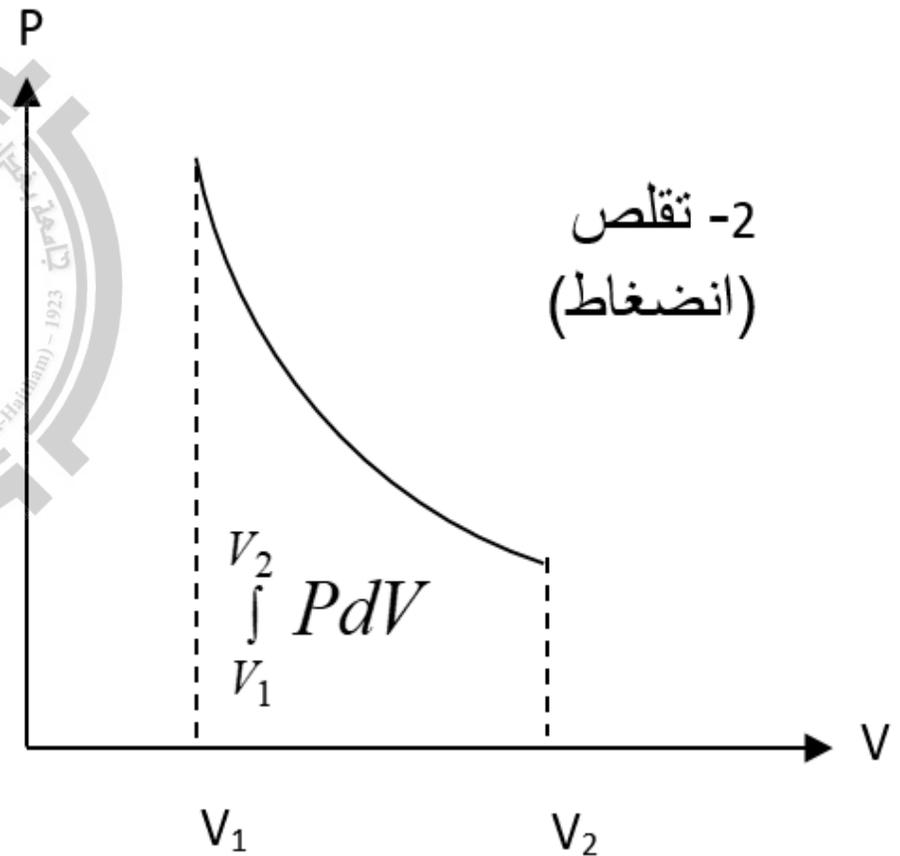
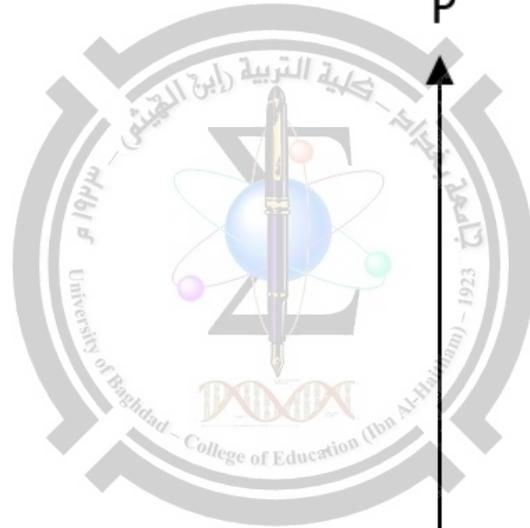
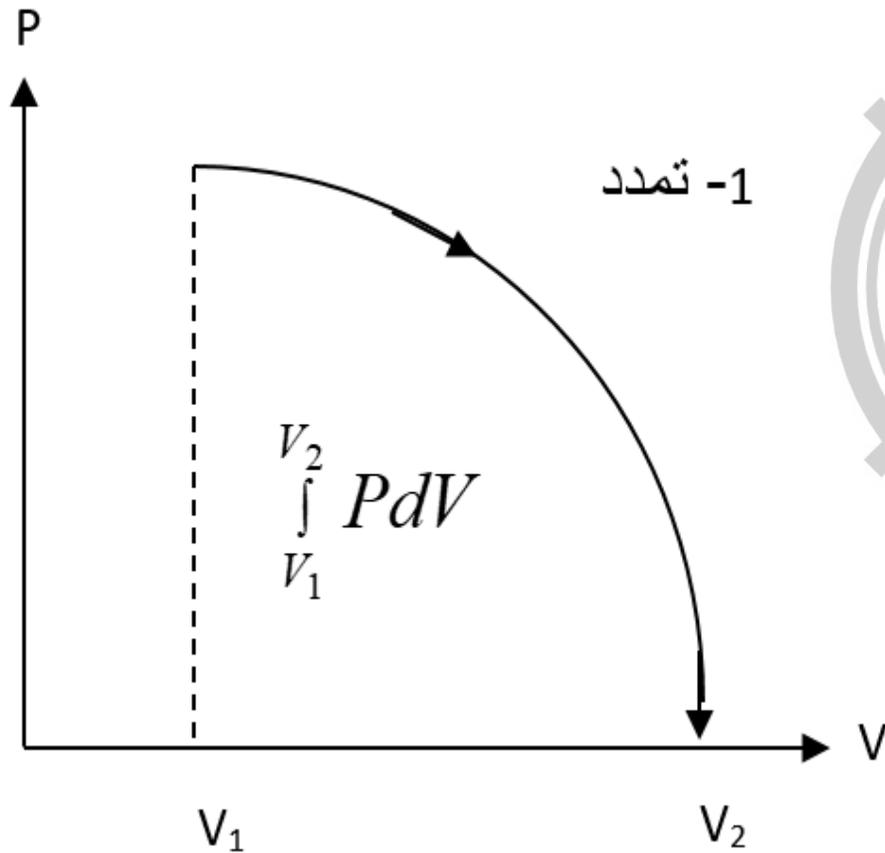
$$W = \int_{v_1}^{v_2} P dv$$

ووحدة الشغل الجول  $J = Nm$  وعند تكامل المعادلة الاخيرة عند ثبوت الضغط :

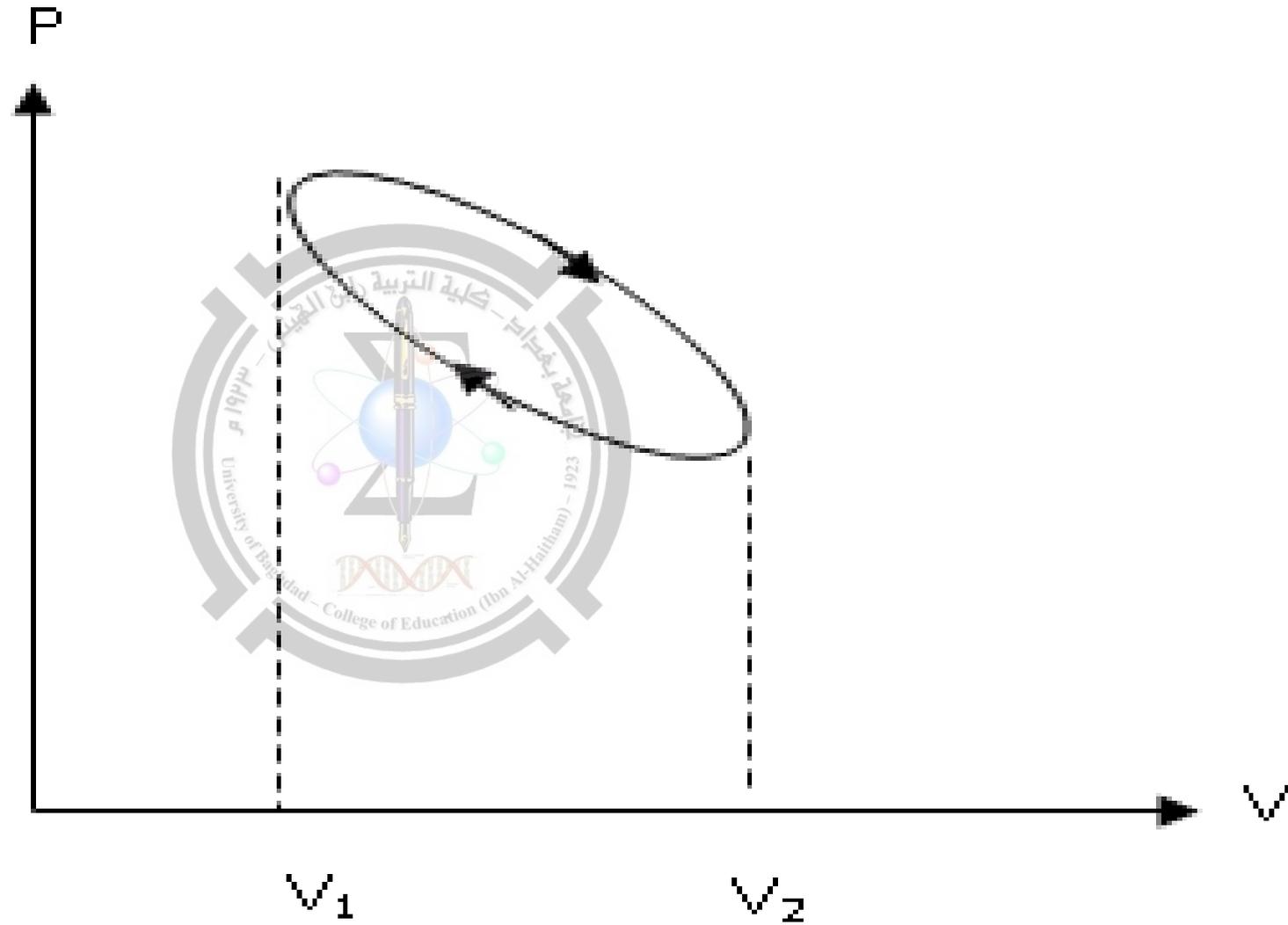
$$W = P \int_{v_1}^{v_2} dv = P(v_2 - v_1)$$

وهو يمثل الشغل لعملية ايزوباريك (ثبوت الضغط).  
والمخطط الاتي يمثل الشغل في مخطط P-V :-

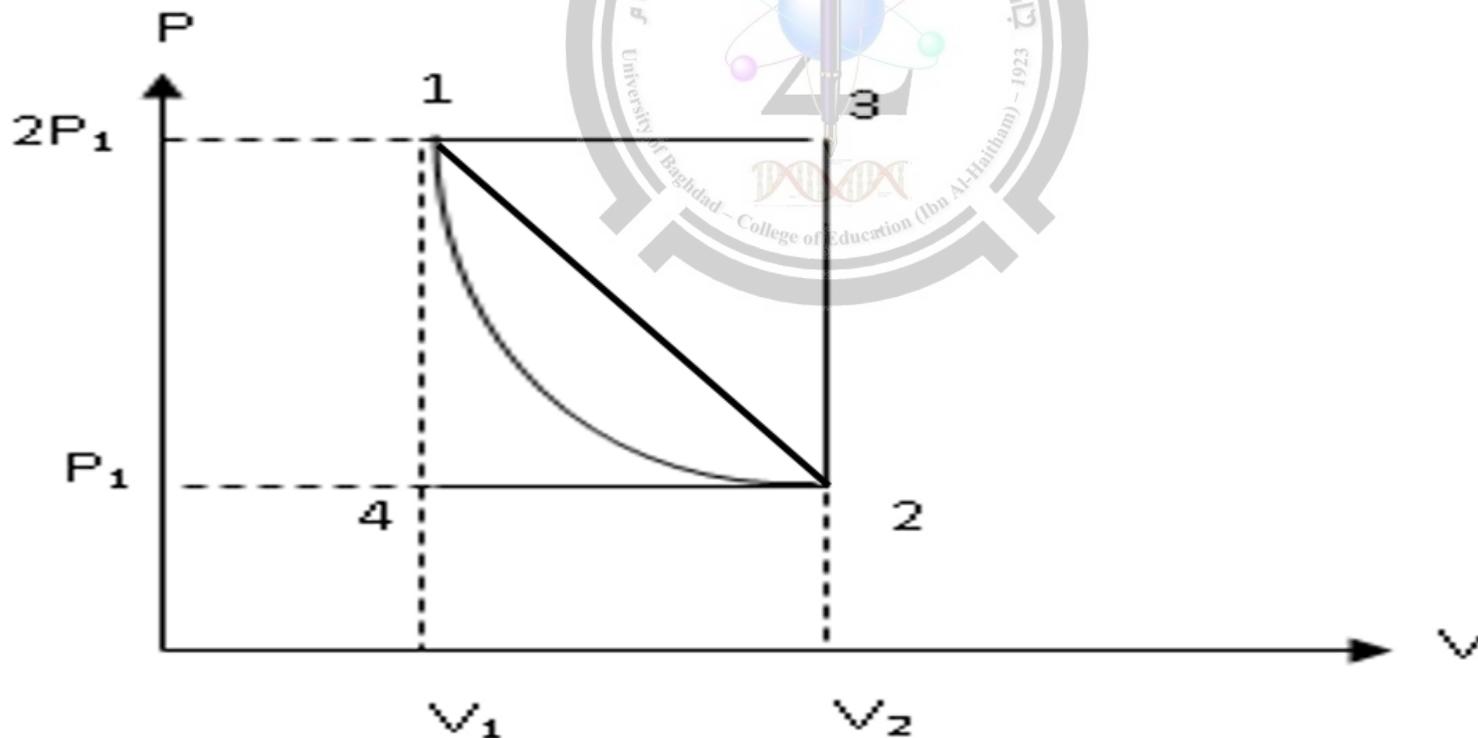
## والمخطط الاتي يمثل الشغل في مخطط P-V :-



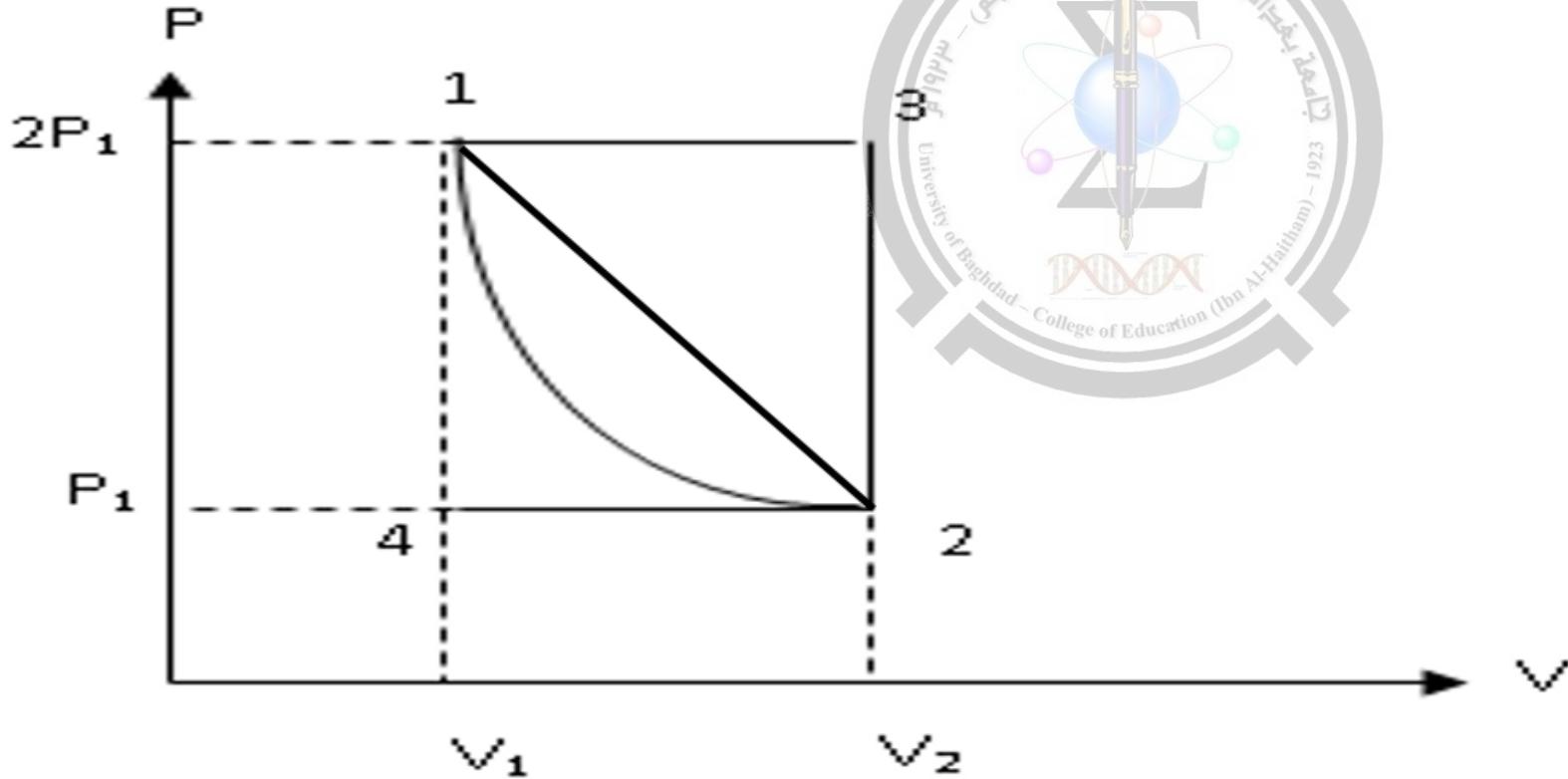
العمليتان معا  
تقلص وتمدد



ان الشغل المنجز خلال الدورة يعتمد على المسار. فالنقطتان (1) , (2) تمثلان حالتى التوازن الابتدائية والنهائية ويوجد عدة مسارات لتغيير الحالة الابتدائية (1) الى النهائية (2) بالنسبة للمسار الاول (2 → 3 → 1) فالعملية (1 → 3) هي عملية ثابتة الضغط والعملية (3 → 2) هي عملية ثابتة الحجم والشغل المنجز خلال هاتين العمليتين هو المساحة تحت الخط المستقيم (1 → 3) . كما في الشكل الآتي



اما المسار الثاني فهو  $(2 \rightarrow 4 \rightarrow 1)$  والذي يتكون من عمليتين الاولى **ثابتة الحجم**  $(1 \rightarrow 4)$  والثانية **ثابتة الضغط**  $(4 \rightarrow 2)$  و**صافي الشغل** هو المساحة تحت الخط **المستقيم**  $(2 \rightarrow 4)$ . اما المسار الثالث هو **المستقيم**  $(1 \rightarrow 2)$  و**الشغل المنجز** هو المساحة تحت هذا الخط ومن هذا يتضح ان **الشغل يعتمد على المسار بين الحالة الابتدائية والنهائية**.



## الشغل خلال عمليات ترموداينميكية مختلفة:-

1-الشغل المنجز خلال عملية ايزوثرمية (ثابت درجة الحرارة) لغاز مثالي:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} P dv \dots\dots\dots (6) \text{ at } T = \text{constant}$$

ولما كان الغاز مثاليا فان معادلة الحالة له هي

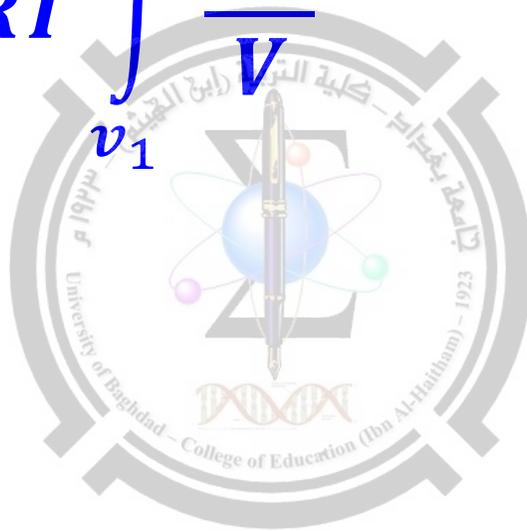
$$PV = nRT$$

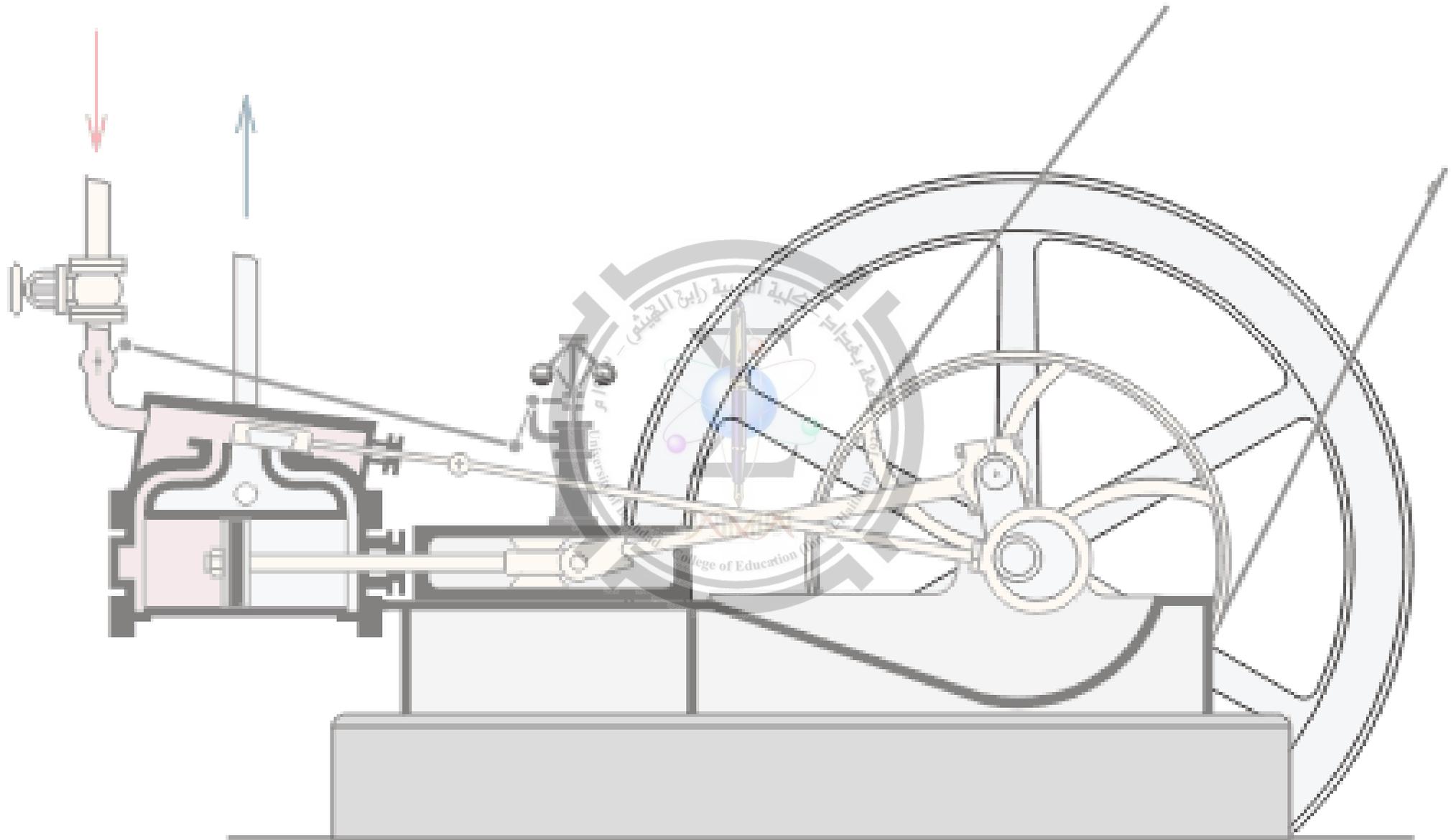
وبالتعويض عن قيمة P في المعادلة (6) ينتج :

$$W = \int_{v_1}^{v_2} \frac{nRT}{V} dv = nRT \int_{v_1}^{v_2} \frac{dV}{V}$$

$$W = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

وبعد حل التكامل نحصل على :





## 2- الشغل الناتج عن عملية ايزوبار (ثابتة الضغط) لغاز مثالي:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} P dV = P(V_2 - V_1) , \quad P = \text{const.}$$

الشغل الناتج عن عملية ايزوكورك (ثبوت الحجم):

$$W = \int P dV = 0, \quad V = \text{constant}, V_2 = V_1$$

$$V_2 - V_1 = 0$$

## قانون الترموداينمك الحراري الأول

هو تعبير لمبدأ حفظ الطاقة أي أن الطاقة تتغير من حالة إلى أخرى ومن طاقة كامنة إلى طاقة حركية ، وبتعبير آخر أن الطاقة لا تفنى ولا تُستحدث وإنما تتحول من صورة إلى أخرى . ويشخص القانون عملية نقل الحرارة بين الأنظمة كنوع من أنواع نقل الطاقة . إن ارتفاع الطاقة الداخلية لنظام ترموديناميكي معين يساوي كمية الطاقة الحرارية المضافة للنظام ، مطروح منه الشغل الميكانيكي المبذول من النظام على الوسط المحيط .

ينص القانون الأول للترموداينمك على أن: "الطاقة لا تفنى ولا تستحدث من عدم ولكن تتحول من شكل إلى آخر".

## القانون الاول للثرموداينميك:

يمثل صيغة خاصة من **قانون حفظ الطاقة** لانه يتعامل مع الحرارة والشغل

القانون الاول للثرموديناميك عبارة عن شرح لمبدأ حفظ الطاقة فهو يؤكد على ان

الطاقة الفائضة في النظام تساوي التغير في الطاقة الداخلية في النظام.

للطاقة الداخلية في مجال الثرموديناميك شكلين احدهما شغل مبذول من المحيط على النظام أو من النظام على المحيط و الثاني انتقال الحرارة بالتوصيل و الإشعاع

وإذا انتقلت الطاقة إلى نظام ما فإن طاقة النظام تزداد بمقدار يساوي الطاقة المنتقلة حسب قانون حفظ الطاقة, فإذا كانت  $U_1$  طاقة النظام عند ابتداء العملية و  $U_2$  طاقته عند انتهاء العملية  $Q$  الحرارة المتدفقة إلى النظام,  $W$  الشغل الذي ينجزه النظام خلال العملية فإن  $U_2 - U_1$  الزيادة في طاقة النظام بين  $Q$  و  $W$  أي ان

$$U_2 - U_1 = Q - W$$

هذه المعادلة شكل من اشكال القانون الاول للثرموديناميك و تسمى  $U$  بالطاقة الداخلية للنظام وتعتمد على حالة النظام الابتدائية فقط و ليس على طريقة اجراء العملية على النظام وتغير حالته.

ويمكن كتابة العلاقة السابقة للعمليات التي يكون فيها تغير الحالة صغير أي في العمليات التي  
يمتص فيها النظام كمية صغيرة من الحرارة  $dQ$  وينجز كمية صغيرة من الشغل  $dW$

$$dU=dQ-dW$$

وتقاس كل من  $Q, W, U$  في العلاقات السابقة بوحدات الطاقة وهذه المعادلة تمثل الصيغة  
التفاضلية للقانون الأول للترموديناميك.



إذا مر الكيان بدورة كاملة بعد انتهاء العملية إلى نفس حالته الابتدائية فإن مقدار التغير بالطاقة  
الداخلية يساوي صفر

$$\oint dU = 0$$

$$\oint dQ = \oint dW$$

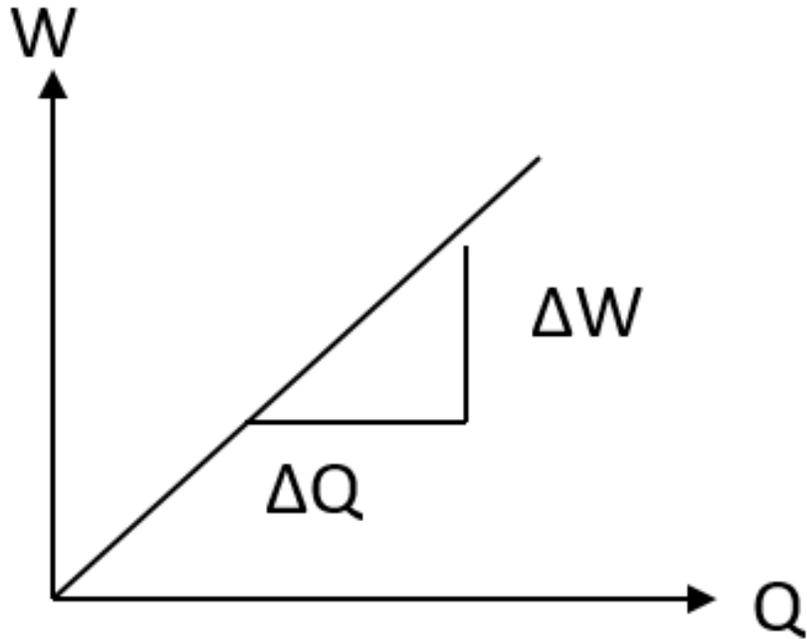


## تجربة جول

اجرى العالم جول عدة تجارب لإيجاد العلاقة الكمية بين الحرارة والشغل. في بداية التجربة تقاس درجة حرارة المائع الابتدائية ثم يسمح للثقل  $mg$  بالسقوط تحت تأثير الجاذبية الارضية. ان سقوط الثقل يؤدي إلى انجاز شغل على المائع فترتفع درجة حرارته

إن مقدار الشغل المبذول  $W$  يمكن حسابه من معرفة مقدار الثقل و المسافة و كمية الحرارة المتولدة  $Q$  .

