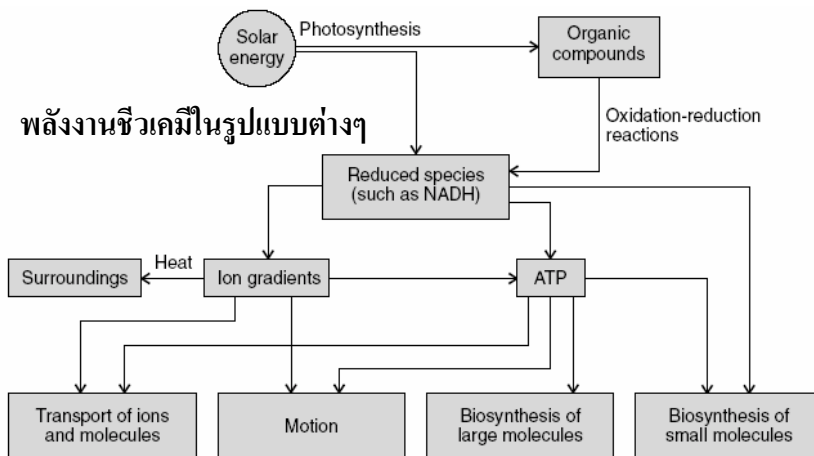


บทที่ 3 กฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์

3.1 พลังงาน งาน ความร้อน



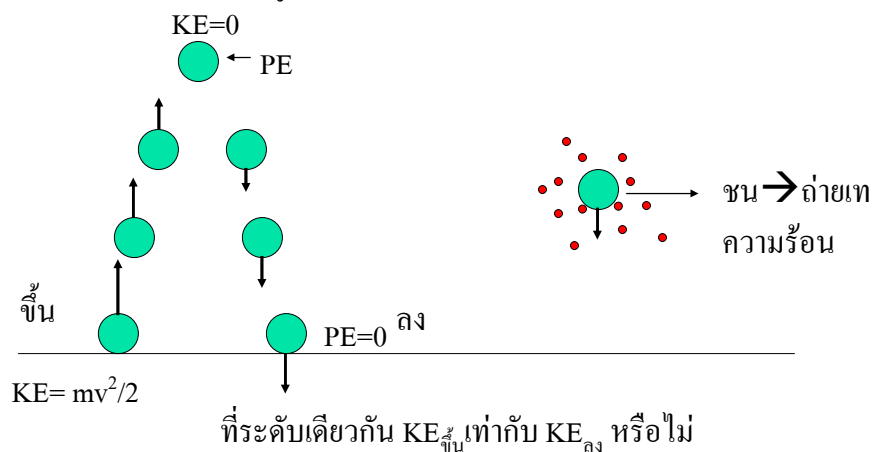
ตัวอย่างการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงไปเป็นพลังงานที่สิ่งมีชีวิตนำไปใช้



1

3.2 กฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์

“กฎการอนุรักษ์พลังงาน : พลังงานไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือทำให้สูญหายไปได้ แต่สามารถเปลี่ยนรูปหรือถ่ายเทได้”



2

3.2.1 สมการกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์

กำหนดให้ U = ผลรวมพลังงานทุกชนิดภายในระบบ

$$\Delta U = U_f - U_i = q + w \quad (3.1)$$

ΔU : การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน,

U_f, U_i = internal energy of a final and initial states

q : ความร้อนที่ให้กับระบบ (ค่า + $\rightarrow$ U เพิ่มขึ้น) แต่ถ้าความร้อนออกจากระบบ $q < 0$

w : งานที่ให้กับระบบ (ค่า + แสดงว่า U เพิ่มขึ้น) แต่ถ้าระบบทำงาน $w < 0$



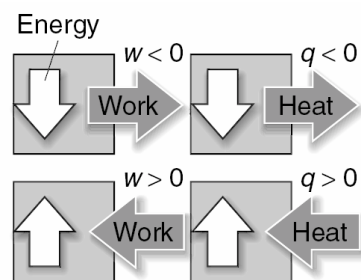
3

บางตำรา ให้นิยาม q หรือ w ที่ต่างๆ ทำให้ได้สมการกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่แตกต่างกันไปด้วย เช่น

$\Delta U = q - w$; โดย w คืองานที่เกิดจากระบบทำงาน
หรือ

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta w$$

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta w$$

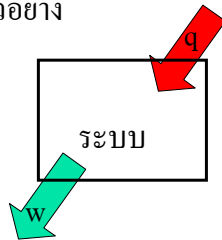


ดังนั้น การเลือกใช้สมการใดนั้น จึงขึ้นอยู่กับความหมาย หลักการทำความเข้าใจวิธีหนึ่ง คือ ให้พิจารณาค่า U ว่าน่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง



4

ตัวอย่าง



ถ้าระบบทำงาน 20 J มีความร้อนเข้าสู่ระบบ 20 J

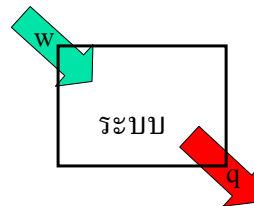
นั่นคือ $w = -20 \text{ J}$ $q = 20 \text{ J}$

$$\Delta U = 20 - 20 \text{ J} = 0$$

ความร้อนออกจากระบบ 10 J , $q = -10 \text{ J}$

งานทำให้กับระบบ 2 J, $w = +2 \text{ J}$

$$\Delta U = -10 + 2 = -8 \text{ J}$$



5 PS

3.2.2 พลังงานภายใน (Internal Energy, U)

- พลังงานภายใน = ผลรวมของพลังงานทุกชนิดในระบบ แทน

ความหมายของพลังงานรวมของระบบ (หรือ E_{total} ในบทที่ 2) นั่นคือ

$$E = U \quad (3.2)$$

$$E(E_{\text{molecule1}}, E_{\text{molecule2}}, \dots) = U(n, P, V, T, \dots) \quad (3.3)$$

