

บรรยาย 9 ความร้อนในสสาร และเทอร์โมไดนามิกส์

ทพชท122 ภาคต้น ปีการศึกษา 2564-65

อุดม รอบคอบ
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.มหิดล

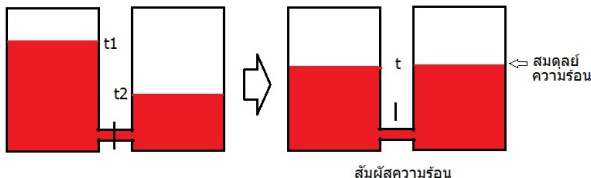
7 มกราคม 2565

หัวข้อที่สอน

1. ความร้อนและอุณหภูมิต
2. ความจุความร้อน และความร้อนแฝง
3. การถ่ายเทความร้อน
4. ระบบเชิงความร้อน
5. กฎข้อที่ ๑ เทอร์โมไดนามิกส์
6. กฎข้อที่ ๒ เทอร์โมไดนามิกส์

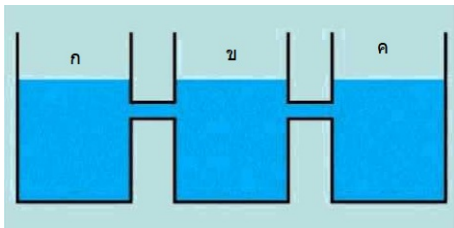
ความร้อนและอุณหภูมิ

- ▶ เราทราบกันโดยทั่วไปว่ามี "ความร้อน" อยู่ในวัตถุ และธรรมชาติของความร้อน คือ ไหลจากวัตถุที่มีความร้อนมากไปยังวัตถุที่มีความร้อนน้อยกว่า (เย็น) เมื่อมีการสัมผัสความร้อน
- ▶ นักฟิสิกส์มองความร้อนเป็น "ของไหลความร้อน" ที่สามารถไหลจากแหล่งที่มีระดับความร้อนสูง ไปยังแหล่งที่มีระดับ ความร้อนต่ำกว่า
- ▶ "อุณหภูมิ (temperature) " คือระดับของของไหลความร้อน

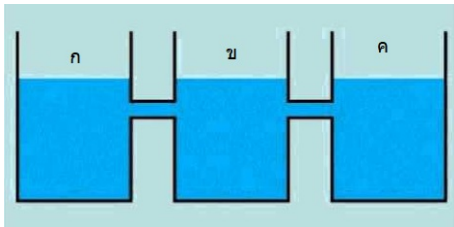


▶ กฎข้อที่ 0 เทอร์โมไดนามิกส์

เมื่อระบบ ก อยู่ในสมดุลความร้อนกับระบบ ข และระบบ ข อยู่ในสมดุลความร้อนกับระบบ ค แสดงว่า ระบบ ก และ ค อยู่ในสมดุลความร้อนเดียวกัน



- ▶ กฎข้อที่ 0 เทอร์โมไดนามิกส์
เมื่อระบบ ก อยู่ในสมดุลความร้อนกับระบบ ข และระบบ ข อยู่ในสมดุลความร้อนกับระบบ ค แสดงว่า ระบบ ก และ ค อยู่ในสมดุลความร้อนเดียวกัน

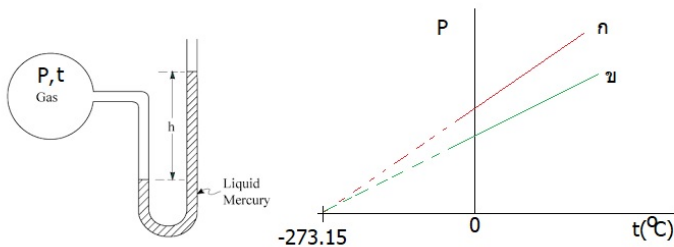


- ▶ มาตรวัดอุณหภูมิ (thermometer)
 - ▶ ระบบ ก = แหล่งอ้างอิงอุณหภูมิ
(น้ำ+ น้ำแข็ง = 0°C น้ำ+ไอน้ำ = 100°C)
 - ▶ ระบบ ข = เทอร์โมมิเตอร์
(ของเหลวในท่อ เทอร์โมคัพเปิล ไพโรมิเตอร์)
 - ▶ ระบบ ค = ระบบตัวอย่าง