عندما يعود المائع إلى حالته الابتدائية يقال أن الكيان (المائع) قد مر دورة كاملة وعند مقارنة الشغل المنجز مع كمية الحرارة نجد أن الحرارة تتغير طرديا أي إن العلاقة بينهما طردية كما في الشكل أدناه.



$$J = \frac{\Delta W}{\Delta Q}$$

ويمكن صياغة النتيجة التي وصل إليها جول من خلال تجاربه فعند مرور أي كيان خلال دورة كاملة فإن التكامل الدوري للشغل يتناسب طردياً مع التكامل الدوري للحرارة

$$W = \oint dQ$$

$$\oint W = J \oint dQ \quad \text{-----(1)}$$



إن قانون جول هو تعبير رياضي للقانون الأول للثرموديناميك بالنسبة لكيان مغلق يمر بدورة كاملة. المعادلة (1) تعطي العلاقة الكمية بين الشغل و الحرارة عندما يستعمل كل الشغل المبذول على الكيان لتوليد الحرارة أو العكس بالعكس. والعلاقة البسيطة بين الشغل و الحرارة هي:-

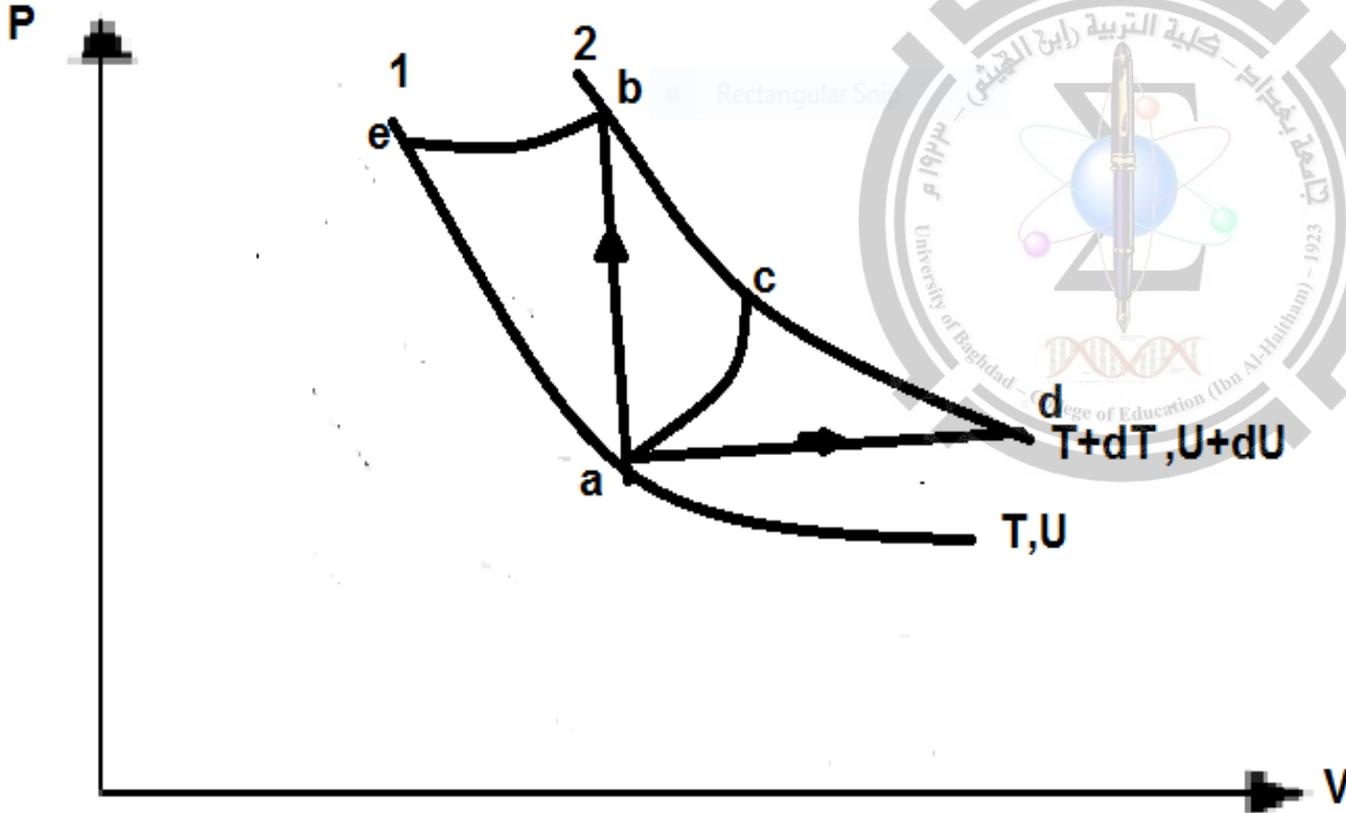
$$W=JQ \text{ -----}(2)$$

اما عمليا

اذا دخلت كمية معينة من الحرارة إلى كيان ما فان الحرارة الداخلية لا تتحول كليا إلى شغل منجز  
فجزء من الحرارة التي يجهز بها الكيان تستخدم لأنجاز شغل خارجي على المحيط و الجزء  
المتبقي يستخدم لزيادة الطاقة الداخلية للكيان

السعة الحرارية النوعية للغاز المثالي :

تعرف السعة الحرارية النوعية المولية  $C$  بأنها كمية الحرارة  $dQ$  اللازمة لرفع درجة حرارة مول واحد درجة حرارية واحدة .



$$C = \frac{dQ}{ndT}$$

في الشكل نلاحظ منحنيين ايزوثيرميين في درجتين حرارة  $T$  و  $T+dT$  ولما كانت الطاقة الداخلية للغاز المثالي تعتمد على درجة الحرارة فقط فانها تبقى ثابتة مادامت درجة الحرارة ثابتة وبالتالي فان تبقى ثابتة مادامت درجة الحرارة ثابتة وبالتالي فان التغير في الطاقة الداخلية  $dU$  لجميع العمليات :-  $a \rightarrow d$  isobaric,  $a \rightarrow b$  isocoric,

عند اخذ العملية ثابتة الحجم ( $a \rightarrow b$ ) فان السعة الحرارية النوعية ستكون :

$$dQ = nC_v dT$$

ومن القانون الاول للثرموداينميك

$dQ = dU + dw$  , but  $dV = 0$  then  $dW = 0$  , implies  $dQ = dU$

$$dU = nC_v dT$$

$$dQ = nC_p dT$$

والعملية ثابتة الضغط  $a \rightarrow d$  :-

ولكن التغير في الشغل هو :-



$dW = PdV$  for ideal gas  $PV = nRT$ , then  $PdV = nRdT$

ومن القانون الاول للثرموداينميك :

$dQ = dU + dW$ , then  $dU = dQ - dW$

$nC_VdT = nC_PdT - nRdT$  then  $ndT$  cancelled from both sides

$$C_P - C_V = R$$

## وللغاز احادي الذرة

$$C_V = \frac{3}{2}R, \text{ then } C_P = C_V + R = \frac{3}{2}R + R = \frac{5}{2}R$$

اي ان الحرارة النوعية للغاز المثالي عند ثبوت الضغط اكبر من حرارته النوعية عند ثبوت الحجم بالمقدار ( R ) ثابت الغازات العام وتكون وحدات  $C_P$  و  $C_V$  نفس وحدات R ورغم ان المعادلات اشتقت للغاز المثالي الا انها تصلح تقريبا للغازات الحقيقية في الضغوط المعتدلة.

العلاقة بين السعتين الحراريتين (  $C_p, C_v$  ) للغاز المثالي :-

في العمليات الادياباتيكية التي تتم بدون تبادل حراري ومادي بين النظام ومحيطه :

حسب القانون الاول للثرموداينميك

$dQ = dW + dU$  but  $dQ = 0$  *adiabatic process then*

$$0 = dW + dU , dU = -dW \dots \dots \dots (1)$$

$$\Rightarrow U_2 - U_1 = -dW$$

إذا اجريت عملية عكوس اديباتيكية على غاز مثالي:-

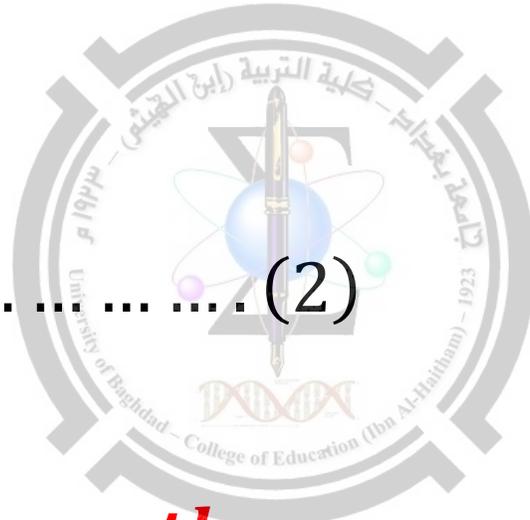
$$dQ = 0, dU = nC_V dT, \text{ and } dW = PdV$$

وبالتعويض في معادلة (1)

$$nC_V dT = -PdV \dots\dots\dots (2)$$

ut  $PV = nRT$  for ideal gas then

$$PdV + VdP = nRdT \dots\dots\dots (3)$$



بحذف  $dT$  من المعادلتين (2) و (3) والاستعانة بالمعادلة: بالعلاقة :  $C_P - C_V = R$

$$\frac{PdV + VdP}{PdV} = -\frac{nRdT}{nC_VdT} = -\frac{(C_P - C_V)}{C_V} = \gamma + 1, \quad \text{as } \gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

$$1 + \frac{VdP}{PdV} = \gamma + 1 \Rightarrow \frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0 \dots \dots (4)$$

وللحصول على الضغط والحجم في العملية الأديباتيكية نجري عملية التكامل على معادلة (4).

$$\int \frac{dP}{P} + \delta \int \frac{dV}{V} = 0$$

$$\ln P + \gamma \ln V = \ln C$$

$$PV^\gamma = C \dots \dots \dots (5)$$



$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{5R/2}{3R/2} = \frac{5}{3}$$

وللغاز المثالي :-

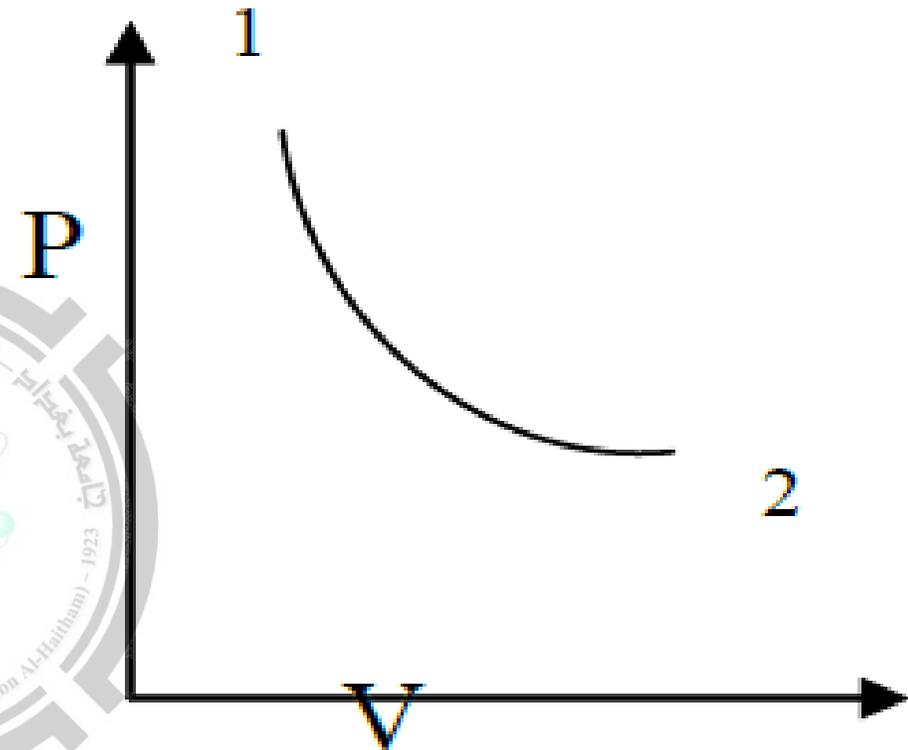
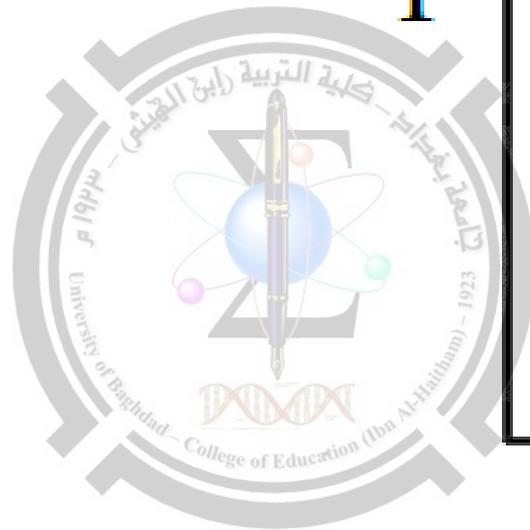
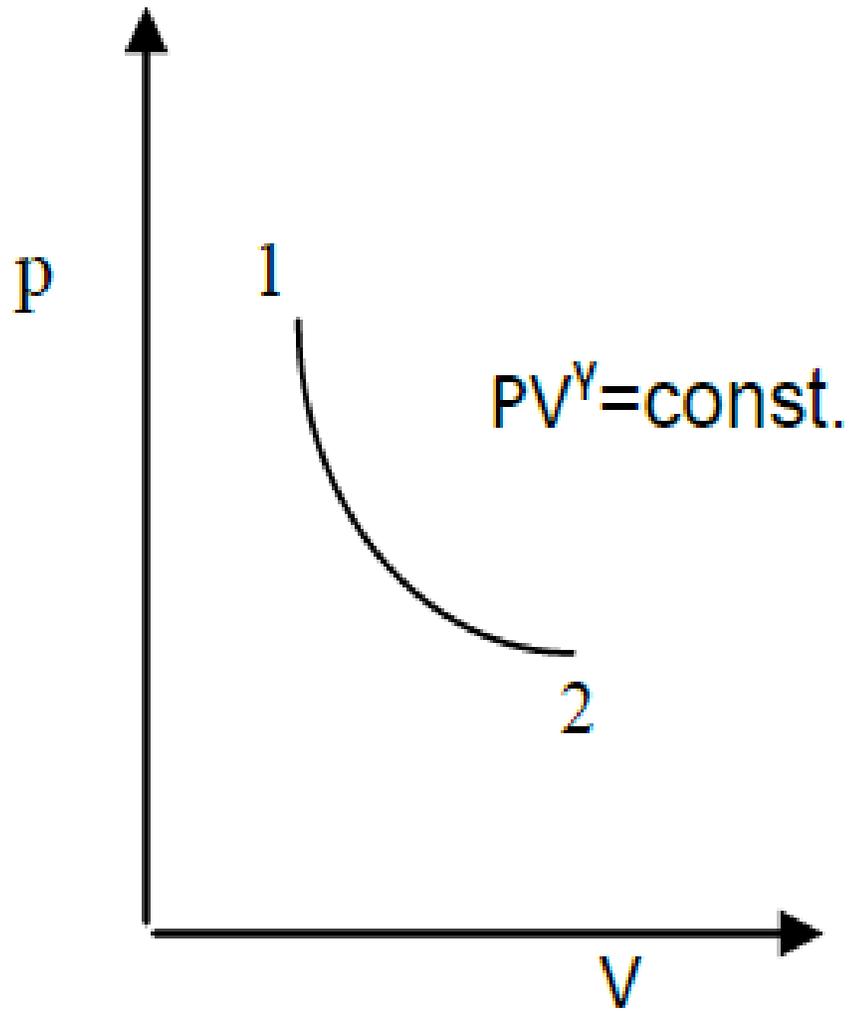
وبتطبيق المعادلة (5) على حالتين في العملية الاديباتيكية نصل على:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \dots\dots\dots (6)$$

$$T_1 P_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_2 P_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$



والمعادلة (6) تدل على ان ميل المنحنيات الاديباتيكية اكثر انحدارا من الايزوثرمية. حسب الشكل التالي



$$P_1V_1 = P_2V_2 = \text{const.}$$

معامل المرونة الحجمي الاديياتيكي :

$$B = -V \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

$$B = -V \frac{dP}{dV}$$



يعرف معامل المرونة الحجمي  $\beta$  لمادة :

وفي العملية الايزوثرمية لغاز مثالي يكون :

$$V = \text{const. then } PdV + Vdp = 0, \quad \frac{dP}{dV} = -\frac{P}{V}$$

$$\beta = -V \left( \frac{-P}{V} \right) = P$$

$$PV^\gamma = \text{const.}$$

$$\beta_{ad} = -V \left( \gamma \frac{P}{V} \right) = \gamma P = \gamma \beta_{iso}$$



وفي العملية الأديباتيكية :-

ويعرف معامل المرونة الحجمي بأنه مقلوب معامل الانكسابية اي ان :-

$$K_{ad} = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\gamma P},$$

$$K_{iso} = \frac{1}{P}$$

الشغل المنجز خلال عملية اديباتيكية لغاز مثالي :

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV = -n \int_{T_1}^{T_2} C_V dT$$

ويمكن ايجاد الشغل من هاتين المعادلتين

$$W = P \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma}$$

$$W = P \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma}$$

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - \gamma}$$

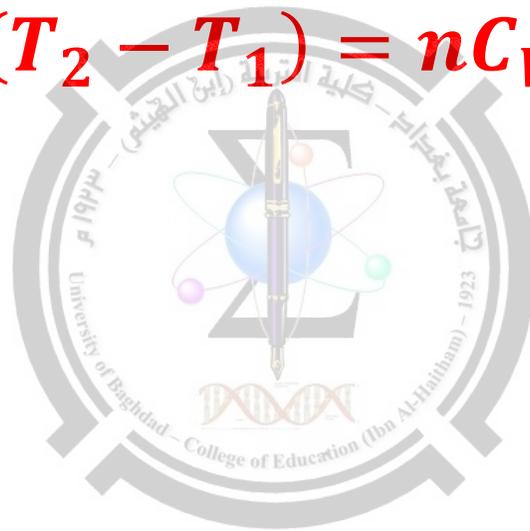


ومن التعويض في التكامل الاول

ويكون الناتج كما يأتي :

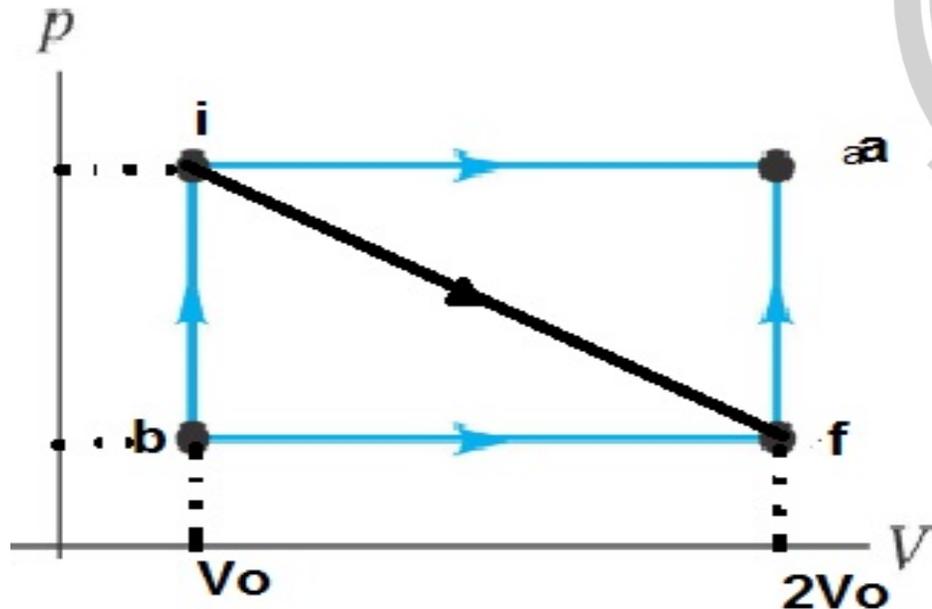
اما التكامل الثاني:

$$W = \int_{T_1}^{T_2} -nC_V dT = -nC_V(T_2 - T_1) = nC_V(T_1 - T_2)$$



# الشغل الناتج عن الزيادة شبه الساكنة في سائل او صلب : *work of quasi-static* *increase of a liquid or a solid*

يمكن الحصول على الشغل في الحالة السائلة او الصلبة بدلالة  $\beta, K$  على اعتبار ان كل منها ثابت .  
اذا كانت معدلات تغير الضغط او درجة الحرارة او الحجم صغيرة يمكن اعتبار الحجم النوعي ثابت  
ويطلق على معدلات التغير هذه بالتغيرات شبه الساكنة *Quasi-static* .



لنفرض ان حالة جسم صلب تغيرت من الحالة  
الابتدائية  $i$  الى الحالة النهائية  $f$  كما في الشكل  
المجاور:-

نلاحظ في الشكل اعلاه حالة جسم صلب تغيرت حالته من حالة ابتدائية  $i$  الى حالة نهائية  $f$  بتغير درجة الحرارة والضغط ويمكن ان يتخذ مسارين هما  $i \rightarrow a \rightarrow f$  او  $i \rightarrow f$  ولغرض حساب الشغل ندرس كل مسار على حدة

أ- المسار  $i \rightarrow a \rightarrow f$  : نلاحظ ان الحالة من  $i \rightarrow a$  عملية ثابتة الضغط ايزوبارك اي  $\Delta P = 0$  ولهذا الشغل المنجز هو:

$$W = \int P dV, \quad \text{but } dV = \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT, \quad \text{but } P = \text{const, then } \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP = 0$$

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \Rightarrow dv = \beta V dT$$

لذلك فان التمدد الحجمي يساوي :

والشغل المنجز هو :-

$$W_{i \rightarrow a} = \int_{T_i}^{T_a} \beta P_i V dT = V \beta P_i \int_{T_i}^{T_a} dT = P_i V \beta (T_a - T_i)$$

المعادلة الأخيرة تمثل حساب الشغل عند ثبوت الضغط . والمسار الثاني  $a \rightarrow f$  هي عملية ثابتة الحجم ايزوكوريك والشغل

$$w = \int P dV = 0 \text{ لان } w = \int P dV = 0$$

ب - المسار  $i \rightarrow f$  تمثل عملية ثابتة درجة الحرارة (ايزوثرمية) : اي  $dT=0$  والانضغاطية للعملية ثابتة درجة الحرارة هي

$$K = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \Rightarrow dV = -KVdP$$

عند ثبوت درجة الحرارة فان التغيرات في الحجم  $V$  والانضغاطية  $K$  صغيرة يمكن اهمالها للمواد الصلبة والسائلة.

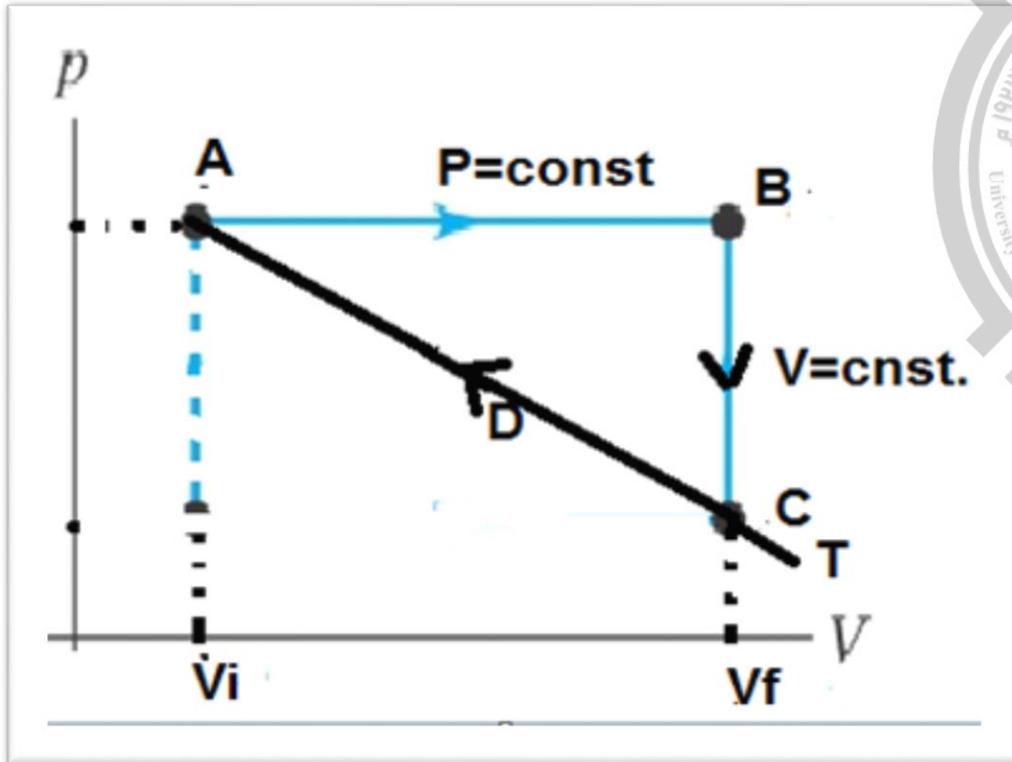
$$W_{i \rightarrow f} = -KV \int_{P_i}^{P_f} P dP = -\frac{KV}{2} (P_f^2 - P_i^2)$$

ولكن الحجم = الكتلة / الكثافة لذا تصبح المعادلة الاخيرة:

$$as V = \frac{m}{\rho} \Rightarrow W_{i \rightarrow f} = \frac{mK}{2\rho} (P_i^2 - P_f^2)$$

## The cyclic process & The net work : العملية الدورية والشغل الصافي

العملية الدورية هي سلسلة مستمرة من العمليات المتعاقبة يعود فيها النظام بشكل دوري الى حالته الابتدائية وكما في الشكل حيث ان الشغل المنجز في هذه الدورة من بداية بدايتها الى نهايتها هو المسار  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$



$$W_{cyclic} = W_{A \rightarrow B} + W_{B \rightarrow C} + W_{C \rightarrow A}$$

$$W_{cyclic} = P_i(V_f - V_i) + 0 + (-RT_1 \ln \frac{V_f}{V_i})$$

يعطى الشغل الصافي لهذه الدورة ذات المسار المغلق بالمعادلة الآتية, حيث يرمز التكامل المغلق الى دورة كاملة.

$$W = \oint P dV$$

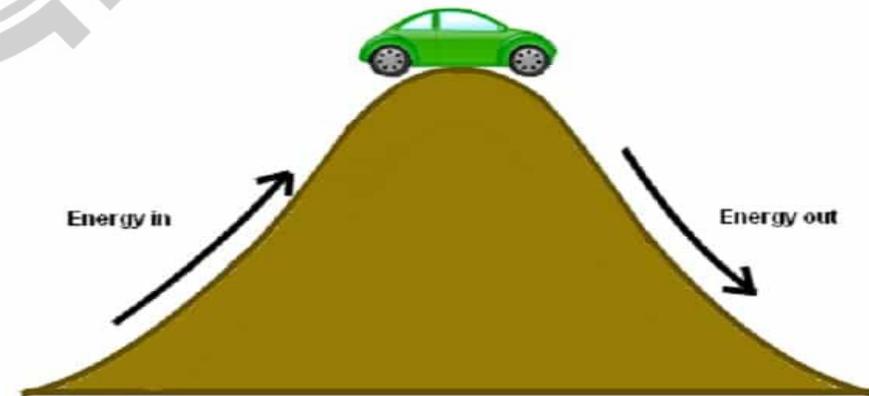
## الطاقة الكامنة للنظام :-

وهي الطاقة التي يمتلكها النظام نتيجة تغير موقعه و تمثل الشغل المبذول ضد القوى المقاومة للنظام. ان الشغل الميكانيكي المستخلص بعد احداث التغير ثم العودة الى حالة الجسم الاصلية مساوي للصفر وبالتالي فان حساب الطاقة الكامنة للنظام حينما يكون في ترتيب موضعي نسبي معين بالمقارنة مع ترتيب الوضع للنظام المتفق عليه باعتبار ان طاقته الكامنة تساوي صفر الى جانب ذلك تعد الطاقة الكامنة دالة للترتيب او للوضع الابتدائي والنهائي فقط ولا تعتمد على المسار الذي يسلكه النظام وهذا يختلف عن الشغل الترموداينميكي الذي يعتمد على المسار.

### Potential And Kinetic ENERGY



### Potential energy



## الطاقة الداخلية :

تعتبر النظرية الحركية ذرات المواد كأنها تهتز ذهابا وايابا حول موضع اتزانها وتسمى الطاقة التي تمتلكها مكونات النظام **الطاقة الداخلية** وهي مكونة من جزئين حركية وكامنة وتعتمد الطاقة الحركية على درجة الحرارة وتخزن مركبة الطاقة الكامنة في الاواصر البينية للذرات.

في المواد الصلبة يوجد نوعا الطاقة بكميات متساوية تقريبا وهناك تغير متبادل فيما بينهما, اما في حالة الغازات حيث تكون القوى البينية ضعيفة فان اغلب الطاقة الداخلية تكون بشكل طاقة حركية انتقالية اضافة الى الحركات الدورانية اذن فالنظرية الحركية اداة ربط لدرجة الحرارة بالطاقة الحركية للذرات والجزيئات. للتمييز بين الحرارة والطاقة الداخلية نلاحظ ان الحرارة شكل من اشكال الطاقة تنتقل الى الجسم دون ان يتضمن ذلك اي شغل ميكانيكي , اما الطاقة الداخلية فهي تلك الطاقة الكامنة التي تمتلكها الذرات في الجزيئات نتيجة لوضعها النسبي في الفراغ لذلك لا يصح القول ان الحرارة في الجسم . وتوجد الطاقة الداخلية داخل الجزيئات (**حركات انتقالية واهتزازية ودورانية**) وهذه الطاقة هي طاقة حرارية كما توجد الطاقة الداخلية في نواة الذرة حيث تظهر اثناء انحلالها وانشطارها او اندماجها وتسمى الطاقة النووية.

يرمز للطاقة الداخلية  $U$  والعمليات الداخلية تعد بمثابة مستودع للطاقة الداخلية لا ينضب الا بتوقف العمليات الداخلية التي ترتبط بوجود المادة.

ولا يمكن قياس الطاقة الداخلية لكتلة معينة لصعوبة ذلك وإنما يستدل على ذلك عند انتقال المادة من حالة الى اخرى فان جزء من الطاقة الداخلية يظهر على شكل شغل او حرارة (لماذا؟) او تيار كهربائي ولا يمكن التعامل مع الطاقة الداخلية كقيمة مطلقة وإنما نتعامل مع التغير في قيمتها  $\Delta U$  اي تأثيرها النسبي.

تمتلك جزيئات النظام طاقة من نوع اخر ناتجة عن وجود كل جزئ في مجال جذب الجزيئات الاخرى وتساوي حاصل ضرب  $PV$  ووحداتها (لتر- جو) كما انها صغيرة جدا للاطوار الصلبة والسائلة بحيث يمكن تجاهلها وتؤخذ بنظر الاعتبار عند الاطوار الغازية.

## التمدد الحر والشغل الاديبياتيكي:-

حالة النظام قد تتغير من من حالة ابتدائية الى حالة نهائية دون وجود اي تبادل حراري وإنما بانجاز شغل فقط وهو ما يسمى الشغل الاديبياتيكي ( $dQ=0$ ). اذا كان النظام عبارة عن مائع في في أسطوانة ذات مكبس وسحب المكبس نحو الخارج بمعدل اسرع من سرعة جزيئات المائع. عندئذ فإن المائع لا ينجز شغلا على المكبس على الاطلاق وهذه العملية تسمى بالتمدد الحر.

## مناقشة القانون الاول للثرموداينميك :-

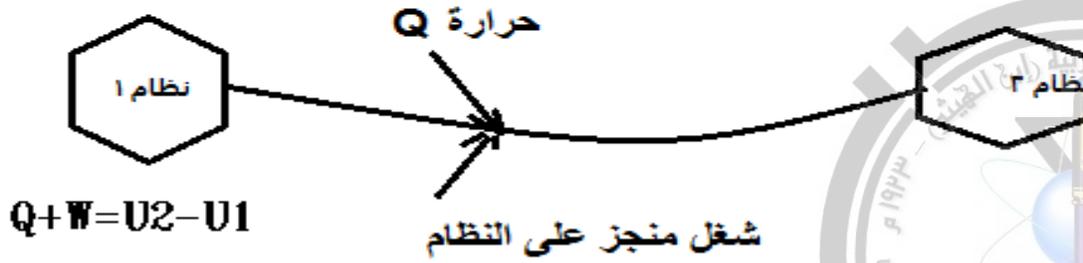
ينص القانون الاول للثرموداينميك على انه اذا انتقل نظام حالة ابتدائية الى حالة نهائية بوسيلة اديباتيكية فقط , فالشغل المنجز هو نفسه لجميع المسارات التي بين الحالتين. يمكن تمثيل ذلك بمخطط حيث يلاحظ ان فرق الطاقة بين الحالتين الابتدائية والنهائية يساوي الشغل المنجز خلال عملية اديباتيكية هو:

$$U_2 - U_1 = \Delta U = W_{ad} \dots \dots \dots (1)$$

حيث  $W_{ad}$  هو الشغل المنجز في عملية اديباتيكية لا يحدث فيها اي تبادل حراري بين النظام ومحيطه. ان مبدأ حفظ الطاقة لنظام يتغير من الحالة الابتدائية الى الحالة النهائية بعملية اديباتيكية كما في الشكل التالي:



الشكل (أ) عملية اديباتيكية



الشكل (ب) عملية ثرموداينميكية تشمل انتقال الحرارة

ويمكن تلخيص معنى المعادلة (1) كالآتي:

الربح في الطاقة الداخلية = الشغل الاديباتيكي الذي يزود به النظام من قبل جميع القوى المؤثرة عليه.

## الصيغة الرياضية للقانون الاول للثرموداينميك :-

ان القانون الاول للثرموداينميك يعبر عن العلاقة بين الشغل والحرارة والطاقة الداخلية للنظام , ولهذا للقانون نصوص كثيرة منها مايلي:

1. ان الطاقة لا تفنى ولا تستحدث (قانون حفظ الطاقة).
2. الطاقة قد تتحول الى صور مختلفة ولكنها لا تفنى.
3. اذا اختفى جزء من احدى صور الطاقة فسوف تظهر كمية مكافئة من الطاقة في صور اخرى

عندما ينجز المحيط شغلا على النظام عند درجات حرارة مختلفة فان الطاقة المنتقلة بوسائط غير كيميائية تساوي الفرق بين تغير الطاقة الداخلية والشغل المنجز والطاقة المنتقلة بالحرارة يرمز لها  $Q$ .

$$Q = U_f - U_i - (-W) = U_f - U_i + W \dots \dots \dots (2)$$

ومن غير المرغوب ان تكون عكس اشارة الحرارة لان الشغل الموجب يدخل الى النظام ويرفع درجة حرارته وان الطريقة المناسبة لذكر العلاقة (2) هو ان يكتب القانون الاول للثرموداينميك بالشكل:

$$U_f - U_i = Q - W \dots \dots \dots (3)$$

وهنا يمكن تصور النظام كأنه كأنه مصرف للطاقة *energy bank* تعتبر الحرارة فيه وديعة والشغل الموجب هو سحب الودائع. ويتضمن القانون الاول ثلاثة مفاهيم هي :-

1. وجود دالة الطاقة الداخلية.
2. قاعدة حفظ الطاقة.
3. تعريف الحرارة باعتبارها طاقة منتقلة بسبب فرق حقيقي في درجات الحرارة.

