

## CHƯƠNG 2. NGUYÊN LÝ THỨ NHẤT NHIỆT ĐỘNG HỌC

### §1 - NỘI NĂNG CỦA MỘT HỆ NHIỆT ĐỘNG - CÔNG VÀ NHIỆT

#### 1. Hệ nhiệt động

*Một tập hợp các vật được xác định hoàn toàn bởi một số các thông số vĩ mô độc lập với nhau gọi là một hệ vĩ mô hay hệ nhiệt động hoặc gọn hơn nữa là hệ.*

Tất cả những vật khác, ngoài hệ gọi là môi trường xung quanh.

Các hệ được phân chia thành hệ cô lập và hệ không cô lập.

*Hệ cô lập nếu nó hoàn toàn không tương tác với môi trường xung quanh, do đó giữa hệ và môi trường không có sự trao đổi năng lượng.*

*Hệ không cô lập nếu nó tương tác với môi trường xung quanh, do đó giữa hệ và môi trường có sự trao đổi năng lượng.*

Một hệ có tương tác với môi trường xung quanh nhưng hoàn toàn không trao đổi nhiệt với môi trường là hệ cô lập về phương diện nhiệt. Trong trường hợp đó ta nói rằng giữa hệ và môi trường có vỏ cách nhiệt.

Một hệ có tương tác với môi trường nhưng không sinh công hoặc nhận công từ môi trường là hệ cô lập về phương diện cơ học.

#### 2. Nội năng của hệ nhiệt động

Năng lượng của một hệ là số đo mức độ vận động của vật chất trong hệ đó.

Ở mỗi trạng thái hệ có những dạng vận động xác định với mức độ nhất định và do đó có một năng lượng xác định. Khi trạng thái của hệ thay đổi thì năng lượng của hệ thay đổi và thực nghiệm xác nhận rằng độ biến thiên năng lượng của hệ trong quá trình biến đổi chỉ phụ thuộc vào trạng thái đầu và trạng thái cuối mà không phụ thuộc vào quá trình đó diễn ra như thế nào. Như vậy năng lượng của hệ chỉ phụ thuộc vào trạng thái của hệ. Ta nói rằng năng lượng là một hàm trạng thái.

Năng lượng của một hệ gồm động năng chuyển động có hướng của toàn hệ, thế năng tương tác của hệ với trường ngoài và nội năng là phần năng lượng bên trong của hệ.

Trong nhiệt động học người ta giả thiết rằng hệ đứng yên nên động năng của hệ bằng không. Người ta cũng giả thiết hệ không đặt trong một trường lực nào nên thế năng tương tác bằng không. Vậy năng lượng của hệ bằng nội năng của hệ.

*Nội năng  $U$  của hệ bao gồm tổng động năng chuyển động nhiệt của các phân tử, thế năng tương tác giữa các phân tử.* Đối với khí lí tưởng các phân tử không tương tác với nhau, trừ lúc va chạm vì vậy thế năng tương tác giữa các phân tử bằng không. Do đó, *nội năng  $U$  của hệ khí lí tưởng bằng tổng động năng chuyển động nhiệt của các phân tử của hệ.*

#### 3. Công và nhiệt

Khái niệm nội năng, công và nhiệt là những khái niệm quan trọng trong nhiệt động học. Như đã biết, khi các hệ vĩ mô tương tác với nhau chúng sẽ trao đổi năng lượng cho nhau. Có hai dạng trao đổi.

***Một là trao đổi năng lượng dưới dạng động năng chuyển động có hướng của hệ. Phần năng lượng trao đổi này gọi là công.***

***Hai là trao đổi năng lượng dưới dạng động năng chuyển động hỗn loạn của các phân tử của hệ. Phần năng lượng trao đổi này gọi là nhiệt.***

**Ví dụ** Khí dẫn nở trong xylanh (hệ khí chuyển động có hướng) làm cho pittông chuyển động. Khí đã truyền năng lượng cho pittông dưới dạng công.

Cho một vật nóng tiếp xúc với một vật lạnh. Các phân tử của vật nóng khi gặp các phân tử của vật lạnh sẽ truyền một phần động năng cho chúng. Kết quả là động năng chuyển động nhiệt của các phân tử vật nóng giảm, còn của các phân tử vật lạnh thì tăng. Vật nóng thì lạnh đi, vật lạnh nóng lên. Vật nóng đã truyền năng lượng cho vật lạnh dưới dạng nhiệt.

Như vậy công và nhiệt hoàn toàn tương đương nhau. Chúng là phần năng lượng trao đổi khi hệ tương tác với môi trường. Sự khác nhau giữa công và nhiệt là ở chỗ, công liên quan đến chuyển động có trật tự của hệ vĩ mô. Còn nhiệt liên quan đến chuyển động hỗn loạn của các phân tử của hệ.

Giữa công và nhiệt có mối liên hệ chặt chẽ và có thể chuyển hoá lẫn nhau. Công có thể biến thành nhiệt và ngược lại nhiệt có thể biến thành công.

Ví dụ khi tốn một công để cọ sát hai vật thì mặt tiếp xúc giữa chúng nóng lên: Công biến thành nhiệt.

Khi đốt nóng một vật thì vật nóng lên và dẫn nở, nghĩa là vật sinh công: Nhiệt biến thành công.

Sự chuyển hoá giữa công và nhiệt luôn luôn tuân theo một quan hệ định lượng xác định. Nhà vật lí người Anh là Jun từ năm 1845, bằng thực nghiệm đã xác định được rằng nhiệt lượng 1calo biến hoàn toàn thành công thì sẽ được 4,18J. Và một 1J biến hoàn toàn thành nhiệt thì sẽ được 0,24calo.

Công và nhiệt là số đo của những phần năng lượng trao đổi giữa hệ với môi trường, nhưng bản thân chúng không phải là năng lượng. Bởi lẽ, năng lượng là một hàm trạng thái. Ở mỗi trạng thái hệ có một năng lượng xác định. Khi trạng thái của hệ thay đổi thì năng lượng của hệ cũng thay đổi. Còn công và nhiệt chỉ sinh ra trong quá trình biến đổi và phụ thuộc vào quá trình biến đổi. Quá trình biến đổi khác nhau thì công và nhiệt sinh ra cũng khác nhau. Công và nhiệt là hàm của quá trình.

Trong hệ đơn vị SI công, nhiệt và năng lượng đều có đơn vị là Jun (J).

