

# บทที่ 13 ความร้อนและอุณหพลศาสตร์

## 1. ความร้อนและอุณหภูมิ

**ความร้อน (Heat)** เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสสารพลังงานความร้อนที่ถูกส่งออกมา จะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่  $10^{13} \text{ Hz}$  เรียกว่ารังสีอินฟราเรด มนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ล้วนมีประสาทสัมผัสหรือปฏิกิริยาตอบสนองที่ไวต่อความร้อน

ความร้อนเป็นปริมาณสเกลาร์มีหน่วยจุล *Joule* เดิมใช้คาลอรี *Calorie* โดย  $1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$

ความรู้สึก บอกระดับของความร้อนไม่ได้ ดังนั้น อุณหภูมิเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ซึ่งใช้บอกระดับความร้อนโดยใช้อุปกรณ์ที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เรียกว่า **เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)**

กำหนดให้อุณหภูมิของน้ำ ณ จุดเยือกแข็งเป็น 0 องศา เซนติเกรด  $^{\circ}\text{C}$  ซึ่งต่อมาเปลี่ยนชื่อเป็น เซลเซียส ตามชื่ออันเดอร์ เซลเซียส (**Anders Celsius**)

ปัจจุบันได้กำหนดหน่วยของอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (**absolute temperature**) มีหน่วยเป็น เคลวิน  $K$  ตามชื่อของ **Lord Kelvin** โดยที่แต่ละช่องของสเกลทั้งสองแบบเท่ากัน  $t(^{\circ}\text{C}) = t(K) - 273.15$

ดังนั้นน้ำจึงมีจุดเยือกแข็งหรือจุดหลอมเหลวที่  $0^{\circ}\text{C}$  หรือ  $273.15\text{K}$  และไอน้ำกลั่นตัวหรือเดือดที่  $100^{\circ}\text{C}$  หรือ  $373.15\text{K}$

## 2. การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

เมื่อวัตถุได้รับความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งโดยทั่วไปจะมีการขยายตัวขึ้น

### 2.1 การขยายตัวตามเส้น

พิจารณา เดิมวัตถุมีความยาว  $l_0$  มีอุณหภูมิ  $t_0$  เมื่อได้รับความร้อนเพิ่มจนอุณหภูมิเป็น  $t$  และความยาวเป็น  $l_t$  ส่วนที่ยืดออกไป  $\Delta l = l_t - l_0$  จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาวเดิม และอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนไปดังสมการ

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t$$

โดยที่  $\alpha$  เป็นค่าคงที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น (Linear expansion coefficient) หรือสามารถหาความสัมพันธ์ของความยาวของวัตถุที่อุณหภูมิ  $t$  ใด ๆ ได้ดังนี้

$$l_t - l_0 = \alpha l_0 \Delta t$$

$$l_t = l_0(1 + \alpha \Delta t)$$

### ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น

ของแข็ง	$\alpha$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) <sup>-1</sup>	ของแข็ง	$\alpha$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) <sup>-1</sup>
ยางแข็ง	$8.00 \times 10^{-5}$	ทองแดง	$1.67 \times 10^{-5}$
สังกะสี	$3.50 \times 10^{-5}$	เหล็กกล้า	$1.19 \times 10^{-5}$
ตะกั่ว	$2.76 \times 10^{-5}$	แก้ว	$(7.80 - 9.70) \times 10^{-6}$
อะลูมิเนียม	$2.20 \times 10^{-5}$	ไม้	$(3.00 - 5.00) \times 10^{-6}$
ทองเหลือง	$1.89 \times 10^{-5}$	ควอตซ์	$0.20 \times 10^{-6}$

## 2.2 การขยายตัวตามพื้นที่

พิจารณาวัตถุรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง  $a$  ยาว  $b$  ที่อุณหภูมิ  $t$  ใด ๆ จะ  
ได้ความสัมพันธ์ว่า

$$Area = a \cdot b = [a_0(1 + \alpha\Delta t)] \cdot [b_0(1 + \alpha\Delta t)]$$

$$Area = a_0 b_0 (1 + 2\alpha\Delta t + (\alpha\Delta t)^2)$$

$$Area = A_0(1 + 2\alpha\Delta t) \quad ; \quad (\alpha\Delta t)^2 \approx 0$$

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามพื้นที่ มีค่าเท่ากับ  $2\alpha$