## الصيغة التفاضلية للقانون الاول للثرموداينميك :-

اذا اشتملت عملية ثرموداينمكية على تغيرات متناهية في الصغر لاحداثيات نظام ما فيمكن ان يصبح القانون الاول للثرموداينميك :

$$dQ = dU + dW \dots\dots\dots (4)$$

حيث  $U$  دالة لاثنين من الحداثيات الثرموداينمكية والضغط هو دالة الى  $(T, V)$  ويمكن ان تصبح العلاقة (4) لنظام اكثر تعقيدا كالاتي:

$$dQ = dU + PdV + VdP \dots\dots\dots (5)$$

واذا كانت العملية المتناهية في الصغر شبه ساكنة يصبح القانون الاول:

$$dQ = dU + PdV \dots\dots\dots (6)$$

ان الطرف الايمن للمعادلة (5) والمعادلة (6) تعرف بصيغة بفافيان التفاضلية *Pfeffian differential*

## العملية الدورية والقانون الاول للثرموداينميك :-

عندما ينجز نظام دورة فان القانون الاول يصبح كالآتي:

$$\oint dW = \int dQ \dots\dots\dots(7)$$

ويمكن كتابتها كالآتي:-

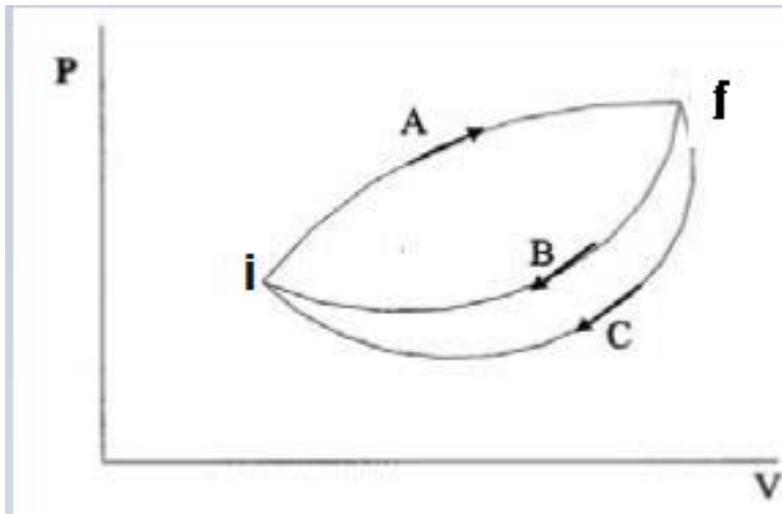
$$\oint (dQ - dW) = 0 \dots\dots\dots(8)$$

والطاقة الداخلية تعتمد على نقطة البداية والنهائية لذلك  $dU=0$  لكل دورة.

ان التكامل المغلق للكمية  $(dQ-dW)$  دائما يساوي صفر.

ولتوضيح ذلك نتصور ان النظام حالتها

الابتدائية  $i$  والنهائية  $f$  كما في الشكل:

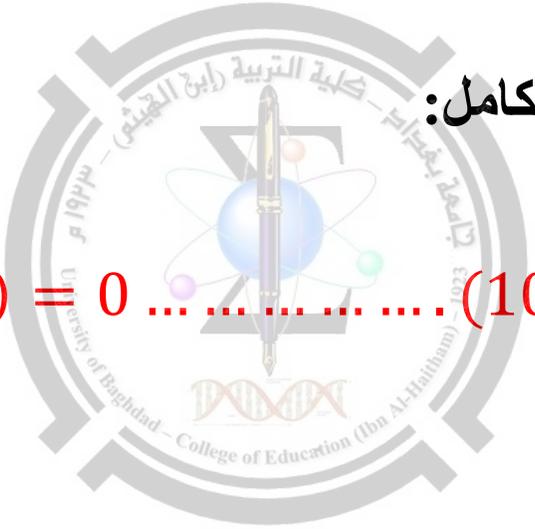


الشغل للمسار المغلق  $i \rightarrow f(B)f \rightarrow i(A)i$  هو:

$$\int_{i(A)}^f (dQ - dW) + \int_{f(B)}^i (dQ - dW) = 0 \dots \dots \dots (9)$$

وللمسار  $i \rightarrow f(C) \rightarrow i$  يكون التكامل:

$$\int_{i(A)}^f (dQ - dW) + \int_{f(C)}^i (dQ - dW) = 0 \dots \dots \dots (10)$$



وبمقارنة المعادلتين نجد ان :-

$$\int_{f(B)}^i (dQ - dW) = \int_{f(C)}^i (dQ - dW) \dots \dots \dots (11)$$

ولما كانت  $C, B$  عمليات عشوائية بين الحالتين  $i, f$  ينتج عن ذلك ان الكمية  $\int (dQ - dW)$  هي نفسها لجميع العمليات وانها تعتمد فقط على الحالات النهائية وليس على المسار المتبع بين الحالتين النهائيتين.

اذا انتقل النظام خلال عملية دورية فان الطاقة الداخلية النهائية  $U_f$  تساوي الطاقة الداخلية الابتدائية  $U_i$  بمعنى ان:

$$U_f - U_i = 0$$

وبالتعويض في المعادلة ( 2 ) نحصل على :-

$$\Delta U = \int (dQ - dW) = Q - W$$

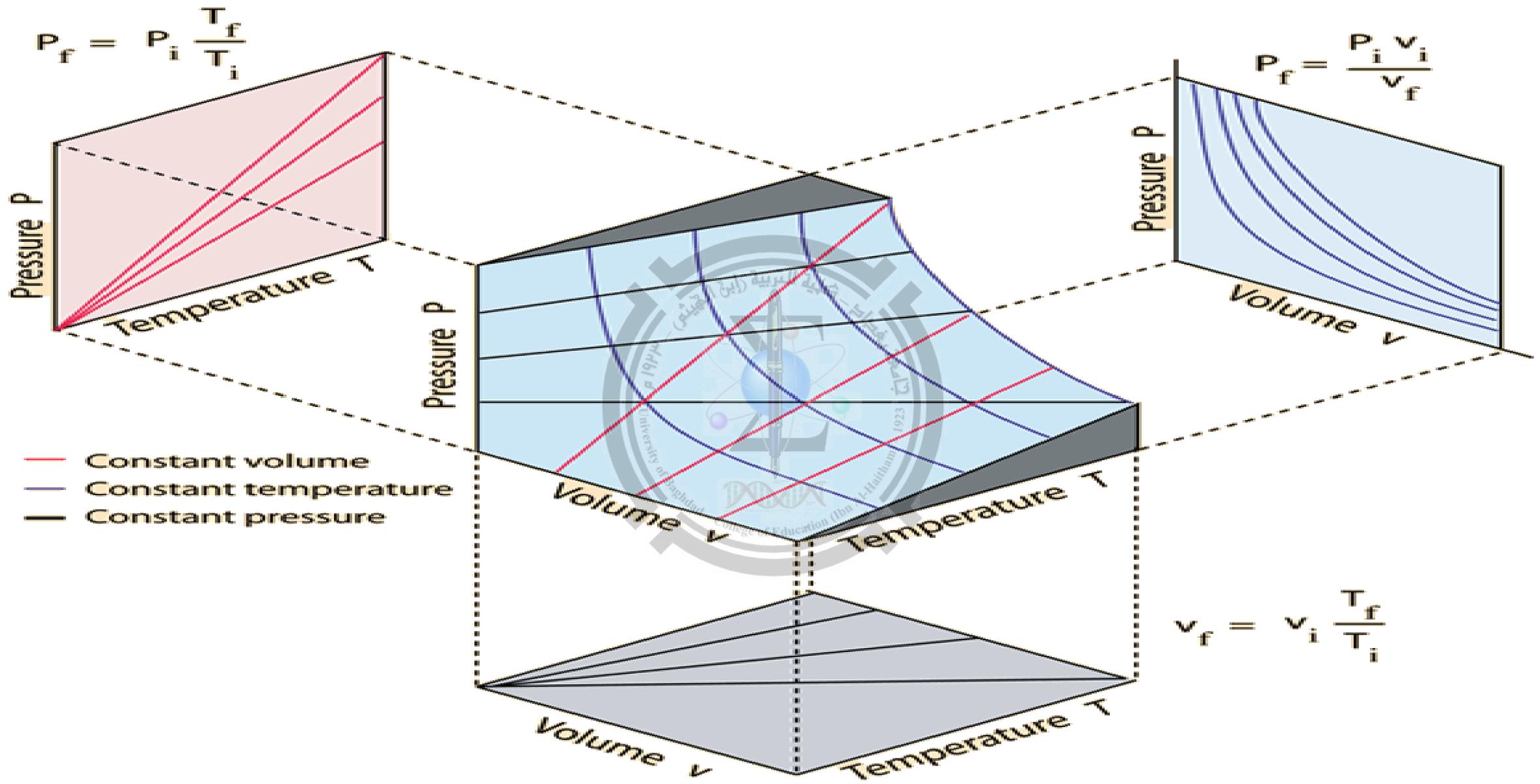
$$Q = \Delta U + W \dots\dots\dots (12)$$

ان الطاقة الداخلية  $U$  هي دالة للاحداثيات الترموداينميكية  $U=f(P, V, T)$  ولا تعتمد على المسار رغم ان كل من  $Q, W$  يعتمدان على المسار.



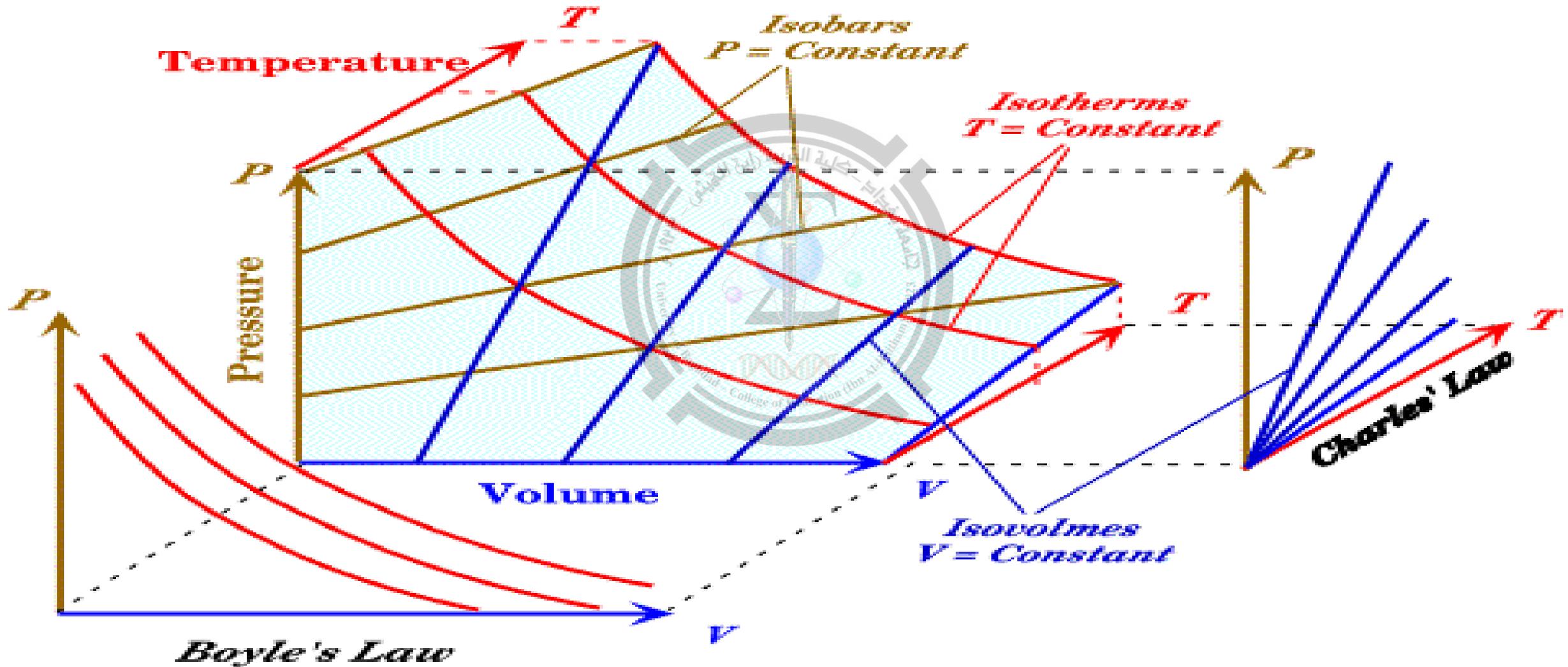
# الفصل الخامس

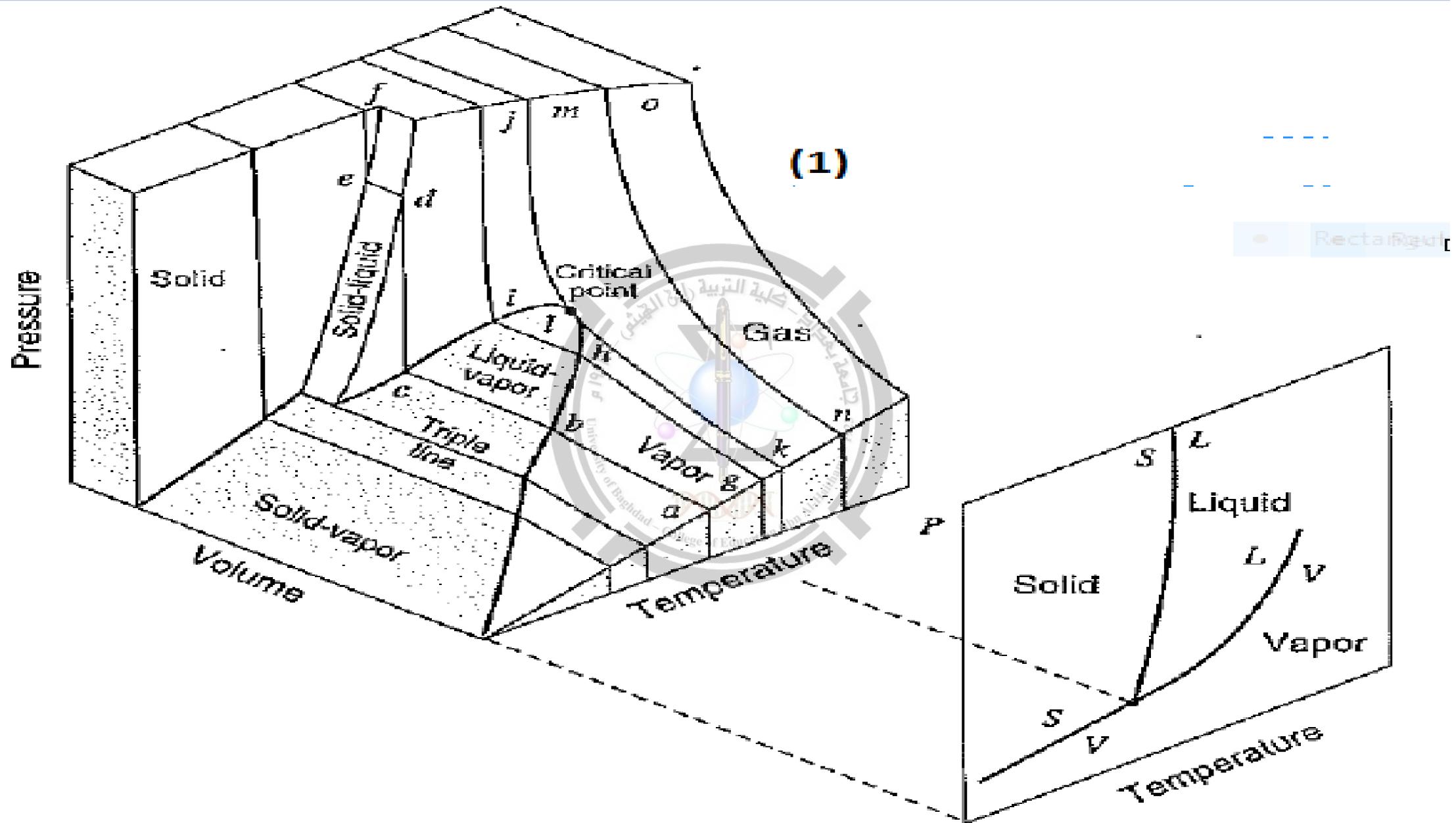


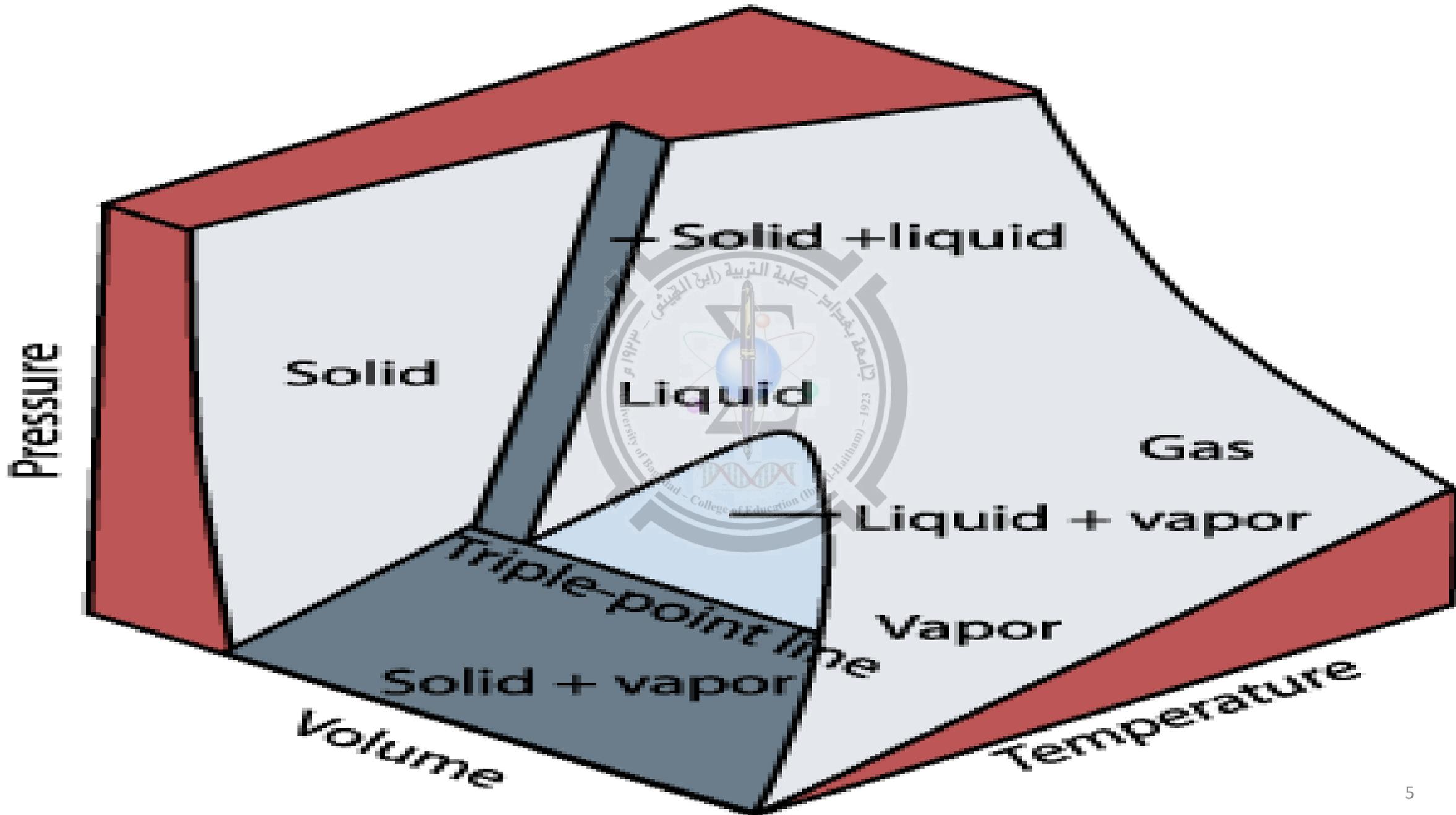


# *P - V - T Surface for Ideal Gas*

$$PV = nRT$$







النقطة الثلاثية:- وهي النقطة التي تتواجد فيها الاطوار الثلاثة للمادة الصلب – السائل – البخار في حالة توازن ثرموداينميكي وهي تمثل نقطة تقاطع منحنى التسامي والتبخر ويرمز لها  $T_p$  .

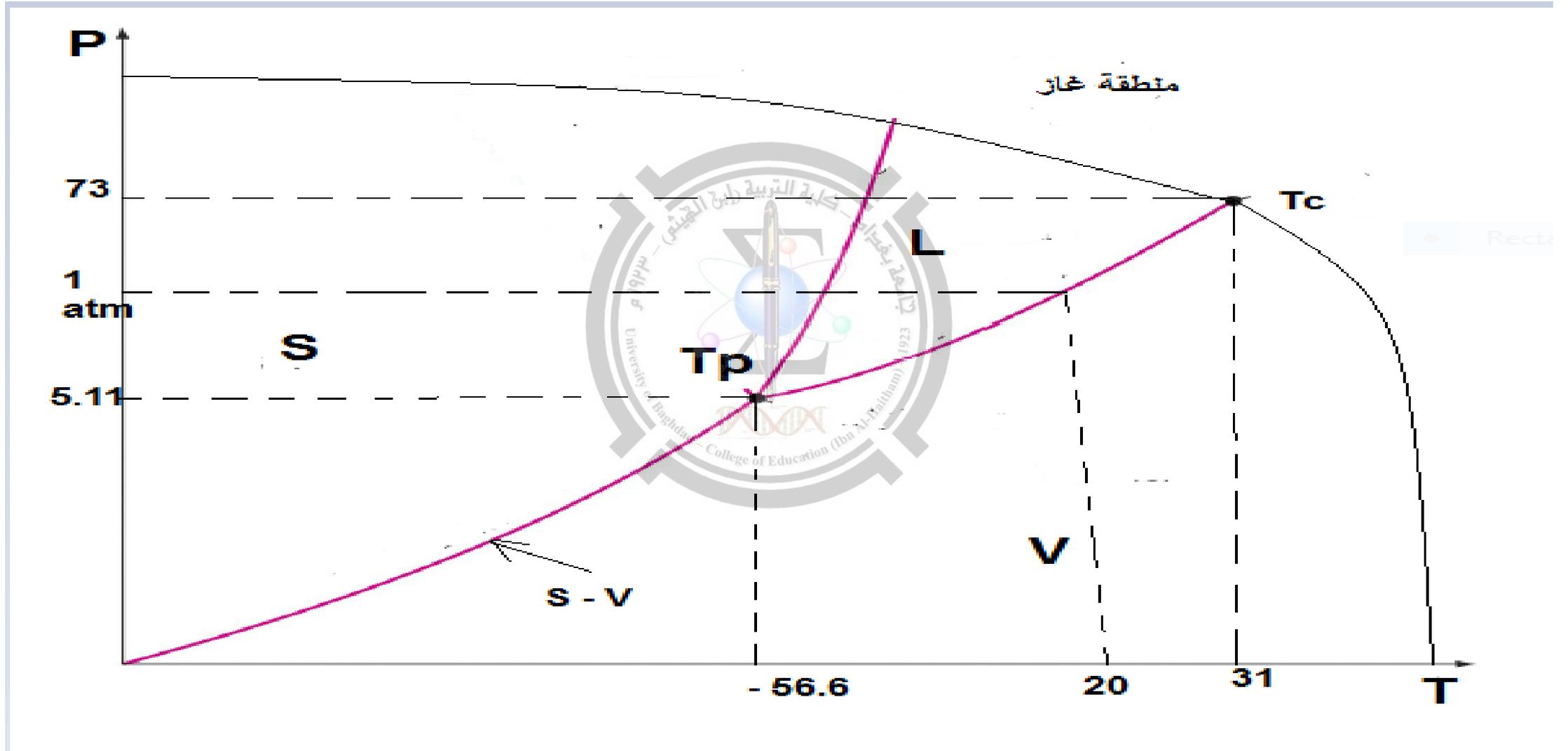
حرارة التحول :- وهي كمية الحرارة اللازمة لتحول المادة من طور الى اخر دون تغير درجة حرارتها .



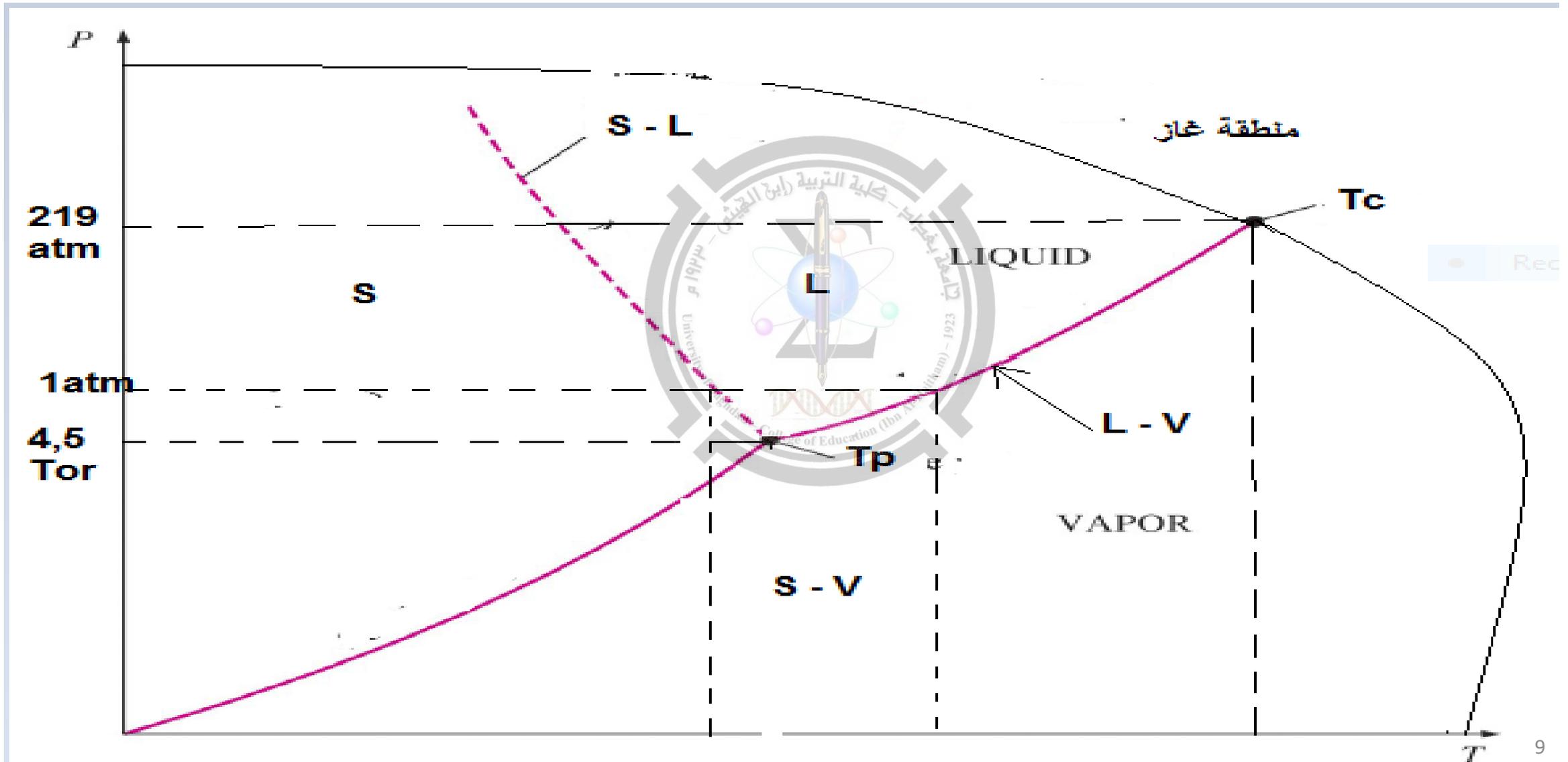
**الحرارة الكامنة للانصهار:-** وهي كمية الحرارة لتحول المادة من الحالة الصلبة الى السائلة عند درجة انصهارها الطبيعية مثلا للماء يتطلب تحول 1 غرام من الجليد في درجة الصفر السيليزي الى ماء في نفس درجة الحرارة 80 سعرة حرارية .  $Q = ml_{12}$

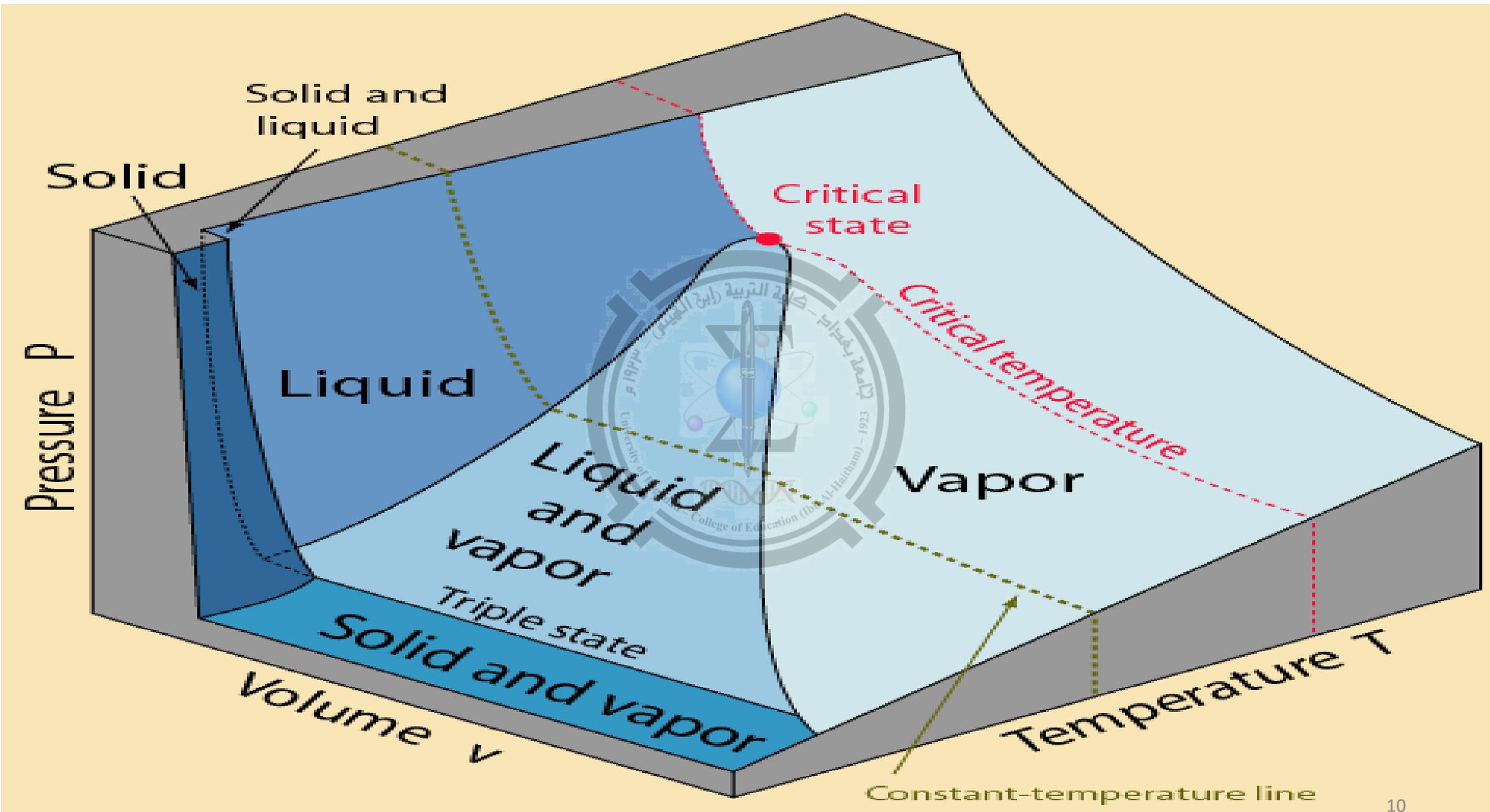
**الحرارة الكامنة للتبخير :-** وهي كمية الحرارة اللازمة لتحول المادة عند طورها السائل الى الطور البخاري عند نقطة الغليان الطبيعية فمثلا لتحول الماء من سائل درجة حرارته  $100^{\circ}\text{C}$  الى بخار بنفس الدرجة الحرارية تتطلب 540 سعرة حرارية  $Q = ml_{23}$ .