- ▶ มาตราอุณหภูมิ (เซลเซียส ($t^{\circ}C$) ฟาห์เรนไฮต์ ($t^{\circ}F$))

$$0^{\circ}C = 32^{\circ}F, 100^{\circ}C = 212^{\circ}F \rightarrow t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32)$$

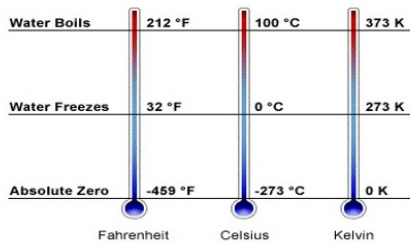
- ▶ มาตราเคลวิน (Kelvin ($T(K)$) จากกฎของบอยล์ $P \propto T$



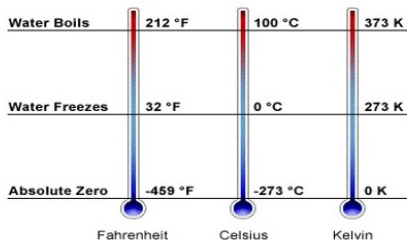
$$T = 0K = t_C = -273.15^{\circ}C \rightarrow T_K = t_C + 273.15$$

$$\rightarrow 0^{\circ}C = 273.15K, 27^{\circ}C(\text{room}) \simeq 300K$$

► เปรียบเทียบมาตราอุณหภูมิต



▶ เปรียบเทียบมาตราอุณหภูมิ



- ▶ ความจุความร้อน (heat capacity: C) ของสสาร = ความสามารถในการเก็บความร้อน
- ▶ กำหนดให้ ΔQ คือความร้อนที่เติมให้สสาร และทำให้สสารมีอุณหภูมิสูงขึ้น Δt

$$\Delta Q \propto \Delta t \rightarrow \Delta Q = C\Delta t$$

$$[Q] = \text{calorie} : \text{cal}, [t] = {}^{\circ}\text{C} \rightarrow [C] = \text{cal}/{}^{\circ}\text{C}$$

- ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity: c) =
ความจุความร้อนจำเพาะต่อหน่วยมวล (g) หรือ ต่อหน่วยโมล (mol)

$$c_m = \frac{C}{m} [\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}], \quad c_n = \frac{C}{n} [\text{cal/mol} \cdot ^\circ\text{C}]$$

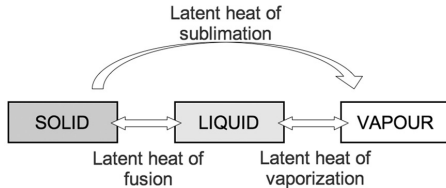
$$\rightarrow \Delta Q = mc_m\Delta t = nc_n\Delta t$$

การแปลงหน่วย $1.0\text{cal} = 4.2\text{J}$, $1.0^\circ\text{C} = 1.0\text{K}$, $1000\text{g} = 1.0\text{kg}$

Material	Specific heat capacity (J/kg K)
Water	4186
Ice	2090
Steam	2010
Aluminium	900
Iron	448
Glass	837
Copper	387
Mercury	138
Gold	129

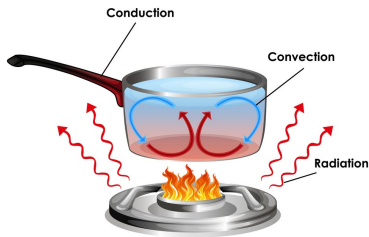
► ค่าความร้อนแฝง (latent heat: L) ในการเปลี่ยนสถานะ

$$\Delta Q = mL, [L] = \text{cal/g}$$

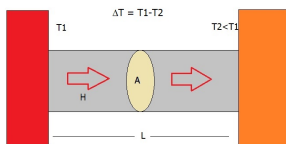


Latent Heats of Selected Materials				
Material	L_f (kJ/kg)	Melting Point (°C)	L_v (kJ/kg)	Boiling Point (°C)
Aluminum	399	659	10,500	2327
Helium	N/A	N/A	21	-269
Hydrogen	58	-259	455	-253
Lead	25	327	871	1750
Water	334	0	2260	100