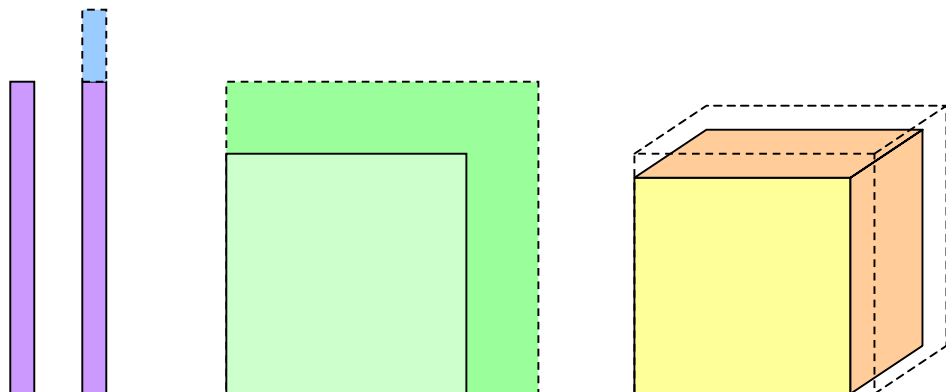
## 2.3 การขยายตัวตามปริมาตร

พิจารณาของแข็งที่มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง ปริมาตรเดิม  $V_0$  เมื่อ  
อุณหภูมิเปลี่ยนไปเป็น  $t$  ปริมาตรใหม่ที่ได้จะมีค่าเท่ากับ  $V_t$  ในทำนองเดียว  
กัน สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$V_t = V_0(1 + \beta\Delta t)$$

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตร เท่ากับ  $\beta = 3\alpha$  โดยที่

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{(V_t - V_0)}{\Delta t} = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$



### 3. ความเค้นที่เกิดจากความร้อน

แท่งวัตถุที่ถูกตรึงไว้ปลายทั้งสอง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจะเกิดแรงดันหรือแรงดึงขึ้นในวัตถุนั้น ทำให้เกิดความเค้นดึงหรือความเค้นอัดขึ้น เรียกว่าความเค้นที่เกิดจากความร้อน (Thermal stress)

$$\text{ความเครียด} = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha(t - t_0) = \alpha\Delta t$$

$$\text{จากค่าโมดูลัสของยังของวัตถุ} = Y = \frac{F \cdot l_0}{A \cdot \Delta l}$$