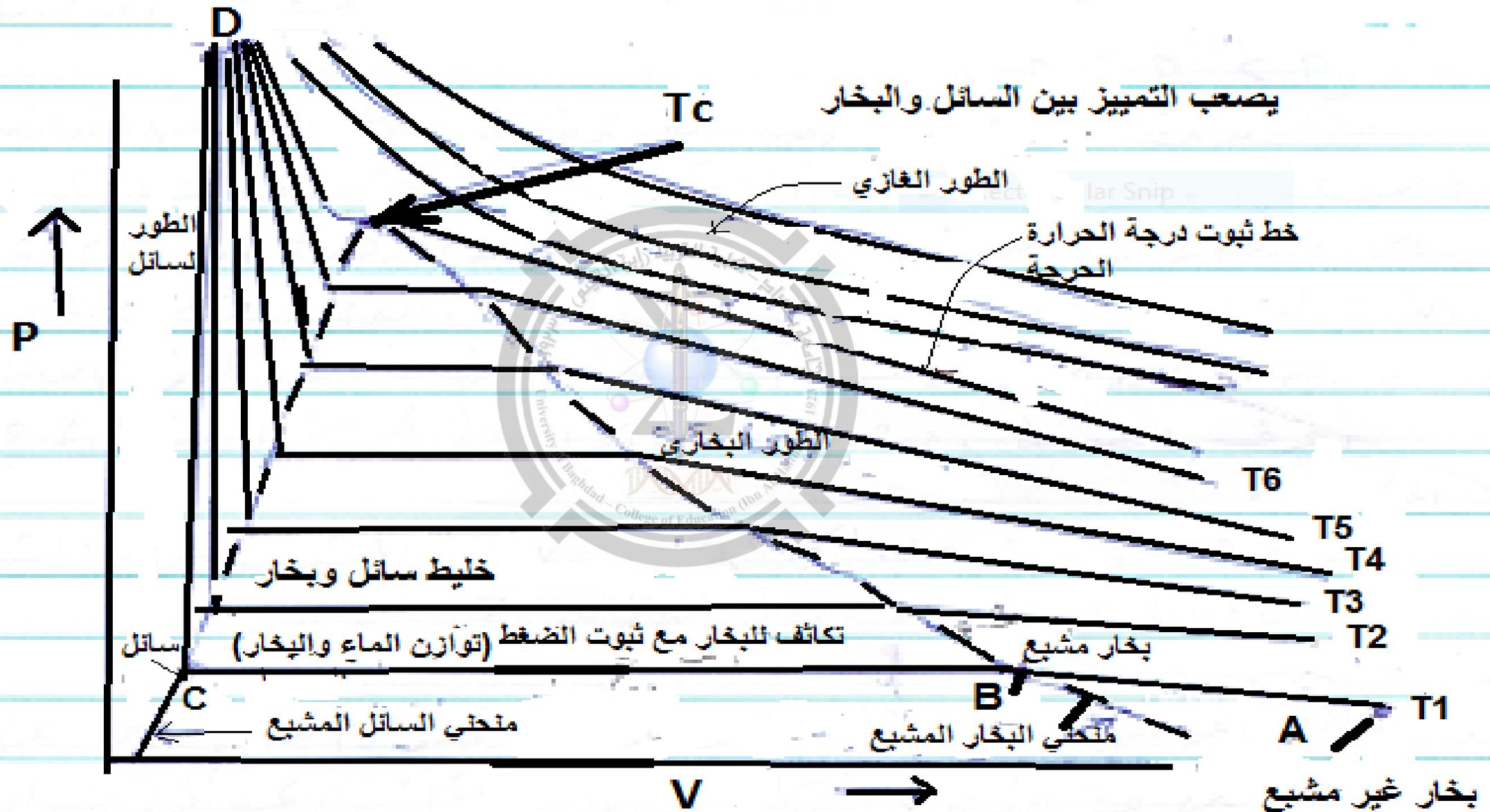
# مخطط الضغط - درجة الحرارة لمادة نقية غاز $\text{CO}_2$ :-



# مخطط الضغط - درجة الحرارة لمادة نقية غاز $H_2O$ :-







الحالة الحرجة :- هي الحالة التي لا يمكن تمييز البخار فيها عن السائل و اعلى من هذه النقطة يسلك الغاز الحقيقي سلوك الغاز المثالي .

منحني التبخر:- هو المنحني الذي يفصل الحالة السائلة عن البخارية.

منحني الانصهار:- هو المنحني الذي يفصل الحالة الصلبة عن السائلة.

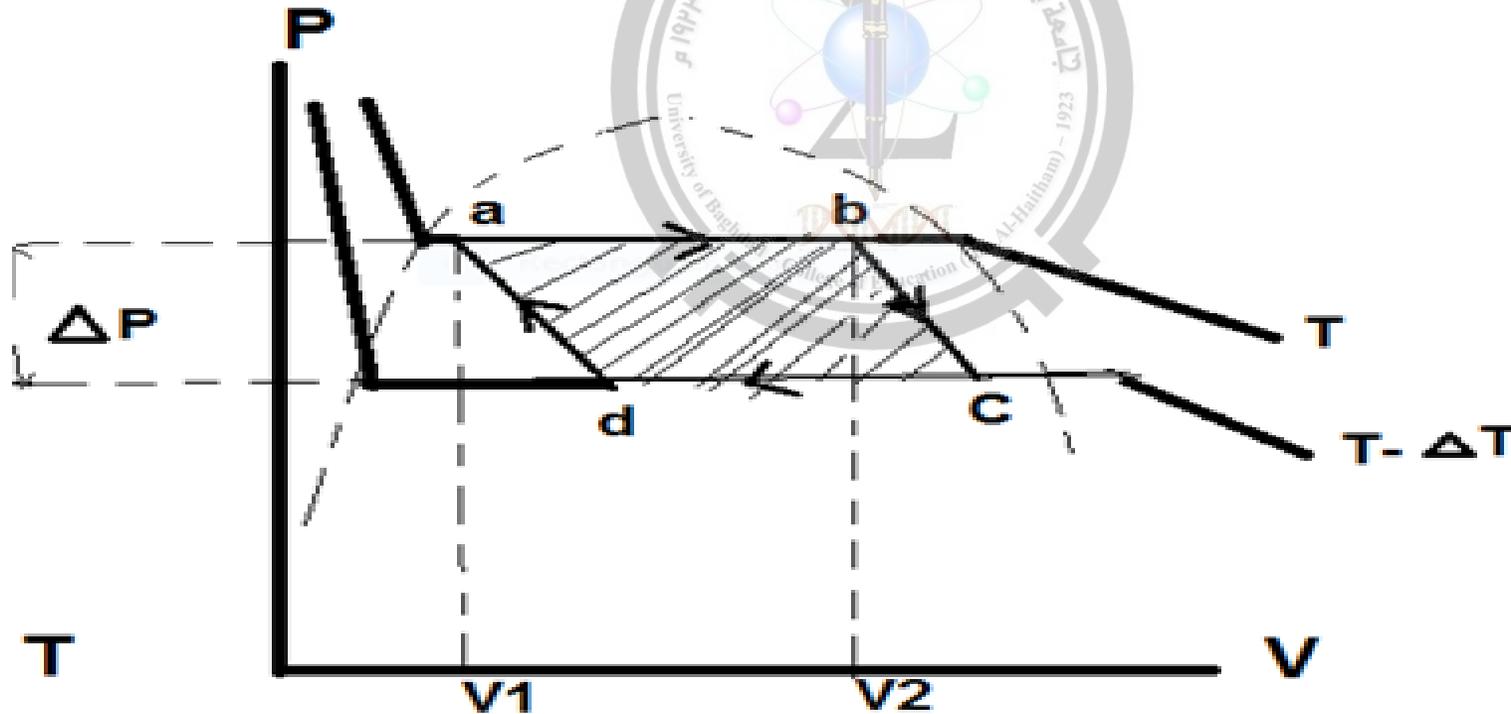
منحني التسامي :- هو المنحني الذي يفصل الحالة الصلبة عن البخارية.

ان ميل منحني التسامي والتبخير لكل المواد يكون موجبا اما ميل منحني الانصهار فيكون موجبا للمواد التي تتمدد بالانصهار وهي تمثل غالبية المواد أما المواد التي تنكمش بالانصهار مثل الماء فيكون ميل منحني الانصهار لها سالبا .

تسمى المادة غازا اذا لم يكن لها سطح حر وكان المحدد لحجمها هو حجم الاناء الحاوي لها وكانت درجة حرارتها اعلى من درجة الحرارة الحرجة اما خلاف ذلك فيسمى بخار وتعني كلمة بخار في بعض الاحيان ان الغاز في درجة حرارة اوطأ من الحرجة وتعني في احيان اخرى الغاز المتوازن مع الحالة السائلة اي بخار مشبع.

## معادلة كلاسيوس وكلايرون :-

يعبر عن الحرارة الكامنة للانصهار  $l_{12}$  والحرارة الكامنة للتبخر  $l_{23}$  والحرارة الكامنة للتسامي  $l_{13}$  ويعبر عن معادلة كلاوسيوس - كلايرون بميل منحنيات التوازن بين حالات مادة نقية كما مبين في المخطط التالي:-



نفرض وجود سائل وبخار في حالة توازن تحت ضغط  $P$  في اسطوانة موضوعة فوق مستودع حراري كبير درجة حرارته  $T$  لتبقى درجة حرارة النظام ثابتة. وتمثل النقطة (a) في الشكل السابق هذه الحالة ثم يتمدد الى النقطة  $b$  وخلال هذه العملية تتحول كتلة  $m$  من السائل الى بخار حيث تمتص كمية حرارة مقدارها  $(Q = m\ell_{23})$  ثم تجري عملية تمدد اديباتيكية صغيرة الى النقطة  $C$  وخلالها ينخفض الضغط بمقدار  $\Delta P$  وتتنخفض درجة الحرارة بقدر  $\Delta T$ .

ثم تجري على النظام عملية كبس مع بقاء درجة الحرارة ثابتة الى النقطة  $d$  واخيرا نكمل الدورة على النظام بعملية كبس اديباتيكية الى النقطة (a). اذا كانت تغيرات الضغط ودرجة الحرارة صغيرة يمكن تقريب المساحة المظللة الى مساحة مستطيل ويكون الشغل مساوي الى مساحة المستطيل.

$$W = \Delta P(V_2 - V_1) = \Delta Pm(v_2 - v_1) \dots\dots(1) \quad \text{Where } v = \frac{V}{m}$$

الحجم النوعي للسائل  $v_1$  الحجم النوعي للبخار و  $v_2$

$$\frac{W}{Q_{abs}} \dots\dots(2)$$

ان كفاءة هذه الدورة ستكون

ان هذه الدورة تمثل عملية عكوس تقارب دورة **كارنو** لذلك فان الكفاءة ستساوي

$$\frac{T_2 - T_1}{Q_{abs}} = \frac{\Delta T}{T} \dots\dots\dots 3$$

$$\frac{W}{Q_{abs}} = \frac{\Delta T}{T} \dots\dots\dots 4$$

أو بالتعويض نحصل على

وبتعويض معادلة (1) في معادلة 4 نحصل على الصيغة الآتية

$$\frac{\Delta m(v_2 - v_1)}{Q_{abs}} = \frac{\Delta T}{T} \dots\dots\dots (5)$$

بالاستعاضة عن  $dT, dP$  بـ  $\Delta P, \Delta T$  وبالأستعاضة عن  $Q = m\ell$  ستكون النتيجة كما يأتي

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\ell_{23}}{T(v_2 - v_1)} \dots\dots\dots 6.)$$

من هذه المعادلة نجد ان ميل منحنى ضغط البخار  $\frac{dP}{dT}$  يعتمد على حرارة التبخر , ودرجة الحرارة والفرق بين الحجم النوعي لكل من البخار والسائل ويمكن تطبيق هذه المعادلة على منحنيات التوازن الاخرى مع تبديل حرارة التحول بما يناسب التحويل وتغيير الحجم النوعية فتصبح المعادلة (6) بصورة عامة

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\ell}{T(v_2 - v_1)} \dots\dots\dots (7)$$

حيث  $\Delta H$  هي حرارة التحول و  $v_2, v_1$  الحجم النوعي الابتدائي والنهائي.

إذا كانت حرارة التحول موجبة ودرجة الحرارة كذلك

موجبة فإن إشارة  $\frac{dP}{dT}$  تعتمد فقط على  $(v_2 - v_1)$

فعند تحول السائل إلى بخار أو تحول الصلب إلى بخار

يكون الفرق بين الحجم النوعية  $(v_2 - v_1)$

موجبا وبذلك تكون إشارة  $\frac{dP}{dT}$  موجبة وترتفع

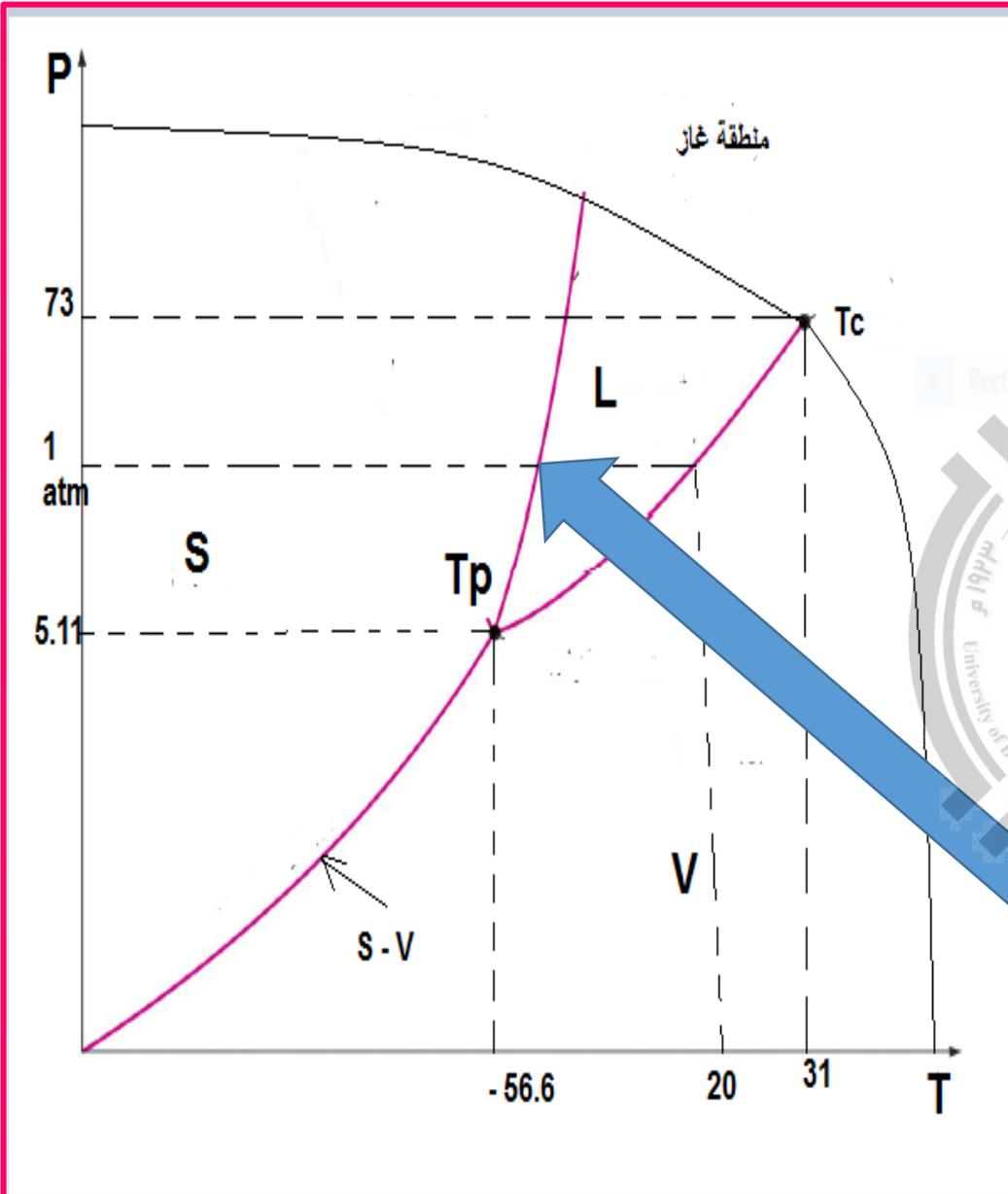
منحنيات التوازن منحدره نحو اليمين وكما ان  $(v_2$

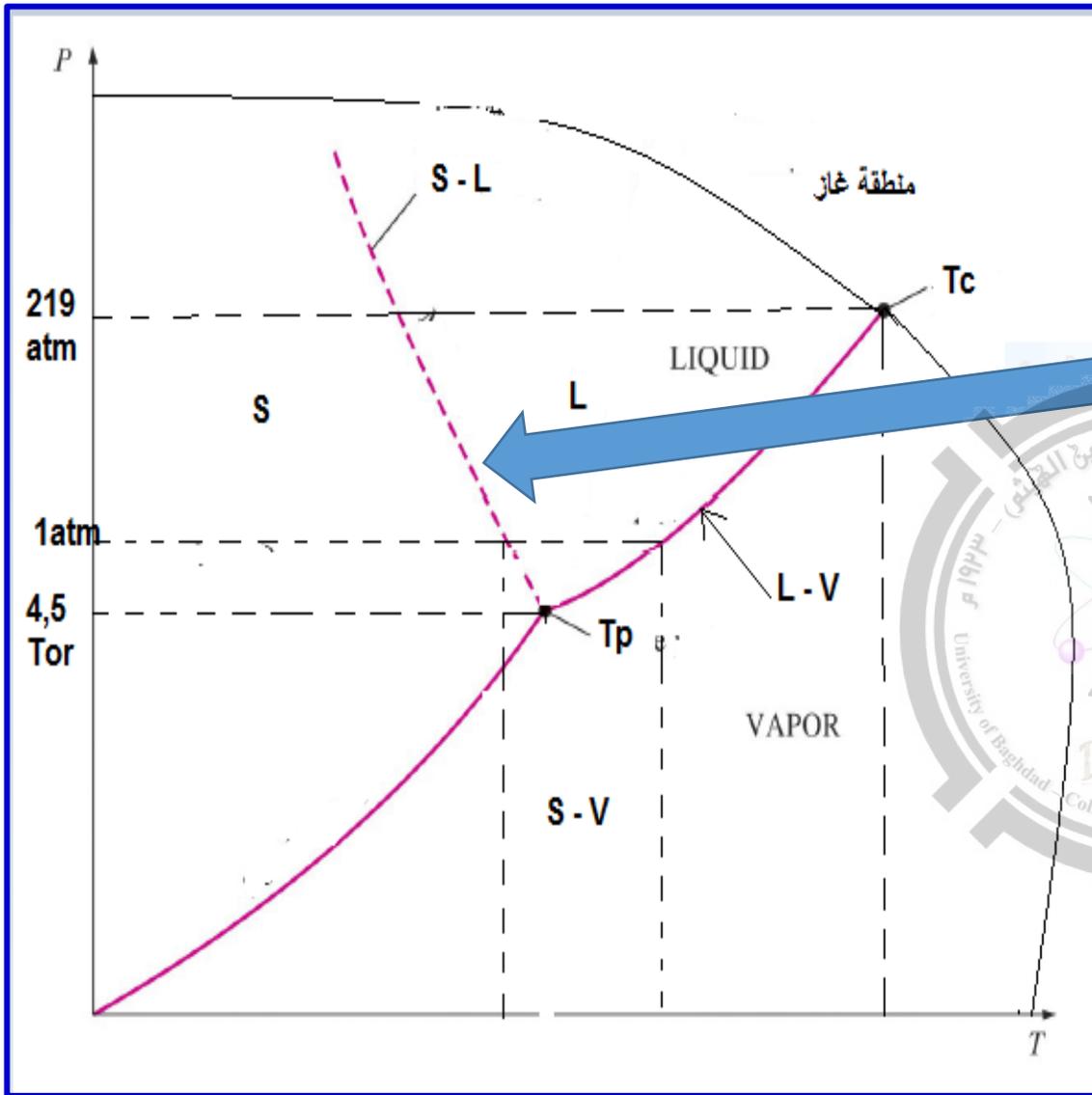
$- v_1)$  تكون موجبة للمواد التي تتمدد عند الانصهار

مثل  $CO_2$  حيث يرتفع منحنى توازن ( الصلب -

السائل ) مائلا متجها نحو اليمين كما في الشكل

المجاور .





اما المواد التي تتقلص عند الانصهار كالماء فان  $(v_2 - v_1)$  تصبح سالبة وان  $\frac{dP}{dT}$  سالبة لذلك يكون منحنى التوازن السابق (الصلب - السائل) يرتفع مائلا متجها نحو اليسار كما في الشكل المجاور.

# الفصل السادس



## القانون الثاني في الترموداينميك والمكائن الحرارية

القانون الاول للترموداينميك (شرح لمبدأ حفظ الطاقة فهو القانون الذي يدرس العلاقة بين الطاقة الحرارية التي يكتسبها ، أو يفقدها النظام ، والشغل الذي يبذله النظام أو المبذول عليه ، التغير في الطاقة الداخلية للنظام). **اولا بان يكون الشغل الصافي للآلة الحرارية مساويا للمجموع الجبري لكميات الحرارة الداخلة والخارجة ، الا ان التجارب اثبتت ان هناك دوما ضياع في الطاقة اي ان الشغل الصافي الناتج يكون دائما اقل من من الحرارة المزودة للنظام اي ان هناك حرارة مبددة لاتشارك في انجاز الشغل . اما الشرط الثاني فيتعلق بانه لايمكن انتاج شغل مفيد من اي نظام مالم يكن هناك فرق بين درجتي حرارة المصدر (المستودع ) الحراري والمستقبل الحراري.** القانون الاول للترموداينميك لا يهتم لاتجاه العملية وانما يهتم فقط بتحول الطاقة في صورة اخرى مع بقاؤها محفوظة , اما القانون الثاني فلاتجاه العملية تاثير كبير حيث لا يتم نقل الحرارة من مستودع بارد  $Q_C$  الى مستودع حار  $Q_H$  بعملية تلقائية بدون انجاز شغل بينما العملية المعكوسة من حار الى بارد تحصل تلقائيا .

**الالة الحرارية:-** هي عبارة عن تصميم ميكانيكي يقوم بامتصاص كمية من الحرارة وينجز شغل بشكل دورات ولكي يكون الشغل مستمر يجب ان تتكرر الدورة . ان ابسط آلة حرارية هي مكبس يحتوي على غاز وتحت المكبس مستودع  $Q_H$  لكي يتمدد الغاز فيدفع المكبس ثم يستبدل بمستودع بارد  $Q_C$  فينكمش الغاز فينزل المكبس الى وضعه الاصلي.

**المستودع :-** عبارة عن خزان ذو كتلة كبيرة تبقى درجة حرارته ثابتة مهما اخذت او اضيفت له حرارة.

هناك أكثر من صيغة للقانون الثاني للثرموداينميك حيث يعد كل منها وجه آخر للقانون ولكن جميعها متكافئة مع بعضها ومن هذه الصيغ

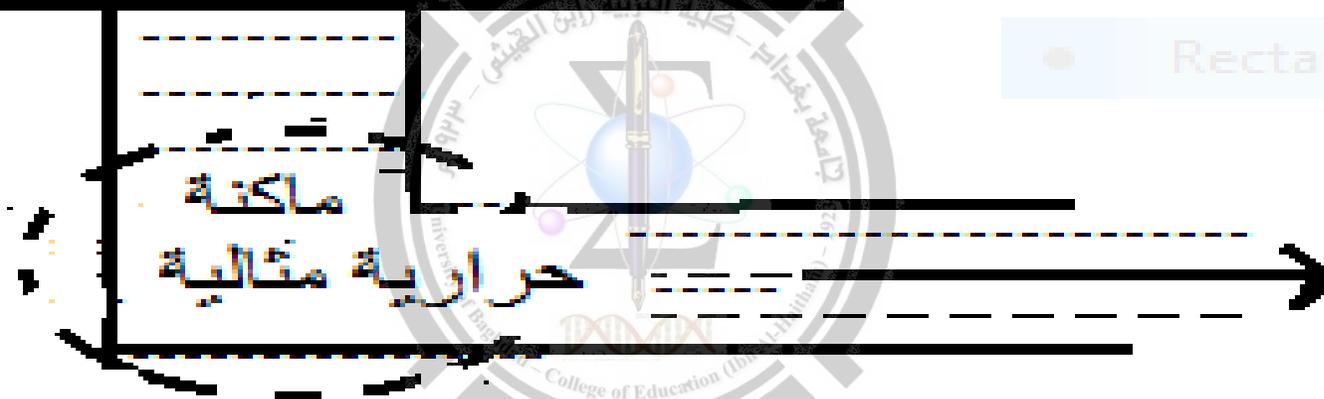
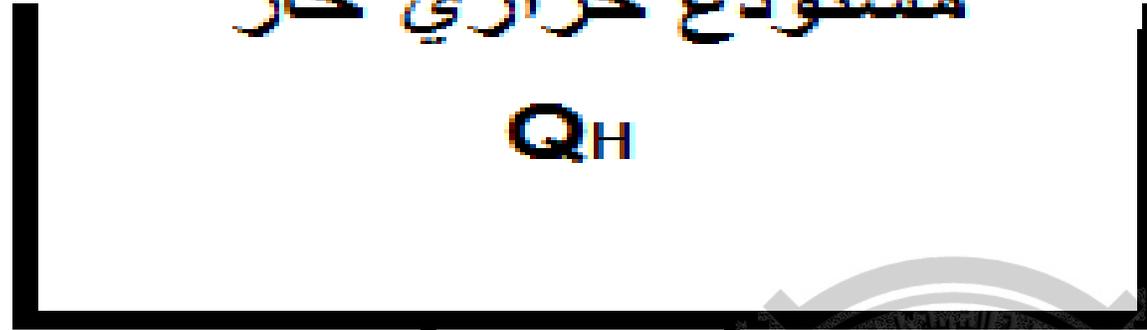
صيغة كلفن – ماكس بلانك من المستحيل اجراء عملية دورية تؤخذ فيها حرارة من مستودع وتحول الى شغل دون نقل حرارة في الوقت نفسه من مستودع ساخن الى مستودع بارد

الصيغة الثانية ( كلازيوس ) :

(( من المستحيل ان تنتقل حرارة من مستودع بارد الى مستودع ساخن دون ان تتحوّل في نفس الوقت كمية معلومة من شغل الى حرارة )) . ويمكن توضيح ذلك بعمل الثلجة الكهربائية .

مستودع حراري حار

$Q_H$



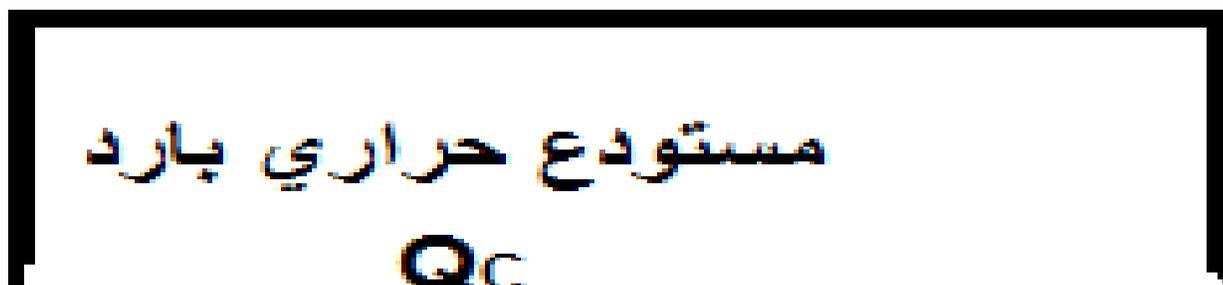
مكانة  
حرارية مثالية

● Rectangular Snip

$W=Q_H$

مستودع حراري بارد

$Q_C$



أو تنص الصيغة الثانية: على انه لايمكن حدوث عملية تكون نتيجتها الوحيدة نقل حرارة من مستودع بارد الى مستودع حار .

ان الجهاز الذي يقوم بنقل الحرارة من جسم بارد الى جسم ساخن يسمى الثلجة لذلك فصيغة كلاوسيوس تعني يستحيل صنع ثلجة تعمل ذاتيا بنقل الحرارة بصورة مستمرة بنقل الحرارة من جسم بارد الى اخر حار ولاتولد تاثيرات خارجية

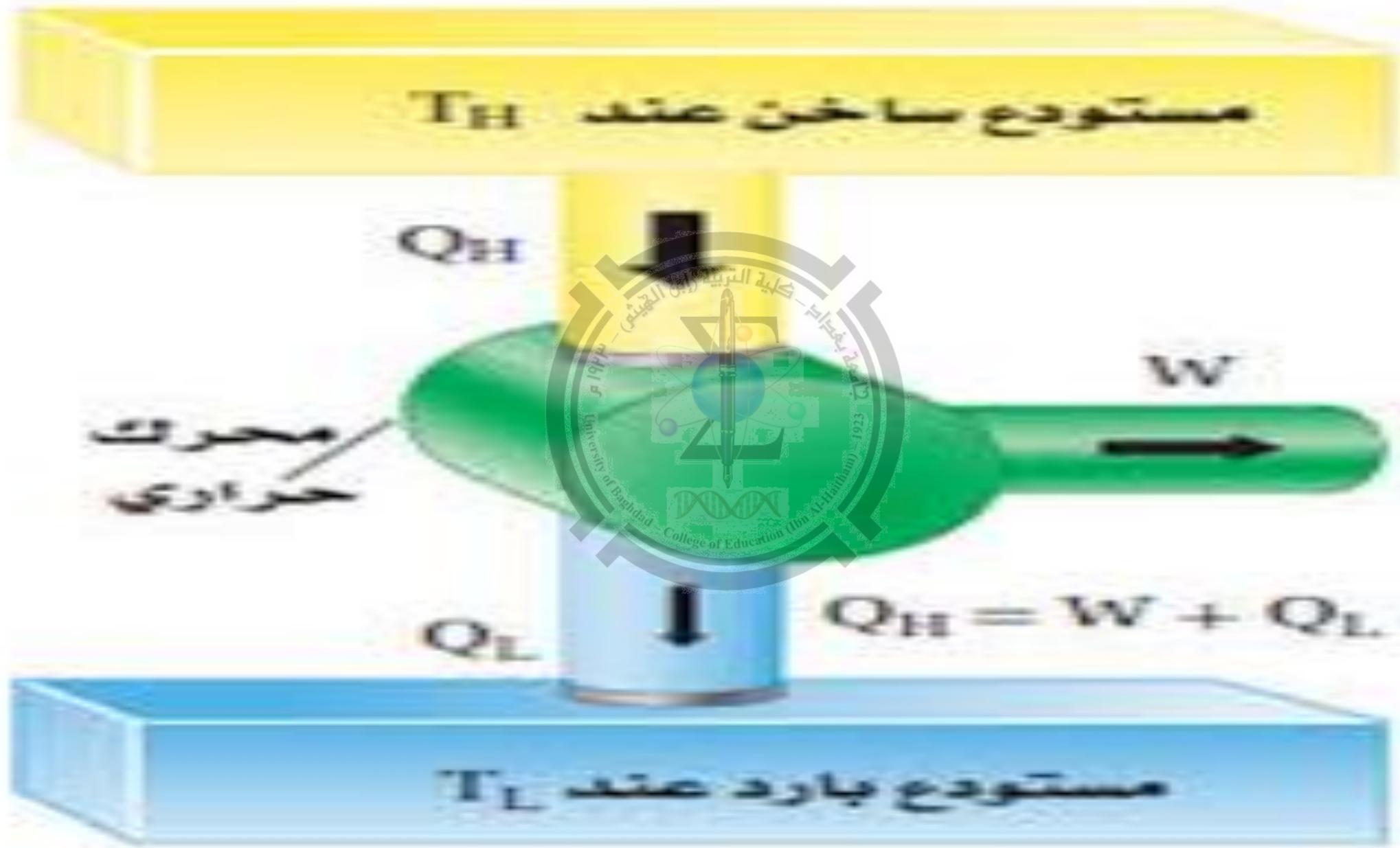
مستودع حراري حار

$Q_H$



مستودع حراري بارد

$Q_C$

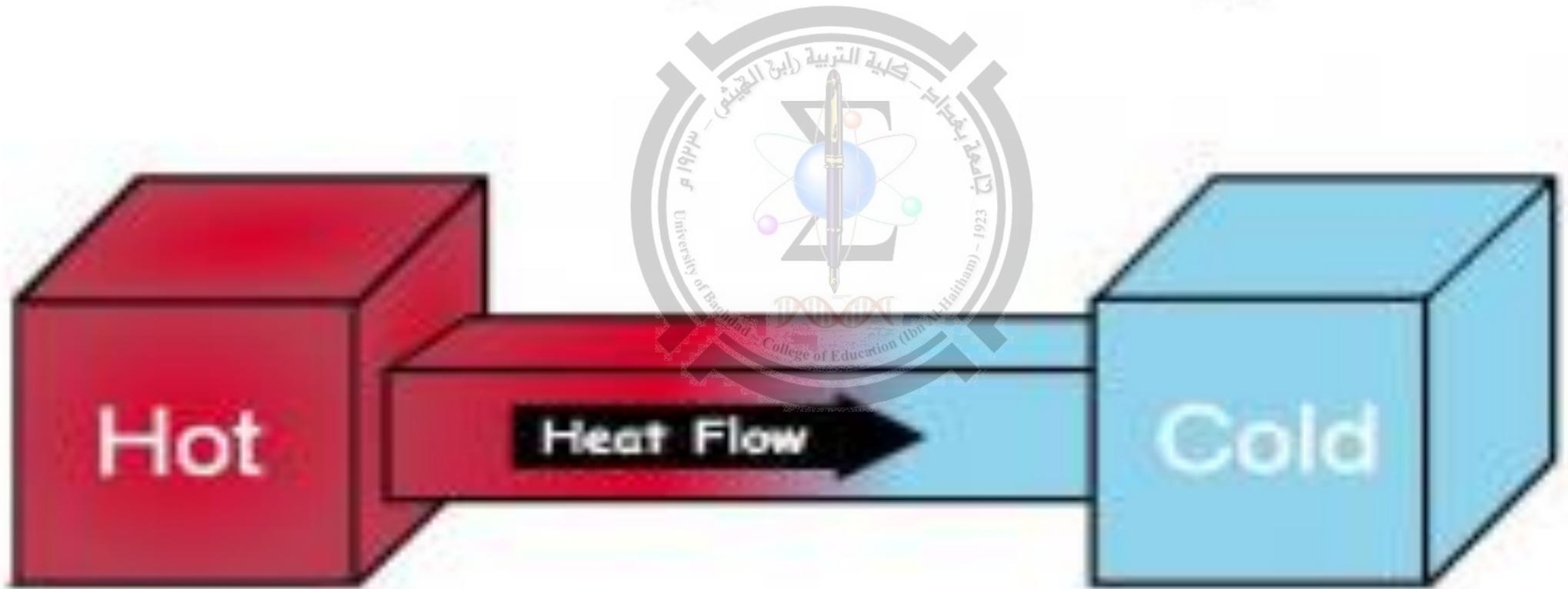


المستودع الساخن



المستودع البارد

# Second law of Thermodynamics



ما يؤكد القانون الثاني في الترموداينميك هو استحالة صنع مثل هذه الماكنة اي لايمكن تحويل الحرارة الى شغل بدون بعض التأثيرات الاخرى على المحيط.