- U เป็น **state function** นั่นคือ ΔU ไม่ขึ้นกับ path ระหว่าง initial และ final state

- พิจารณาพลังงานที่เปลี่ยนไปของระบบในรูปของพลังงานภายใน

$$\Delta E = E_{\text{final}} - E_{\text{initial}} \quad (3.4)$$

$$\text{หรือ } \Delta U = U(n_f, P_f, V_f, T_f, \dots) - U(n_i, P_i, V_i, T_i, \dots) \quad (3.5)$$

$$\text{จะได้ } \Delta U = U_f - U_i \quad (3.6)$$

$$\text{- ถ้าพลังงานภายในเปลี่ยนไปที่ละน้อย } \Delta U = \int_{U_i}^{U_f} dU \quad (3.7)$$

6 PS

พลังงานที่เปลี่ยนไปจะอยู่ในรูปของความร้อนและงาน
สำหรับงานอาจอยู่ในรูป

งานเชิงกล (mechanical work); $dw = -P_{\text{ext}} dV$

$$dU = dq - P_{\text{ext}} dV$$

งานเชิงไฟฟ้า (electrical work); $dw = \Phi dq$

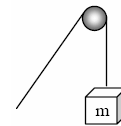
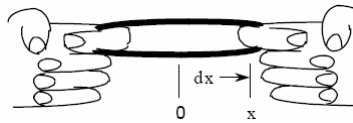
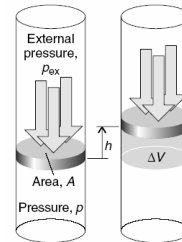
$$dU = dq + \Phi dq$$

งานเชิงแม่เหล็ก (magnetic work); $dw = H dM$

H = external magnetic field ;

M : the magnetic moment.

งานเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (gravitational work) $dw = mg dh$



7

ตัวอย่าง จงคำนวณงานที่พีชต้องใช้ในการลำเลียงน้ำ 10 g ที่มีความสูงจากราก
จนถึงใบเท่ากับ 20 m

วิธีทำ งานที่พีชต้องใช้ในการลำเลียงน้ำเป็นงานเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

$$= mgh = (0.01 \text{ kg}) * (9.81 \text{ ms}^{-2}) * (20 \text{ m}) = 1.96 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} = 1.96 \text{ J}$$

งาน 1.96 J นี้เป็นงานที่ระบบทำงาน ทำให้พลังงานออกจากระบบไป
ดังนั้น $w = -1.96 \text{ J}$

ปริมาณของงานนี้เท่ากับการยกหนังสือ (textbook) หนัก 1 kg จากพื้นสูง 20 ซม.
($= 1 \text{ kg} * 9.81 \text{ ms}^{-2} * 0.2 \text{ m} = 1.96 \text{ J}$)

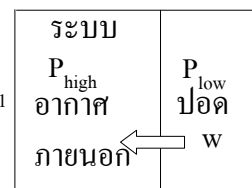


8

ตัวอย่าง จงคำนวณงานที่อากาศต้องใช้ในขณะที่หายใจออกมาด้วยปริมาตร 0.50L

วิธีทำ ในขณะที่หายใจออก แรงดันของอากาศในปอดน้อยกว่าแรงดันบรรยากาศ (1 atm) ดังนั้นอากาศต้องการงานเพื่อขับดันอากาศออกจากปอดงานที่เกิดจากการขับดันของอากาศเป็นงานเชิงกล (w)

$$\begin{aligned} &= -P_{\text{ex}} dV = -(1 \text{ atm}) * (0.50 \text{ L}) \\ &= -0.5 \text{ atm L} * (1/9.8692 \times 10^{-6} \text{ Pa atm}^{-1}) * 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ L}^{-1} \\ &= 50.66 \text{ J} \end{aligned}$$



ประมาณปริมาณของงานนี้เสมือนการยกหนังสือ (textbook)หนัก 1 kg จำนวน 7 เล่ม ให้สูงจากพื้น 75 ซม. (= 7 * 1 kg * 9.81 ms⁻² * 0.075 m = 51.5 J)



9

ตัวอย่าง ถ้ามอเตอร์ไฟฟ้าให้งานเชิงกล 15 kJ/sec ทำให้มอเตอร์ร้อนขึ้นและถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อม 2 kJ/sec พลังงานภายในที่เปลี่ยนไปของมอเตอร์มีค่าเท่าใด

วิธีทำ ระบบของกระบวนการนี้ คือ มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าให้งานเชิงกลแสดงว่าพลังงานของระบบลดลง

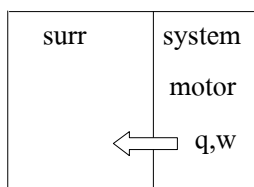
ดังนั้น $w = -15 \text{ kJ/sec}$

มอเตอร์ร้อนขึ้นและถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อม (diathermic process)

แสดงว่าระบบคายความร้อน พลังงานของระบบลดลง ดังนั้น $q = -2 \text{ kJ/sec}$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta U &= q + w \\ &= -2 - 15 = -17 \text{ kJ/sec} \end{aligned}$$

ตอบ



10

ตัวอย่าง ถ้าต้องใช้งานเพื่ออัดสปริงให้หดตัว 40 kJ ทำให้สปริงร้อนขึ้น 10 kJ พลังงานภายในที่เปลี่ยนไปของสปริงมีค่าเท่าใด

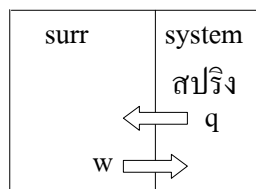
วิธีทำ ระบบของกระบวนการนี้ คือ สปริง

ออกแรงกดสปริงเป็นงานที่ให้กับระบบ แสดงว่าพลังงานของระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้น $w = 40 \text{ kJ}$

สปริงร้อนขึ้นและถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมแสดงว่าระบบคายความร้อน พลังงานของระบบลดลง ดังนั้น $q = -10 \text{ kJ}$

$$\begin{aligned}\therefore \Delta U &= q + w \\ &= -10 + 40 = 30 \text{ kJ}\end{aligned}$$