## **§ 2. NGUYÊN LÝ THỨ NHẤT NHIỆT ĐỘNG HỌC**

## 1. Phát biểu:

Theo quan điểm nhiệt động học, định luật bảo toàn và chuyển hoá năng lượng, một định luật tổng quát của tự nhiên, được phát biểu như sau:

*Độ biến thiên năng lượng toàn phần  $\Delta W$  của một hệ trong một quá trình biến đổi vĩ mô có giá trị bằng tổng công  $A$  và nhiệt  $Q$  mà hệ nhận được trong quá trình đó.*

$$\Delta W = A + Q$$

(2-1)

Nhưng, như đã nói ở trên, đối với một hệ nhiệt động năng lượng của hệ bằng nội năng của nó, do đó  $\Delta W = \Delta U$  và (2-1) có dạng:

$$\Delta U = A + Q$$

(2-2)

Nghĩa là: ***Trong một quá trình biến đổi, độ biến thiên nội năng của hệ có giá trị bằng tổng công và nhiệt mà hệ nhận được trong quá trình đó.***

Đây chính là nguyên lý thứ nhất nhiệt động học. Ta nhận thấy nguyên lý thứ nhất nhiệt động học chính là định luật bảo toàn và chuyển hoá năng lượng vận dụng vào hệ vĩ mô.

Trong biểu thức (2-2), các đại lượng  $\Delta U$ ,  $A$  và  $Q$  có thể dương hoặc âm.

Nếu  $A > 0$  và  $Q > 0$  thì  $\Delta U > 0$ , nghĩa là nếu hệ thực sự nhận công và thực sự nhận nhiệt từ bên ngoài thì nội năng của hệ tăng.

Nếu  $A < 0$  và  $Q < 0$  thì  $\Delta U < 0$ , nghĩa là nếu hệ thực sự sinh công và toả nhiệt cho bên ngoài thì nội năng của hệ giảm.

## 2. Hệ quả

a. Nếu hệ ta xét là một hệ cô lập, nó sẽ không trao đổi công và nhiệt với bên ngoài  $A = 0$ ,  $Q = 0$  và  $\Delta U = 0$  thì  $U = \text{const}$ , nội năng của hệ bảo toàn.

Vậy: ***Nội năng của một hệ cô lập bảo toàn.***

Nếu hệ cô lập gồm hai vật chỉ trao đổi nhiệt với nhau và giả sử  $Q_1$ ,  $Q_2$  là nhiệt lượng mà hai vật đó nhận được của nhau thì

$$Q = Q_1 + Q_2 = 0 \quad \text{hay} \quad Q_1 = -Q_2 \quad \text{suy ra}$$

Nếu  $Q_1 < 0$  thì  $Q_2 > 0$  và ngược lại nếu  $Q_1 > 0$  thì  $Q_2 < 0$ . Nghĩa là, trong một hệ cô lập gồm hai vật chỉ trao đổi nhiệt, nhiệt lượng do vật này toả ra bằng nhiệt lượng do vật kia thu vào.

b. Một trường hợp rất quan trọng, đó là trường hợp hệ biến đổi một cách tuần hoàn. Nghĩa là sự biến đổi của hệ diễn ra theo một chu trình hay một quá trình kín. Sau một loạt biến đổi hệ trở về trạng thái ban đầu. Như vậy sau một chu trình  $\Delta U = 0$ , do đó theo nguyên lý thứ nhất  $A = -Q$ .

Nếu  $A > 0$  thì  $Q < 0$  và ngược lại nếu  $A < 0$  thì  $Q > 0$ . Vậy:

***Trong một chu trình, công mà hệ nhận được có giá trị bằng nhiệt do hệ toả ra hay công do hệ sinh ra có giá trị bằng nhiệt mà hệ nhận vào.***

Khi hệ thực hiện một quá trình biến đổi vô cùng nhỏ, biểu thức của nguyên lý thứ nhất nhiệt động học có dạng.

$$dU = \delta A + \delta Q$$

(2-3)

Về mặt toán học, cách viết trên cho thấy rằng  $dU$  là một vi phân toàn phần, nó không phụ thuộc vào quá trình.

$\delta A$  và  $\delta Q$  không phải là những vi phân toàn phần, độ lớn của chúng phụ thuộc vào quá trình biến đổi.

Tương ứng những đặc điểm toán học ấy, về mặt vật lý cách viết trên cho ta biết nội năng  $U$  là hàm trạng thái; Công  $A$  và nhiệt  $Q$  là hàm quá trình.

Để phân biệt, công mà hệ thực sự nhận được thường kí hiệu  $A$ ; Công mà hệ thực sự sinh ra thường kí hiệu  $A'$ .

Nhiệt mà hệ nhận:  $Q$

Nhiệt mà hệ toả ra:  $Q'$

### § 3. KHẢO SÁT CÁC QUÁ TRÌNH CÂN BẰNG CỦA KHÍ LÍ TƯỞNG

Nguyên lý thứ nhất của nhiệt động học được ứng dụng rộng rãi trong các ngành khoa học khác như điện tử học, hoá học, sinh học, vũ trụ học v.v... Trong chương này chúng ta giới hạn chỉ xét vấn đề áp dụng nguyên lý thứ nhất để khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng.

#### 1. Trạng thái cân bằng và quá trình cân bằng

***Trạng thái cân bằng của một hệ là trạng thái có các thông số trạng thái hoàn toàn xác định. Nếu môi trường xung quanh không tác dụng lên hệ thì trạng thái đó tồn tại mãi.***

Một hệ cô lập, nghĩa là hệ không trao đổi năng lượng với bên ngoài thì tự nó sẽ chuyển dần tới trạng thái cân bằng và trạng thái này tồn tại mãi.

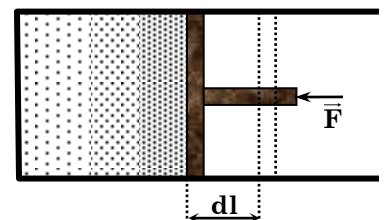
Nếu hệ là một khối khí nhất định thì mỗi trạng thái cân bằng của hệ được biểu diễn bằng một điểm trên đồ thị Mendeleev-Clapayron.

***Quá trình cân bằng là một quá trình biến đổi trong đó hệ đi qua một chuỗi liên tiếp các trạng thái cân bằng.***

Quá trình cân bằng theo định nghĩa này chỉ là một quá trình lý tưởng, không có trong thực tế. Vì trong quá trình biến đổi, khi hệ chuyển từ trạng thái cân bằng trước sang trạng thái cân bằng sau thì trạng thái cân bằng trước phải phá huỷ (để cho hệ ra khỏi trạng thái ấy), thế thì các thông số trạng thái của hệ đã biến đổi, không còn xác định nữa.