ان صيغتي القانون متكافئتان بالرغم من معاكسة احدهما الاخرى لكنهما تؤكدان على استحالة تحويل جميع الحرارة الى شغل مفيد وهذا هو جوهر القانون الثاني للترموداينميك .

ان اساس اشتغال اي ماكنة حرارية يتوقف على فرق درجات بين مستودعين حراريين وبادخال ماكنة حرارية في مسار جريان الحرارة عندئذ نستطيع تحويل الحرارة الى شغل مفيد , اما اذا ارغمنا الحرارة على الانتقال من مستودع بارد الى مستودع حار فيجب هنا ان نبذل جهد لاستمرار الجريان الحراري

## دورة كارنو

تمثل دورة كارنو دورة حرارية نظرية لها انعكاس كبير في الترموداينمك حيث أنها تعطي الحد الأقصى للحصول على الشغل من خلال دورة حرارية تعمل بين درجتين مختلفتين للحرارة. وبواسطة دورة كارنو يمكن حساب الكفاءة الحرارية لآلة معينة. ومثال على ذلك آلات الاحتراق الداخلي حيث يدخل خليط الوقود والهواء المكبوس، ثم يحترق الخليط بفعل الشرارة الكهربائية الصادرة من شمعة الاحتراق. فيندفع المكبس لتشغيل الآلة. وبتناوب عمل المكابس تشتغل الآلة وتنتج شغلا مثل حركة السيارة. وتقاس كفاءة أي آلة بمقارنتها بدورة كارنو.

تتألف ماكنة كارنو المثالية من مكبس يتحرك بحرية داخل اسطوانة وان المكبس وجدران الاسطوانة غير موصلة للحرارة عدا قاعدتها التي تكون موصلة جيدة للحرارة , وتحوي الاسطوانة مادة التشغيل وهي مائع . وتعتبر دورة كارنو من اكفاً الوحدات وتتألف من اربع عمليات عكوسة ومتسلسلة

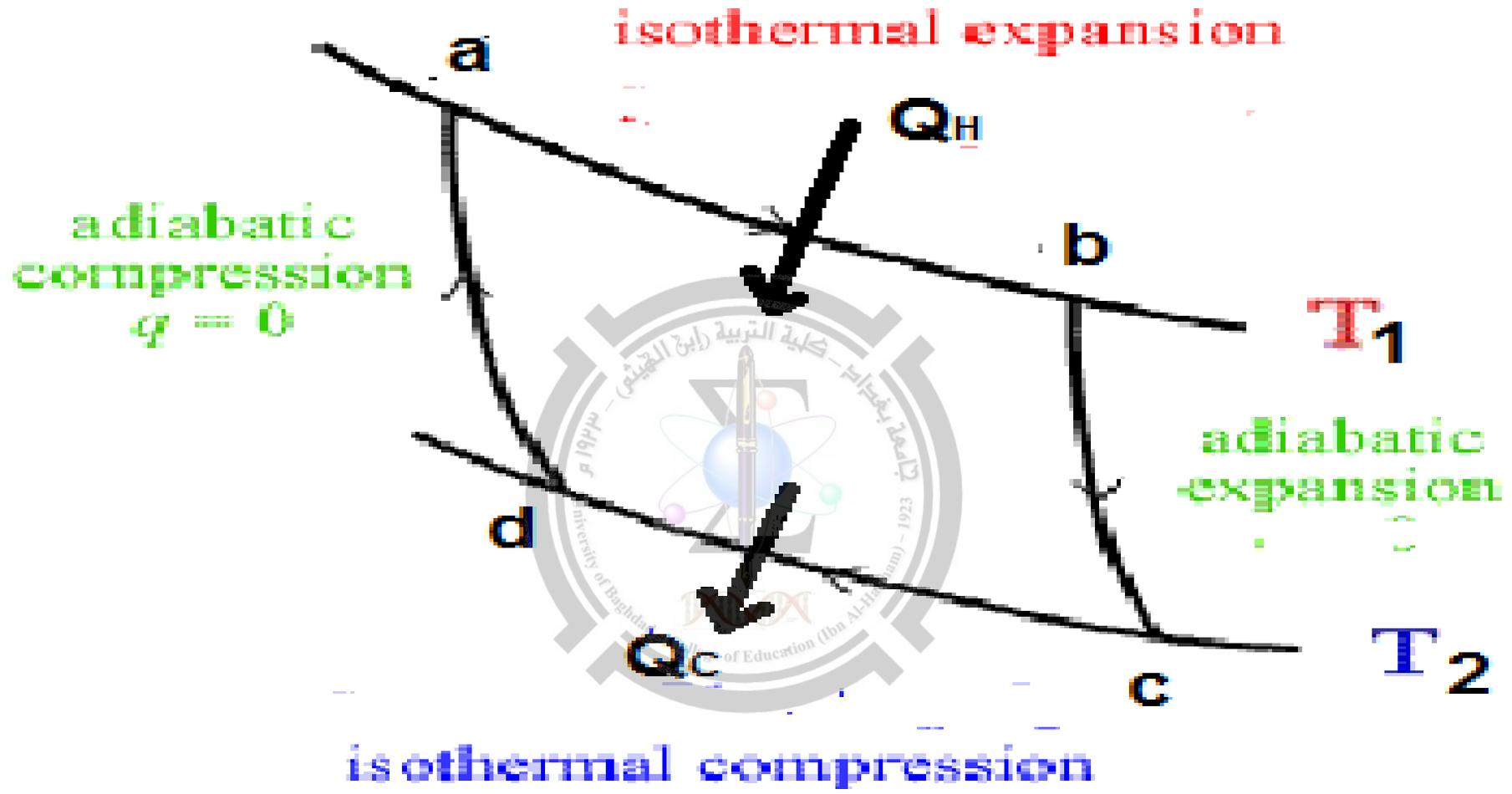
عملية ايزوثرمية : توضع الاسطوانة فوق مستودع حراري درجة حرارته عالية  $T_1$  فتمتص الحرارة  $Q_H$  من المستودع وتتمدد على المسار a الى b فتتجز شغل مع بقاء درجة الحرارة ثابتة  $T_2$ .

عملية اديباتيكية : توضع الاسطوانة فوق مسند عازل ويستمر تمدد المادة على المسار b الى c فتتجز شغلا اديباتيكية وتنخفض درجة الحرارة المادة المشغلة الى  $T_1$ .

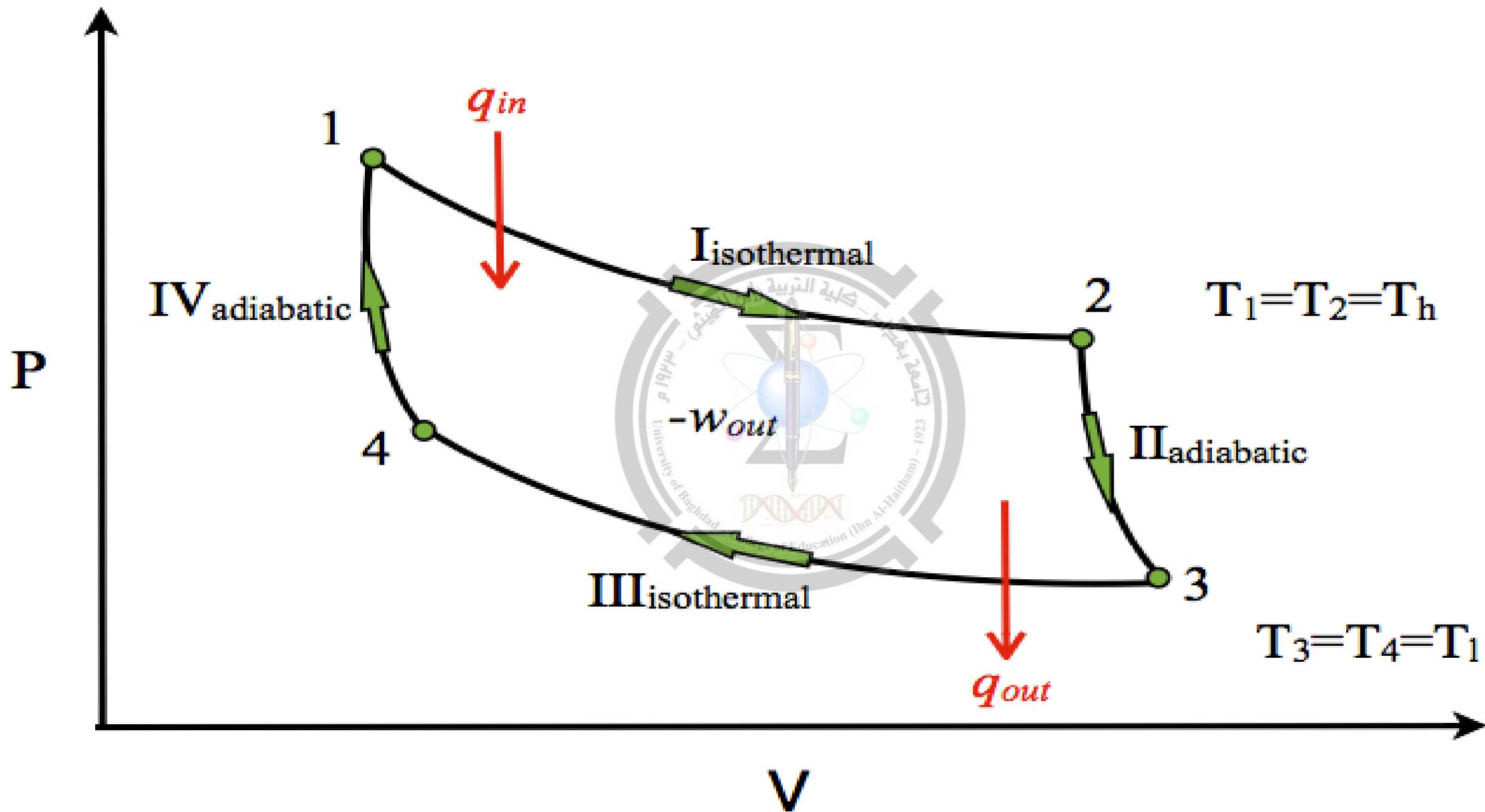
عملية ايزوثيرمية : تنقل الاسطوانة فتوضع فوق مستودع درجة حرارته واطئة  $T_1$  وتكبس فيقل حجمها وينجز عليها شغلا وتلفظ حرارة  $Q_C$  الى المستودع البارد وفقا للمسار c الى d.

عملية اديباتيكية : تعاد الاسطوانة فوق المسند العازل وتستمر عملية الكبس فيقل الحجم وينجز شغلا على المادة فترتفع حتى تصل الى  $T_2$  كما كانت كما كانت عليه اولا ويمثل المسار d الى a هذه العملية وهكذا تستمر الدورة كما في الشكل

P

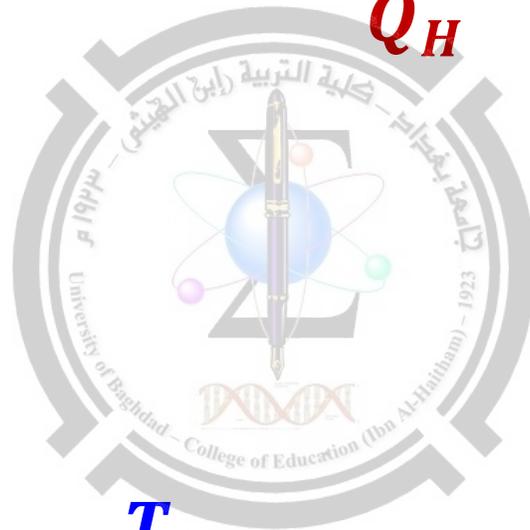


V



ويعبر عن الكفاءة لاي دورة حرارية بالقانون:-

$$\eta = \frac{\text{الشغل المنجز}}{\text{الحرارة المجهزة}} = \frac{W}{Q_H} \times 100\% = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \times 100\%$$
$$= 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \times 100\%$$



$$\eta = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \text{ As } T_2 < T_1$$

إذا عبرنا عن دورة كارنو باتجاهات متعاكسة أي باتجاه معاكس لعقرب الساعة فإن الحرارة تمتص عند التمدد  $d$  إلى  $c$  وتلفظ عند الانكباس من  $b$  إلى  $a$  ويعمل النظام كثلاجة تمتص الحرارة من المستودع المنخفض الحرارة وتلفظ إلى المستودع المرتفع درجة الحرارة , وبما ان الدورة الاصلية عكوسة فيمكن عكس جميع مراحلها مع تغيرات طفيفة جدا في درجة الحرارة والضغط . لكل نقطة وتكون مقادير  $Q_H$  و  $Q_C$  و  $W$  نفسها للدورة الاصلية ومعكوسها ونظرية كارنو هي احدى نتائج القانون الثاني للثرموداينميك

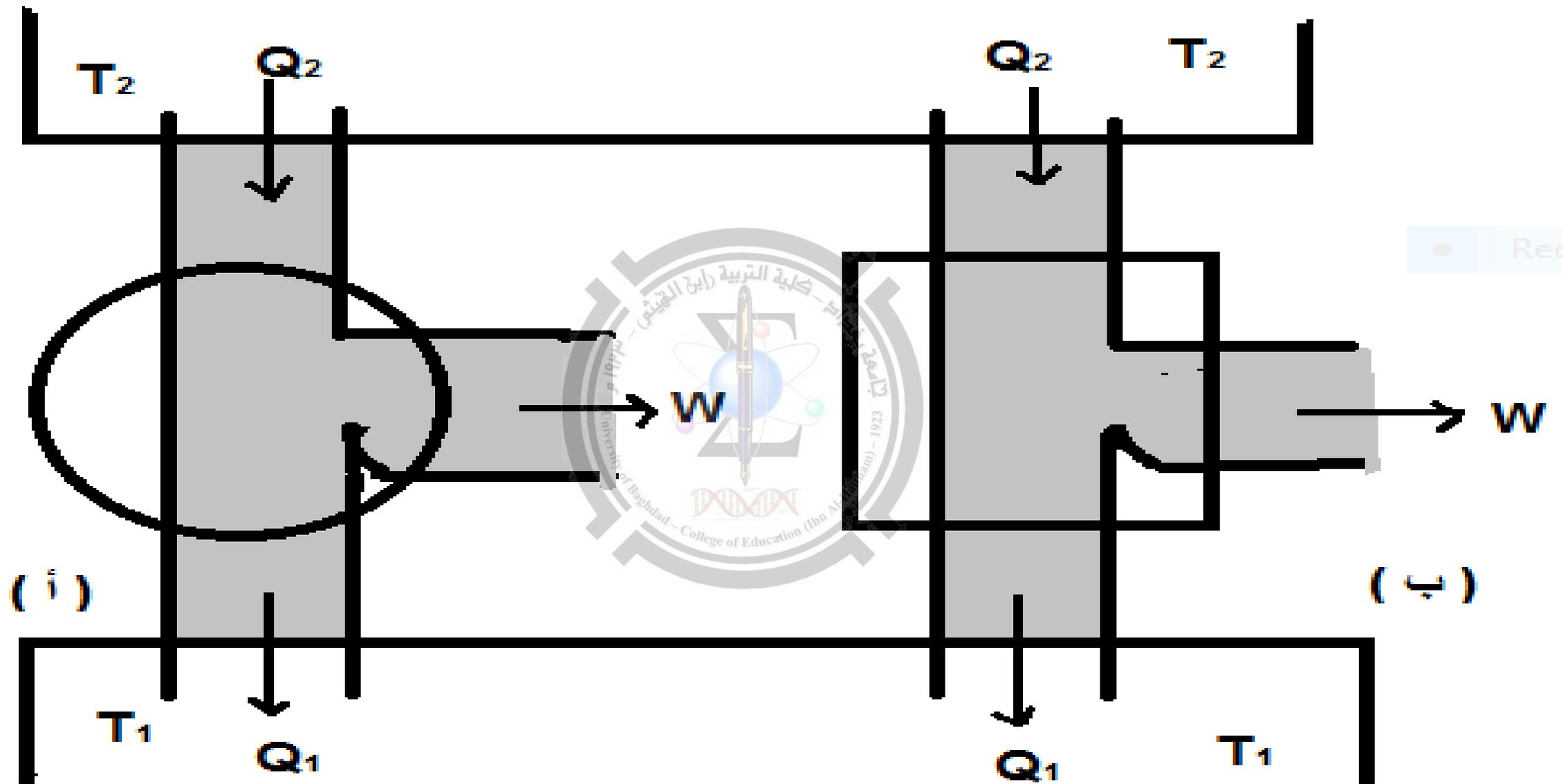


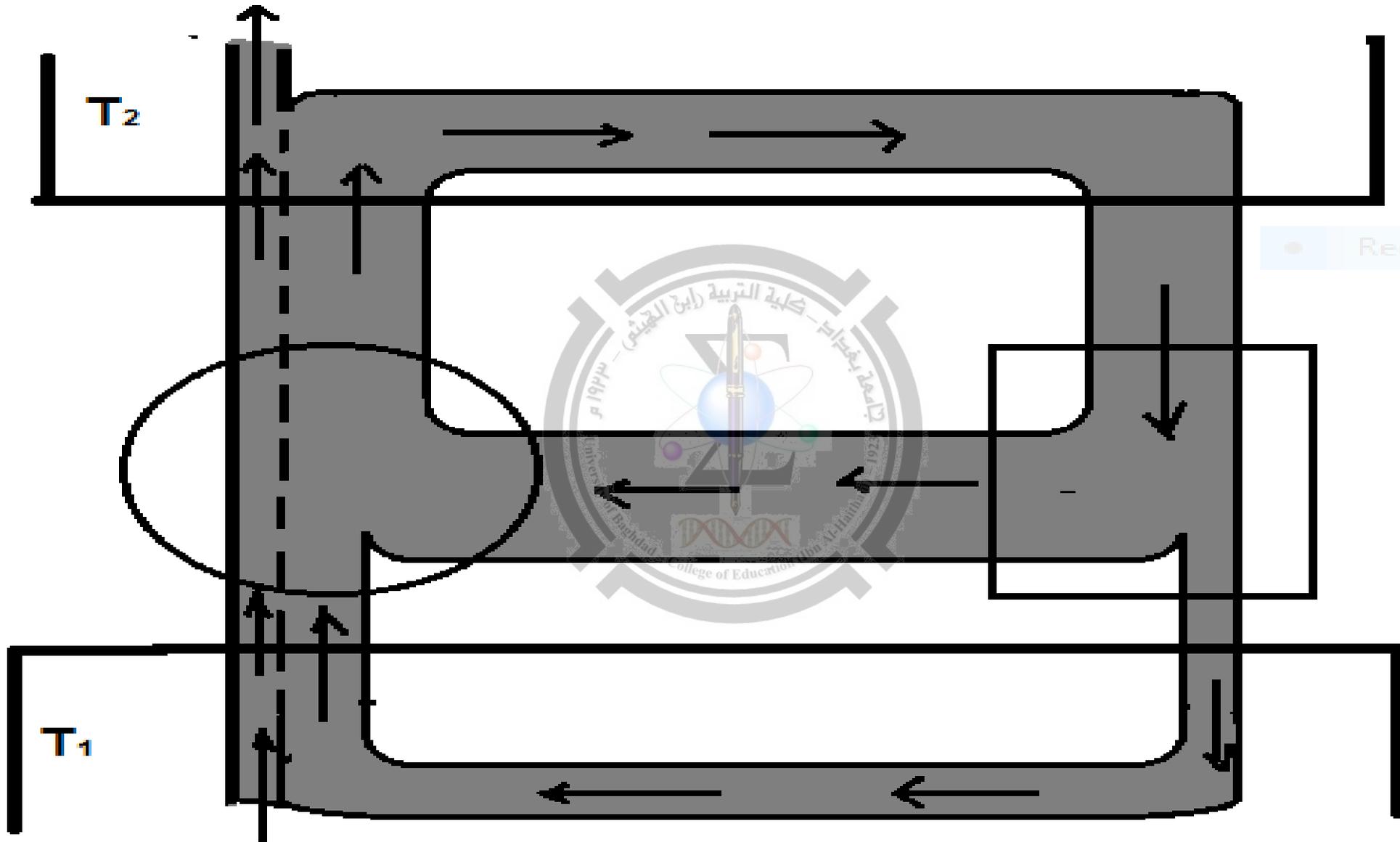
ويمكن كتابة نص القانون الثاني كمايلي:-

1. لا يمكن لأي ماكينة تعمل بين مستودعين حراريين ان تمتلك كفاءة اكبر من كفاءة ماكينة عكوسة تعمل بين نفس المستودعين.
2. الكفاءة الحرارية لجميع المكين العكوسة التي تعمل بين مستودعين حراريين محددتين واحدة.

## لا توجد ماكينة كفاءتها اعلى من كفاءة ماكينة كارنو :-

لو فرضنا ان هناك ماكينة كفاءتها اعلى من ماكينة كارنو وهي ممثلة بالمستطيل في الشكل الآتي والتي تسحب الحرارة من المستودع الحار  $Q_H$  وتلفظ الحرارة في مستودع بارد  $Q_C$  بعد انجازها لشغل مقداره  $W$ . حين نفرض انها تاخذ حرارة اقل مما تاخذ ماكينة كارنو المتمثلة بالدائرة لانجاز نفس الشغل وتلفظ كمية حرارة اقل في المستودع البارد مما تلفظه ماكينة كارنو. فلو عكس عمل ماكينة كارنو لاصبحت ثلاجة دون ان تتغير المقادير  $Q_H, Q_C, W$  وربطت مع الماكينة التي كفاءتها اكبر من ماكينة كارنو كما في الشكل الاخير, سنلاحظ من المخطط ان احدهما تشغل الثانية وتكون صافي النتيجة انتقال حرارة من المستودع البارد الى المستودع الساخن وهذا يناقض نص كلاوسيوس للقانون الثاني للثرموداينميك لذا فان كفاءة الماكينة المفروضة لايمكن ان تكون اكبر من كفاءة الماكينة العكوس.





## المكائن الحرارية

ان الماكنة الحرارية هي نظام ثرموداينميكي يعمل بشكل مستمر بحيث تضاف اليه حرارة ويستخرج منه شغل ويمر النظام الذي يؤلف هذه الماكنة خلال سلسلة عمليات تشكل مايسمى الدورة . والمكائن الحقيقية تعمل دائما بين مستودعين احدهما ساخن والاخر بارد وتقوم الماكنة بامتصاص الحرارة  $Q_H$  وتلفظ قدر اخر من الحرارة  $Q_C$  الى المستودع البارد وتنتج شغل كما في الشكل



## دورة الماكنة الحرارية

يفترض في المكنن الحرارية المثالية ان المادة المشغلة تعمل في دورة مغلقة وتتم عملياتها داخل اسطوانة الماكنة ولا يتم تزويد الماكنة بالمادة المشغلة عند نهاية كل دورة . تتزود المادة المشغلة بالحرارة من مصدر خارجي وتمر بعمليات متتالية واخيرا تعود الى حالتها الابتدائية. إن أية دورة مثالية لابد ان تتضمن العمليات الآتية:-

1. عملية ايزوثيرمية (ثبوت درجة الحرارة)

2. عملية اديباتيكية اي لا تبادل حراري

3. عملية ثابتة الحجم ( ايزوكوريك )

4. عملية ثابتة الضغط ( ايزوكوريك )

ان التغير في الطاقة الداخلية عند نهاية كل دورة يساوي صفر لذلك فان القانون الاول للثرموداينميك يصبح بالشكل الاتي:

$$dQ = dW + (dU = 0) \Rightarrow dQ = dW \Rightarrow Q_H - Q_C = W$$

اي ان الشغل الميكانيكي الناتج يساوي الفرق بين الحرارة المجهزة للماكنة والحرارة التي تلفظ للخارج. ويعبر عن كفاءة الالة الحرارية كالآتي:-

$$\eta = \frac{\text{الشغل المنجز}}{\text{الحرارة المجهزة}} = \frac{W}{Q_H} \times 100\% = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \times 100\%$$
$$= 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \times 100\%$$

ومن ملاحظة الشكل الاتي ستكون اكفاً ماكنة حرارية هي التي لها اوسع انبوب جانبي فرعي اي التي تنتج اكبر شغل واطيق انبوب تفرغ.

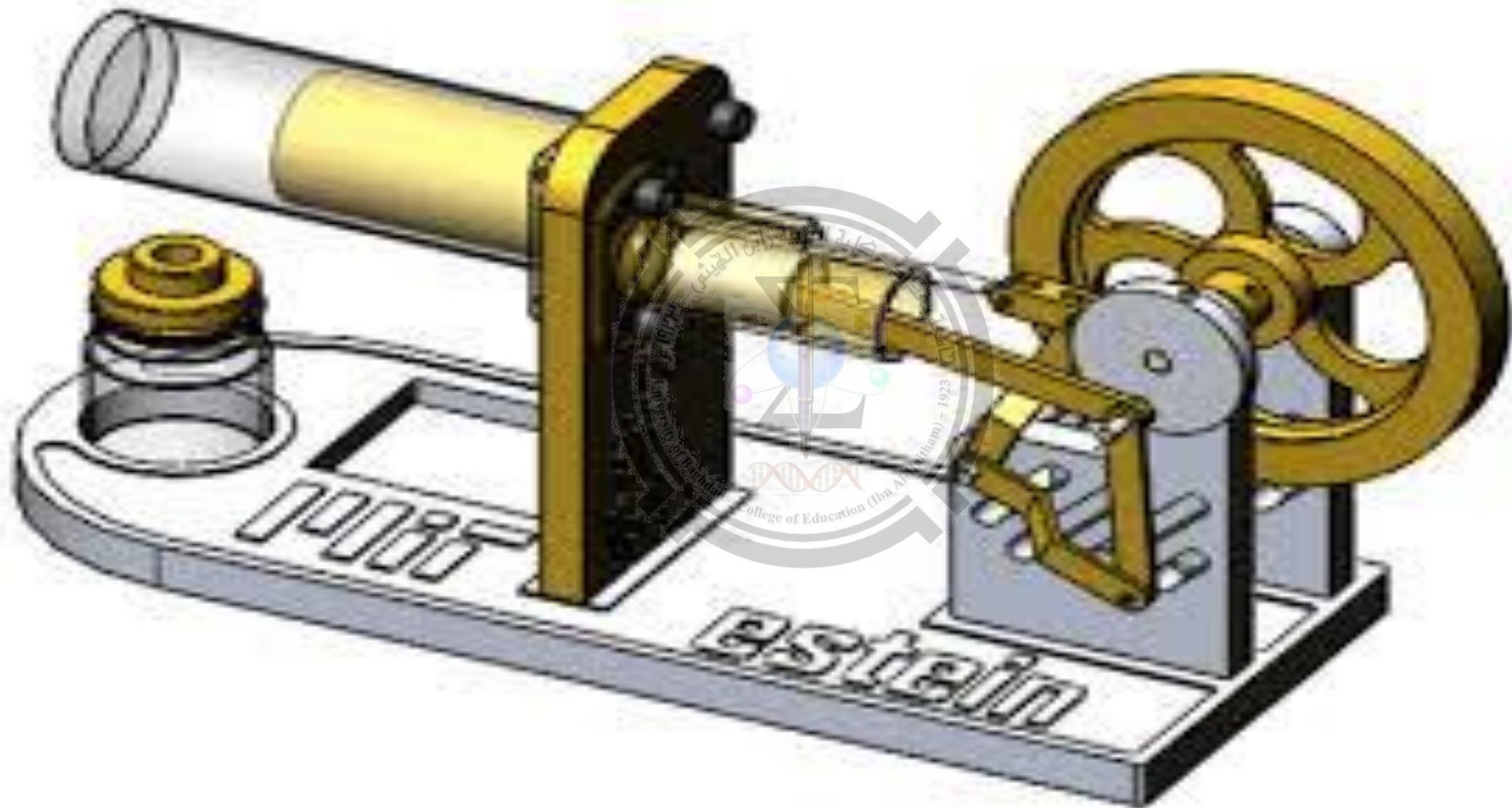


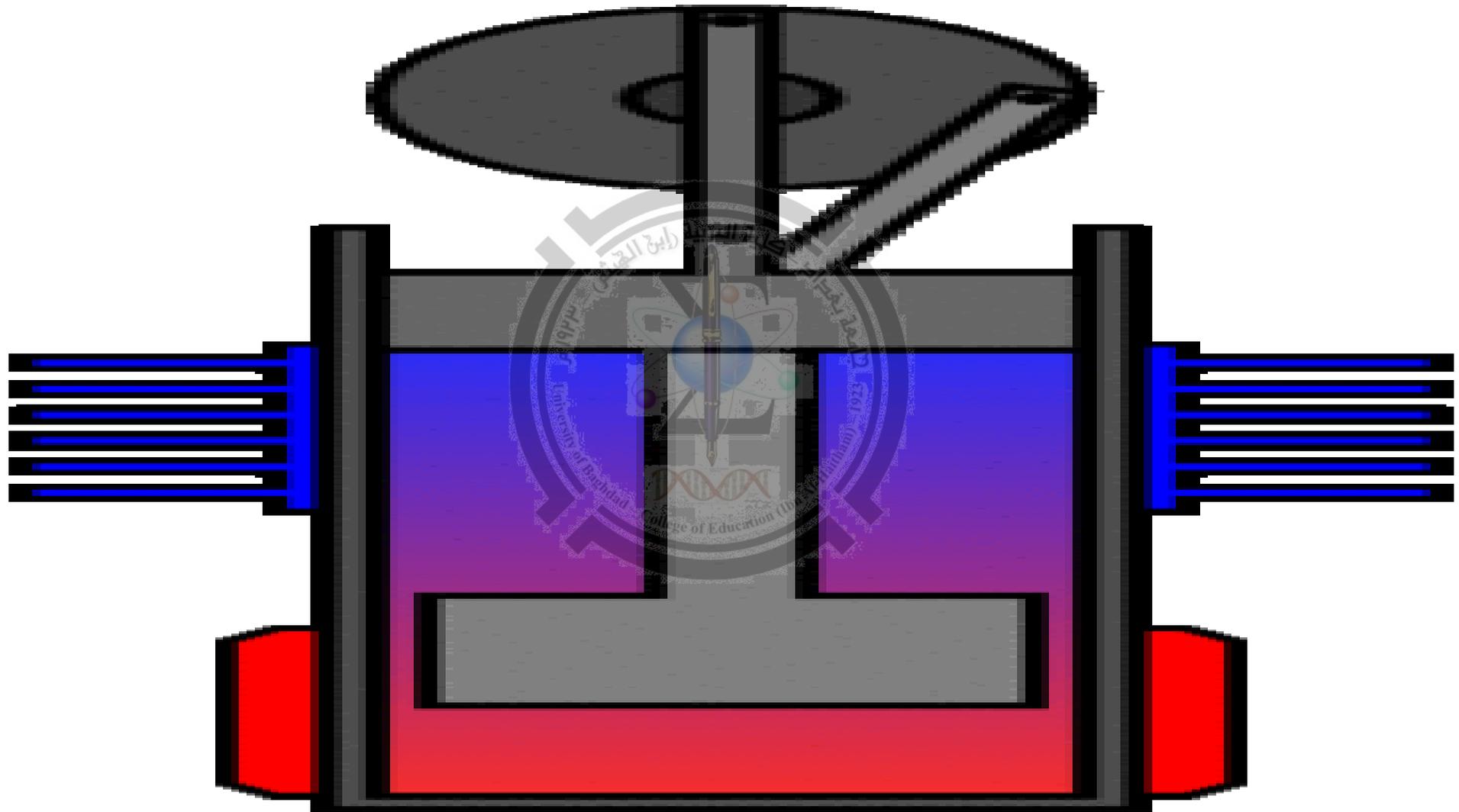
## انواع المكائن الحرارية :-

أ- المكائن ذات الاحتراق الخارجي ومنها المكائن البخارية حيث يتم رفع الضغط ودرجة الحرارة في فرن خارجي مثل الماكينة البخارية وماكينة سترلنك.