ตอบ



11 PS

3.2.3 Expansion work: (งานเนื่องจากการขยายตัว)

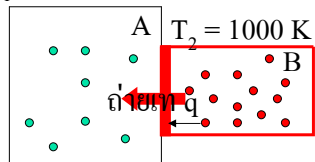
สมการกฎข้อที่หนึ่งเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta U = q + w$$

q เข้า-ออกระบบได้อย่างไร

เมื่อมีการถ่ายเทความร้อน $T_2 \rightarrow T_1$

$T_1 = 300 \text{ K}$



Monoatomic ideal gas

- B ลด KE

- A เพิ่ม KE

- อนุภาค B ชนผนัง $\rightarrow$ ผนัง B สั่น $\rightarrow$ ผนัง

A สั่น $\rightarrow$ เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมให้อนุภาค

A

12 PS

พ เข้า-ออกระบบได้อย่างไร

Quasi-static process

กระบวนการเทอร์โมไดนามิกส์ของที่ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ (infinitely slowly) โดยไม่ทำให้ระบบเสียสมดุล

หีบออก (เหมือนหีบเม็ดทรายออก)

แก๊สดัน
กระบอกสูงขึ้น
เล็กน้อย
ปริมาตรเปลี่ยน
ระบบทำงาน, -w
(Expansion work)
งานออกจากระบบ
(ถ้างานเข้าระบบทำ
อย่างไร)

สมดุล สมดุล

x ΔV

Expansion work: ระบบทำงานโดยการขยายตัว

งาน = แรง x ระยะทาง

Pressure = force / Area

$$A \cdot P = \frac{\text{force}}{\text{Area}} \cdot A$$

$$w = A \cdot P \cdot x$$

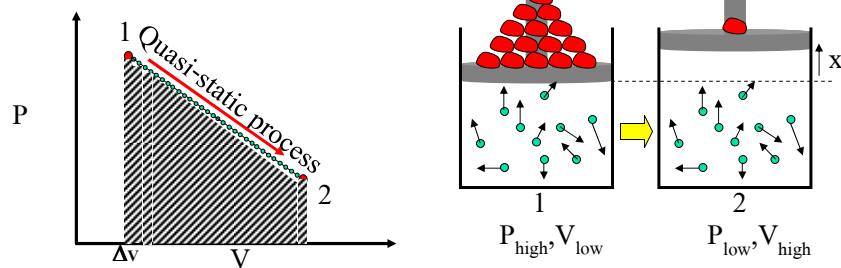
$$= P \cdot \underbrace{A \cdot x}_{\Delta V}$$

$$= P \cdot \Delta V$$

$$\Delta U = q - P \Delta V$$

13
PS

PV-diagrams

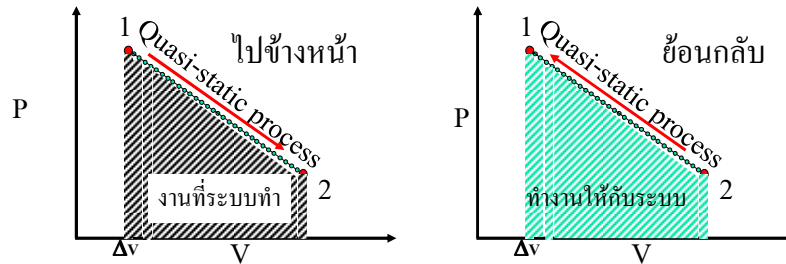


- การเปลี่ยนแปลงสถานะ 1 → สถานะ 2 แบบ quasi-static process
- การเปลี่ยนแปลงเกิดช้าๆ (เหมือนหีบเม็ดทรายทีละเม็ดออกจากลูกสูบ) แก๊สขยายตัว ทำให้ ΔV เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ โดย P คงที่
- คำนวณงานจากพื้นที่ใต้กราฟ หรือ
- งานที่ระบบทำ(expansion work)

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

14
PS

กระบวนการผันกลับ

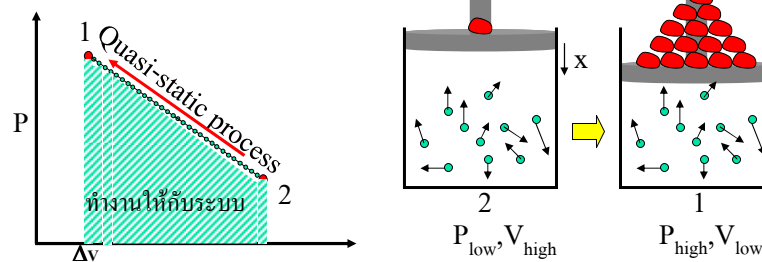


- พิจารณาในทางย้อนกลับ การเปลี่ยนแปลงสถานะ 2 $\rightarrow$ สถานะ 1 แบบ quasi-static process การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นช้าๆ (เสมือนหยิบเม็ดทรายทีละเม็ด กลับมาวางไว้บนลูกสูบ)
- แก๊สหดตัว ทำให้ ΔV ลดลงทีละน้อยๆ โดย P คงที่
- งานที่ระบบได้รับ หรือทำงานให้กับระบบ (compression work)