- ▶ การถ่ายเทความร้อน = การนำ (conduction) การพา (convection) และการแผ่รังสี (radiations)



- ▶ การนำความร้อน - ความสามารถในการนำความร้อนของสสาร k



$$H \propto \frac{\Delta T A}{L}$$

$$H = k \frac{\Delta T A}{L}$$

$$[H] = \text{Watt}, [k] = \text{Watt}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$$

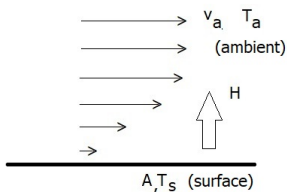
▶ ตัวอย่างค่าการนำความร้อนของสาร

Material	Thermal conductivity (K), (unit : W/m-K)
Diamond	2300
Silver	429
Cooper	401
Aluminum	237
Human skin	0.37
Wood	0.17
Air	0.026

▶ ตัวอย่างค่าการนำความร้อนของสาร

Material	Thermal conductivity (K), (unit : W/m-K)
Diamond	2300
Silver	429
Cooper	401
Aluminum	237
Human skin	0.37
Wood	0.17
Air	0.026

▶ การพาความร้อน -Newton's law of cooling



$$H = hA\Delta T, \quad \Delta T = T_a - T_s$$

$h =$ convection coefficient

$$[h] = \text{Watt}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$$

▶ ตัวอย่างค่า สปส การพาความร้อน h

Fluid	Convection Heat Transfer Coefficient
	$W/m^2 K$
Air, free convection	6-30
Superheated steam or air, forced convection	30-300
Oil, forced convection	60-1,800
Water, forced convection	300-18,000
Water, boiling	3,000-60,000
Steam, condensing	6,000-120,000

▶ ตัวอย่างค่า สปส การพาความร้อน h

Fluid	Convection Heat Transfer Coefficient
	W/m ² K
Air, free convection	6-30
Superheated steam or air, forced convection	30-300
Oil, forced convection	60-1,800
Water, forced convection	300-18,000
Water, boiling	3,000-60,000
Steam, condensing	6,000-120,000

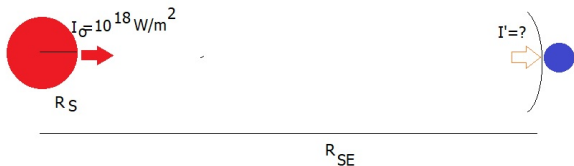
- ▶ การแผ่รังสีความร้อน = การแผ่รังสีของวัตถุดำ (black body radiations) - กฎของสเตฟาน

$$H = e\sigma A(T_s^4 - T_a^4), \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

σ คือค่าคงตัวของสเตฟาน และ $e \in [0, 1]$ คือ สปส การแผ่รังสีของผิว ($e=1$ คือ black body) (อุณหภูมิ T ต้องเป็นเคลวินเท่านั้น)

- ▶ กรณีตัวอย่าง การแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์
($T_s = 6000 \text{ K}$, $T_a = 0 \text{ K}$, $e = 1$)

$$I_0 = \frac{H}{A} = 1 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (6 \times 10^3)^4 \sim 10^{18} \text{ W/m}^2$$

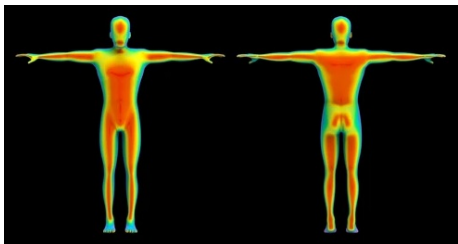


$$R_S \simeq 7 \times 10^8 \text{ m}, \quad R_{SE} \simeq 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$I_0 4\pi R_S^2 = I' 4\pi R_{SE}^2 \rightarrow I' = I_0 \frac{R_S^2}{R_{SE}^2} \simeq 0.44 \times 10^{12} \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

ยังไม่ได้คิดการถูกดูดซับและสะท้อนกลับรังสีโดยชั้นบรรยากาศของโลก
 $\rightarrow I' = 1.36 \times 10^3 \text{ W/m}^2$