ب- المكائن ذات الاحتراق الداخلي حيث يجري رفع الضغط ودرجة الحرارة من تفاعل كيميائي بين الوقود والهواء داخل الاسطوانة نفسها مثل مكائن الديزل ومكائن الكازولين.

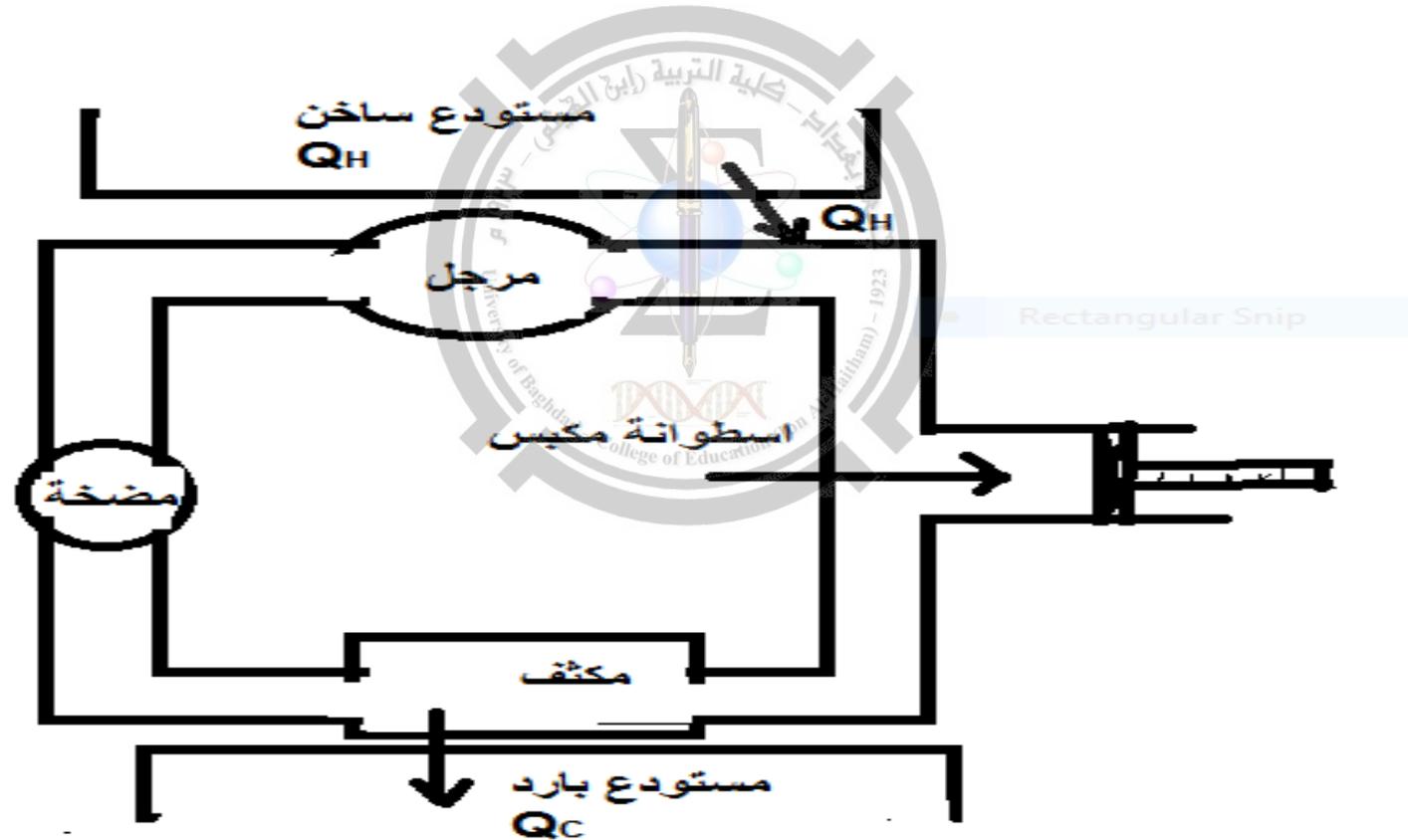
تتم الدورة في نوعي المكائن باستخدام غاز او مزيج من الغاز والهواء داخل اسطوانة مزودة بمكبس متحرك ويرفع الضغط ودرجة الحرارة للغاز في بعض مراحل الدورة.





## مكائن الاحتراق الخارجي (المكائن البخارية):-

في الشكل الاتي تصميم ماكينة بخارية بسيطة حيث تواجه هذه المكائن عدة صعوبات منها :-

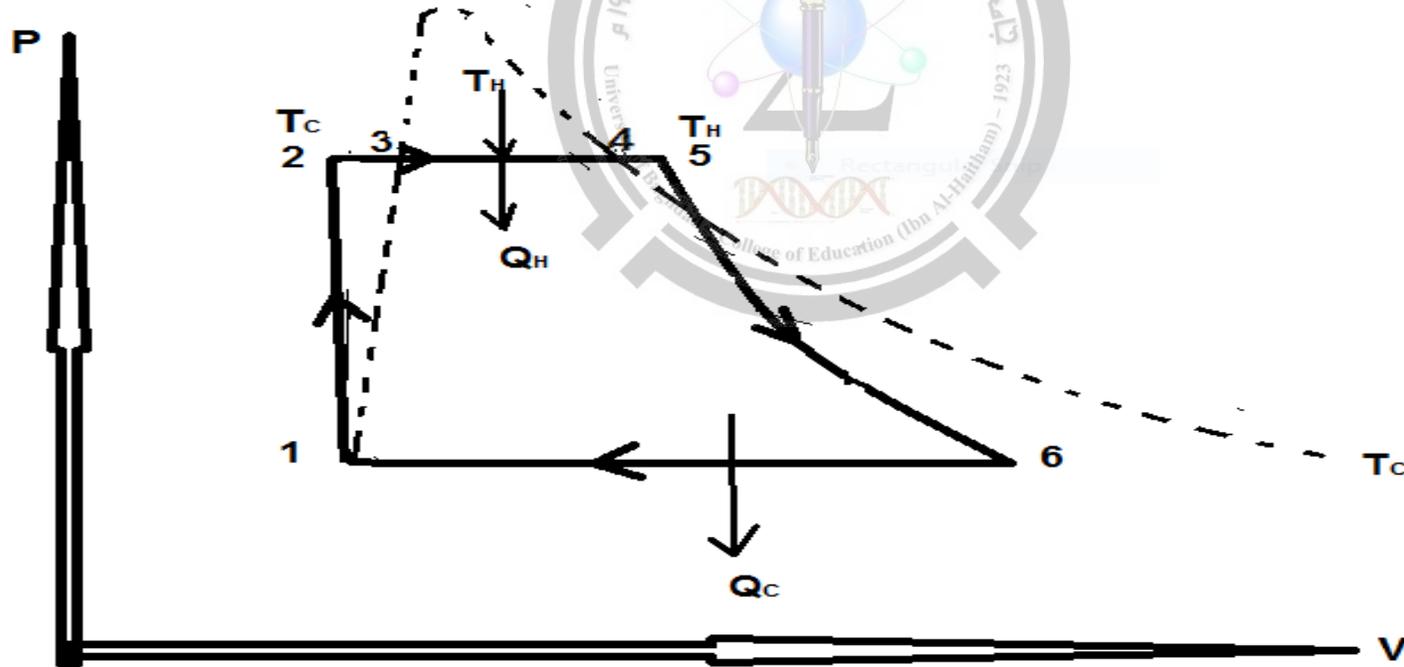


## 1- الاحتكاك

2- التوصيل الحراري من خلال الجدران اثناء تمدد البخار .

3- انتقال الحرارة العكسي نتيجة الفرق بين مصدر الحرارة (الفرن) والمرجل.

4- التعجيل والاضطراب المتسببين عن اختلاف الضغط المطلوب لجريان البخار من جزء الى اخر.



تتكون دورة المكائن البخارية من ست مراحل كما ممثلة بالشكل السابق وهي:-

1. من 1 الى 2 انضغاط اديباتيكي للماء الى ضغط المرجل بدرجة حرارة  $T_C$  وهنا يحدث تغير طفيف جدا في درجة الحرارة.

2- من 2 الى 3 تسخين للماء عند ثبوت الضغط حتى يصل الى نقطة الغليان .

3- من 3 الى 4 تبخير للماء عند ثبوت الضغط ودرجة الحرارة حتى يتحول الى بخار مشبع .

4- من 4 الى 5 رفع درجة حرارة البخار بحيث يصبح فوق المسخن . **superheating**

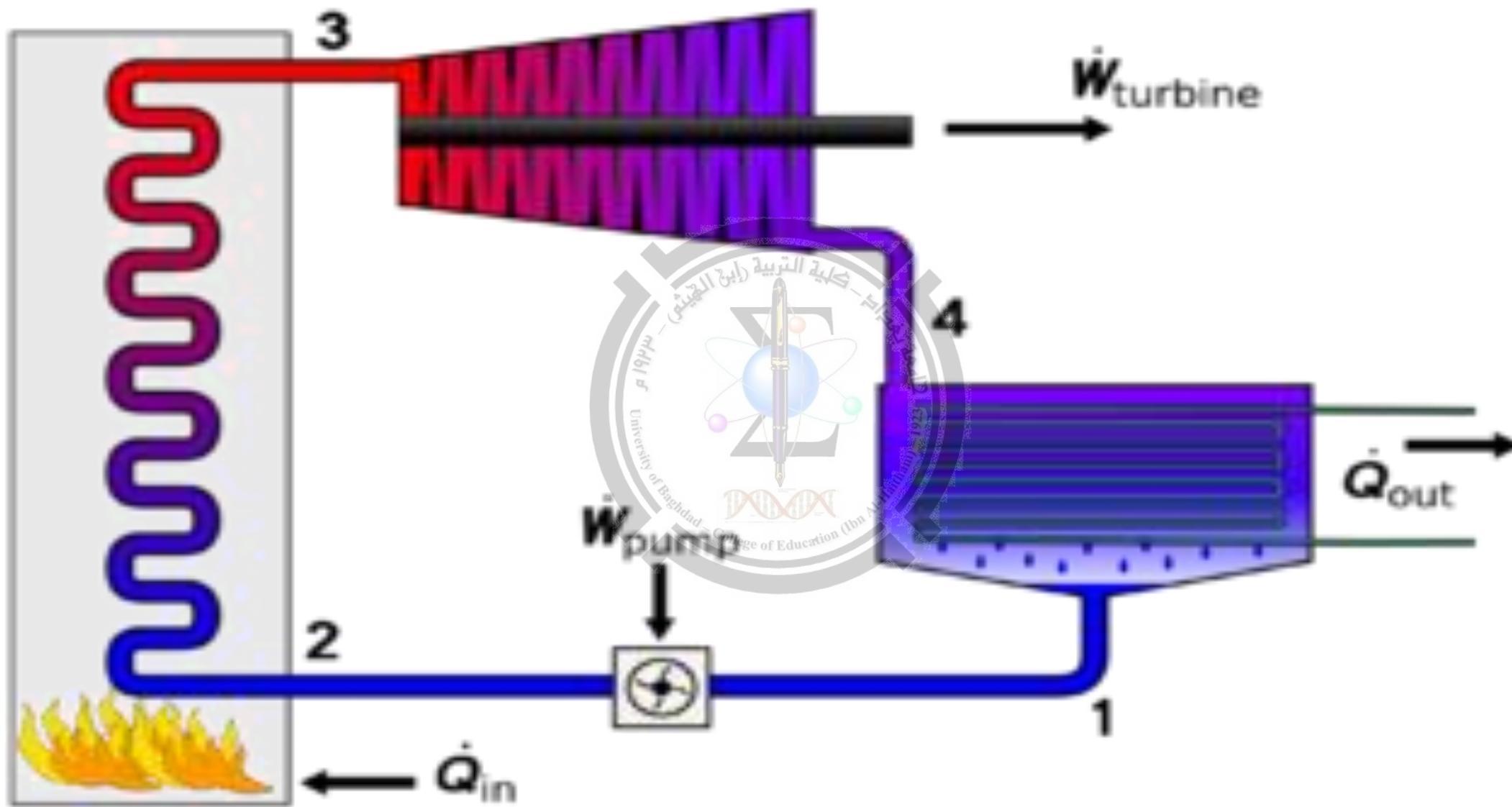
5- من 5 الى 6 تمدد اديباتيكي للبخار وعندها يصبح البخار رطب.

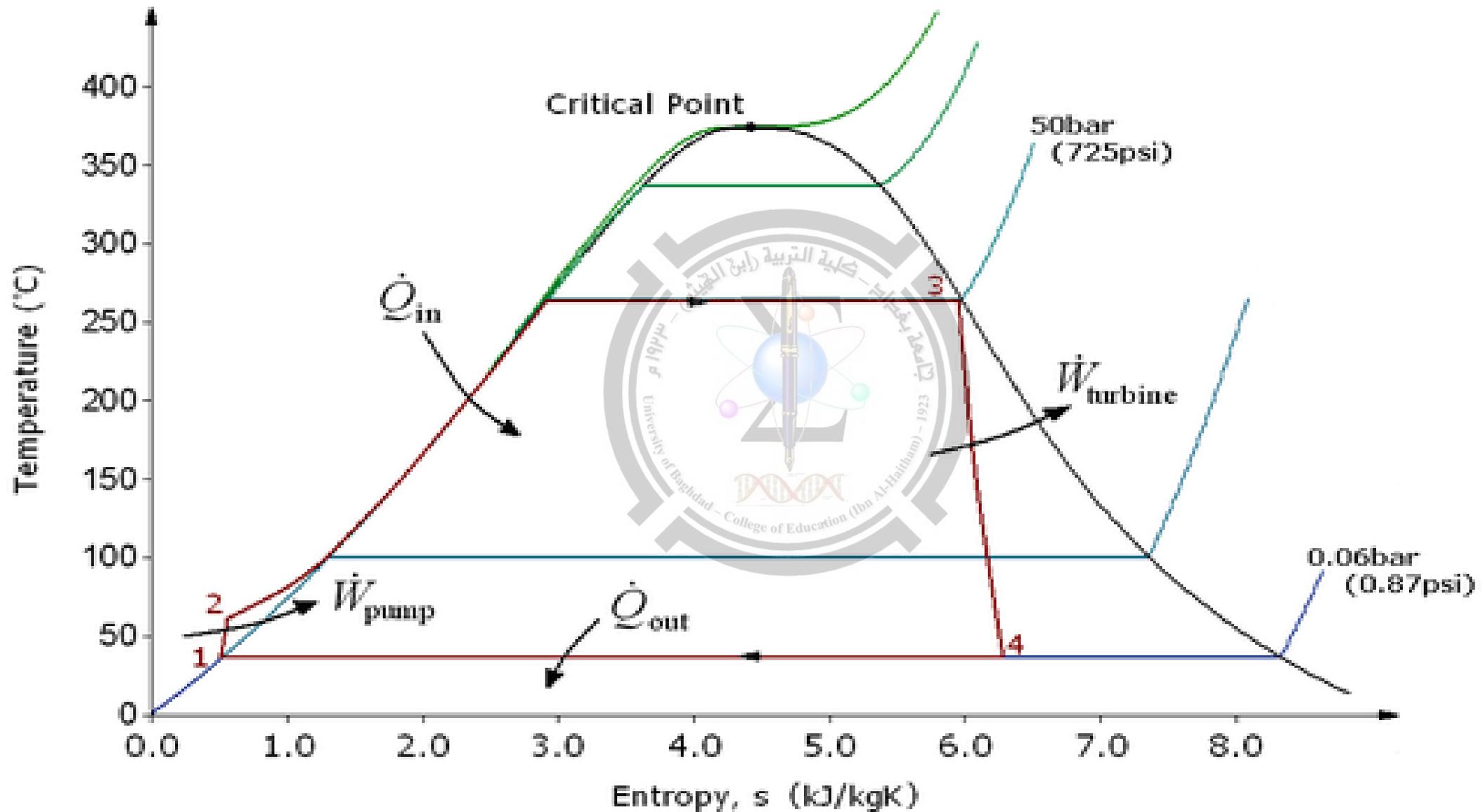
6- من 6 الى 1 يتكثف البخار عند ثبوت الضغط ودرجة الحرارة حتى يتحول الى ماء مشبع .

يحدث امتصاص للحرارة  $Q_H$  اثناء العمليات (2 الى 3) و(3 الى 4) و (4 الى 5) بينما تلتف الحرارة  $Q_C$  من النظام الى المستودع البارد عند الدرجة الحرارية  $T_C$  اثناء عملية التكثيف (من 6 الى 1) ليعود النظام الى حالته الابتدائية. تحسب كفاءة الماكنة الماكنة البخارية كالآتي : (الكفاءة = الشغل المنجز الصافي / الحرارة المجهزة الكلية). وتختلف الماكائن البخارية في عملها فمنها من يتبع دورة كارنو ومنها من يتبع دورة رانكن كما أنّ الشغل المنجز يتوقف على نوع الدورة المتبعة.

دورة رانكن: **Rankine cycle** هي دورة وظيفتها تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل. تغذى الحرارة من مصدر خارجي إلى حلقة مغلقة، والتي عادة ما تستخدم الماء. تولد هذه الدورة حوالي 80% من الطاقة الكهربائية حول العالم، بما في ذلك جميع منشآت الطاقة الشمسية الحرارية، الطاقة الحيوية، طاقة وقود أحفوري، و الطاقة النووية. يعود اسمها إلى العلامة الاسكوتلاندي، ويليام رانكن. تعد دورة رانكن اللبنة الأساسية في الديناميك الحراري المتعلقة بالمحرك البخاري.







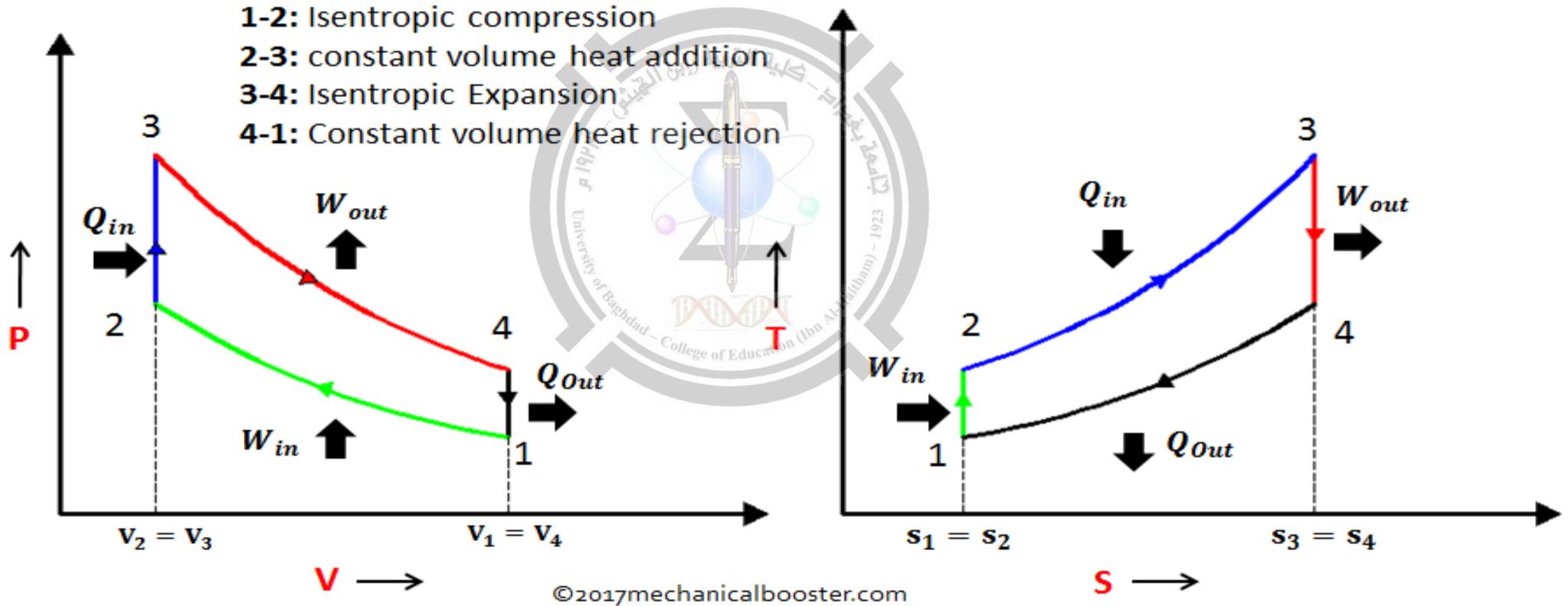
مكائن الاحتراق الداخلي :- وتقسم الى ثلاث مجموعات :-

المحركات التي يحترق فيها الوقود بسرعة عند حجم ثابت وتسمى الدورة للمادة المشغلة دورة اوتو.

المحركات التي يحترق الوقود على مراحل عند ضغط ثابت وتسمى الدورة للمادة المشغلة دورة الديزل .

المحركات ذات الاحتراق المختلط للوقود اي يحترق جزء من الوقود عند حجم ثابت والجزء الاخر عند ضغط ثابت وتسمى دورة المادة المشغلة دورة ديوال .

# دورة أوتو : Otto : دورة أوتو هي مجموعة من العمليات المستعملة في محركات الاحتراق الداخلي ذات الإشعال بالشرارة ( محركات البنزين )



**P-V and T-S Diagram of Otto Cycle**

من اساسيات كل مكائن الاحتراق الداخلي ذات المكبس ان تتضمن اربع عمليات هي:-

1. تزويد اسطوانة الماكنة بالهواء والوقود بنسب معينة.

2. يضغط الهواء والوقود قبل او بعد الخلط.

3. اشعال الخليط المضغوط مما يتسبب في التمدد الذي ينتج عنه حركة المكبس الميكانيكية.



ومن أشكال مكائن الاحتراق الداخلي:-

مكائن الاشعال بالشرارة ذات الاشواط الاربعة ( **مكائن الكازولين** )

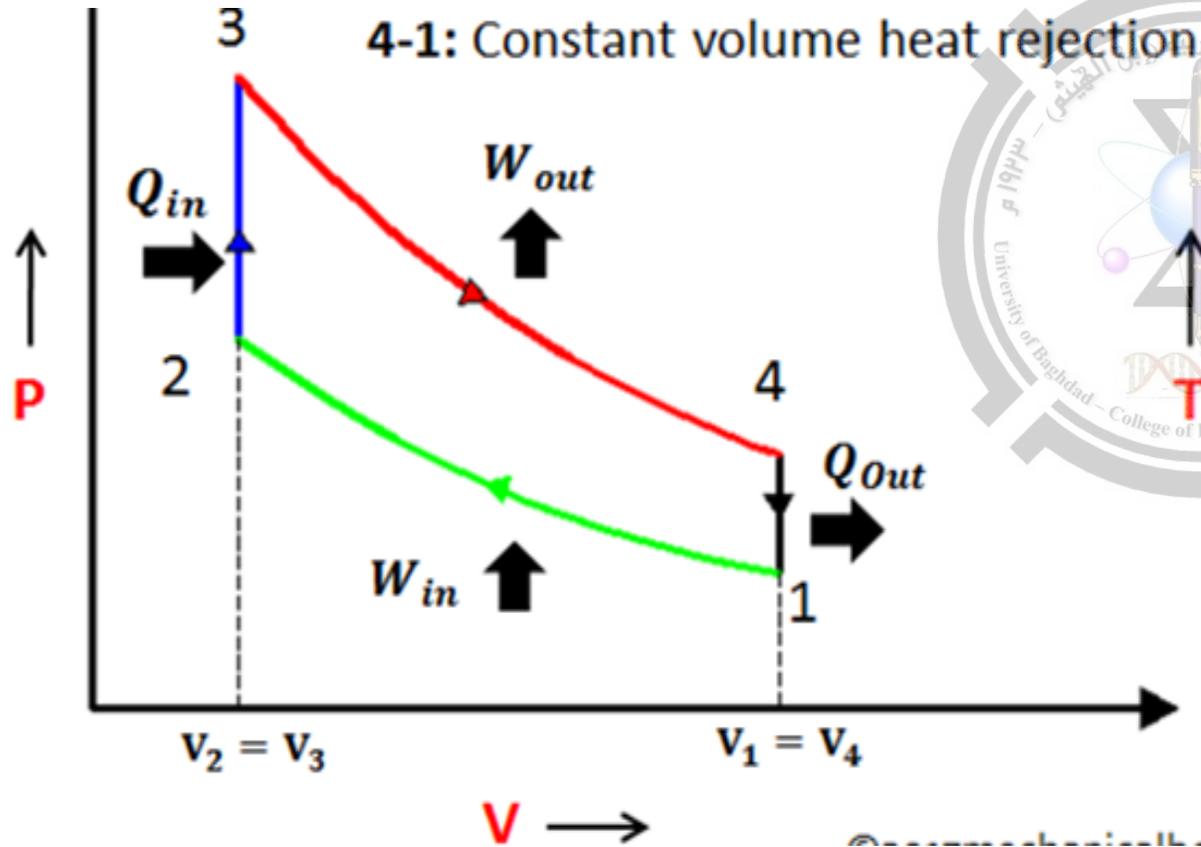
تعمل مكائن الاشعال بالشرارة بالبنزين حيث يسحب خليط من الوقود والهواء معا داخل الاسطوانة وبنسب معينة ثابتة , في حالة الوقود السائل يلزم تبخير الوقود واعداد الخليط من **الكاربوريتر (المكربن carburetor)** وهي اداة لمزج الهواء بالبنزين لاحداث مزيج متفجر وبامتلاء الاسطوانة بالخليط يتم بعد ذلك انضغاطه ثم يجري اشعاله بشرارة كهربائية عالية الفولتية تسري عبر نتوء شمعة الاشعال البارزة داخل الاسطوانة تنتج شرارة عندما ينقطع التيار الابتدائي من ملف الحث . وتعمل هذه المكائن بدورة اوتو المثالية رباعية الاشواط. وسميت بهذا الاسم نسبة الى المهندس الالماني Otto واشواطها الاربع هي:-

**شوط الاخذ:-** يبدأ المكبس حركته من اعلى موضع وصمام الدخول مفتوح وصمام التفريغ فيكون مغلقا واثناء حركة المكبس الى الاسفل او الى الخارج تندفع شحنة جديدة عبارة عن خليط هواء وبنزين الى الاسطوانة.

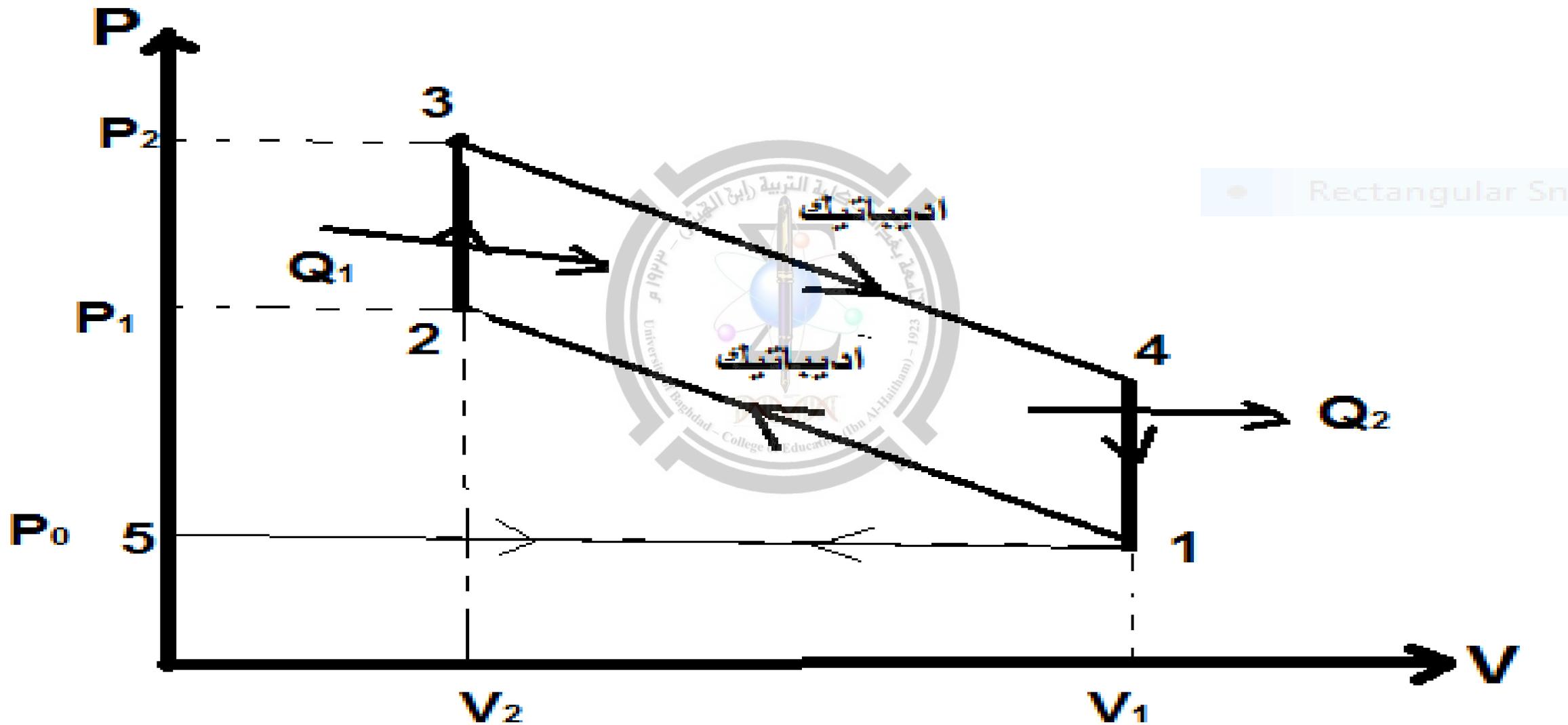
**شوط الانضغاط (الكبس) :-** يغلق صمام الاخذ ويتحرك المكبس ضاغطا على الشحنة الجديدة منجزا عملية اديباتيكية حيث يقل الحجم الى  $\frac{1}{5}$  حجمه الاصلي وترتفع الى حوالي  $600^{\circ}\text{C}$  وتسمى العملية ما قبل التسخين.

**شوط التمدد (شوط الشغل):** عند نهاية شوط الكبس يشعل المزيج بسلسلة من الشرارات من شمعة الاشتعال ويحصل الاحتراق بسرعة فائقة وقد ترتفع درجة حرارة الغاز الى  $2000^{\circ}\text{C}$  ويبلغ الضغط حوالي  $15\text{atm}$  تحت حجم ثابت يندفع المكبس الى الاسفل بقوة بسبب انغلاق الصمامين وتتمدد الغازات المحترقة تمدا اديباتيكا تقريبا.

شوط التفريغ :- يفتح صمام التفريغ عندما يقترب المكبس الى الاعلى فينخفض الضغط في الاسطوانة الى الضغط الجوي ويبقى صمام الدخول مغلقا ويقوم المكبس اثناء حركته الى الاعلى بطرد نواتج الاحتراق الغازية للتهيئة لدخول شحنة جديدة وهكذا تعاد الدورة.