$$w = \int_{V_2}^{V_1} P dV$$

15
PS

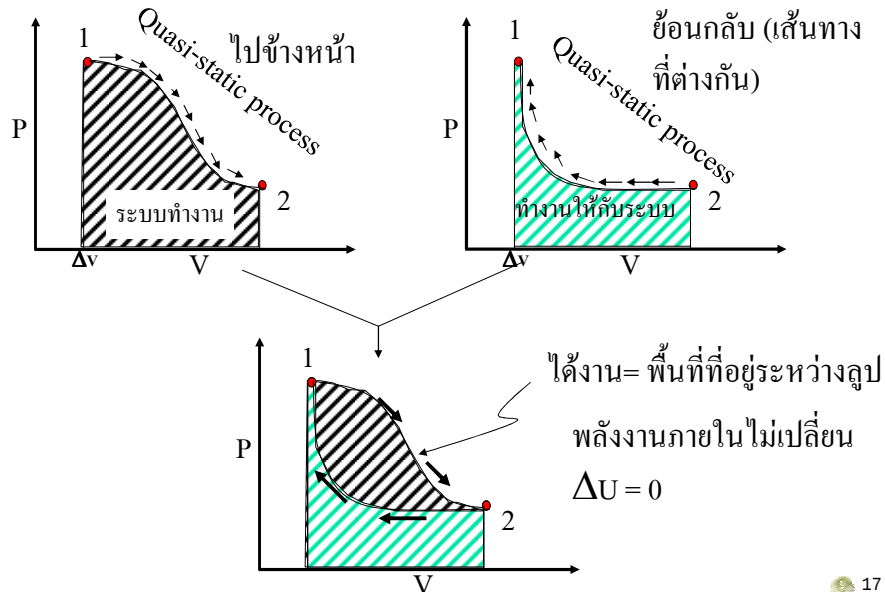
กระบวนการผันกลับ



- การเปลี่ยนแปลงสถานะ 2 $\rightarrow$ สถานะ 1 แบบ quasi-static process
- $V_{\text{ลด}} \rightarrow$ compressing the system $\rightarrow$ ให้งานกับระบบ

16
PS

PV-diagrams & expansion work

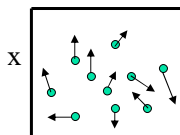


17

ความสัมพันธ์ระหว่าง U กับ P,V,T

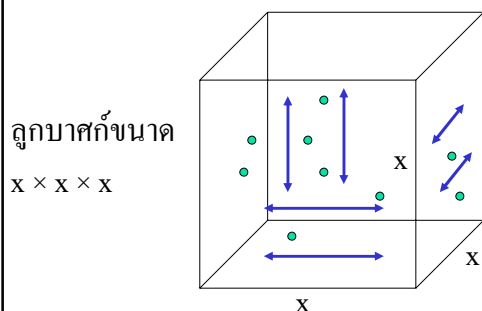
(พิสูจน์ $U = (3/2) PV$ หรือ $U = (3/2) nRT$)

พิจารณา monoatomic gas ในภาชนะระบบปิด (P,V,T)



ความดัน $\propto$ การชนผนังของแก๊ส

เมื่อพิจารณาการชนผนังใน 3D ของ monoatomic gas จำนวน N อนุภาค



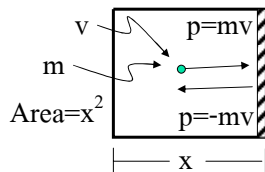
จำนวนและทิศการเคลื่อนที่ของแก๊ส

- N/3 ซ้าย-ขวา
- N/3 หน้า-หลัง
- N/3 บน-ล่าง

18

พิจารณาแก๊สอะตอมเดี่ยว มวล m , ความเร็ว v ชนผนังด้านหนึ่ง (ทิศซ้ายขวา)

แรงที่เนื่องมาจากการ



$$F = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$F = \frac{\Delta mv}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

พิจารณาโมเมนตัม Elastic collision; $\Delta p = mv_{\text{ก่อนชน}} - (-mv_{\text{หลังชน}}) = 2mv$

พิจารณาเวลา;

$$\Delta t = \frac{\text{ระยะทางไป-กลับ}}{\text{อัตราเร็วการชน}} = \frac{2x}{v}$$

ความดันจาก

อนุภาคตัวเดียว

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2mv}{\frac{2x}{v}} = \frac{mv^2}{x}$$

$$P = \frac{F}{A} = \frac{mv^2}{x} \cdot \frac{1}{x^2} = \frac{mv^2}{x^3} \quad \text{หรือ} \quad P = \frac{mv^2}{V}$$

19

ถ้าพิจารณาอนุภาคทั้งหมด N อนุภาค ความดันที่เกิดจากการชนผนังด้าน
ดังกล่าวเท่ากับ

$$P = \frac{mv^2}{V} \cdot \frac{N}{3}$$

จัดรูปใหม่ จะได้เป็น $3PV = mv^2 \cdot N$

$$\frac{3}{2}PV = \left(\frac{mv^2}{2} \right) \cdot N \quad \left. \vphantom{\frac{3}{2}PV} \right\} \text{พลังงานจลน์รวมของระบบ}$$

KE ของ 1 อนุภาค

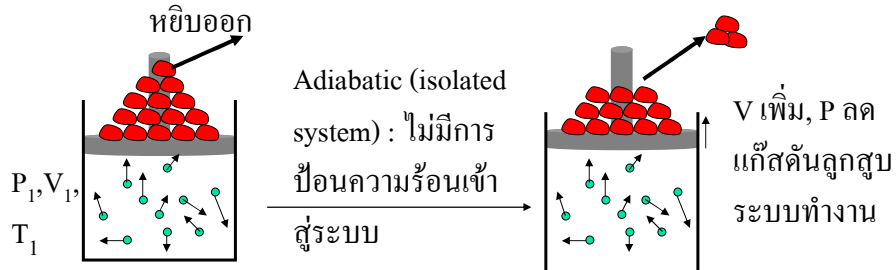
$$U = KE_{\text{total}} + PE_{\text{total}}$$

เนื่องจากเป็นแก๊สอะตอมเดี่ยวและเป็นแก๊สอุดมคติ $PE_{\text{total}} = 0$,

$$U = KE_{\text{total}} = \frac{3}{2}PV = \frac{3}{2}nRT$$

20

3.2.4 งานจากระบบขยายตัวที่อุณหภูมิคงที่ (isothermic process) และผันกลับได้
ปัญหาแก๊สขยายตัว ทำให้ T ลดลง



