

CHƯƠNG 6. NGUYÊN LÝ I CỦA NHIỆT ĐỘNG LỰC HỌC

Giảng viên: Nguyễn Tuấn Cảnh

Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN

Email: canhnt@vnu.edu.vn

Ngày 18 tháng 11 năm 2021

NỘI DUNG

- 1 CÁC KHÁI NIỆM
- 2 NGUYÊN LÝ I CỦA NHIỆT ĐỘNG LỰC HỌC
- 3 KHẢO SÁT CÁC QUÁ TRÌNH CÂN BẰNG CỦA KHÍ LÝ TƯỞNG

6.1. Các khái niệm

6.1.1. Hệ nhiệt động

- Mọi tập hợp các vật được xác định bởi các thông số vĩ mô (p , V , T), độc lập đối với nhau, được gọi là hệ nhiệt động.
- Các vật nằm ngoài hệ gọi là môi trường.
- Hệ cô lập là hệ hoàn toàn không có tương tác và trao đổi năng lượng với môi trường.
- Có hai dạng trao đổi năng lượng giữa hệ và môi trường là công và nhiệt. Từ đó chia làm hai dạng hệ cô lập:
 - ▶ Hệ là cô lập về phương diện nhiệt: không có trao đổi nhiệt với môi trường ngoài.
 - ▶ Hệ là cô lập về phương diện cơ học: không có trao đổi công với môi trường ngoài.

6.1. Các khái niệm

6.1.2. Công và nhiệt

- **Nhiệt:** Dạng năng lượng trao đổi trực tiếp giữa các phân tử chuyển động hỗn loạn của các vật tương tác, xảy ra do sự chênh lệch nhiệt độ giữa các vật hoặc giữa vật với môi trường.

Ví dụ:

Một vật lạnh tiếp xúc với một vật nóng, các phân tử chuyển động nhanh của vật nóng sẽ va chạm với các phân tử chuyển động chậm hơn của vật lạnh và truyền cho chúng một phần động năng của mình. Quá trình này sẽ dừng lại khi nhiệt độ của hai vật bằng nhau.

- Có sự phân biệt giữa **nhiệt** và **nội năng**, tương tự như sự phân biệt giữa **công** và **cơ năng**. Không có khái niệm nhiệt của một hệ, mà chỉ có khái niệm nhiệt được truyền từ vật này sang vật khác do sự chênh lệch về nhiệt độ.
- Đơn vị của nhiệt: 1 calo (cal) là nhiệt cần cung cấp cho 1 g nước để nhiệt độ của nó tăng từ 14,5 °C đến 15,5 °C. Một đơn vị nhiệt Anh (BTU) là năng lượng cần cung cấp cho 1 pound (0,4536 kg) nước để nhiệt độ của nó tăng từ 63 °F đến 64 °F.

6.1. Các khái niệm

6.1.2. Công và nhiệt

- Công và nhiệt đều là các đại lượng đo mức độ trao đổi năng lượng giữa các vật.
- Công và nhiệt có mối liên hệ chặt chẽ với nhau và có thể chuyển hóa lẫn nhau: công có thể chuyển hóa thành nhiệt và ngược lại.
- Sự chuyển hóa giữa công và nhiệt luôn tuân theo một hệ thức định lượng xác định: $4,18 \text{ J} = 1 \text{ cal}$.
- Công và nhiệt chỉ xuất hiện trong quá trình biến đổi trạng thái của hệ. Công và nhiệt là hàm của quá trình.

6.1. Các khái niệm

6.1.2. Công và nhiệt

- Quy ước dấu của công (mà hệ nhận được):
 - ▶ $A > 0$: hệ nhận công từ bên ngoài.
 - ▶ $A < 0$: hệ sinh công cho bên ngoài.
- Quy ước dấu của nhiệt:
 - ▶ $Q > 0$: hệ thu nhiệt từ bên ngoài.
 - ▶ $Q < 0$: hệ tỏa nhiệt ra bên ngoài.