ولدراسة دورة اوتو في ماكينة الكازولين تبدأ الدورة والهواء داخل الاسطوانة عند النقطة 1 على مخطط P-V كما في الشكل الاتي



**نلاحظ من المخطط مايتي :**

**1 الى 2 عملية كبس اديباتيكية**

**2 الى 3 عملية اضافة حرارة بثبوت الحجم**

**3 الى 4 عملية تمدد اديباتيكية**

**4 الى 1 عملية لفظ حرارة بثبوت الحجم**

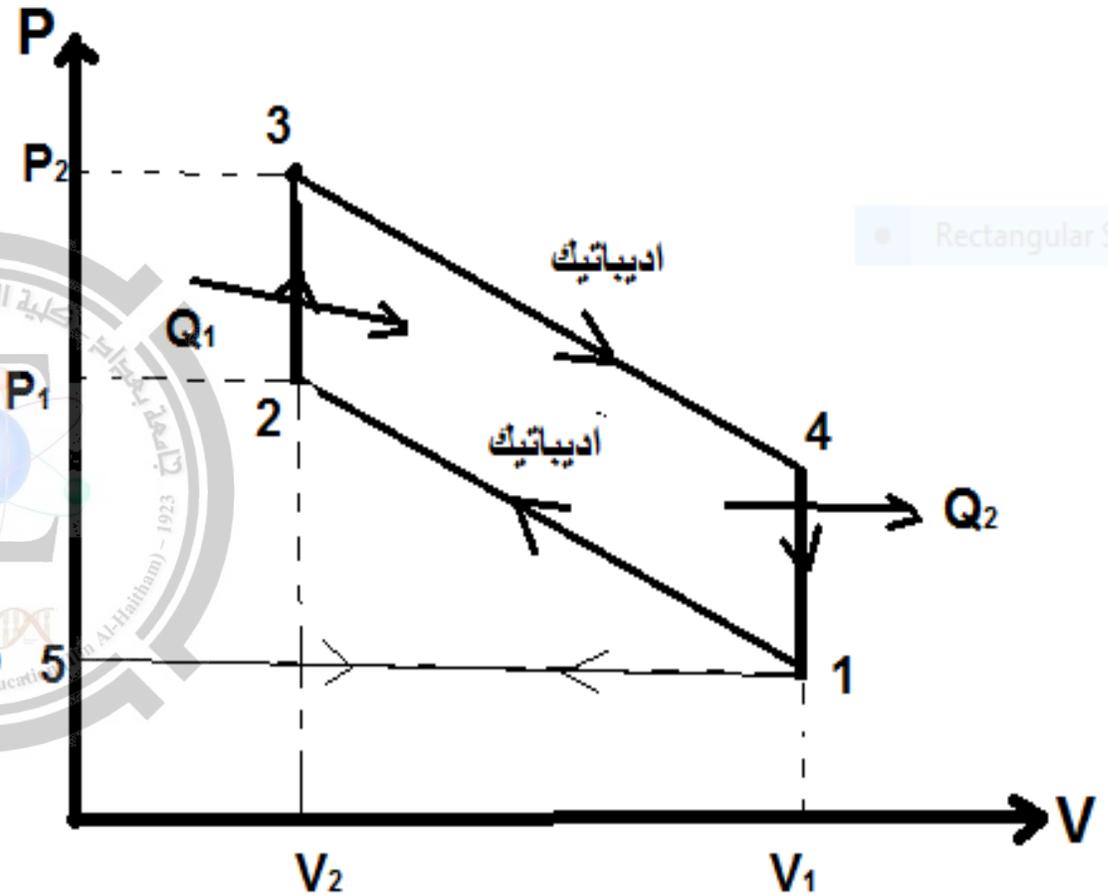
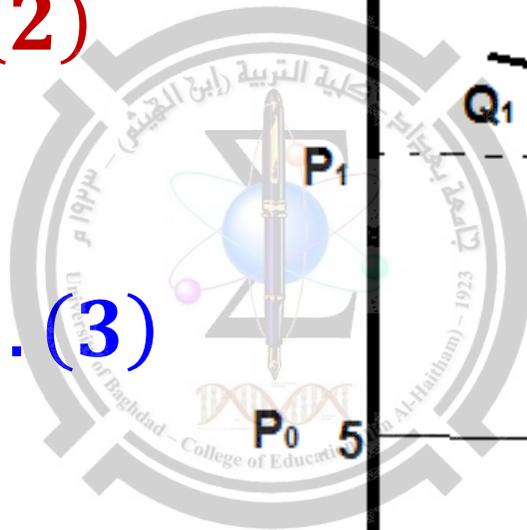
**تسمى النسبة  $\frac{V_1}{V_2}$  نسبة الكبس . وتحسب كفاءة دورة اوتو بالعلاقات الاتية:**



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

$$\eta = 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} \dots \dots \dots (2)$$

$$\eta = 1 - \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \dots \dots \dots (3)$$

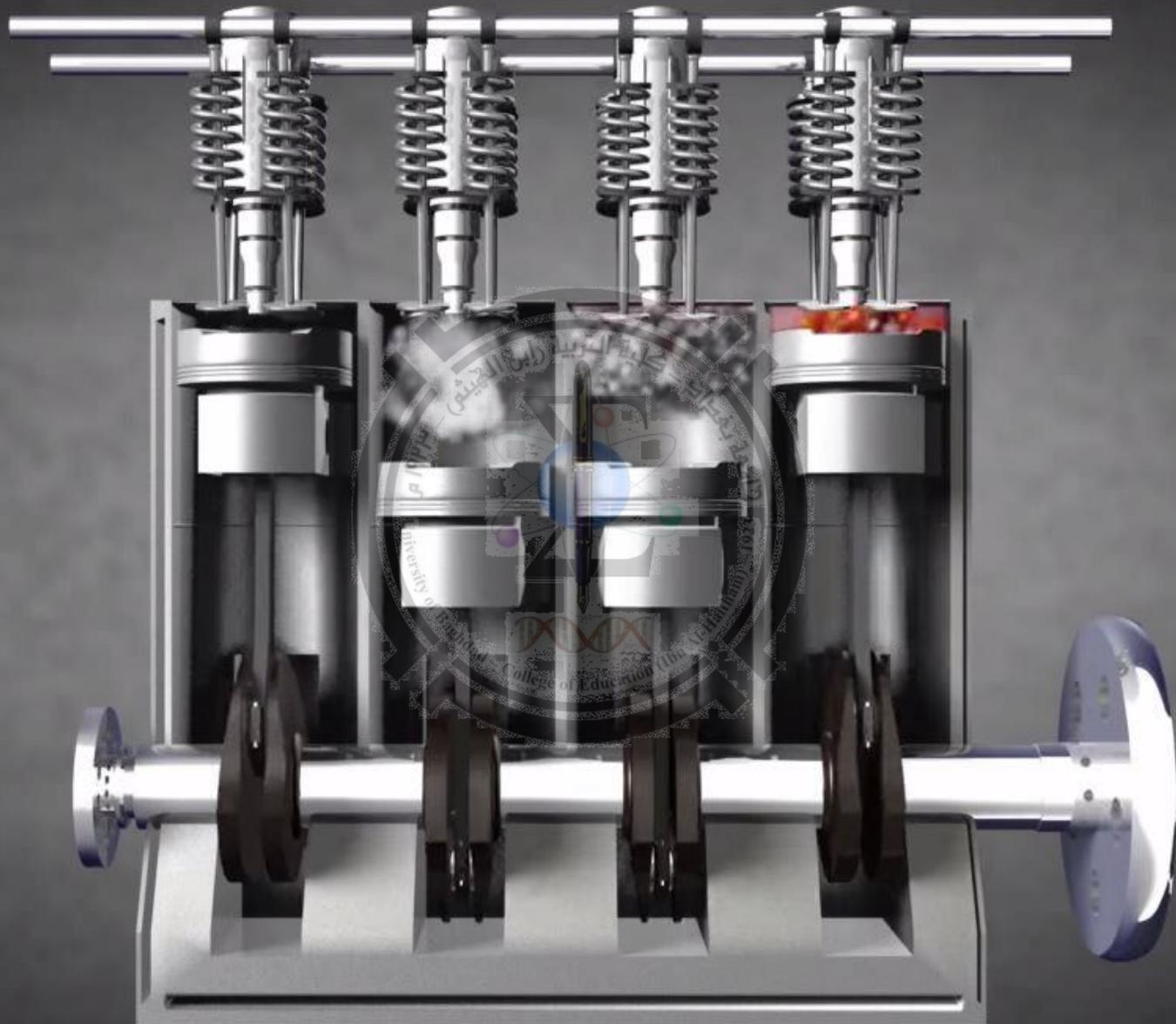


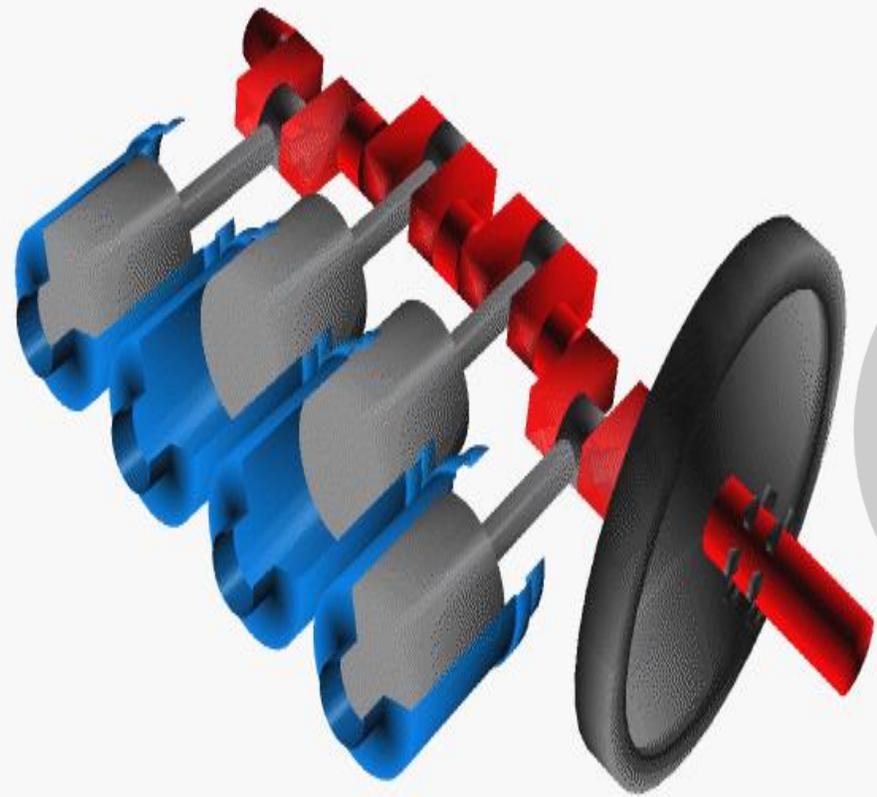
• Rectangular Sn

## مكائن الشغل الانضغاطي (مكائن الديزل)

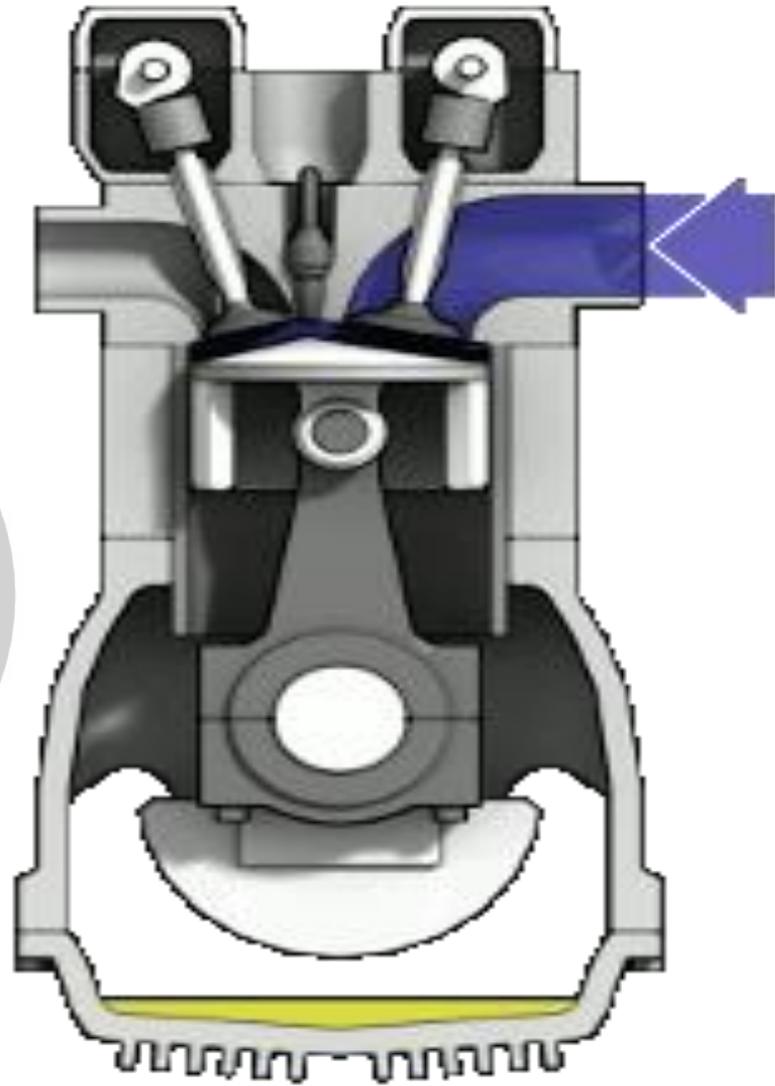
تعرف هذه المكائن باسم مكائن الديزل نسبة الى صانعها الالماني **ديزل** وليس لأنّ الزيت المستعمل في تشغيلها هو الديزل اذ **لا وجود لمثل هذا الزيت** وانما تستعمل زيت اقل تطايرا من المستعمل في مكائن الاشتعال بالشرارة ويسمى **زيت الغاز** وهو زيت ثقيل مقارنة بالبنزين حيث يتم دفع الوقود الى داخل الماكنة على شكل رذاذ دقيق . تتكون ماكنة الديزل من اسطوانة ومكبس وهي اكثر نشاطا من **ماكنة اوتو** حيث يبلغ الضغط داخل الاسطوانة حوالي **35atm** كما يوجد فيها صمام لدخول الهواء باعتباره المادة المشغلة وصمام اخر لدخول زيت الغاز الثقيل باعتباره الوقود وصمام خروج ملحق بالاسطوانة وتتكون ماكنة ديزل من خمسة اشواط هي:

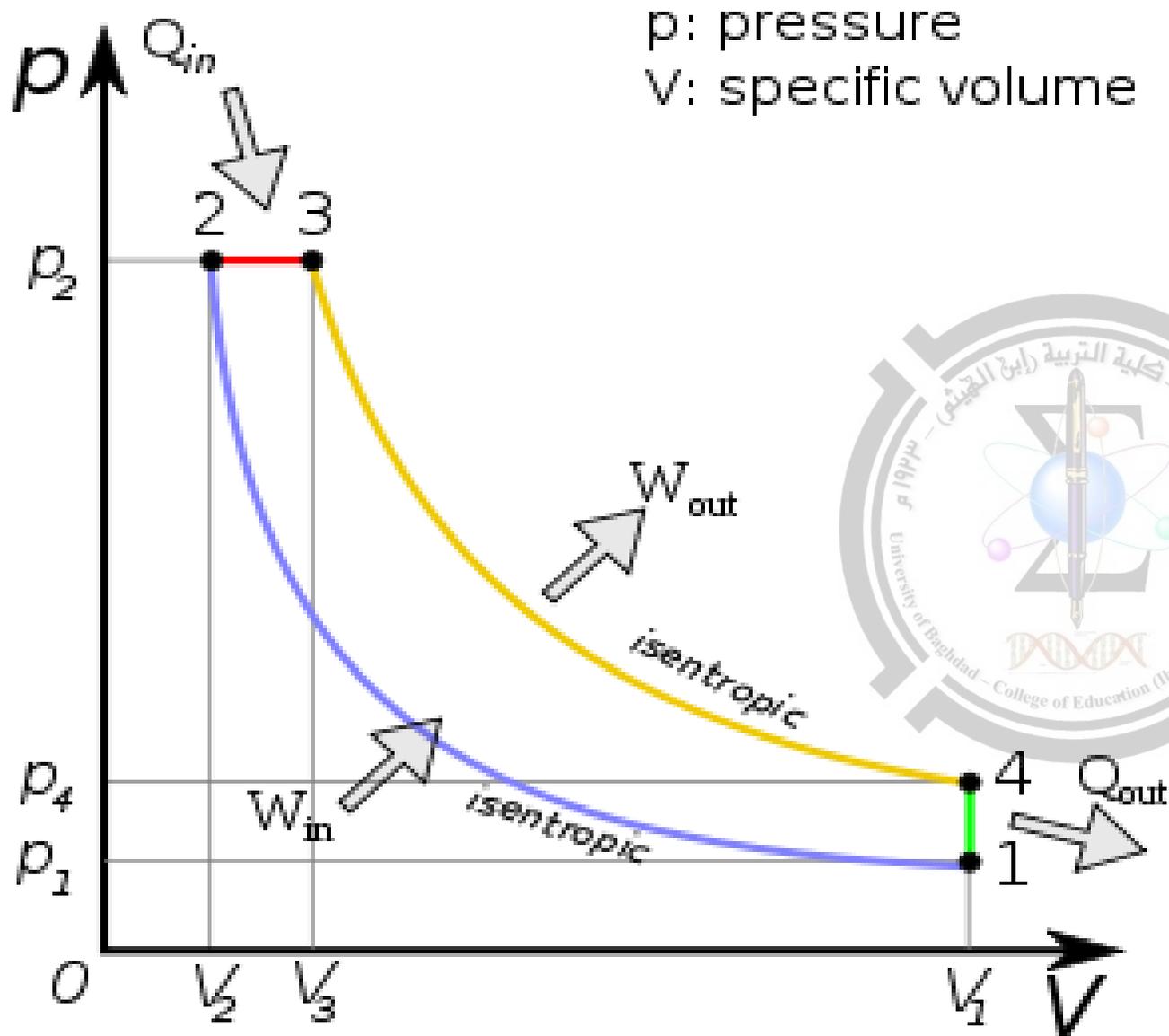






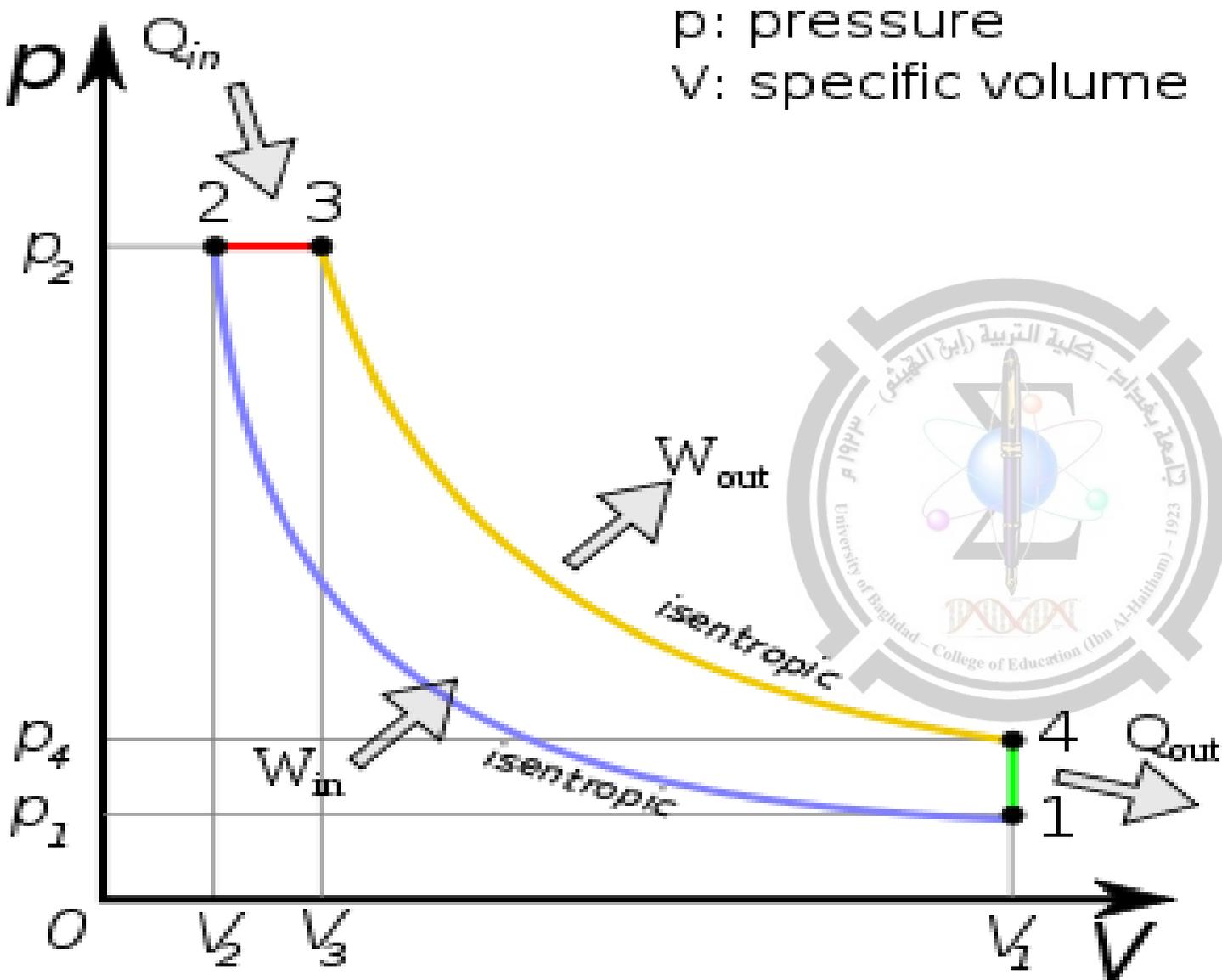
1



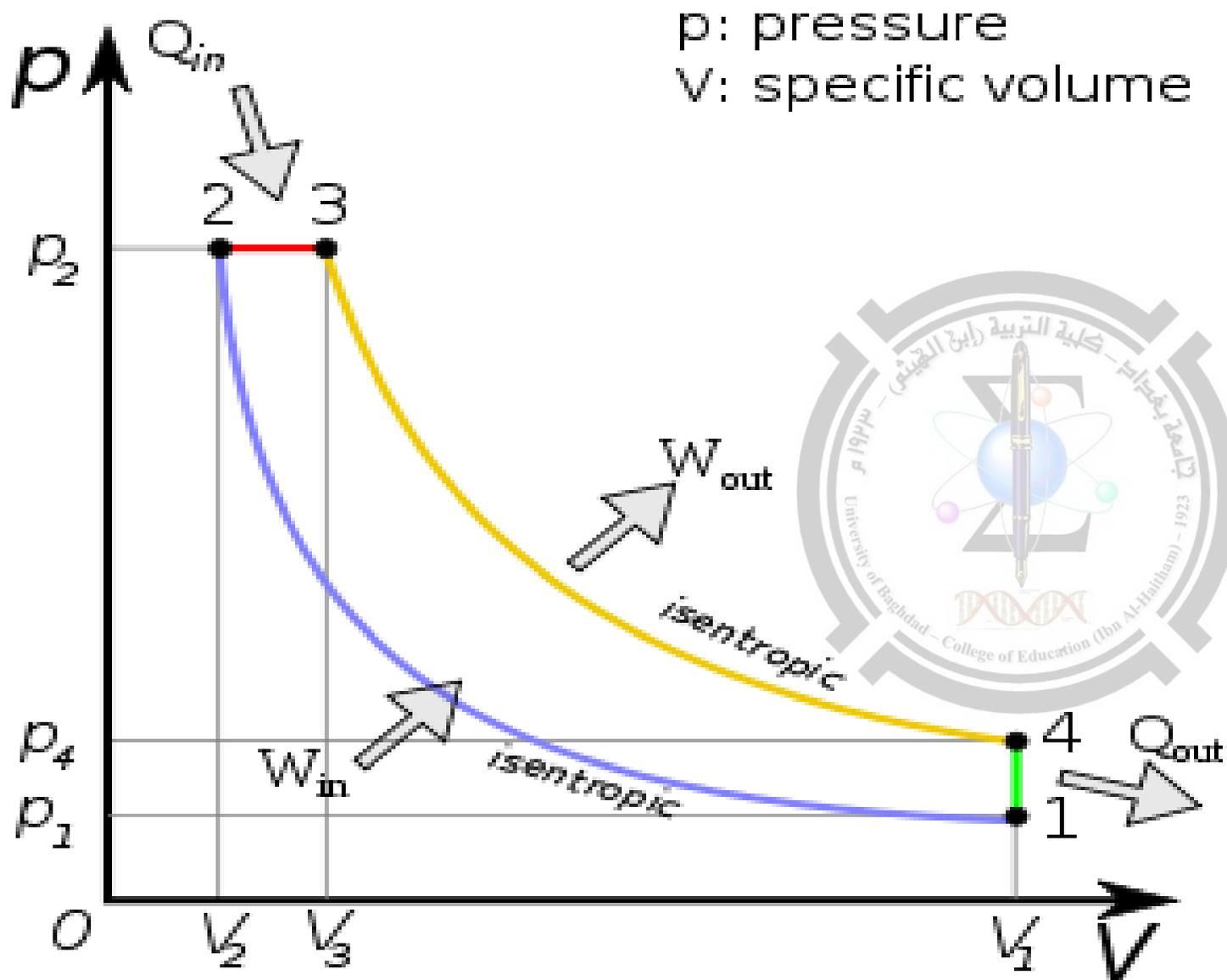


**1- شروط الادخال حيث يفتح صمام الهواء ويدخل هواء نقي خلال مرشح تحت ضغط ثابت مساوي للضغط الجوي.**

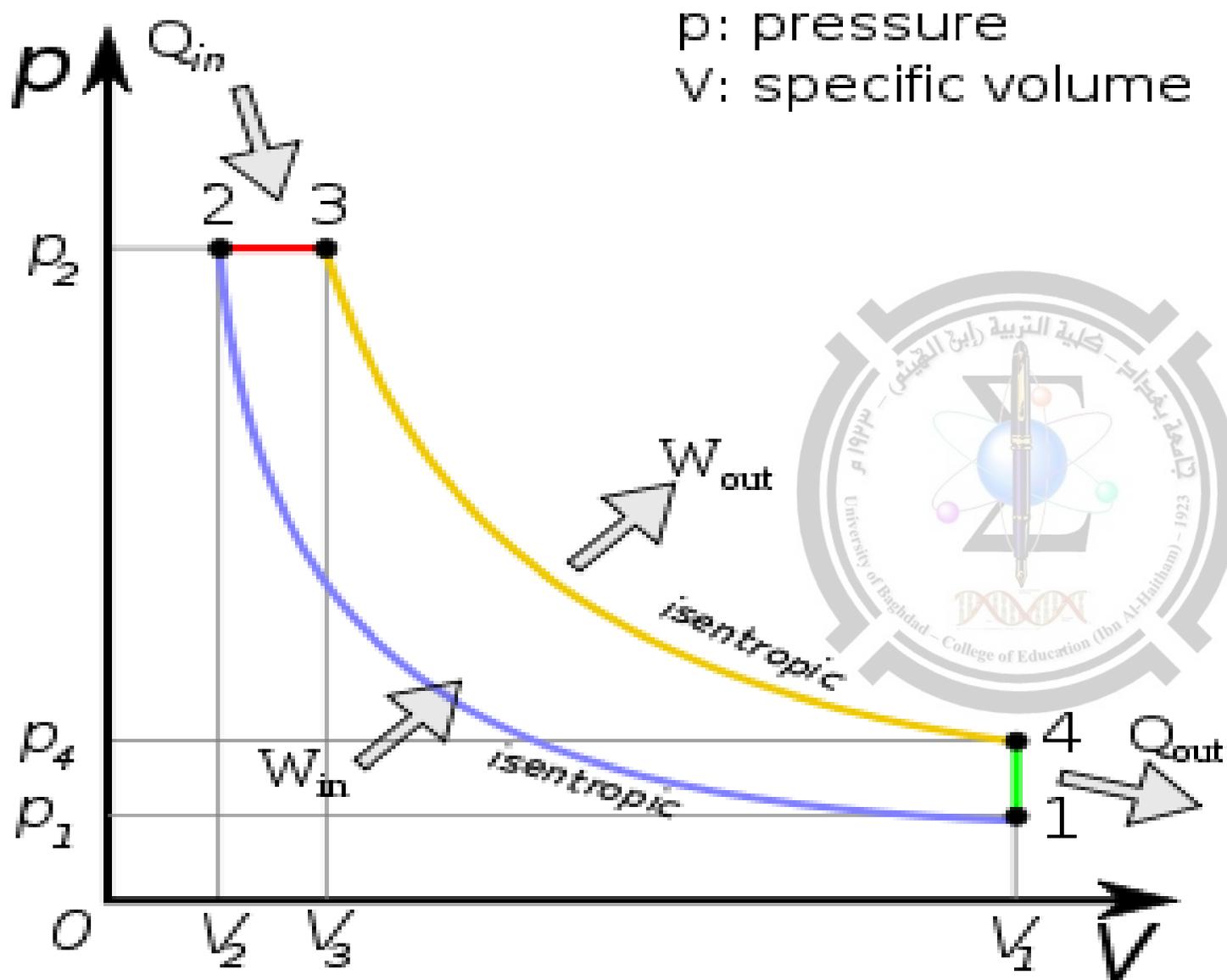




2- شوط الكبس : تكون جميع الصمامات مغلقة ويكبس الهواء  $\frac{1}{17}$  من حجمه الاصلي وترتفع الحرارة الى حوالي  $1000^{\circ}\text{C}$  والضغط الى حوالي  $35\text{atm}$  ويمثل بالمنحني 1 الى 2 .



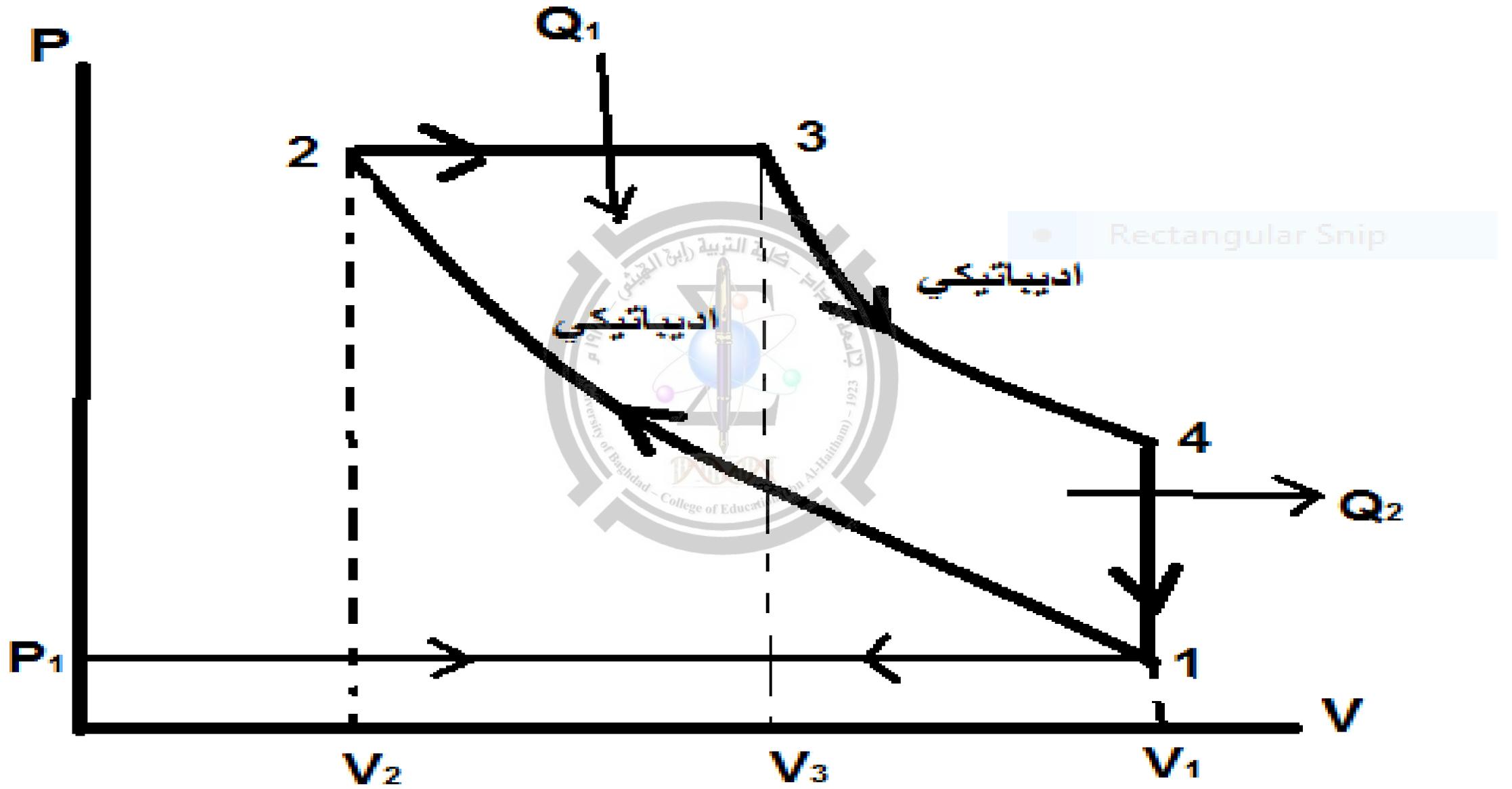
3- ادخال الزيت : يرش الزيت تحت ضغط الى داخل الاسطوانة ويسخن الزيت تلقائيا لان درجة حرارة الاسطوانة اكثر بكثير من درجة الاشتعال ويبقى الضغط ثابت بتنظيم تزويد الزيت, ويمثل المنحني 2 الى 3 هذه العملية ونتيجة الاحتراق ترتفع درجة حرارة الزيت الى حوالي  $2000^{\circ}\text{C}$  عندها يتوقف تزويد الزيت.