1st law thermo;

$$\Delta U = q + w$$

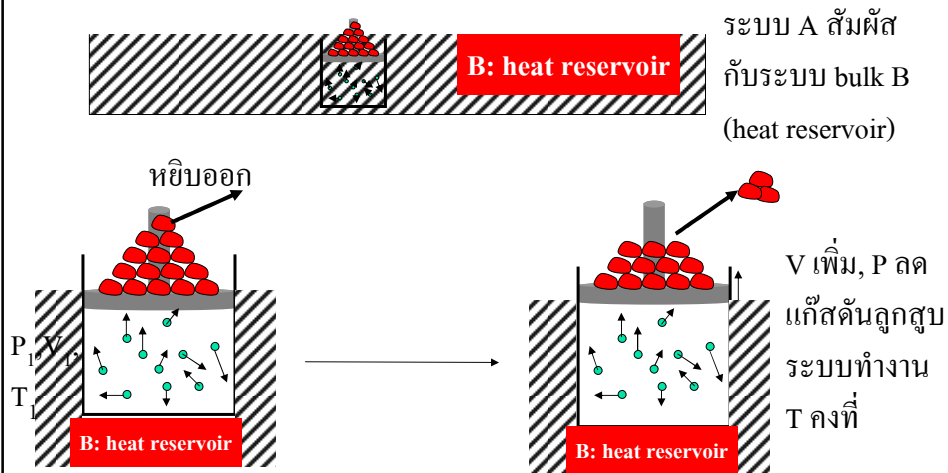
$$\text{Adiabatic; } q = 0 \longrightarrow \Delta U = 0 - w \rightarrow U \text{ ลด} \rightarrow T \text{ ลด}$$

ระบบทำงาน ; $-w$

หรือ $KE \rightarrow \text{work}$ เมื่อระบบใช้ KE ไป ทำให้ KE ลดลง $\rightarrow T$ ลด

21
PS

รักษา T ให้คงที่โดยใช้ heat reservoir

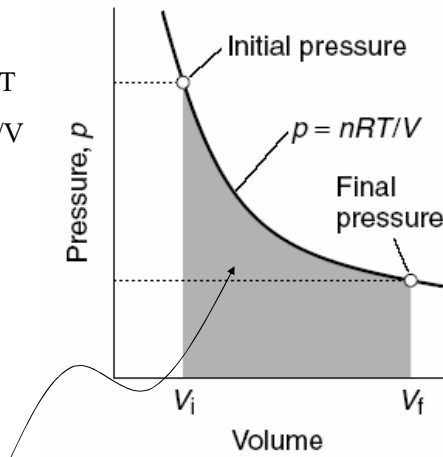


ดังนั้นเมื่อระบบขยายตัว $KE \rightarrow \text{work}$ แต่ T คงที่ เพราะโดยรับ q จาก heat reservoir ทำให้ U เท่าเดิม และ $\Delta U = 0$

22
PS

ระบบขยายตัวที่ T คงที่ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง P และ V จะเป็น hyperbola

จากสมการ $PV = nRT$
 เมื่อ T คงที่ $P = nRT/V$
 หรือ $P = k/V$
 k (ค่าคงที่) $= nRT$



งานที่เกิดจากระบบขยายตัว = พื้นที่ใต้กราฟ

23 PS

งานที่เกิดจากระบบขยายตัว ที่ T คงที่
 โดย integration

Differential equation: the product rule

$$dw = d(PV) \quad dP=0 \text{ (quasi-static)}$$

$$= PdV + VdP$$

$$w = -\int_{V_i}^{V_f} P(V)dV$$

$$= -\int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV$$

$$= -nRT[\ln V]_{V_i}^{V_f}$$

$$= -nRT[\ln V_f - \ln V_i]$$

$$w = -nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

$$\int_a^b \frac{dx}{x} = (\ln x + \text{constant}) \Big|_a^b$$

$$= (\ln b + \text{constant}) - (\ln a + \text{constant})$$

$$= \ln b - \ln a = \ln \frac{b}{a}$$

1st law thermo;

$$\Delta U = q + w$$

Isothermal; $\Delta U = 0$

ระบบทำงาน ; $-nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$

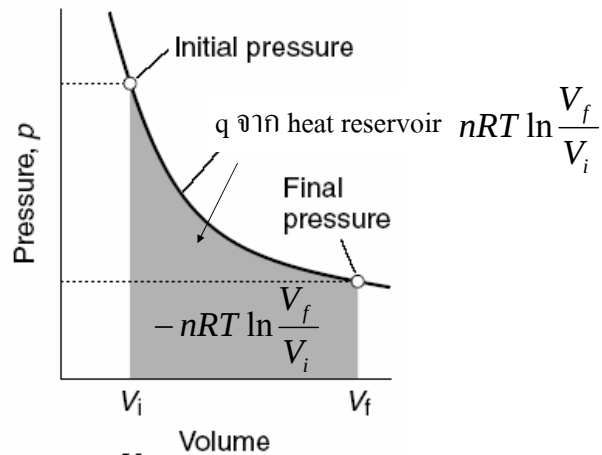
$$0 = q - nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

$$q = nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

q : ความร้อนที่ให้เข้าไปในระบบ

24 PS

งานที่เกิดจากระบบขยายตัว ที่ T คงที่

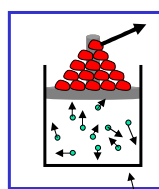


ถ้า $V_f > V_i \rightarrow w < 0$ ($-nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$) ระบบทำงาน $\rightarrow$ isothermal expansion

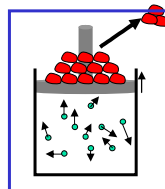
ถ้า $V_f < V_i \rightarrow w > 0$ ($nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$) ทำงานให้ระบบ $\rightarrow$ isothermal compression



3.2.5 กระบวนการเอเดียเบติก (Adiabatic process)



isolated system :
ไม่มีความร้อนเข้า-
ออกจากระบบ



ปริมาตรเพิ่ม(แก๊สขยายตัว) $\rightarrow$
ความดันลดลง $\rightarrow$ ระบบทำงาน
(KE เปลี่ยนเป็น w) $\rightarrow$ U ลดลง