6.2. Nguyên lý I của nhiệt động lực học

6.2.1. Mô tả chung

- Nguyên lý I của nhiệt động học nêu lên mối quan hệ định lượng giữa công, nhiệt và nội năng của hệ.
- Nguyên lý I là một trường hợp riêng của định luật bảo toàn và chuyển hóa năng lượng áp dụng vào các quá trình nhiệt động.
- Các trường hợp được xét trong phần này đều giả thiết cơ năng của hệ không đổi. Năng lượng của hệ là nội năng.

6.2. Nguyên lý I của nhiệt động lực học

6.2.2. Các cách phát biểu

Cách phát biểu thứ nhất

Độ biến thiên nội năng của hệ trong một quá trình biến đổi vĩ mô có giá trị bằng tổng công A và nhiệt lượng Q mà hệ nhận được trong quá trình đó:

$$\Delta U = A + Q$$

- Khi hệ thực hiện một quá trình biến đổi vô cùng nhỏ, biểu thức của nguyên lý I có thể viết:

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

- dU là độ biến thiên nội năng của hệ (vi phân toàn phần, vì nội năng là hàm của trạng thái).
- δA và δQ là công và nhiệt của hệ nhận được trong quá trình (vi phân không hoàn chỉnh vì A , Q là hàm của quá trình).

6.2. Nguyên lý I của nhiệt động lực học

6.2.2. Các cách phát biểu

Cách phát biểu thứ hai

Gọi $A' = -A$ là công mà hệ sinh ra, ta có thể viết biểu thức nguyên lý I như sau:

$$Q = \Delta U + A'$$

Nhiệt truyền cho hệ trong một quá trình bằng độ biến thiên nội năng của hệ và công mà hệ sinh ra trong quá trình đó.

6.2. Nguyên lý I của nhiệt động lực học

6.2.2. Các cách phát biểu

Cách phát biểu thứ ba

Với một chu trình, không có sự thay đổi nội năng: $A = -Q$.

- Nếu $A > 0$ (hệ nhận công từ bên ngoài) thì $Q < 0$ (hệ tỏa nhiệt ra bên ngoài).
- Nếu $A < 0$ (hệ sinh công cho bên ngoài) thì $Q > 0$ (hệ thu nhiệt từ bên ngoài).
Trong một chu trình, công mà hệ nhận được có giá trị bằng nhiệt do hệ tỏa ra bên ngoài (hay công do hệ sinh ra có giá trị bằng nhiệt mà hệ thu từ bên ngoài).

6.2. Nguyên lý I của nhiệt động lực học

6.2.3. Hệ quả

- Nếu hệ cô lập: $A = Q = 0$. Do đó: $dU = 0$, $U = \text{const.}$
Vậy: *Nội năng của hệ cô lập được bảo toàn.*
- Nếu hệ cô lập gồm hai vật chỉ trao đổi nhiệt với nhau thì:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 0; \quad Q_1 = -Q_2$$

Nếu $Q_1 < 0$ (vật 1 tỏa nhiệt) thì $Q_2 > 0$ (vật 2 thu nhiệt) và ngược lại.

Vậy: *Trong một hệ cô lập gồm hai vật chỉ trao đổi nhiệt, nhiệt lượng do vật này tỏa ra bằng nhiệt lượng mà vật kia thu vào.*

6.2. Nguyên lý I của nhiệt động lực học

6.2.4. Ý nghĩa

- Nguyên lý I là định luật bảo toàn và biến đổi vận động. Mọi hiện tượng vĩ mô đều tuân theo nguyên lý I.
- Đối với các máy làm việc tuần hoàn: $A = -Q$. Nếu $Q = 0$ thì $A = 0$. Do đó: Không thể sinh công mà không thay đổi nội năng hoặc nhận nhiệt từ bên ngoài.
→ *Không thể chế tạo được động cơ vĩnh cửu loại 1.*

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.1. Trạng thái cân bằng

- Trạng thái cân bằng của hệ là trạng thái không biến đổi theo thời gian và tính bất biến đó không phụ thuộc các quá trình của ngoại vật.
- Mỗi trạng thái cân bằng được xác định bằng một số thông số nhiệt động. Nếu hệ là khối khí thì các thông số nhiệt động thường lấy hai thông số độc lập là p, V . (T được xác định qua hai thông số này)
- Trạng thái cân bằng của hệ trên giản đồ p - V được biểu diễn bằng một điểm.