4- شروط الشغل : جميع الصمامات مغلقة ويسمح لمزيج الغاز بان يتمدد بعملية اديباتيكية ويتحرك المكبس مندفاعا للخارج حتى يصل الى الحالة 4 في المخطط وهنا يهبط الضغط لبلوغ قيمته الاصلية ويفتح صمام الخروج ويمثل بالخطوط الممثلة بالرقم 4

5- شوط التفريغ : تطرد فضلات مزيج الغاز الى الخارج ويعود الضغط الى قيمته الاصلية  $P_1$  وتكون الماكنة جاهزة لدورة جديدة.





لدراسة دورة ديزل تكون الاسطوانة في البدء مملوءة بالهواء عند الحالة 1 وكما في الخطوات الآتية

1 الى 2 يمثل انضغاط الهواء بعملية اديباتيكية  $P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma$

2 الى 3 يتم تزويد النظام بكمية من الحرارة  $Q_1$  عند ضغط ثابت بينما يتغير الحجم

$$Q_1 = C_P(T_3 - T_2) \frac{KJ}{kg}$$

بزيادة قليلة:

3 الى 4 تمدد اديباتيكي دون تزويد النظام بالحرارة :  $P_3V_3^\gamma = P_4V_4^\gamma$

4 الى 1 لفظ الحرارة عند حجم ثابت ويهبط الضغط ويعود الهواء الى حالته الاصلية عند النقطة 1 والحرارة الملفوظة (المطرودة) هي:

$$Q_2 = C_V(T_4 - T_1)$$

عند العمليتين (1 الى 2) و (3 الى 4) لا يتم التزود بحرارة او لفظ حرارة (عملية اديباتيكية) لذلك  $dQ=0$  اي ان  $dW=-dU$  والحرارة الملفوظة هي:

$$W = -nC_V(T_2 - T_1)$$

وفي حالة 2 الى 3 فإن الشغل المنجز خلال ضغط ثابت:-

$$W = P_2(V_3 - V_2) = nR(T_3 - T_2) = (C_p - C_v)(T_3 - T_2)$$

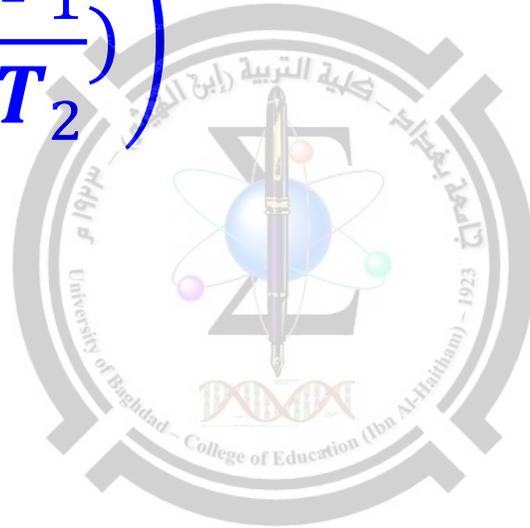
وفي حالة 3 الى 4 فإن الشغل المنجز خلال عملية أديباتيكية:-

$$W = -nC_V(T_4 - T_3)$$

للحصول على الشغل الكلي (لدورة كاملة)  $W$  نجمع الخطوات السابقة (جمعا جبريا) :-

كفاءة الديزل = ( الحرارة المجهزة - الحرارة المفقودة ) / الحرارة المجهزة

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

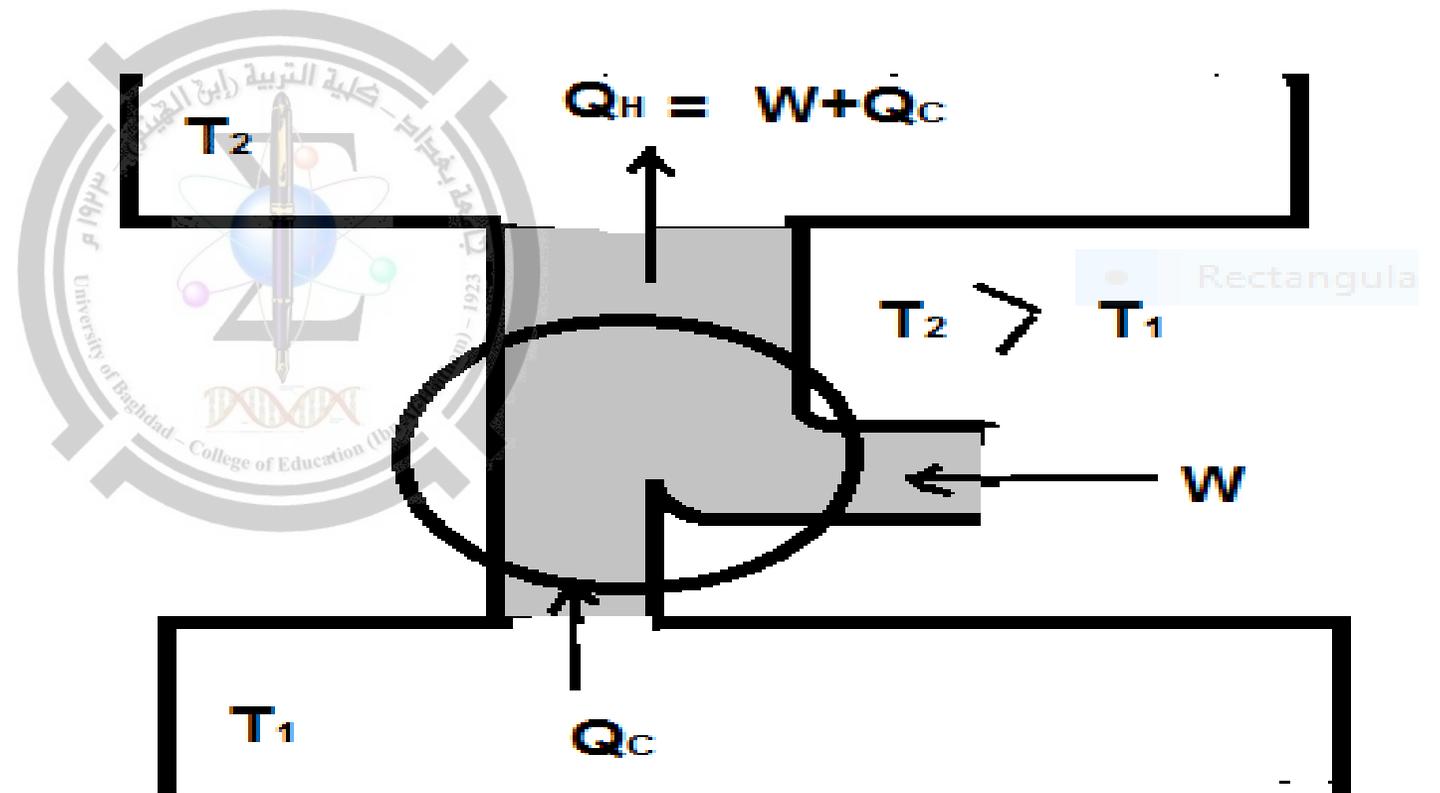


## دورة التثليج

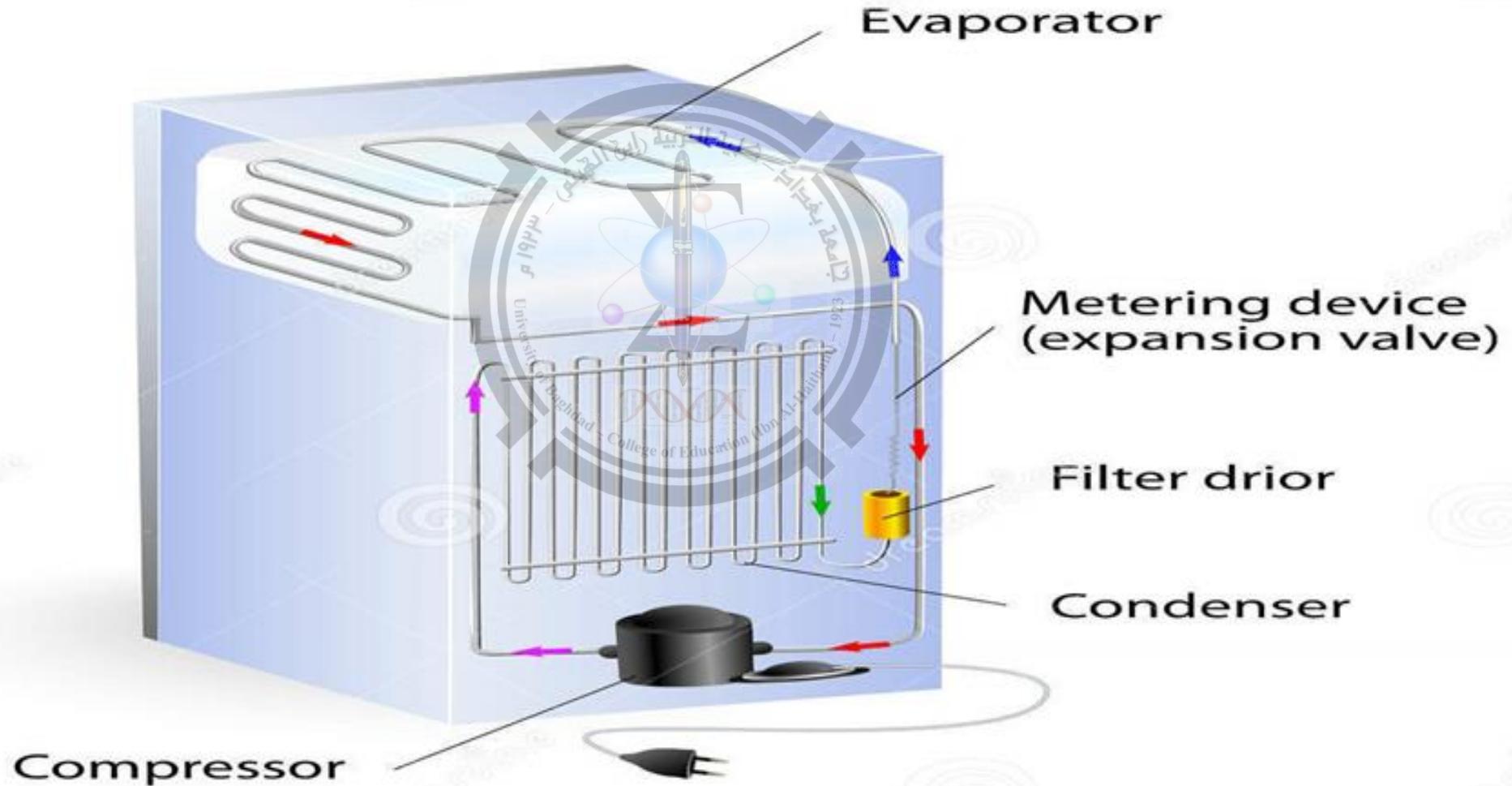
يمكن اعتبار الثلاجة ماكينة حرارية تعمل بالاتجاه المعاكس ففي الماكينة الحرارية حيث تأخذ حرارة من مستودع درجة حرارته عالية ويحول قسم منها الى شغل ميكانيكي وتلفظ الباقي بشكل حرارة الى مستودع درجة حرارته واطنة. اما الثلاجة فانها تأخذ الحرارة من مستودع بارد بواسطة شغل ميكانيكي يجهزه مكبس (اي أنها تحتاج شغل خارجي) Compressor ثم تلفظ هذا المجموع بشكل حرارة في مستودع درجة حرارته عالية اي ان الحرارة تضخ من من داخل الثلاجة التي درجة تكون حرارتها واطنة الى المحيط الخارجي ذو درجة الحرارة العالية ببذل شغل ميكانيكي .

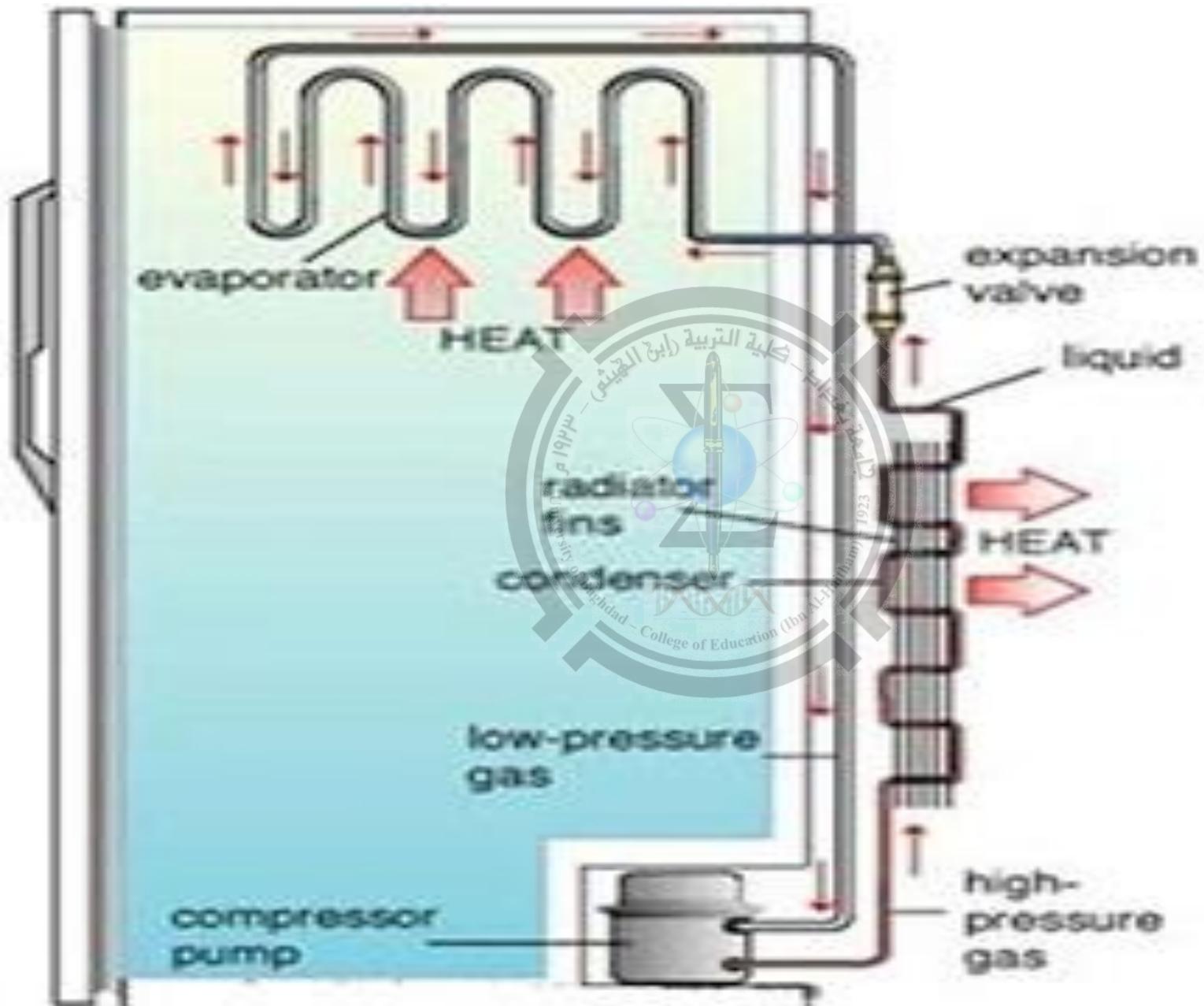
من وجهة النظر الاقتصادية فان احسن دورة تثلج هي تلك التي تضخ اكبر حرارة  $Q_1$  من الثلجة باستخدام اقل شغل ميكانيكي  $W$ . ولذلك يعرف معامل الانجاز  $\omega$  وليس الكفاءة للثلجة كما يأتي

$$\omega = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}$$

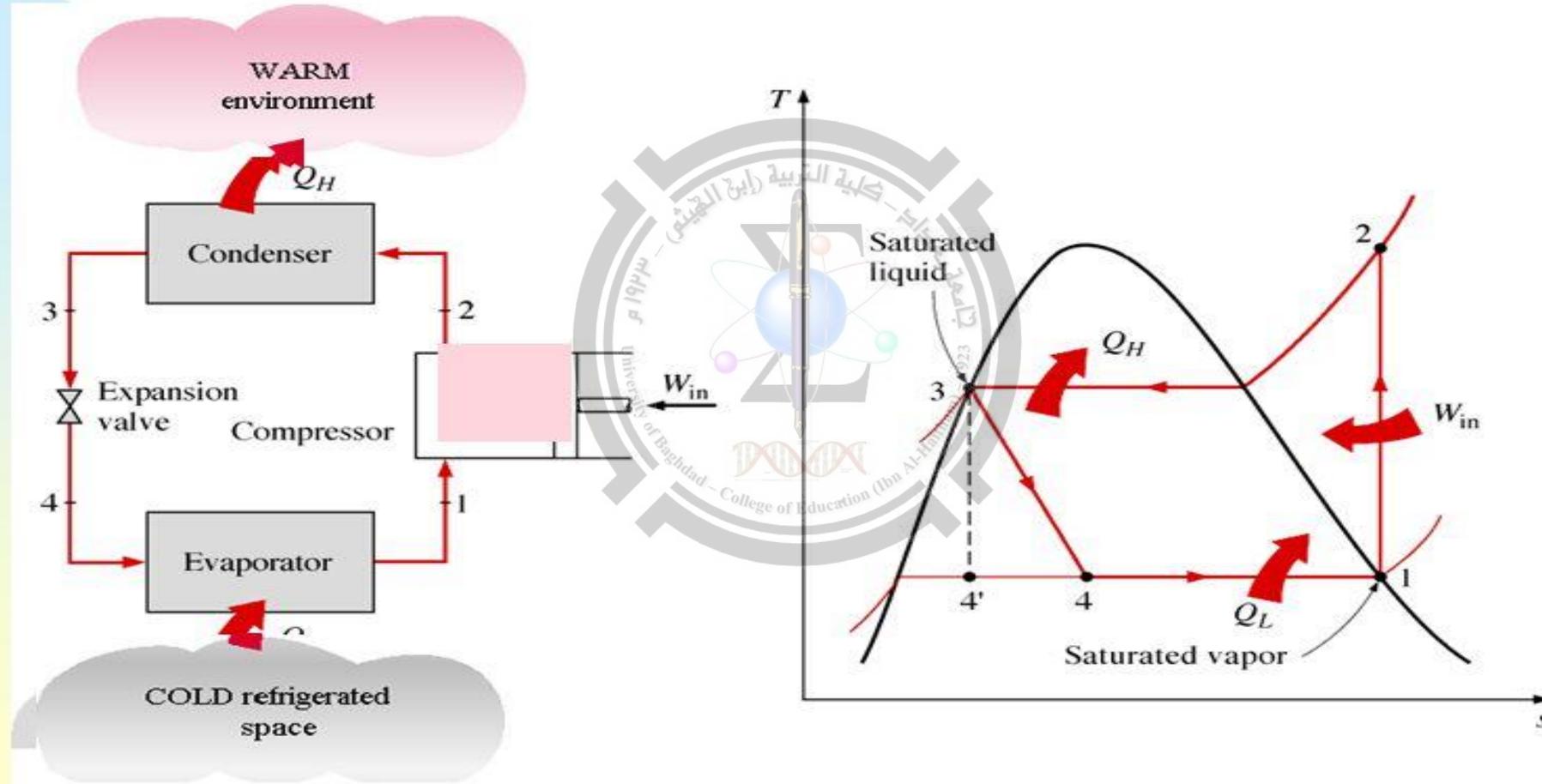


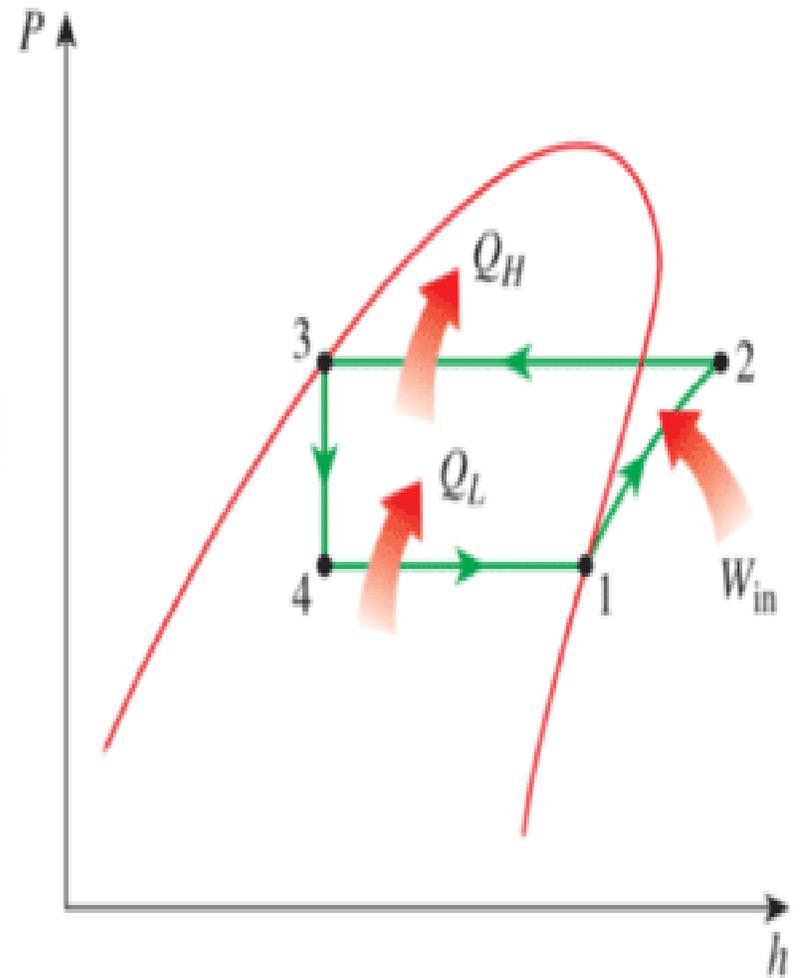
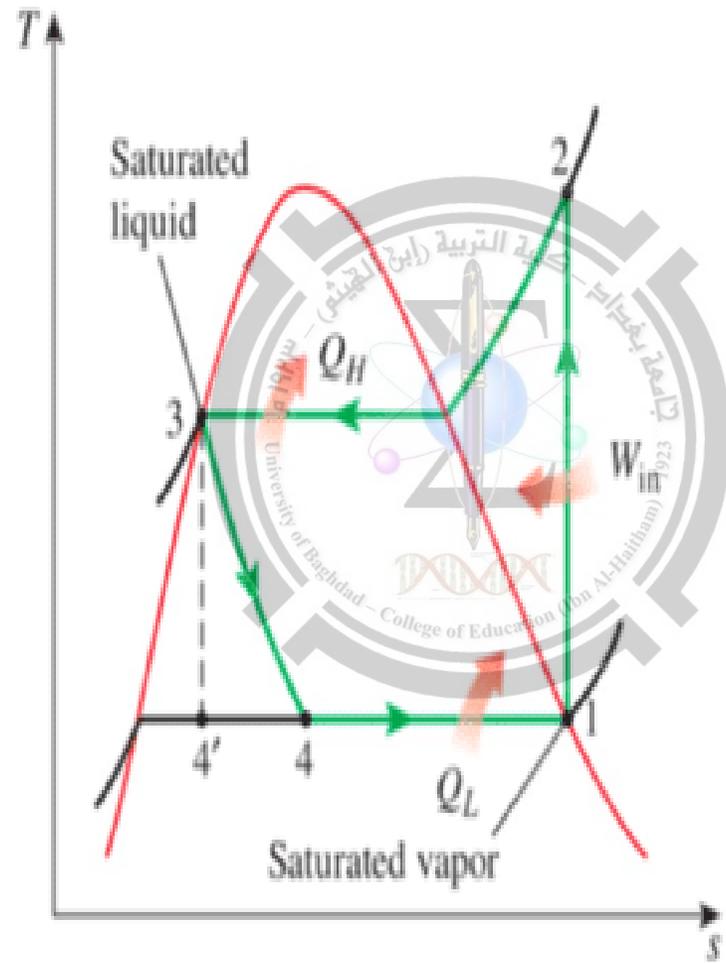
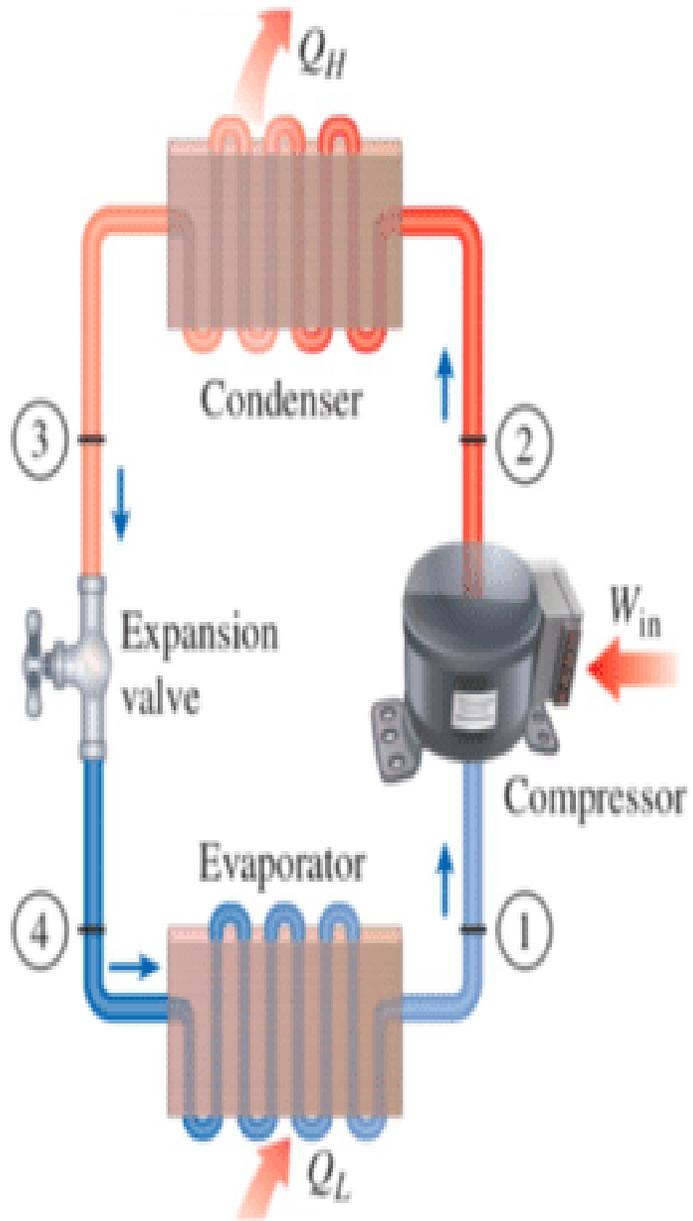
# Typical refrigeration cycle



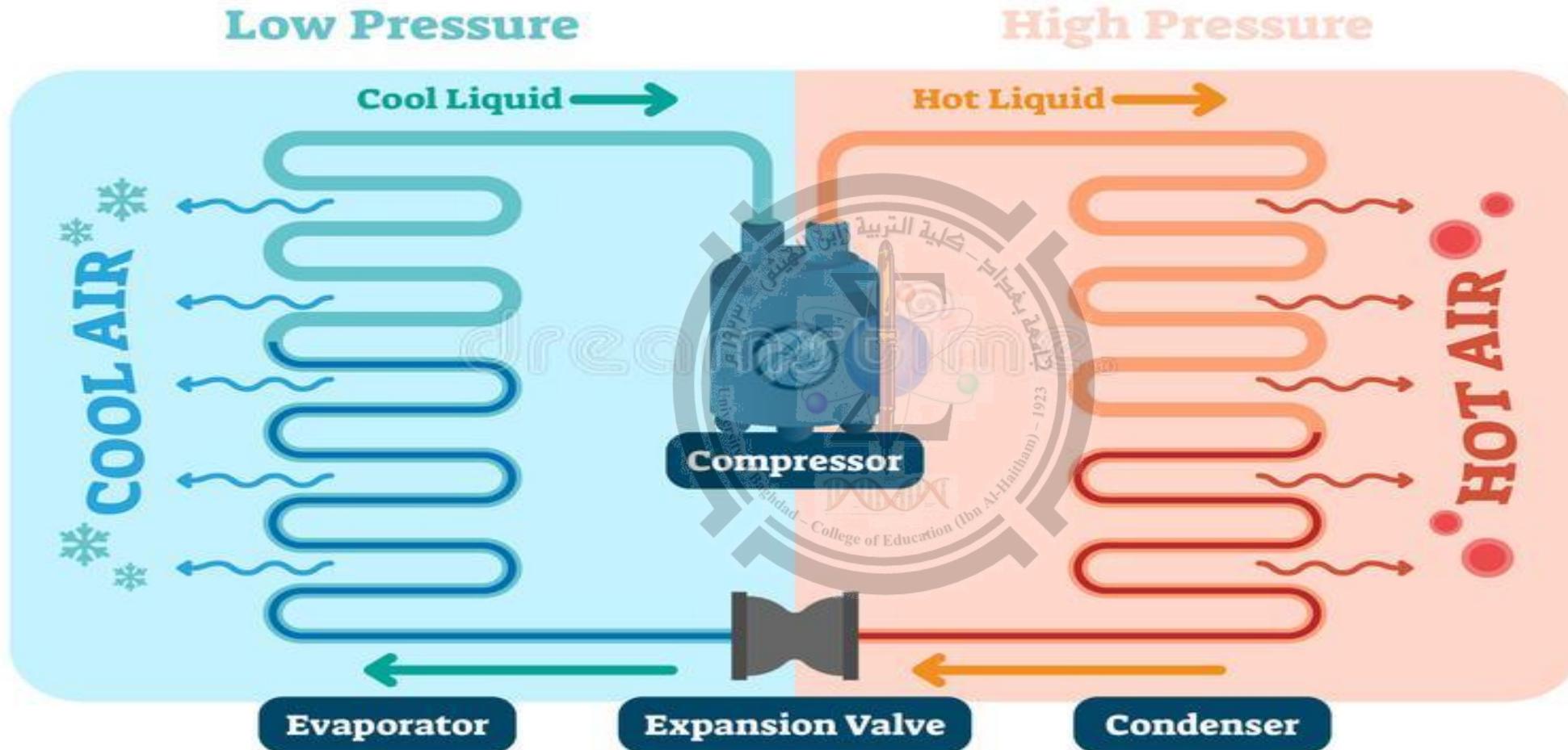


# Schematic and $T$ - $s$ Diagram for Ideal Vapor-Compression Refrigeration Cycle

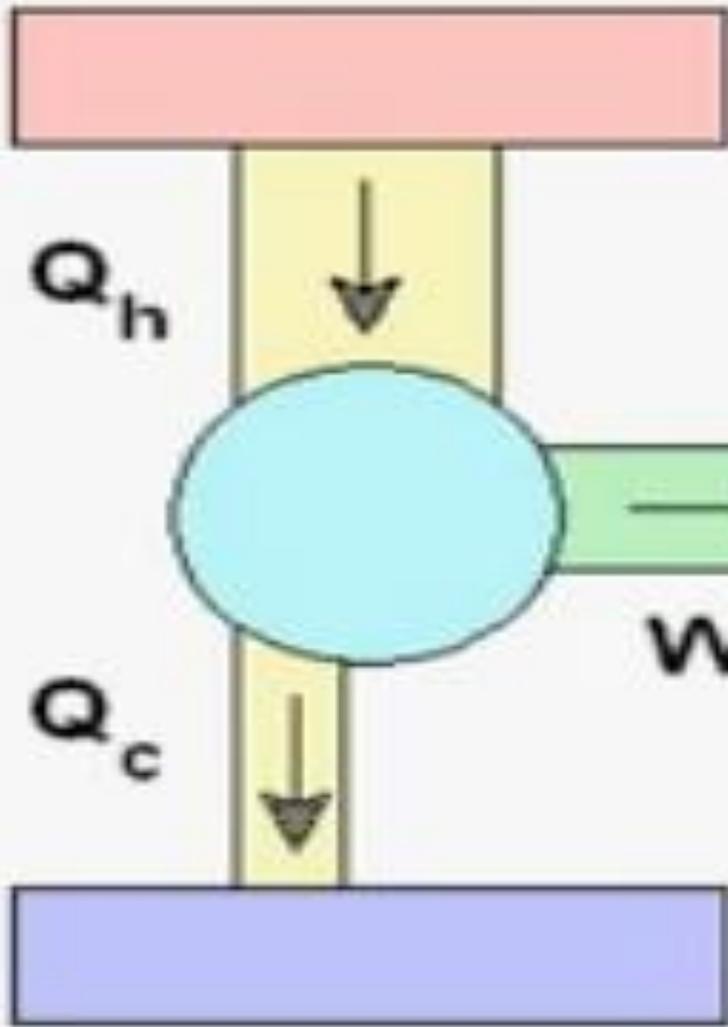




# Refrigeration Cycle



# Engine



# Refrigerator