Tuy nhiên trong thực tế người ta đã thực hiện những quá trình có thể coi là cân bằng.

Hãy xét quá trình nén khí trong xylanh. Khi pitton đứng yên, khí ở trạng thái cân bằng với môi trường xung quanh. Áp suất, nhiệt độ và mật độ khí ở mọi điểm trong khối khí như nhau và hoàn toàn xác định. Khi pitton dịch chuyển do tác dụng của lực  $\vec{F}$  áp suất khí trong hệ sẽ tăng dần. Tuy nhiên sự tăng áp suất lại



Hình: 2-1

xảy ra khác nhau ở những điểm khác nhau. Ở sát bề mặt pitton áp suất tăng tức thời khi pitton bắt đầu dịch chuyển, sau đó sự tăng áp suất lan truyền dần đến các phần khác của khối khí với vận tốc bằng vận tốc âm thanh (cỡ 330m/s). Do đó khi pitton dịch chuyển, áp suất của khối khí không đồng đều mà giảm dần từ bề mặt pitton về phía đáy. Dịch chuyển pitton càng nhanh sự chênh lệch về áp suất giữa các phần của hệ càng lớn. Sự thay đổi của nhiệt độ trong khối khí cũng tương tự như sự thay đổi của áp suất.

Như vậy, trong quá trình nén khí, các thông số trạng thái của hệ luôn thay đổi và ở mỗi thời điểm ta không thể xác định được giá trị của chúng. Các trạng thái mà hệ đó đi qua là những trạng thái không cân bằng và quá trình biến đổi là không cân bằng.

Tuy nhiên nếu quá trình nén khí xảy ra **vô cùng chậm** để sao cho sự chênh lệch về áp suất, nhiệt độ cũng như mật độ khí giữa các phần của hệ rất nhỏ, có thể bỏ qua thì ở mỗi thời điểm các thông số trạng thái của hệ là hoàn toàn xác định và trạng thái của hệ khi đó là cân bằng. Quá trình nén khí vô cùng chậm là quá trình cân bằng. Trên đồ thị (P, V), quá trình cân bằng được biểu diễn bởi một đường cong liên tục (h. 2-2).

## 2. Công của áp lực trong quá trình cân bằng

Để tính công của áp lực, ta trở lại xét ví dụ về quá trình nén khí trong một xylanh. Giả sử quá trình nén là quá trình cân bằng, trong đó thể tích của hệ biến đổi từ  $V_1$  đến  $V_2$ . Ngoại lực tác dụng lên pitton là  $F$ .

Khi pitton dịch chuyển một đoạn  $dl$  thì khối khí nhận được công từ bên ngoài bằng

$$\delta A = -F \cdot dl$$

Dấu (-) ở bên phải vì khi nén  $dl < 0$ ; hệ nhận công  $\delta A > 0$ .

Vì quá trình cân bằng nên

$$F = P \cdot S$$

trong đó  $P$  là áp suất trên mặt pitton,  $S$  là diện tích mặt pitton.

$$\text{Do đó} \quad \delta A = -P \cdot S \cdot dl = -P \cdot dV$$

Với  $dV = S \cdot dl$  là độ biến thiên thể tích của khối khí ứng với dịch chuyển  $dl$

Công mà khối khí nhận được trong quá trình nén trên là

$$(2-4) \quad A = \int_{(1)}^{(2)} \delta A = - \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

(2-4) là công thức tính công của áp lực trong quá trình cân bằng.

Ngoài cách tính công bằng biểu thức toán học người ta còn tính công bằng đồ thị.

Giả sử hệ là một khối khí lí tưởng biến đổi từ trạng thái (1) đến trạng thái (2) theo một quá trình nào đó (h.2-2) và (h. 2-3).

Công mà hệ nhận được trong một quá trình vi phân:

$$2-2. \quad \delta A = -P \cdot dV \quad \text{có độ lớn bằng diện tích gạch chéo trên hình}$$

Công mà hệ nhận được trong quá trình biến đổi của hệ từ  $V_1$  đến  $V_2$ :

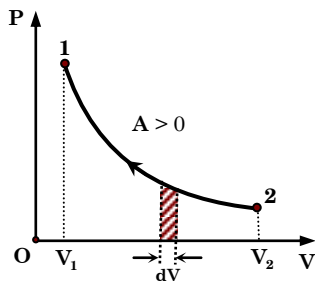
$$A = - \int_{V_1}^{V_2} P dV \quad \text{có giá trị bằng diện tích giới hạn bởi}$$

đường cong của quá trình với trục hoành và hai điểm trên trục hoành ứng với thể tích  $V_1, V_2$  của khối khí.

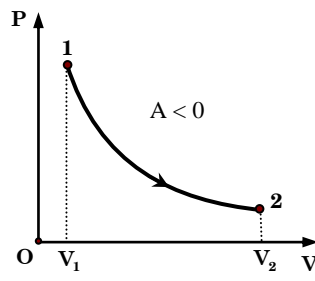
Nếu là quá trình nén khí thì công  $A$  dương (h. 2-2)

Nếu là quá trình giãn khí thì công  $A$  âm (h. 2-3)

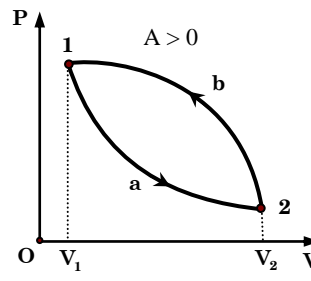
Xét quá trình biến đổi hệ là một quá trình kín (h. 2-4). Giả sử hệ biến đổi theo đường cong kín  $1a2b1$ , trong đó  $1a2$  là quá trình giãn;  $2b1$  là quá trình nén. Trong quá trình giãn  $1a2$  hệ nhận một công âm có giá trị bằng diện tích giới hạn bởi đường cong với trục hoành:  $1a2V_2V_11$ . Trong quá trình nén  $2b1$  hệ thực sự nhận công dương và có giá trị bằng diện tích hình  $2b1V_1V_22$ .