$$\text{ความเค้นที่เกิดจากความร้อน} = \frac{F}{A} = Y\alpha\Delta t$$

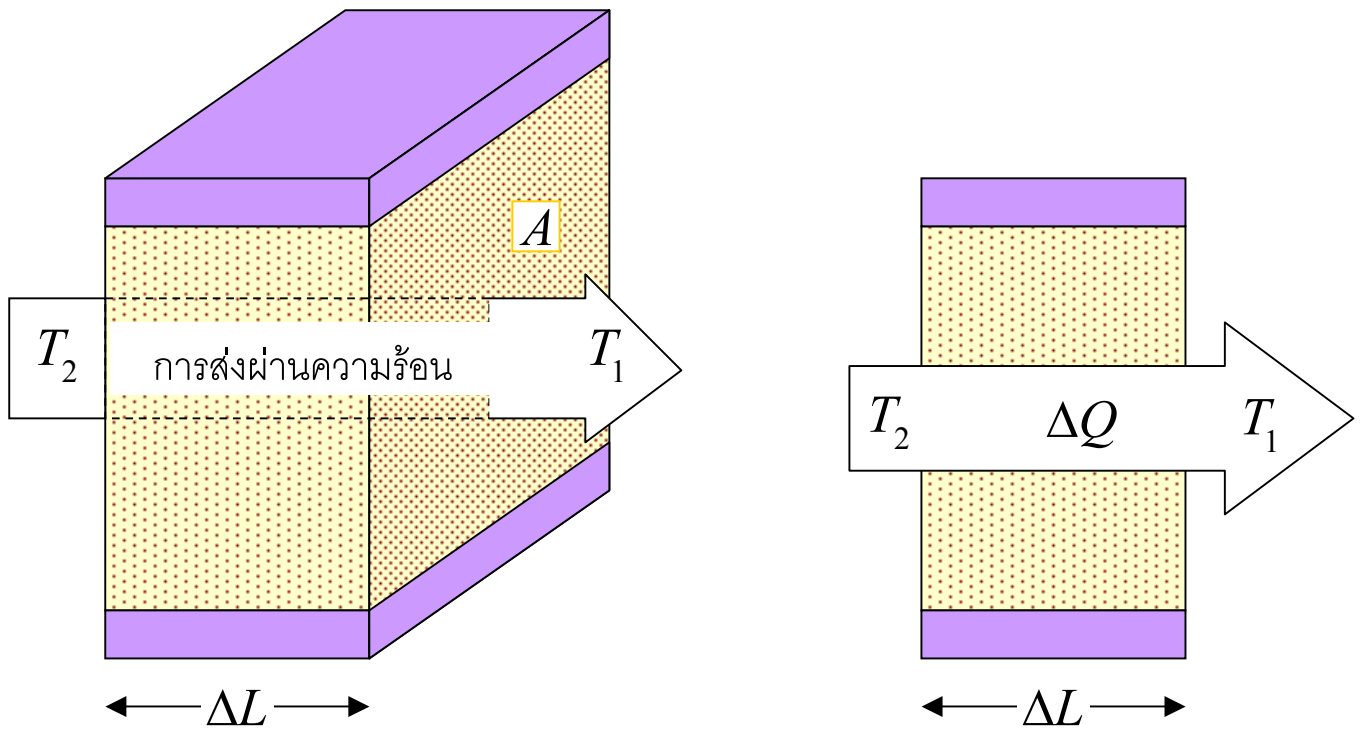
### 4. การส่งผ่านความร้อน

การที่พลังงานความร้อนมีการส่งผ่าน หรือถ่ายเทความร้อนนั้น เป็นการส่งถ่ายพลังงานความร้อน จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ ซึ่งพิจารณาได้ 3 กรณี คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี

#### 4.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนเป็นการส่งผ่านพลังงานความร้อนไปในเนื้อวัตถุ เมื่อมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ โดยที่เนื้อวัตถุหรือตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่

อัตราการส่งถ่ายพลังงาน แปรผันตรงกับ พื้นที่หน้าตัด  $A$  ผลต่างอุณหภูมิ  $\Delta T$  และแปรผกผันกับความหนาของตัวกลาง  $\Delta L$  พิจารณาการถ่ายเทพลังงานดังรูป



$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = kA \frac{\Delta T}{\Delta L} = kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta L}$$

โดยที่  $k$  เป็นค่าคงที่เรียกว่า สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity)

พิจารณาในช่วงเวลาสั้น ๆ  $dt$  ความหนาแน่น ๆ  $dx$  ได้กระแสความร้อน

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dL} \quad (\text{Heat current, } H)$$

เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจะลดลง เรียก  $\frac{dT}{dL}$  ว่า เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ

การนำความร้อนจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนวัตถุมีอุณหภูมิคงที่ ซึ่งเรียกว่า สภาวะคงตัว กล่าวคือที่แต่ละจุดในเนื้อวัตถุ จะมีการไหลของความร้อนเข้า

เท่ากับอัตราการไหลออกของความร้อน  $\frac{dT}{dL}$  จะคงที่

ค่า  $H$  ในกรณีการนำความร้อนอยู่ในสภาวะคงตัว ได้ดังนี้

$$H \int dL = -kA \int dT$$

$$HL = kA(T_2 - T_1)$$

$$H = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L}$$

## 4.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อนเป็นการส่งผ่านพลังงานความร้อน โดยโมเลกุลของตัวกลางที่รับความร้อนเป็นตัวเคลื่อนที่พาไป เป็นไปได้ 2 กรณี

□ การพาความร้อนอย่างอิสระ (Free convection)

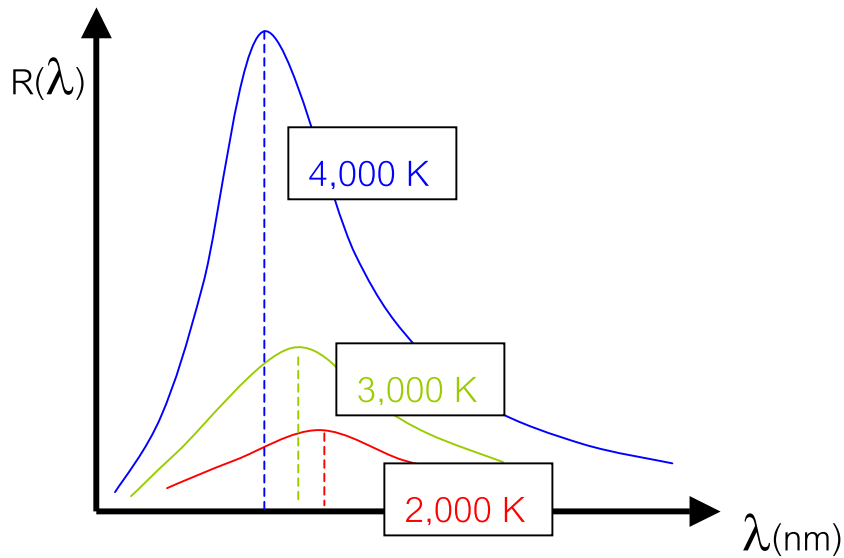
การพาโดยโมเลกุลของตัวกลาง เคลื่อนที่ไปได้เนื่องจากความหนาแน่นของตัวกลางแตกต่างกัน เช่น การเกิดลมพัด การระบายอากาศจากปล่องโรงงาน