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.2. Quá trình cân bằng

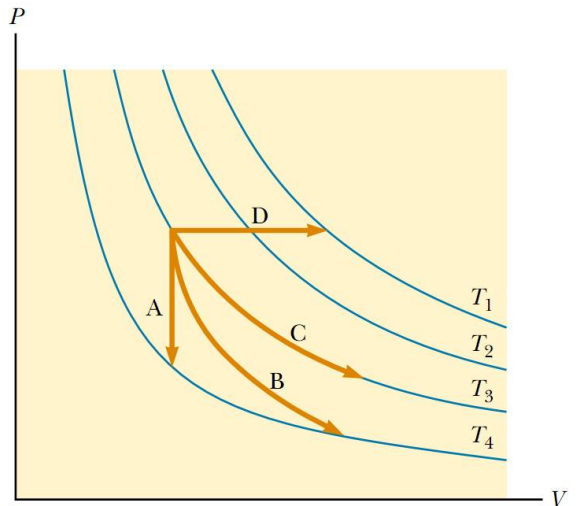
- Quá trình cân bằng là một quá trình biến đổi gồm một chuỗi liên tiếp các trạng thái cân bằng.
- Quá trình cân bằng là quá trình lý tưởng không có thực tế.
- Quá trình biến đổi là vô cùng chậm để có đủ thời gian cần thiết lập lại trạng thái cân bằng mới của hệ thì quá trình đó có thể được coi là quá trình cân bằng.
- Trên đồ thị p - V quá trình cân bằng được biểu diễn bằng đường cong liên tục.

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.2. Quá trình cân bằng

- A: Quá trình đẳng tích (isovolumetric).
- B: Quá trình đoạn nhiệt (adiabatic).
- C: Quá trình đẳng nhiệt (isothermal).
- D: Quá trình đẳng áp (isobaric).

Chú ý: chữ 'nhiệt' trong đẳng nhiệt là nói đến 'nhiệt độ', còn chữ 'nhiệt' trong 'đoạn nhiệt' là nói đến nhiệt lượng trao đổi.



6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

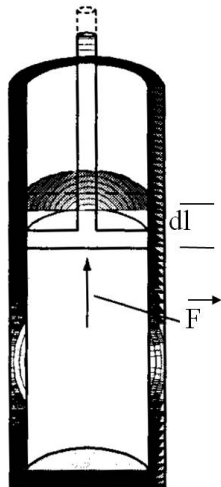
6.3.3. Công trong quá trình cân bằng

Xét quá trình giãn nở khí trong xi lanh có pittông:

Khi pittông dịch chuyển một đoạn dl thì khối khí trong xi lanh nhận được công: $\delta A = -Fdl$.

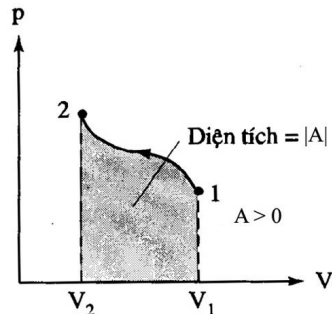
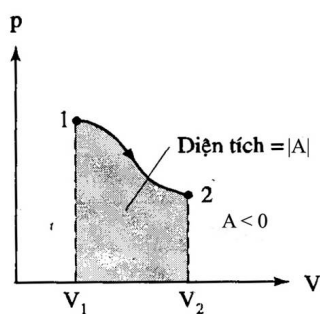
Ta có: $\delta A = -p.S.dl = -p.dV$.

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



6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.3. Công trong quá trình cân bằng



$$A = \int \delta A = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$$

Công A mà hệ nhận được có giá trị bằng diện tích giới hạn bởi đường cong biểu diễn quá trình cân bằng với trục hoành.