- ▶ กรณีตัวอย่าง การแผ่รังสีความร้อนของร่างกายมนุษย์
 $(T_s = 37^{\circ}\text{C} = 310\text{K}, T_a = 27^{\circ}\text{C} = 300\text{K}, e = 1, A = 1.5\text{m}^2)$



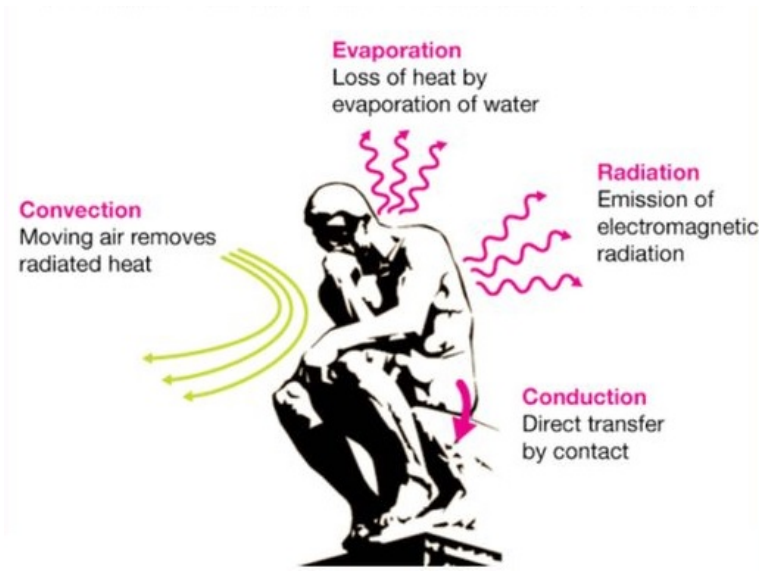
$$H = 1 \times 1.5 \times 5.67 \times 10^{-8} (310^4 - 300^4) = 9.65\text{W} = 9.65\text{J/s}$$

$$1\text{day} \rightarrow \Delta t_{1\text{day}} = 24 \times 60 \times 60 = 8.64 \times 10^4\text{s}$$

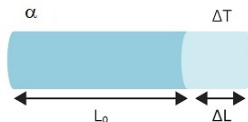
$$Q_{1\text{day}}(\text{J}) = H\Delta t_{1\text{day}} = 9.65 \times 8.64 \times 10^4 = 8.34 \times 10^5\text{J/day}$$

$$Q_{1\text{day}}(\text{cal}) = \frac{83.4}{4.2} \times 10^5 = 1986 \times 10^3\text{cal} = 1986\text{kcal}$$

► การสูญเสียความร้อนโดยรวมของร่างกายมนุษย์ (by Rodin)



► การขยายตัวเชิงความร้อน - สปส การขยายตัวเชิงเส้น / เชิงปริมาตร



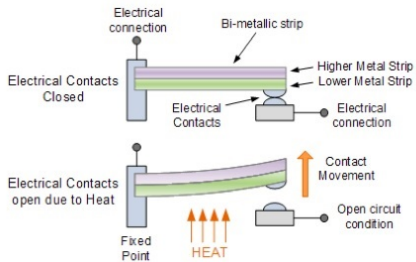
$$\Delta L \propto L_0 \Delta T \rightarrow \Delta L = \alpha L_0 \Delta T, [\alpha] = 1/^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$V = L^3 \rightarrow \Delta V = (L_0 + \Delta L)^3 - L_0^3 \propto \Delta T$$

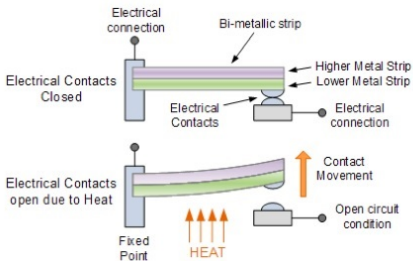
$$\Delta V \simeq 3\alpha L_0^3 \Delta T = \beta V_0 \Delta T, \beta = 3\alpha \quad (3)$$