□ การพาความร้อนอย่างไม่อิสระ (Forced convection)

การพาโดยโมเลกุลของตัวกลางที่พาถูกแรงภายนอกกระทำให้เคลื่อนที่ เช่น การระบายความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์พัดลม และ เครื่องทำความเย็น

## 4.3 การแผ่รังสี (Radiation)

การแผ่รังสี คือการที่วัตถุร้อนส่งผ่านพลังงานความร้อนออกจากผิววัตถุ ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เรียกว่ารังสีอินฟราเรด จึงเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง โดยไม่อาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ การแผ่รังสีจะเกิดกับวัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า **ศูนย์องศาสัมบูรณ์** โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกมา มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน มีพลังงานแตกต่างกันดังรูป



$R(\lambda)$  คืออัตราการแผ่รังสีต่อหน่วยพื้นที่ผิวของวัตถุต่อหน่วยความยาวคลื่น ขึ้นกับอุณหภูมิและชนิดของวัตถุ  $R(\lambda)$  สูงสุดจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นสั้น

อัตราการแผ่รังสีจากวัตถุ  $\frac{dQ}{dt}$  เป็นตามกฎของสเตฟาน (Stefan's law)

$$\frac{dQ}{dt} = e\sigma AT^4 \text{ มีหน่วยเป็นวัตต์}$$

$T$  คืออุณหภูมิของวัตถุ มีหน่วยเป็นองศาสัมบูรณ์

$e$  คือสภาพแผ่รังสี emissivity ของผิววัตถุ มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 (ผิวดำ  $e=1$ )

$\sigma$  คือค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์มาน (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}(\text{K})^{-4}$  หรือ  $1.35 \times 10^{-12} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$

อัตราการแผ่รังสีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว  $R$  มีค่าดังนี้

$$R = \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = \frac{e\sigma AT^4}{A} = e\sigma T^4$$

อัตราการแผ่รังสีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว  $R$  ระหว่างวัตถุ มีอุณหภูมิ  $T_1$  กับสิ่งแวดล้อม  $T_2$  คือ

$$R = e\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

กรณีที่  $T_1 > T_2$  จะทำให้อัตราการแผ่รังสีมากกว่าดูดกลืน

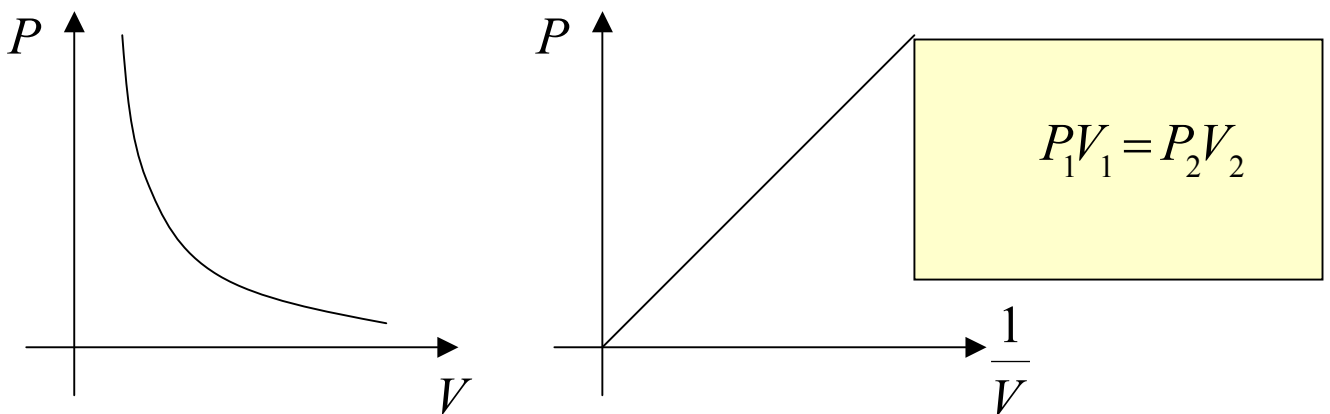
กรณีที่  $T_1 = T_2$  จะทำให้อัตราการแผ่รังสีและดูดกลืนเท่ากัน