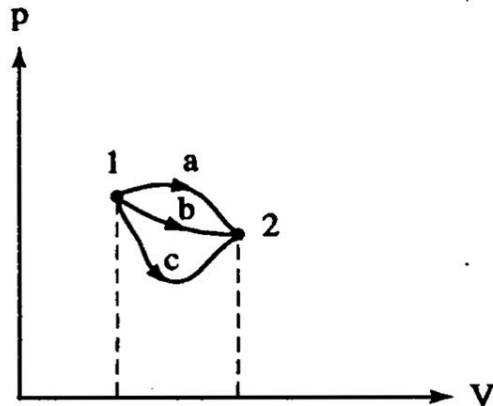
6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.3. Công trong quá trình cân bằng

Các quá trình khác nhau cho ta diện tích giới hạn với trục hoành khác nhau:

Ví dụ:

$1a2$, $1b2$, $1c2$ là ba quá trình mà hệ nhận được công khác nhau. Công là hàm của quá trình.



6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.4. Nhiệt trong quá trình cân bằng

- Nhiệt dung riêng c của một chất là một đại lượng vật lý có giá trị bằng nhiệt lượng cần thiết truyền cho một đơn vị khối lượng để nhiệt độ của nó tăng thêm một độ.

$$c = \frac{\delta Q}{m.dT} \rightarrow \delta Q = c.m.dT$$

Với m là khối lượng vật, δQ là nhiệt lượng truyền cho vật, dT là độ biến thiên nhiệt độ của vật trong quá trình.

Nhiệt dung riêng không đơn giá trị vì nhiệt δQ không phải là vi phân toàn phần, nó phụ thuộc vào quá trình biến đổi.

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.4. Nhiệt trong quá trình cân bằng

- Nhiệt dung mol C_{mol} (hay kí hiệu đơn giản là C) của một chất là một đại lượng về trị số bằng nhiệt lượng cần truyền cho một mol chất đó để nhiệt độ của nó tăng một độ.
- Mối liên hệ giữa nhiệt dung riêng và nhiệt dung mol:

$$C = \mu c$$

- Nhiệt của một quá trình có thể viết dạng khác:

$$\delta Q = \frac{m}{\mu} \cdot C \cdot dT$$

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.4. Nhiệt trong quá trình cân bằng

- Trong hệ SI, đơn vị của c và C là:

$$[c]=\text{J/kg.K}, [C]=\text{J/mol.K}$$

- Nhiệt là hàm của quá trình, do đó các quá trình khác nhau sẽ có nhiệt dung mol khác nhau:
 - Quá trình đẳng tích có nhiệt dung mol đẳng tích C_V
 - Quá trình đẳng áp có nhiệt dung mol đẳng áp C_p

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.5. Quá trình đẳng tích (isovolumetric)

- Quá trình đẳng tích được biểu diễn bằng đoạn thẳng song song với trục tung trên giản đồ p - V .
- Công khối khí nhận được:

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = 0$$

- Nhiệt khối khí nhận được:

$$Q = \int \delta Q = \frac{m}{\mu} C_V \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T$$

Với $\Delta T = T_2 - T_1$ và C_V là nhiệt dung mol đẳng tích.

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.5. Quá trình đẳng tích (isovolumetric)

- Độ biến thiên nội năng của hệ:

$$\delta U = A + Q = Q$$

Trong quá trình đẳng tích, nhiệt trao đổi bằng độ biến thiên nội năng của khối khí.
Mặt khác:

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

Suy ra:

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad i \text{ là số bậc tự do}$$

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.6. Quá trình đẳng áp (isobaric)

- Quá trình đẳng áp được biểu diễn bằng đoạn thẳng song song với trục hoành trên giản đồ p - V .
- Công khối khí nhận được:

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = -p(V_2 - V_1) = -\frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) = -\frac{m}{\mu} R \Delta T$$

- Nhiệt khối khí nhận được:

$$Q = \int \delta Q = \frac{m}{\mu} C_p \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T$$

Với $\Delta T = T_2 - T_1$ và C_p là nhiệt dung mol đẳng áp.