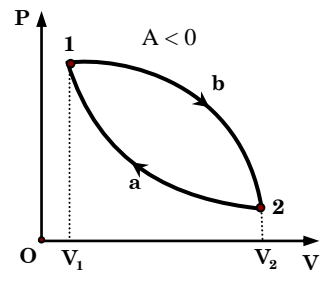
Hình: 2-2



Hình: 2-3



Hình: 2- 4a



Hình: 2- 4b

Công hệ nhận được trong toàn chu trình bằng công hệ nhận được trong quá trình giãn cộng với công hệ nhận được trong quá trình nén. Rõ ràng ta được kết quả là công mà hệ nhận được trong một quá trình kín có giá trị bằng diện tích giới hạn bởi đường cong biểu diễn chu trình.

Nếu chiều diễn biến của chu trình ngược chiều quay của kim đồng hồ thì ta gọi đó là chu trình ngược. Vì đường cong nén ở trên, đường cong giãn ở dưới nên công  $A$  của chu trình có giá trị dương (h. 2-4).

Nếu chiều diễn biến của chu trình cùng chiều quay của kim đồng hồ thì ta có chu trình thuận. Trong chu trình này đường cong giãn ở trên, đường cong nén ở dưới nên công mà hệ nhận được trong chu trình là âm (hệ sinh công).

### 3. Nhiệt trong quá trình cân bằng

Nhiệt dung riêng  $c$  của một chất là đại lượng có trị số bằng nhiệt lượng cần thiết truyền cho một đơn vị khối lượng của chất đó để nhiệt độ của nó tăng thêm một độ.

Nếu  $m$  là khối lượng của một vật,  $\delta Q$  là nhiệt lượng truyền cho vật trong một quá trình cân bằng nào đó và  $dT$  là biến thiên nhiệt độ của vật trong quá trình ấy, thì:

$$c = \frac{\delta Q}{mdT} \quad \text{hay} \quad \delta Q = cmdT \quad (2-5)$$

đơn vị  $c$ : J/kg.K

Theo định nghĩa nhiệt dung riêng  $c$  không đơn giá vì nhiệt lượng  $\delta Q$  phụ thuộc quá trình, tức là phụ thuộc những điều kiện tiến hành quá trình. Nhiệt dung riêng chỉ có giá trị xác định khi vật nhận nhiệt lượng  $\delta Q$  trong những điều kiện xác định.

Ngoài nhiệt dung riêng  $c$  người ta còn định nghĩa nhiệt dung phân tử  $C$  của một chất khí như sau:

Nhiệt dung phân tử của một chất là một đại lượng có giá trị bằng nhiệt lượng cần truyền cho 1 kmol chất đó để nhiệt độ của nó tăng thêm một độ.

$$\text{Rõ ràng} \quad C = \mu c \quad (2-6)$$

đơn vị  $C$ : J/kmol.K

trong đó  $\mu$  là khối lượng 1 kmol chất đó.

Thay nhiệt dung riêng  $c$  từ (2-6) vào (2-5) ta được:

$$\delta Q = \frac{m}{\mu} C dT \quad (2-7)$$

(2-7) là biểu thức tính nhiệt mà hệ nhận được trong quá trình biến đổi vi phân.

Tiếp theo, chúng ta vận dụng nguyên lý thứ nhất nhiệt động học để khảo sát các quá trình cân bằng của hệ khí lí tưởng.

#### 4. Quá trình đẳng tích

Đó là quá trình trong đó thể tích của hệ không đổi. Phương trình của quá trình:

$$\frac{P}{T} = \text{const} \Leftrightarrow \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

hoặc  $V = \text{const}$

Trên giản đồ (P, V) quá trình đẳng tích biểu diễn bằng một đoạn thẳng song song với trục OP.

$1 \rightarrow 2$  là quá trình hơi nóng đẳng tích

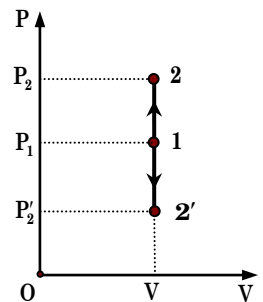
$1 \rightarrow 2'$  là quá trình làm lạnh đẳng tích

Ví dụ: Quá trình hơi nóng (làm lạnh) khí trong 1 bình kín có vỏ không dẫn nở.

Công mà hệ nhận được

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} PdV = 0$$

Nhiệt mà hệ nhận được



Hình: 2-5

$$Q = \int_{(1)}^{(2)} \delta Q = \frac{m}{\mu} C_V \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{m}{\mu} C_V (T_2 - T_1)$$

$$Q = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T \quad (2-$$

10)

Trong đó  $C_V$  là nhiệt dung phân tử đẳng tích

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

Theo nguyên lý thứ nhất, độ biến thiên nội năng của hệ:

$$\Delta U = A + Q$$

Vì quá trình là đẳng tích,  $A = 0$  nên  $\Delta U = Q$ . Mặt khác, chúng ta lại biết nội năng của khí lí tưởng

$$U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT \quad \text{suy ra}$$

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T$$

Theo (2-10) và với  $\Delta U = Q$  ta viết được

$$\frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T \quad \rightarrow C_V = \frac{i}{2} R \quad (2-$$

11)

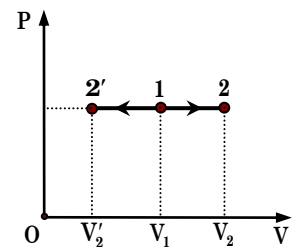
### 5. Quá trình đẳng áp

Đó là quá trình trong đó áp suất của hệ không đổi. Phương trình của quá trình:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \Leftrightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\text{hoặc } P = \text{const}$$

Trên đồ thị (P, V) quá trình đẳng áp được biểu diễn bằng một đoạn thẳng song song với trục OV.



Hình: 2-6

$1 \rightarrow 2$  là quá trình giãn đẳng áp

$1 \rightarrow 2'$  là quá trình nén đẳng áp

Ví dụ: Truyền nhiệt để khí trong xylanh giãn vô cùng chậm. Khi đó áp suất trong khối khí luôn luôn cân bằng áp suất ngoài piston. Đó là quá trình đẳng áp.