กรณีที่  $T_1 < T_2$  จะทำให้อัตราการแผ่รังสีน้อยกว่าการดูดกลืน

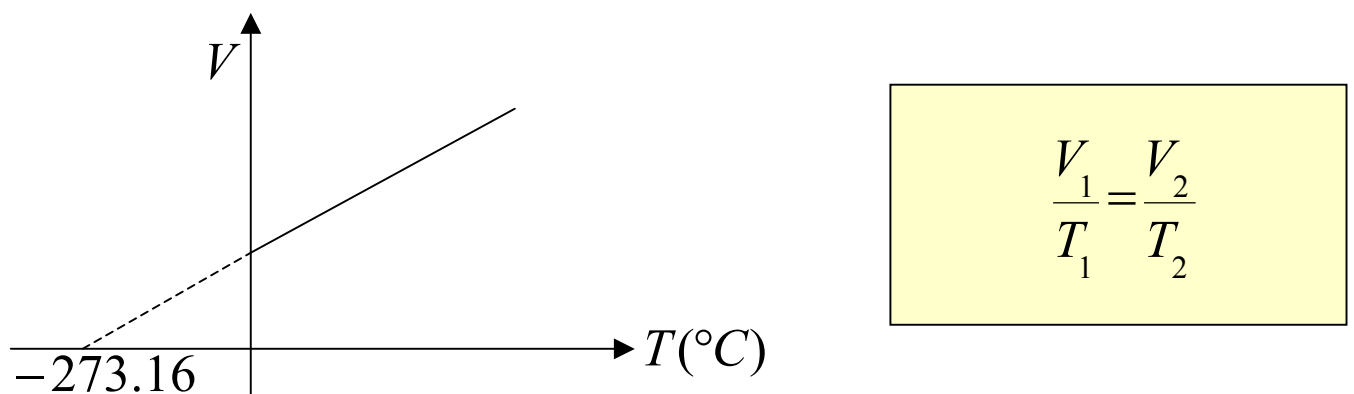
สำหรับวัตถุที่มีสามารถในการดูดกลืนพลังงานทั้งหมด ที่ตกกระทบผิว วัตถุ หรือปลดปล่อยพลังงานทั้งหมด จะเรียกวัดภูนั้นว่า วัตถุดำ Black body

## 5. กฎของก๊าส

จากการศึกษาของ Boyle พบว่า “เมื่ออุณหภูมิของก๊าสคงที่ ความดันจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ เศษหนึ่งส่วนปริมาตร ของก๊าส”



จากการศึกษาของ Charles พบว่า “เมื่อความดันของก๊าสคงที่ ปริมาตรจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ อุณหภูมิ ของก๊าส เป็นองศาเคลวิน”





จากการทดลองของ Gay Lussac พบว่า “เมื่อปริมาตรคงที่ความดันของก๊าซจะเป็นปฏิกภาคโดยตรงกับอุณหภูมิ” สามารถเขียนรวมกันได้ว่า

$$V \propto \frac{1}{P} \quad ; \quad V \propto T$$

$$V \propto \frac{T}{P} \quad ; \quad PV \propto T \quad ; \quad \frac{PV}{T} = K$$

ในกรณีที่ก๊าซ มีชนิดและปริมาณเดียวกัน สามารถเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

จากกฎของอาร์โวกาโดร “ก๊าซทุกชนิดจำนวน 1 โมล จะมีปริมาตรเท่ากับ 22.4 ลูกบาศก์เดซิเมตร ที่ S.T.P.” เมื่อนำมาแทนค่าจะได้ว่า

$$\frac{1.013 \times 10^5 \times n(22.4 \times 10^{-3})}{273} = 8.31 n = k$$

สามารถเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$PV = nRT \quad ; \quad R = 8.31 \text{ Joule/mol} \cdot K$$

$$PV = Nk_B T \quad ; \quad k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ Joule/molecule} \cdot K$$