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.6. Quá trình đẳng áp (isobaric)

- Độ biến thiên nội năng của hệ:

$$\delta U = A + Q$$

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

- Suy ra:

$$C_p = \frac{i+2}{2} R$$

- Hệ thức Mayer: $C_p - C_v = R$
- Hệ thức Poisson:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$$

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.7. Nhiệt dung mol của một số chất khí

Khí	C_p	C_v	$C_p - C_v$	$\frac{C_p}{C_v}$
He	20,8	12,5	8,33	1,67
Ar	20,8	12,5	8,33	1,67
Ne	20,8	12,7	8,12	1,64
Kr	20,8	12,3	8,49	1,69
H ₂	28,8	20,4	8,33	1,41
N ₂	29,1	20,8	8,33	1,40
O ₂	29,4	21,1	8,33	1,40
CO	29,3	21,0	8,33	1,40
Cl ₂	34,7	25,7	8,96	1,35
CO ₂	37,0	28,5	8,50	1,30
SO ₂	40,4	31,4	9,00	1,29
H ₂ O	27	12,5	8,37	1,30
CH ₄	35,5	27,1	8,41	1,31

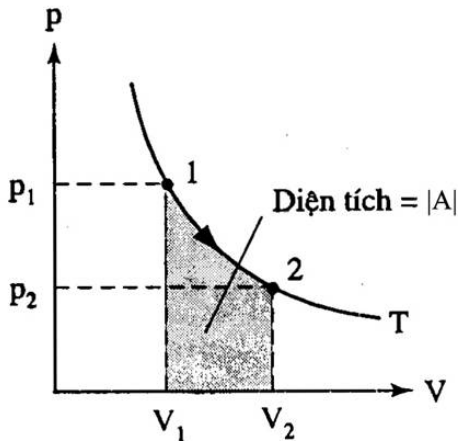
6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.8. Quá trình đẳng nhiệt (isothermal)

- Quá trình đẳng nhiệt (isothermal) là quá trình có nhiệt độ không đổi và được biểu diễn bằng đoạn thẳng hypecbol trên giản đồ p - V . Chữ 'nhiệt' ở đây là nói đến 'nhiệt độ'.
- Công khối khí nhận được:

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

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right), \quad A = \frac{m}{\mu} RT \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$



6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.8. Quá trình đẳng nhiệt (isothermal)

- Do nhiệt độ không đổi nên nội năng của hệ không đổi: $U = \text{const}$
- Nhiệt khối khí nhận được:

$$Q = -A = \frac{m}{\mu} RT \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = \frac{m}{\mu} RT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

- Nếu nén đẳng nhiệt thì khối khí nhận công và tỏa nhiệt;
- Nếu giãn đẳng nhiệt thì khối khí thu nhiệt và sinh công.

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.9. Quá trình đoạn nhiệt (adiabatic)

- Quá trình đoạn nhiệt là quá trình biến đổi mà hệ không trao đổi nhiệt với bên ngoài: $Q = 0$ hay $\delta Q = 0$. Chữ 'nhiệt' ở đây là nói về 'nhiệt lượng trao đổi'.
- Áp dụng nguyên lý I cho quá trình đoạn nhiệt:

$$dU = \delta A \rightarrow n.C_V dT = -p.dV$$

- Mặt khác, lấy vi phân phương trình trạng thái khí lý tưởng:

$$p.dV + V.dp = n.R.dT = n.C_V.dT \cdot \frac{R}{C_V} = -p.dV \cdot \frac{R}{C_V}$$

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

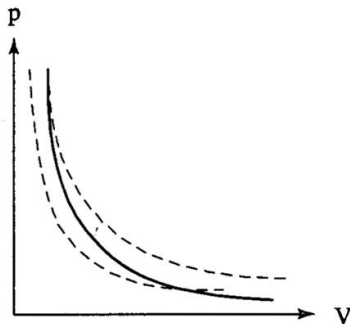
6.3.9. Quá trình đoạn nhiệt (adiabatic)