P_1, V_1, T_1 (q=0)

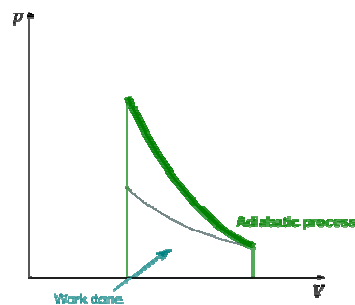
ฉนวนกันความร้อน

1st law thermo;

$$\Delta U = q + w = 0 - w$$

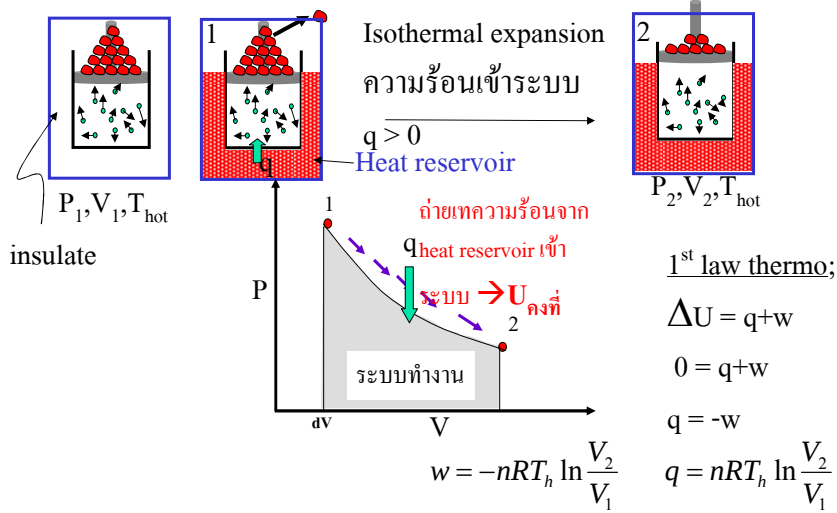
$$\Delta U = -w$$

$$w = C_v \Delta T$$



พิจารณากระบวนการ 4 ขั้นตอนต่อไปนี้

- ขั้นที่ 1: state 1 ไป state 2 (isothermal process)

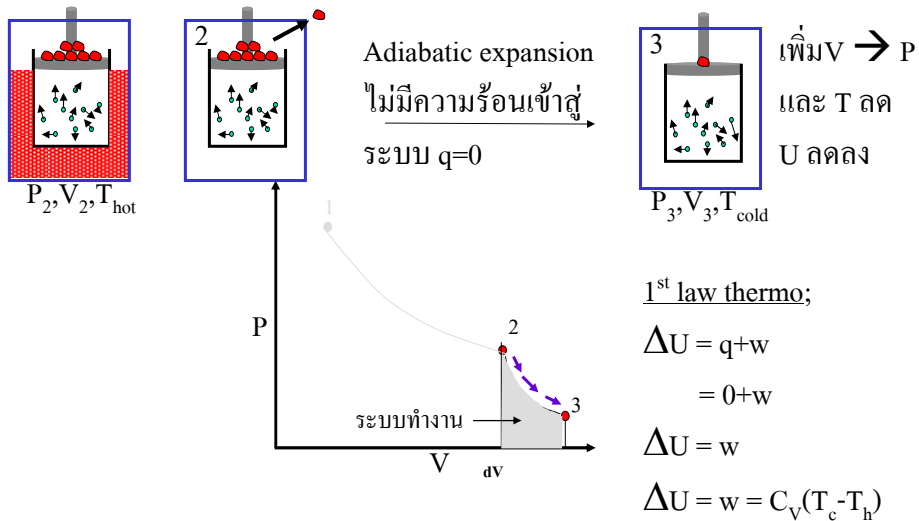


$q = -w \rightarrow$ ความร้อนที่เข้าสู่ระบบถูกนำไปเปลี่ยนเป็นงาน

27 PS

พิจารณากระบวนการ 4 ขั้นตอนต่อไปนี้

- ขั้นที่ 2: state 2 ไป state 3 (adiabatic process)

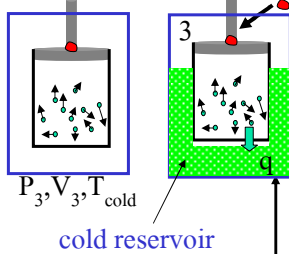


ระบบทำงาน $\rightarrow$ T ลด $\rightarrow$ U ลด

28 PS

พิจารณากระบวนการ 4 ขั้นตอนต่อไปนี้

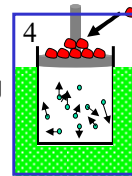
- ขั้นที่ 3: state 3 ไป state 4 (isothermal process)



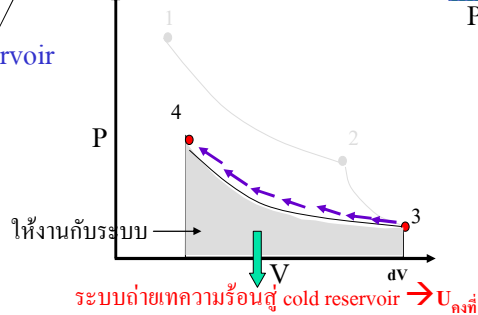
Isothermal compression

ความร้อนออกจากระบบ

$q < 0$, U คงที่



ลด V, P เพิ่ม
และ T คงที่
U ลดลง



ให้งานกับระบบ $\rightarrow$ P เพิ่ม, V ลด

1st law thermo;

$$\Delta U = q + w$$

$$0 = q + w$$

$$q = -w$$

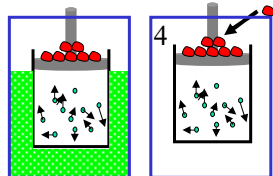
$$w = -nRT_c \ln \frac{V_4}{V_3}$$

$$q = nRT_c \ln \frac{V_4}{V_3}$$

29

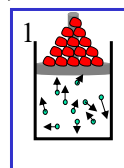
พิจารณากระบวนการ 4 ขั้นตอนต่อไปนี้

- ขั้นที่ 4: state 4 กลับไป state 1 (adiabatic process)