Công mà hệ nhận được

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} P dV = P(V_1 - V_2) \quad (2-$$

13)

Nhiệt mà khí nhận được



$$Q = \int_{(1)}^{(2)} \delta Q = \frac{m}{\mu} C_P \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$Q = \frac{m}{\mu} C_P (T_2 - T_1) \quad (2-$$

14)

Theo nguyên lí thứ nhất

$$\Delta U = A + Q = P(V_1 - V_2) + \frac{m}{\mu} C_P \Delta T$$

Trong đó độ biến thiên nội năng

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T \quad \text{do đó ta có phương trình}$$

$$\frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T = P(V_1 - V_2) + \frac{m}{\mu} C_P \Delta T$$

mà  $P(V_1 - V_2) = \frac{m}{\mu} R(T_1 - T_2) = -\frac{m}{\mu} R \Delta T$

$$\rightarrow \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T = -\frac{m}{\mu} R \Delta T + \frac{m}{\mu} C_P \Delta T$$

$$\rightarrow C_P = \frac{i+2}{2} R \quad (2-$$

15)

Suy ra hệ thức Mayer:

$$C_P - C_V = R \quad (2-$$

16)

Tỉ số  $\frac{C_P}{C_V} = \gamma = \frac{i+2}{i} \quad (2-$

17)

gọi là hệ số Poatxông (còn gọi là hệ số đoạn nhiệt).

## 6. Quá trình đẳng nhiệt

Đó là quá trình trong đó nhiệt độ của hệ không đổi

Những quá trình trong đó hệ tiếp xúc với môi trường vô hạn có nhiệt độ không đổi hay hệ tiếp xúc với bình điều nhiệt đều là những quá trình đẳng nhiệt.

Phương trình của quá trình đẳng nhiệt

$$PV = const \Leftrightarrow P_1 V_1 = P_2 V_2$$

(2-18)

Trên đồ thị (P, V), quá trình đẳng nhiệt được biểu diễn bằng một đường hyperbol (h. 2-17)

$1 \rightarrow 2$  là quá trình giãn đẳng nhiệt

$1 \rightarrow 2'$  là quá trình nén đẳng nhiệt

Công hệ nhận được:

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Theo phương trình trạng thái của khí lí tưởng

$$P = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V} \rightarrow A = - \frac{m}{\mu} RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_1}{V_2}$$

(2-19)

Từ (2-18) ta suy ra công thức thứ hai để tính công

$$\rightarrow A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

(2-20)

Độ biến thiên nội năng  $\Delta U = 0$ , vì  $T = \text{const}$

Từ nguyên lí thứ nhất  $\Delta U = A + Q$  ta tính nhiệt mà hệ nhận được

$$Q = \Delta U - A = -A$$

$$\text{Vậy: } Q = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

(2-21)

## 7. Quá trình đoạn nhiệt

Đó là một quá trình trong đó hệ không trao đổi nhiệt với bên ngoài.

$$Q = 0 \quad \text{hay} \quad \delta Q = 0$$

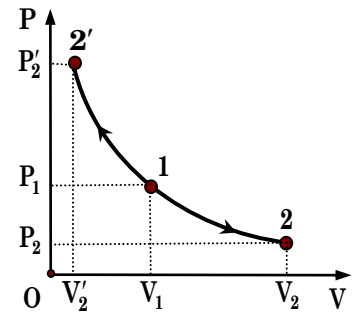
Ví dụ quá trình nén hoặc giãn khí trong một xylanh có vỏ cách nhiệt lí tưởng.

Theo nguyên lí thứ nhất, với  $Q = 0$  thì

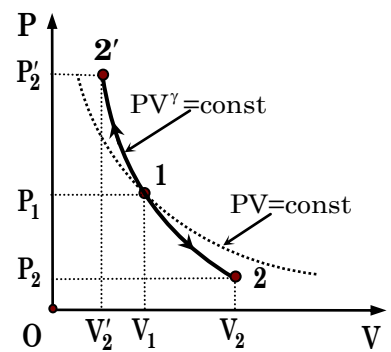
$$\Delta U = A = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T \quad \text{hay} \quad dU = \delta A = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT$$

Mặt khác  $\delta A = -P dV$ ; còn  $\frac{i}{2} R = C_V$  nên ta có phương

trình



Hình: 2-7



Hình: 2-8

$$\frac{m}{\mu} C_V dT = -PdV = -\frac{m}{\mu} \frac{RT}{V} dV \rightarrow$$

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{C_V} \frac{dV}{V} = 0$$

$$\text{mà } \frac{R}{C_V} = \frac{C_p - C_V}{C_V} = \gamma - 1 \rightarrow \frac{dT}{T} + (\gamma - 1) \frac{dV}{V} = 0$$

tích phân phương trình này, được:

$$\ln T + (\gamma - 1) \ln V = \text{const}$$

$$\ln TV^{\gamma-1} = \text{const} \quad \text{hay}$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}$$

(2-22)

Từ phương trình trạng thái khí lí tưởng ta có

$$T = \frac{PV}{\frac{m}{\mu} R} \quad \text{thay vào (2-22) được:}$$

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

(2-23)

Rút V từ phương trình trạng thái khí lí tưởng thay vào (2-23), được.

$$TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const} \quad (2-24)$$

24)

Các phương trình (2-22), (2-23), (2-24) là các phương trình của quá trình đoạn nhiệt. Trên đồ thị (P, V) phương trình  $PV^\gamma = \text{const}$  biểu diễn bằng một đoạn đường cong (đường liền nét trong hình 2-8). Đường cong đó gọi là đường cong đoạn nhiệt.

Nhận thấy đường đoạn nhiệt dốc hơn đường đẳng nhiệt. Điều này được giải thích như sau: trong quá trình đoạn nhiệt,  $\delta Q = 0$  do đó độ biến thiên nội năng đúng bằng công mà khối khí nhận vào.

Khi nén đoạn nhiệt (đoạn  $1 \rightarrow 2'$ )  $\delta A > 0$  do đó  $dU > 0$  suy ra  $dT > 0$ , nghĩa là nhiệt độ của khí tăng, vì vậy đường đoạn nhiệt đi lên nhanh hơn đường đẳng nhiệt.

Khi giãn đoạn nhiệt (đoạn  $1 \rightarrow 2$ )  $\delta A < 0$  do đó  $dU < 0$  suy ra  $dT < 0$ , nghĩa là nhiệt độ của khí giảm, vì vậy đường đoạn nhiệt đi xuống nhanh hơn đường đẳng nhiệt. Kết quả đường đoạn nhiệt dốc hơn đường đẳng nhiệt.

Hoặc là chỉ xét riêng về mặt toán học ta thấy chỉ số đoạn nhiệt  $\gamma = \frac{i+2}{i} > 1$  nên

đường cong  $PV^\gamma = \text{const}$  sẽ dốc hơn đường cong  $PV = \text{const}$ .