- Thu được phương trình vi phân:

$$p.dV\left(1 + \frac{R}{C_V}\right) + V.dp = 0$$

$$\rightarrow p.dV\left(\frac{C_p}{C_V}\right) + V.dp = 0$$

$$\gamma \frac{dV}{V} = -\frac{dp}{p}$$



- Phương trình quá trình đoạn nhiệt:

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

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

$$Tp^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = \text{const}$$

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.9. Quá trình đoạn nhiệt (adiabatic)

- Công trong quá trình đoạn nhiệt:

$$A = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{\text{const}}{V^\gamma} \cdot dV = \frac{\text{const}}{\gamma - 1} \left(\frac{1}{V_2^{\gamma-1}} - \frac{1}{V_1^{\gamma-1}} \right)$$

- Các cách viết kết quả khác nhau:

$$A = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{\gamma - 1}$$

$$A = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} R (T_2 - T_1) = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} R T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$$

$$A = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} R T_1 \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} - 1 \right] = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} R T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.10. Tổng kết các quá trình

Quá trình	Phương trình	A	Q	$\Delta U = A + Q$
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	$pV = \text{const}$	$\frac{m}{\mu} RT \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$	$\frac{m}{\mu} RT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	0
Đoạn nhiệt	$pV^\gamma = \text{const}$	$\frac{m}{\mu} C_V \Delta T$	0	$\frac{m}{\mu} C_V \Delta T$

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

6.3.11. Quá trình đa biến

- Các quá trình nói trên được tổng quát hóa bằng phương trình sau:

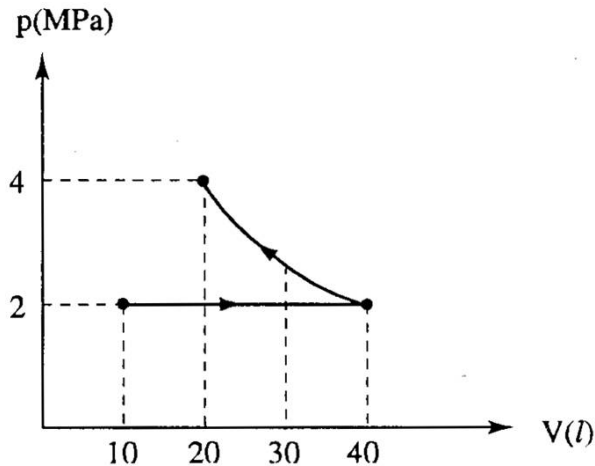
$$pV^n = \text{const}$$

- ▶ $n = 0$ ứng với quá trình đẳng áp.
- ▶ $n = 1$ ứng với quá trình đẳng nhiệt.
- ▶ $n = \gamma$ ứng với quá trình đoạn nhiệt.
- ▶ $n = \pm\infty$ ứng với quá trình đẳng tích.

6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

Ví dụ 1

Tính công mà hệ sinh ra trong các quá trình biến đổi.



6.3. Khảo sát các quá trình cân bằng của khí lý tưởng

Ví dụ 2

Nén 10 g khí O_2 ở điều kiện tiêu chuẩn đến thể tích 4 lít. Tìm:

- Áp suất và nhiệt độ của khối khí sau mỗi quá trình nén đẳng nhiệt và đoạn nhiệt.
- Công cần thiết để nén khối khí trong mỗi trường hợp. Nên nén theo cách nào thì lợi hơn?

Ví dụ 3

Cho một khối khí N_2 (ở 290 K và $p = 6,58 \times 10^5 \text{ N/m}^2$) giãn đoạn nhiệt từ thể tích 1 lít tới thể tích 3 lít, rồi giãn đẳng áp đến thể tích 5 lít. Cuối cùng giãn đoạn nhiệt đến thể tích 7 lít.

- Tính độ biến thiên nội năng, nhiệt lượng mà hệ nhận được, công mà hệ sinh ra trong mỗi quá trình biến đổi.
- Xác định nhiệt độ và áp suất ở trạng thái cuối cùng.

The End