Adiabatic compression

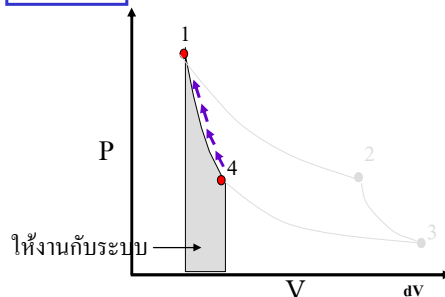
$q = 0$, U เพิ่ม



ลด V, P เพิ่ม
และ T เพิ่ม
U เพิ่ม

$P_4, V_4, T_{\text{cold}}$

P_1, V_1, T_{hot}



ให้งานกับระบบ $\rightarrow$ ระบบกลับที่จุดเริ่มต้นอีกครั้ง

1st law thermo;

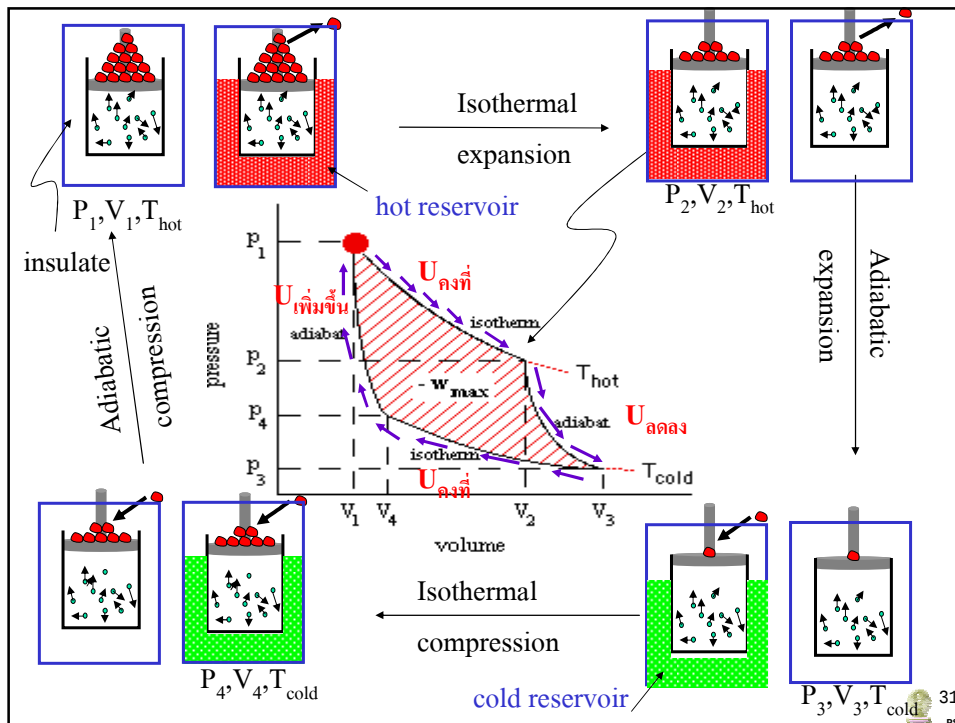
$$\Delta U = q + w$$

$$= 0 + w$$

$$\Delta U = w$$

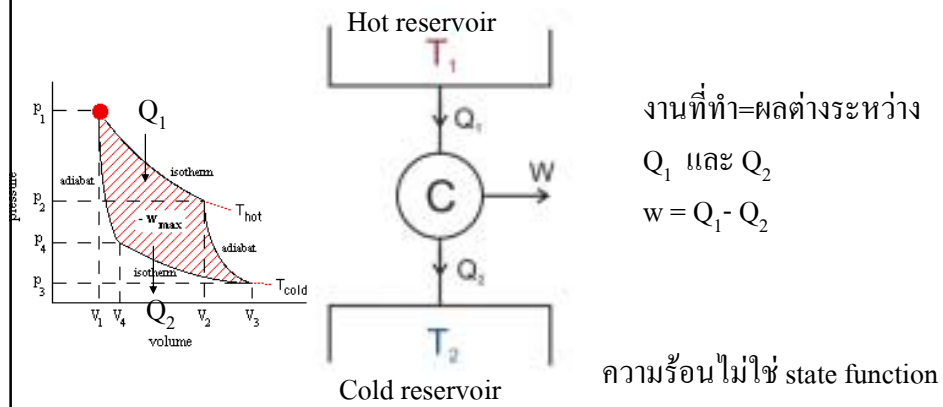
$$\Delta U = w = C_V(T_h - T_c)$$

30



- ถ้าสมมติว่ากระบวนการนี้เป็นกระบวนการอุดมคติ นั่นคือ ไม่มีการสูญเสียความร้อน เนื่องจากแรงเสียดสีของภาชนะหรือเครื่องยนต์
- ระบบสามารถกลับที่จุดเริ่มต้นในสภาวะ T, P, V, U เหมือนเดิม (state variable)
- กระบวนการที่ระบบดำเนินครบรอบวัฏจักรดังกล่าวเรียกว่า วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle)
- เครื่องยนต์ที่ทำงานแบบวัฏจักรคาร์โนต์เรียกว่า Carnot Engine
- Carnot Engine เป็นเครื่องยนต์อุดมคติ (ประสิทธิภาพดีที่สุดตามทฤษฎี) ที่ให้ความเข้าใจในการใช้หรือเปลี่ยนรูปความร้อนให้เป็นงาน (เนื่องจาก การถ่ายเท q จาก hot reservoir เข้าระบบเพื่อนำไปทำงาน (พื้นที่ระหว่างกราฟ) แล้วถ่ายเท q ออกจากระบบ cold reservoir)