Approximate Coefficients of Thermal Expansion at 20°C		
Material	α ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	β ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
Aluminum	23	69
Concrete	12	36
Diamond	1	3
Glass	9	27
Stainless Steel	17	51
Water*	69	207

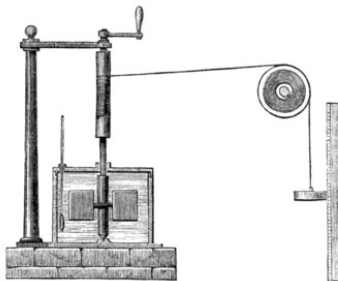
▶ Thermostat control



► Thermostat control

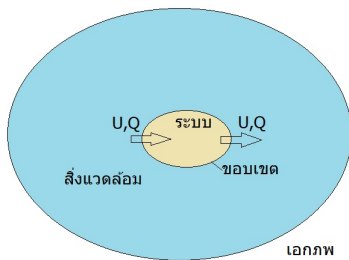


► ความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่ง - การทดลองของ เจมส์ จูล



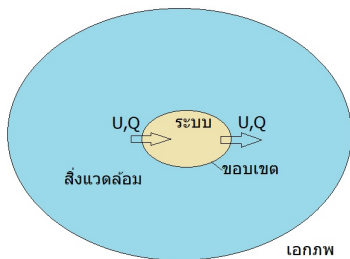
ระบบเชิงความร้อน

- ▶ นิยามระบบเชิงความร้อน = ระบบปิด (ขนาดเล็ก) ที่ยอมให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและพลังงานกับสิ่งแวดล้อม (ระบบขนาดใหญ่) ผ่านขอบเขตของระบบ



ระบบเชิงความร้อน

- ▶ นิยามระบบเชิงความร้อน = ระบบปิด (ขนาดเล็ก) ที่ยอมให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนและพลังงานกับสิ่งแวดล้อม (ระบบขนาดใหญ่) ผ่านขอบเขตของระบบ



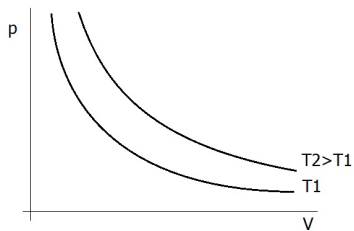
- ▶ ระบบก๊าซอุดมคติ สถานะของระบบ $= (p, V, T, N)$ สมการสถานะ

$$pV = Nk_B T = nRT, \quad R = N/N_A$$

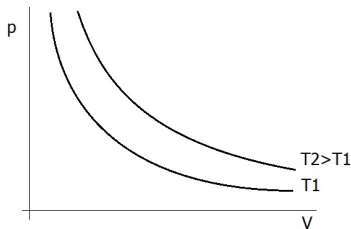
$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}, \quad N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ \#/mol}$$

$$R = N_A k_B = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

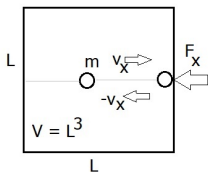
▶ แผนภาพ p-V ในกรณี N,T คงตัว



▶ แผนภาพ p-V ในกรณี N,T คงตัว



▶ ทฤษฎีจลน์ของก๊าซ



$$V = L^3, \quad v = (v_x, v_y, v_z)$$

$$\Delta p_x = -2mv_x, \quad \Delta t = \frac{2L}{v_x}$$

$$\rightarrow F_x = \frac{\Delta p_x}{\Delta t} = -\frac{mv_x^2}{2L}$$

$$p_1 = \frac{F_x}{L^2} = \frac{mv_x^2}{L^3} \quad (4)$$

► ทฤษฎีจลน์ (ต่อ)

$$p_N = \frac{m}{V} \sum_{n=1}^N v_{x,n}^2 = N \frac{mv_{x,rms}^2}{V}, \quad v_{x,rms}^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_{x,n}^2$$

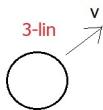
$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \rightarrow v_{x,rms}^2 = v_{y,rms}^2 = v_{z,rms}^2 = \frac{1}{3} v_{rms}^2$$

$$p_N V = \frac{1}{3} N m v_{rms}^2 \equiv N k_B T \rightarrow \frac{1}{2} m v_{rms}^2 = \frac{3}{2} k_B T \quad (5)$$