Trong quá trình đoạn nhiệt, để tính công, ta áp dụng công thức tổng quát

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

Biểu thức tính công A sẽ có dạng tùy thuộc biểu thức của áp suất P.

Ví dụ từ phương trình

$$PV^\gamma = \text{const} \Leftrightarrow PV = P_1 V_1^\gamma$$

trong đó  $P_1 V_1^\gamma$  đã biết

$$P = \frac{P_1 V_1^\gamma}{V^\gamma}$$

suy ra

$$A = -P_1 V_1^\gamma \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma} = \frac{P_1 V_1^\gamma}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1-\gamma} - 1 \right]$$

hoặc thay  $P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$  thì

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

Hoặc nếu có thể thì áp dụng nguyên lý thứ nhất:

$$A = \Delta U = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T$$

Có thể tóm tắt kết quả khảo sát các quá trình cân bằng của khí lí tưởng trong bảng dưới đây.

Quá trình	Phương trình	A	Q	$\Delta U$
Đẳng tích	$\frac{P}{T} = \text{const}$	0	$\frac{m}{\mu} C_V \Delta T$	$\frac{m}{\mu} C_V \Delta T$
Đẳng áp	$\frac{V}{T} = \text{const}$	$P(V_1 - V_2)$	$\frac{m}{\mu} C_P \Delta T$	$\frac{m}{\mu} C_V \Delta T$
Đẳng nhiệt	$PV = \text{const}$	$\frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_1}{V_2}$	$\frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$	0
Đoạn nhiệt	$PV^\gamma = \text{const}$	$\frac{m}{\mu} C_V \Delta T$	0	$\frac{m}{\mu} C_V \Delta T$

**Nhận xét:** Công và nhiệt trong các quá trình khác nhau có giá trị khác nhau, nghĩa là công và nhiệt phụ thuộc quá trình. Điều này chứng tỏ: Công và nhiệt là hàm của quá trình.

Trong khi đó trong cả bốn quá trình độ biến thiên nội năng đều có chung một biểu thức  $\frac{m}{\mu} C_V \Delta T$  (trong quá trình đẳng nhiệt  $\Delta T = 0$ ). Suy ra độ biến thiên nội năng

không phụ thuộc vào quá trình biến đổi mà chỉ phụ thuộc vào trạng thái đầu và trạng thái cuối. Nội năng U là hàm trạng thái.

### **BÀI TẬP VÍ DỤ**

**Ví dụ 1:** Tìm nhiệt dung riêng đẳng áp và đẳng tích của một hỗn hợp khí gồm 3 kmol khí argon (Ar) và 2 kmol khí nitơ (N<sub>2</sub>).

Cho biết 1 kmol khí Ar là  $\mu_{\text{Ar}} = 40 \text{ kg}$  và

1 kmol khí N<sub>2</sub> là  $\mu_{N_2} = 28kg$

### **Giải**

Trước hết ta tính xem 1 kmol hỗn hợp khí trên,  $\mu$  bằng bao nhiêu?

Áp dụng phương trình trạng thái khí lí tưởng cho từng loại khí và cho hỗn hợp khí

$$\left. \begin{array}{l} P_1 V = \frac{m_1}{\mu_1} RT \\ P_2 V = \frac{m_2}{\mu_2} RT \\ PV = \frac{m}{\mu} RT \\ P = P_1 + P_2 \end{array} \right\} (P_1 + P_2)V = \frac{m}{\mu} RT = \left( \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right) RT ; \quad m = m_1 + m_2$$

$$\rightarrow \mu = \frac{m_1 + m_2}{\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}} \quad (*)$$

ở đây chỉ số (1) ứng với Ar; chỉ số (2) ứng với khí N<sub>2</sub>

$$\rightarrow \frac{m_1}{\mu_1} = n_1 = 3 \quad \frac{m_2}{\mu_2} = n_2 = 2$$

$$\text{và} \quad m_1 = 3\mu_1 = 3.40 = 120kg$$

$$m_2 = 2\mu_2 = 2.28 = 56kg$$

Thay vào (\*) ta được

$$\rightarrow \mu = \frac{120 + 56}{3 + 2} = 35,2kg / kmol$$

Tính nhiệt dung đẳng áp.

Nhiệt lượng mà lượng khí Ar nhận được để nhiệt độ tăng thêm 1 lượng dT.

$$\delta Q_1 = n_1 C_{1P} dT$$

với nitơ:

$$\delta Q_2 = n_2 C_{2P} dT$$

và với hỗn

$$\delta Q = n C_P dT = \delta Q_1 + \delta Q_2 = (n_1 C_{1P} + n_2 C_{2P}) dT$$

$C_P, C_{1P}, C_{2P}$  là nhiệt dung phân tử đẳng áp.

$$\text{Do đó} \quad C_P = \frac{n_1 C_{1P} + n_2 C_{2P}}{n}$$

Ở phần trên ta đã có phương trình

$$\frac{m}{\mu} = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \quad \rightarrow n = n_1 + n_2 = 5$$

Vậy

$$C_P = \frac{3C_{1P} + 2C_{2P}}{5}$$

(\*\*)

$$C_P = \frac{i+2}{2} \rightarrow C_{1P} = \frac{3+2}{2}R \quad \text{và} \quad C_{2P} = \frac{5+2}{2}R$$

thay vào (\*\*) được

$$C_P = \frac{3 \cdot \frac{5}{2}R + 2 \cdot \frac{7}{2}R}{5} = 2,9R$$

Nhiệt dung riêng đẳng áp của hỗn hợp

$$c_P = \frac{C_P}{\mu} = \frac{2,9R}{35,2} = 685 \text{ J/kg.K}$$

Tính nhiệt dung riêng đẳng tích

$$\left. \begin{aligned} \delta Q_1 &= n_1 C_{1V} dT \\ \delta Q_2 &= n_2 C_{2V} dT \\ \delta Q &= n C_V dT \\ \delta Q &= \delta Q_1 + \delta Q_2 \end{aligned} \right\} n C_V dT = n_1 C_{1V} dT + n_2 C_{2V} dT$$

$$C_V = \frac{n_1 C_{1V} + n_2 C_{2V}}{n}$$

$$C_V = \frac{3 \cdot \frac{i}{2}R + 2 \cdot \frac{i}{2}R}{n} = \frac{3 \cdot \frac{3}{2}R + 2 \cdot \frac{6}{2}R}{5} = 2,1R$$

Nhiệt dung riêng đẳng tích

$$c_V = \frac{C_V}{\mu} = \frac{2,1R}{35,2} = \frac{2,18,31.103}{35,2}$$

$$c_V \approx 495 \frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$$

**Vi dụ 2:** Một khối khí nitơ (được coi là khí lí tưởng) có thể tích  $V = 5$  lít và áp suất  $P = 5\text{at}$ . Người ta thực hiện dẫn nở khối khí đến thể tích  $V_2 = 10$  lít bằng các quá trình đẳng áp (1), đẳng nhiệt (2) và đoạn nhiệt (3).