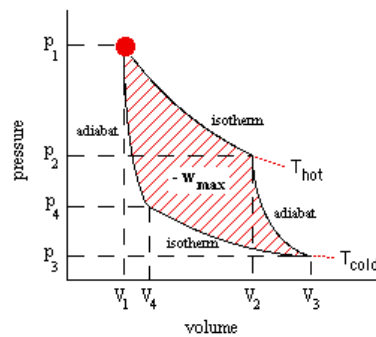
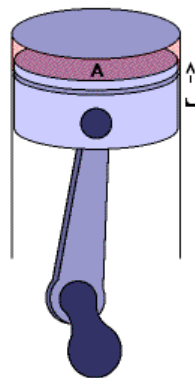
แผนภาพเครื่องยนต์คาร์โนต์ (Carnot Engine Diagram)



33
es

วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot cycle)

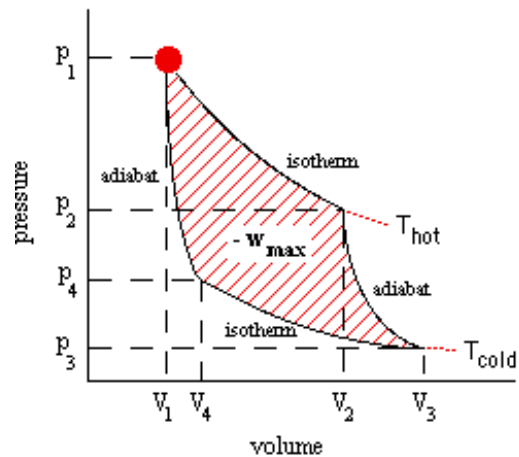
the most efficient cycle possible for converting a given amount of thermal energy into work or, conversely, for using a given amount of work for refrigeration (Carnot refrigerator) purposes.



34
es

วัฏจักรคาร์โนต์

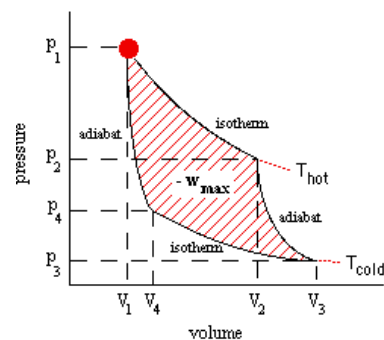
- เป็นการผสมของกระบวนการ
อะเดียเบติก และไอโซเทอร์ม
มอล
- การทำงานมีสี่จังหวะ คือ
 1. Isothermal expansion
 2. Adiabatic expansion
 3. Isothermal compression
 4. Adiabatic compression



35
es

การเปลี่ยนแปลงงาน ความร้อนและพลังงานในวัฏจักรคาร์โนต์

step	description	conversion
p_1V_1 to p_2V_2	isotherm (T_h) expansion	heat to work
p_2V_2 to p_3V_3	adiabatic expansion	internal energy to work
p_3V_3 to p_4V_4	isothermal(T_c) compression	work to heat
p_4V_4 to p_1V_1	adiabatic compression	work to internal energy



36
es

การเปลี่ยนแปลงงาน ความร้อนและพลังงานในวัฏจักรคาร์โนต์

step	description	conversion	ΔU	q_{rev}	w_{rev}
p_1V_1 to p_2V_2	isotherm (T_h) expansion	heat to work	0	$RT_h \ln(V_2/V_1)$	$-RT_h \ln(V_2/V_1)$
p_2V_2 to p_3V_3	adiabatic expansion	internal energy to work	$C_v(T_c - T_h)$	0	$C_v(T_c - T_h)$
p_3V_3 to p_4V_4	isothermal(T_c) compression	work to heat	0	$RT_c \ln(V_4/V_3)$	$-RT_c \ln(V_4/V_3)$
p_4V_4 to p_1V_1	adiabatic compression	work to internal energy	$C_v(T_h - T_c)$	0	$C_v(T_h - T_c)$

37
PS

Carnot cycle

38
PS

ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์ (Efficiency of a Carnot engine)

$$\text{ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์ } (\eta) = \frac{w_{ex}}{Q_1}$$

ปริมาณความร้อนที่ให้ระบบเปลี่ยนไปเป็นงานที่ระบบทำ

$$\Delta U = q_{net} + w = Q_1 - Q_2 + (-w_{ex})$$

q_{net} = ความร้อนสุทธิที่ให้กับระบบ

Q_1 = ความร้อนที่ให้กับระบบ

Q_2 = ความร้อนที่ออกจากระบบ

w_{ex} = งานที่ระบบทำ

Carnot cycle: $\Delta U = 0$

$$0 = Q_1 - Q_2 - w_{ex}$$

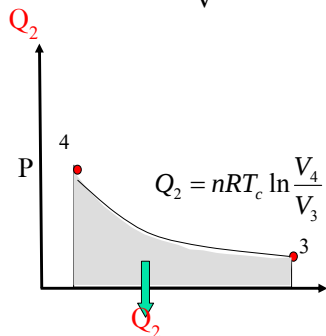
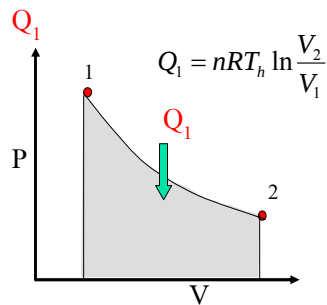
$$w_{ex} = Q_1 - Q_2$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$



39

พิจารณาความสัมพันธ์จาก Q_1 vs Q_2



$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{\cancel{nRT_c} \ln \frac{V_4}{V_3}}{\cancel{nRT_h} \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

ถ้า $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_4}{V_3}$

$$\eta_c = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

← สำหรับ Carnot engine

$$\eta = \frac{w_{ex}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

← สำหรับเครื่องยนต์
ทั่วไป



40

Reversing Carnot cycle: Carnot refrigerator