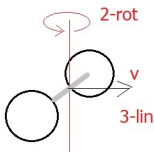
$$KE = \frac{3}{2} k_B T = \frac{1}{2} k_B T + \frac{1}{2} k_B T + \frac{1}{2} k_B T$$

$$1 \text{ molecule} : \rightarrow KE = N_{dof} \frac{1}{2} k_B T \quad (6)$$

$$KE_{mon}(lin) = \frac{3}{2} k_B T$$



monatomic 3-dof



diatomic 5-dof

$$KE_{dia}(lin + rot) = \frac{5}{2} k_B T$$

กรณีตัวอย่าง $He, N_2, O_2,$

- กรณีตัวอย่าง อัตราเร็วโมเลกุลของก๊าซ ที่อุณหภูมิห้อง 300K

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad M = N_A m - \text{molar mass}$$

$$M(N_2) = 28g = 28 \times 10^{-3}kg \rightarrow v_{rms} = \sqrt{\frac{3(8.31)(300)}{28 \times 10^{-3}}} \\ = 516.8m/s \quad (7)$$

$$M(O_2) = 32g = 32 \times 10^{-3}kg \rightarrow v_{rms} = \sqrt{\frac{3(8.31)(300)}{32 \times 10^{-3}}} \\ = 483.4m/s \quad (8)$$

กฎข้อที่ ๑ เทอร์โมไดนามิกส์

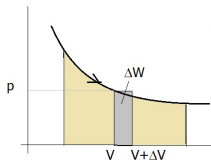
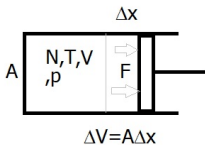
- ▶ กำหนดให้ U คือพลังงานภายในทั้งหมดของระบบ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน ΔU เกิดจาก การรับความร้อน ΔQ เข้าระบบ และระบบทำงาน ΔW ให้กับสิ่งแวดล้อม จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน พบว่า

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W$$

- ▶ ระบบก๊าซอุดมคติ (monatomic)

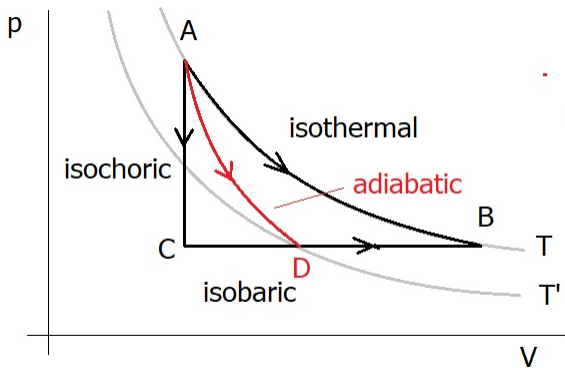
$$\Delta U = \frac{3}{2}Nk_B\Delta T = \frac{3}{2}nR\Delta T, \Delta Q = nc\Delta T$$

$$\Delta W = F\Delta x = \frac{F}{A}A\Delta x = p\Delta V$$



▶ กระบวนการความร้อนของระบบก๊าซอุดมคติ

- ▶ ความดันคงตัว (isobaric) CB
- ▶ ปริมาตรคงตัว (isochoric) AC
- ▶ อุณหภูมิคงตัว (isothermal) AB
- ▶ ไม่แลกเปลี่ยนความร้อน (adiabatic) AD
- ▶ วงรอบ (cyclic) ABCA



▶ จากกฎข้อที่ ๑

▶ ปริมาตรคงตัว

$$\Delta W = 0 \rightarrow \frac{3}{2}nR\Delta T = nc_V\Delta T, \quad c_V = \frac{3}{2}R$$