- Vẽ các quá trình (1), (2) và (3) trên đồ thị (P,V)
- Trong các quá trình trên, quá trình nào có công trao đổi nhỏ nhất. Tính công trao đổi của khối khí trong quá trình đó.

**Giải**

- Vẽ các quá trình trên đồ thị (P, V). Trong quá trình đẳng nhiệt, gọi  $P_2$  là áp suất ở trạng thái cuối ta có:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \rightarrow \quad P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{5 \cdot 5}{10} = 2,5\text{at}$$

Chú ý: chọn đơn vị cho phù hợp. Nếu thể tích tính bằng lít, thì áp suất tính bằng at. Trường hợp không biết cách chọn đơn vị phù hợp thì tốt nhất là chuyển sang hệ đơn vị SI. Khi đó

$$P_1 = 5at = 5.9,81.10^4 N/m^2$$

$$V_1 = 5l = 5.10^{-3} m^3$$

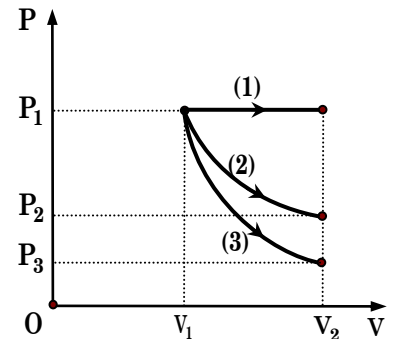
$$V_2 = 10l = 10^{-2} m^3$$

Trong quá trình đoạn nhiệt, gọi  $p_3$  là áp suất ở trạng thái cuối, ta có:

$$P_1 V_1^\gamma = p_3 V_2^\gamma \rightarrow P_3 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma$$

$$\text{Ở đây } \gamma = \frac{i+2}{i} = \frac{5+2}{5} = 1,4$$

$$\rightarrow P_3 = 5. \left( \frac{5}{10} \right)^{1,4} = 1,89at$$



b. Công trao đổi

Nhìn đồ thị ta thấy trong quá trình đoạn nhiệt (3), công trao đổi có giá trị nhỏ nhất và ta tính được

$$A = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{\gamma - 1} = \frac{1,89.10^5.10.10^{-3} - 5.10^5.5.10^{-3}}{1,4 - 1} = -1525(J) \text{ (hệ thực sự sinh công)}$$

Chú ý: Ở câu này để tránh sự phiền phức khi phải tìm đơn vị năng lượng phù hợp với đơn vị at của áp suất và lít của thể tích, ta chuyển sang sử dụng hệ đơn vị SI. Trong hệ đơn vị SI:

Đơn vị áp suất là  $N/m^2$

Đơn vị thể tích là  $m^3$

Đơn vị của công là Jun (J)

**Ví dụ 3:** Một lượng khí lí tưởng lưỡng nguyên tử ở trạng thái (1) có thể tích  $V_1 = 2$  lít, áp suất  $P_1 = 1at$  và nhiệt độ  $t_1 = 20^\circ C$ . Người ta đốt nóng đẳng tích đến trạng thái (2) có áp suất  $P_2 = 3at$ , sau đó cho khí giãn đẳng nhiệt đến trạng thái (3) có áp suất ban đầu; cuối cùng nén đẳng áp khối khí về trạng thái ban đầu.

- Tính nhiệt độ  $T_2$  của khối khí ở trạng thái (2) và thể tích của khối khí ở trạng thái (3).
- Vẽ các quá trình trên đồ thị (P, V).
- Trong cả chu trình hệ nhận hay cho nhiệt. Tính nhiệt lượng mà hệ nhận hay cho đó.

**Giải**

- a. Từ (1)  $\rightarrow$  (2) là quá trình đẳng tích nên  $V_2 = V_1$ . Trạng thái (2) có các thông số  $P_2, V_2, T_2$ .

Từ phương trình

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad \text{suy ra} \quad T_2 = \frac{P_2}{P_1} T_1 = \frac{3}{1} \cdot 293 = 879K$$

(2)  $\rightarrow$  (3) là quá trình đẳng nhiệt, theo đề bài  $P_3 = P_1$ , nên có phương trình

$$P_2 V_2 = P_3 V_3 \quad \text{hay} \quad P_2 V_1 = P_1 V_3$$

$$\rightarrow V_3 = \frac{P_2}{P_1} V_1 = \frac{3}{1} \cdot 2 = 6 \text{ lít}$$

b. Vẽ chu trình

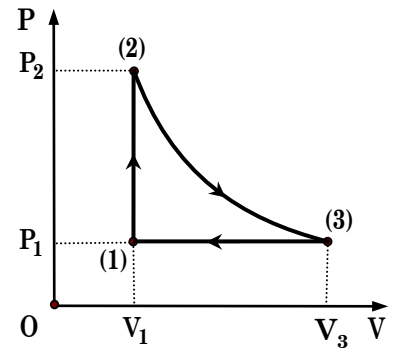
Trạng thái (1) có  $P_1 = 1 \text{at}$ ;  $V_1 = 2 \text{ lít}$ ;  $T_1 = 293K$