▶ ความดันคงตัว

$$\frac{3}{2}nR\Delta T = nc_P\Delta T - p\Delta V = nc_P\Delta T - nR\Delta T$$

$$\rightarrow c_P = \frac{3}{2}R + R = c_V + R$$

▶ อุณหภูมิคงตัว

$$\Delta U = 0 \rightarrow \Delta Q = p\Delta V \text{ Ideal heat engine}$$

$$\Delta Q = nRT \frac{\Delta V}{V} = nRT \Delta \ln V$$

$$Q_{1 \rightarrow 2} = nRT \ln(V_2/V_1)$$

จากคุณสมบัติ $\ln A - \ln B = \ln(A/B)$

▶ จากกฎข้อที่ ๑ (ต่อ)

▶ ไม่แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\Delta Q = 0, \Delta U = nc_V \Delta T = nc_V(p\Delta V + v\Delta P)$$

$$nc_V V \Delta p + n(c_V + R)p \Delta V = 0$$

$$\frac{1}{npV} \times \dots \rightarrow c_V \frac{\Delta p}{p} + c_P \frac{\Delta V}{V} = 0$$

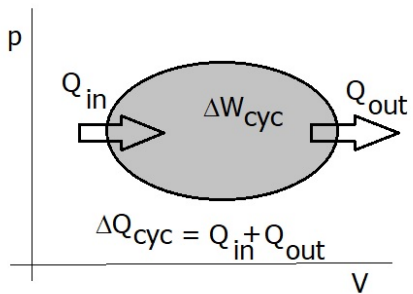
$$\gamma = \frac{c_P}{c_V} \rightarrow \Delta \ln p + \gamma \Delta \ln V = 0 \rightarrow \Delta \ln(pV^\gamma) = 0$$

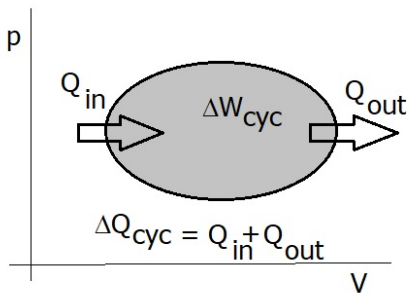
$$\ln pV^\gamma = C \text{ adiabatic equation} \rightarrow p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$$

$$\rightarrow TV^{\gamma-1} = C, \frac{T^\gamma}{p^{\gamma-1}} = C$$

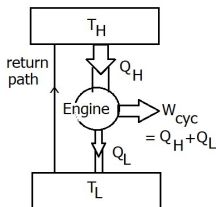
▶ วงรอบ

$$\Delta U = 0 \rightarrow \Delta Q_{cyc} = \Delta W_{cyc} \text{ Practical heat engine}$$





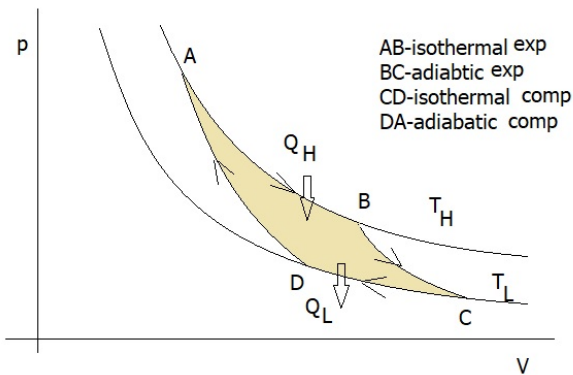
- ▶ เครื่องยนต์ความร้อน - ประสิทธิภาพ (efficiency) $e(\%)$



$$e(\%) = \frac{W_{cyc}}{Q_{in}} \times 100\%$$

$$= \frac{Q_{in} + Q_{out}}{Q_{in}} \times 100\%$$

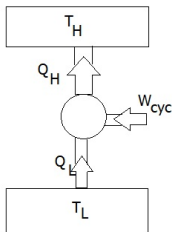
▶ เครื่องยนต์คาร์โนต์



$$Q_H = nRT_H \ln \frac{V_B}{V_A}, \quad Q_L = nRT_L \ln \frac{V_D}{V_C} = -nRT_L \ln \frac{V_C}{V_D}$$

$$\begin{aligned} \text{Adiabatic : } \rightarrow \frac{V_B}{V_A} &= \frac{V_C}{V_D} \rightarrow e(\%) = \frac{Q_H + Q_L}{Q_H} \times 100\% \\ &= \frac{T_H - T_L}{T_H} \times 100\% \end{aligned}$$

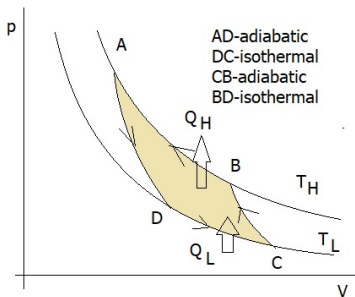
▶ ตู้เย็น - ประสิทธิภาพ (performance) P



$$P = \frac{Q_L}{W_{cyc}} = \frac{Q_L}{Q_H + Q_L}$$

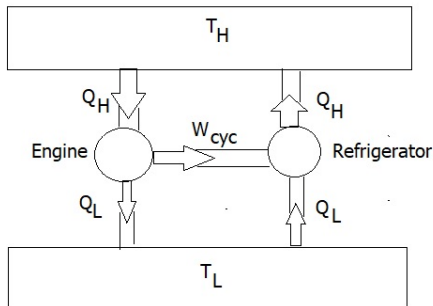
ตู้เย็นคาร์โนต์

$$P = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$



กฎข้อที่ ๒ เทอร์โมไดนามิกส์

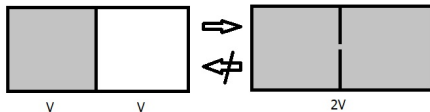
- ▶ การทำงานของเครื่องยนต์-ตู้เย็นคาร์โนต์ ร่วมกัน



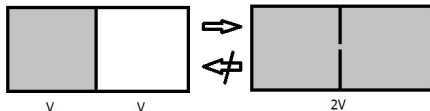
$$e(\%) = \frac{T_H - T_L}{T_H} \times 100\%, \quad P = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$
$$T_L \rightarrow 0 \quad e(\%) \rightarrow 0, \quad P \rightarrow 0$$

เราจะไม่สามารถเข้าถึง $T_L = 0 \text{ K}$ ได้เลย

- ▶ การขยายตัวอิสระของก๊าซในระบบโดดเดี่ยว $V \rightarrow 2V$
เกิดขึ้นในทิศทางเดียว ไม่สามารถผันกลับได้



- ▶ การขยายตัวอิสระของก๊าซในระบบโดดเดี่ยว $V \rightarrow 2V$
เกิดขึ้นในทิศทางเดียว ไม่สามารถผันกลับได้



- ▶ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ΔS

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

การขยายตัวอิสระในระบบโดดเดี่ยว = อุณหภูมิตคงตัว

$$\Delta Q = nRT \ln \frac{2V}{V} = nRT \ln 2$$

$$\Delta S = nR \ln 2 > 0$$

▶ กฎข้อที่ ๒ เทอร์โมไดนามิกส์

ทิศทางของกระบวนการทางความร้อนของระบบใดๆ พิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลง เอนโทรปี ได้ดังนี้

$$\Delta S = 0 \quad \text{reversible process}$$

$$\Delta S > 0 \quad \text{irreversible process} \quad (9)$$

การกระจายตัวอิสระ เป็นตัวแทนของกระบวนการที่ไม่ผันกลับ

▶ กฎข้อที่ ๒ เทอร์โมไดนามิกส์

ทิศทางของกระบวนการทางความร้อนของระบบใดๆ พิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลง เอนโทรปี ได้ดังนี้

$$\Delta S = 0 \quad \text{reversible process}$$

$$\Delta S > 0 \quad \text{irreversible process} \quad (9)$$

การกระจายตัวอิสระ เป็นตัวแทนของกระบวนการที่ไม่ผันกลับ

▶ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของวงรอบคาร์โนต์

$$\Delta S = \frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_L}{T_L} = nR \left(\ln \frac{V_B}{V_A} + \ln \frac{V_D}{V_C} \right) = 0$$

กระบวนการวงรอบเป็นตัวแทนของกระบวนการผันกลับได้

▶ ข้อสรุป กฎข้อที่ ๑ คำนวณปริมาณพลังงานที่เกี่ยวข้องในกระบวนการทางความร้อน กฎข้อที่ ๒ บรรยายทิศทางที่เกิดกระบวนการความร้อน