Trạng thái (2) có  $P_2 = 3 \text{at}$ ;  $V_2 = V_1$ ;  $T_2 = 897K$

Trạng thái (3) có  $P_3 = P_1$ ;  $V_3 = 6 \text{ lít}$ ;  $T_3 = T_2$

c. Chu trình thuận nên  $A < 0$

$$\Delta U = A + Q = 0 \rightarrow Q = -A > 0$$



Vậy chu trình nhận nhiệt. Nhiệt nhận vào trong chu trình:

$$Q = Q_{12} + Q_{23} + Q_{31}$$

Trước hết tính khối lượng khí có phương trình trạng thái lí tưởng

$$P_1 V_1 = nRT_1 \quad \rightarrow n = \frac{P_1 V_1}{RT_1}$$

$$P_1 = 1 \text{at} \approx 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$V_1 = 2 \text{ lít} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ J/kmol.K}$$

$$T_1 = 293K$$

$$n = 0,082 \cdot 10^{-3} \text{ kmol}$$

$$Q_{12} = nC_V(T_2 - T_1) = n \frac{i}{2} (T_2 - T_1)$$

với  $i = 5$

$$\rightarrow Q_{12} = 999,98 \approx 1000J$$

$$Q_{23} = nRT_2 \ln \frac{P_2}{P_1} = 659J$$

$$Q_{31} = nC_P(T_1 - T_3)$$

trong đó  $T_3 = T_2 = 897K$ ;  $C_P = \frac{i+2}{2} R$ ;  $i = 5$

$$Q_{31} = -1400J$$



Do đó  $Q = 1000 + 659 - 1400 = 259J$

### **BÀI TẬP TỰ GIẢI**

**Bài 1:** Tìm nhiệt dung riêng đẳng áp và đẳng tích của một khối khí. Biết khối lượng 1kmol của khí đó là 30kg/kmol và hệ số Poát xông là  $\gamma = 1,4$ .

Đáp số: a.  $C_p = 969J/kg.K$ ; b.

$$C_v = 692,6J/kg.K$$

**Bài 2:** Có 10g khí oxy ở nhiệt độ 10°C và áp suất 3at. Sau khi đốt nóng đẳng áp thể tích khí tăng đến 10 lít. Tính:

- Nhiệt lượng cung cấp cho khối khí
- Độ biến thiên nội năng của khối khí
- Công do khối khí sinh ra khi giãn nở

Cho  $\mu_{O_2} = 32Kg/kmol$ .

Đáp số: a.  $Q = 7,8.10^3J$ ; b.  $\Delta U = 5,5.10^3J$ ; c.

$$A' = 2,3.10^3J$$

**Bài 3:** Một bình kín có thể tích 20 lít đựng một chất khí đơn nguyên tử, khối lượng riêng của khối khí đó là 0,2kg/m<sup>3</sup>. Khi đốt nóng khối khí lên thêm 80° thì tốn một nhiệt lượng 997J. Tìm khối lượng của một mol khí đó.

Đáp Số:

$$\mu = \frac{3\rho VR\Delta T}{2Q} = 4kg/kmol$$

**Bài 4:** Một khối khí đơn nguyên tử ở áp suất 10<sup>5</sup>N/m<sup>2</sup> và nhiệt độ 7°C. Sau khi đốt nóng đẳng áp để nhiệt độ lên đến 40°C, thì khối khí chiếm thể tích 8 lít. Hãy tính nhiệt lượng mà khối khí nhận được.

Đáp số:  $Q = 400J$

**Bài 5:** Có 1 kmol khí lí tưởng được đốt nóng đẳng áp. Biết rằng khi nhiệt độ khối khí tăng thêm 72° thì phải tốn một nhiệt lượng  $Q = 1,6kJ$ . Hãy tìm công mà khí sinh ra, độ biến thiên nội năng của khí và hệ số Poát xông.

Đáp số:

$$A' = 0,6kJ; \Delta U = 1kJ; \gamma = 1,6$$

**Bài 6:** Khi giảm thể tích của khối khí oxy từ thể tích 20 lít đến 10 lít thì áp suất của khối khí tăng 10<sup>5</sup>N/m<sup>2</sup> đến 2,5.10<sup>5</sup>N/m<sup>2</sup>. Hỏi nội năng của khối khí sẽ thay đổi thế nào? Tính độ biến thiên nội năng.

Đáp số:  $\Delta U = 1,25.10^3J$

**Bài 7:** Một khối khí lí tưởng lưỡng nguyên tử ở áp suất 10<sup>6</sup>N/m<sup>2</sup> và thể tích 2m<sup>3</sup> được giãn nở tới thể tích 4m<sup>3</sup>. Tìm áp suất cuối cùng và công do khối khí sinh ra khi quá trình giãn nở đó là:

- Đẳng áp

- b. Đẳng nhiệt
- c. Đoạn nhiệt

Đáp số: a.  $P_2 = 10^6 \text{ N/m}^2$ ;  $A' = 2 \cdot 10^6 \text{ J}$

b.  $P_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $A' = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 13,86 \cdot 10^5 \text{ J}$

c.  $P_2 = 3,79 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $A' = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{\gamma - 1} = 12,1 \cdot 10^5 \text{ J}$

**Bài 8:** Có 3,2g khí oxy ở nhiệt độ  $20^\circ\text{C}$  và áp suất  $10^6 \text{ N/m}^2$  được dẫn đoạn nhiệt tới áp suất  $3,8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ . Xác định:

- a. Thể tích của khối khí tăng bao nhiêu lần sau khi dẫn.
- b. Nhiệt độ của khối khí sau khi dẫn.
- c. Công do khối khí sinh ra.

Đáp số: a.  $\frac{V_2}{V_1} = 2$ ; b.  $T = 222 \text{ K}$ ; c.  $A' = 73,6 \text{ J}$

**Bài 9:** Hãy vẽ đồ thị các quá trình đẳng tích, đẳng áp, đẳng nhiệt và đoạn nhiệt đối với khí lí tưởng trên những giản đồ.

- a. (P, V)
- b. (V, T)
- c. (V, U)
- d. (T, U)

**Bài 10:** Một khối khí oxy ở trạng thái thứ nhất có thể tích  $V_1 = 3 \text{ lít}$  và áp suất  $P_1 = 8,2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  biến đổi sang trạng thái hai có thể tích  $V_2 = 4,5 \text{ lít}$  và áp suất  $P_2 = 6 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  (xem hình vẽ trong bài).

Tìm nhiệt lượng khối khí nhận được, công khối khí sinh ra và độ biến thiên nội năng của khối khí trong hai cách biến đổi:

- a. Khối khí biến đổi theo đường ACB
- b. Khối khí biến đổi theo đường ADB

Đáp số: a. Theo đường ACB:  $Q_{ACB} = 1,5 \text{ kJ}$ ;  $A'_{ACB} = 0,9 \text{ kJ}$ ;  $\Delta U = 0,6 \text{ kJ}$

b. Theo đường ADB:  $Q_{ADB} = 1,8 \text{ kJ}$ ;  $A'_{ADB} = 1,2 \text{ kJ}$ ;  $\Delta U = 0,6 \text{ kJ}$