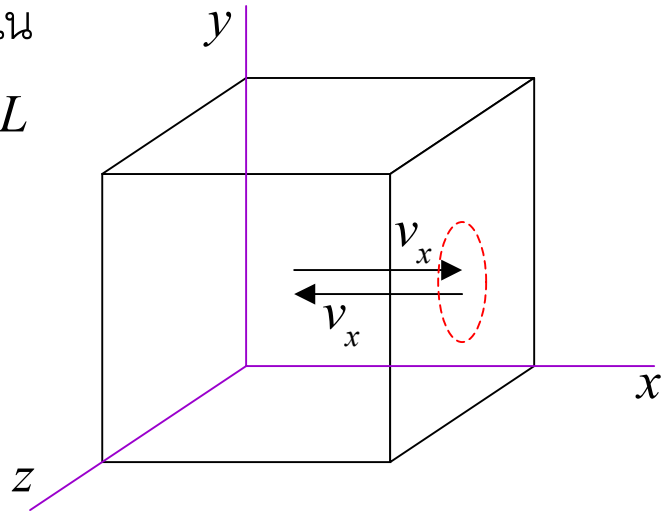
$k_B = \text{Boltzmann constant}$

## 6. ทฤษฎีจลน์ของก๊าซ

โรเบิร์ต บอย ได้ตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับก๊าซไว้ว่า

- ก๊าซเป็นอนุภาคเล็ก ๆ อยู่ในที่ว่าง
- อนุภาคของก๊าซ มีการชนกันแบบยืดหยุ่น
- อนุภาคของก๊าซมีอัตราเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกัน
- อนุภาคของก๊าซมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับภาชนะ

พิจารณาอนุภาคของก๊าซใน  
กล่องรูปลูกบาศก์กว้างด้านละ  $L$



โมเมนตัมก่อนชน  $p_1 = m\bar{v}_x$  โมเมนตัมหลังชน  $p_2 = -m\bar{v}_x$

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม (การดล)  $\Delta p = -2m\bar{v}_x$

การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม = การดล  $2m\bar{v}_x = F \cdot t$

จากความสัมพันธ์  $F = PA$  และ  $t = \frac{2L}{v_x}$  ดังนั้น

$$PA \cdot \frac{2L}{v_x} = 2mv_x \quad ; \quad PV = m\bar{v}_x^2$$

พิจารณาความเร็วในการเคลื่อนที่ ในระบบสามมิติ

$$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2 \quad ; \quad \bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$$

$$\bar{v}^2 = 3\bar{v}_x^2 \quad ; \quad \bar{v}_x^2 = \frac{\bar{v}^2}{3}$$

ดังนั้นสามารถเขียนได้ว่า  $PV = \frac{1}{3}m\bar{v}^2$

พลังงานจลน์เฉลี่ยของก๊าซ สามารถเขียนได้ในรูปตัวแปรทางฟิสิกส์ของก๊าซ

$$K.E. = \frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{3}{2}PV = \frac{3}{2}nRT = \frac{3}{2}Nk_B T$$

พลังงานจลน์เฉลี่ยของก๊าซ แปรผัน กับอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

# 7. อุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics)

อุณหพลศาสตร์เป็นวิชาที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนกับพลังงานกลของระบบ

**ระบบ** คือ คำที่ใช้เรียกสิ่งที่กำลังสนใจศึกษาหรือสังเกตอยู่ ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นไปได้ 2 กรณีคือ 1. เกิดการอนุรักษ์พลังงาน และ 2. พลังงานความร้อน ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ทั้งหมด

## 7.1 พลังงานภายในระบบ

พลังงานภายในระบบก็คือ พลังงานจลน์รวมของทุกโมเลกุลของก๊าซ

$$\text{พลังงานภายในของก๊าซ } U = \frac{3}{2} Nk_B T$$

## 7.2 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

เมื่อระบบเปลี่ยนจากสถานะที่ 1 ไปสู่สถานะที่ 2 โดยระบบได้รับพลังงานความร้อน  $Q$  ทำงานให้กับสิ่งแวดล้อมเป็น  $W$

พบว่าพลังงานภายในระบบเปลี่ยนไปตามหลักการคงตัวของพลังงาน

ดังสมการ 
$$U_2 - U_1 = \Delta U = Q - W$$

ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สามารถเขียนได้ใหม่ว่า

$$dU = dQ - dW$$

เรียกสมการนี้ว่า กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

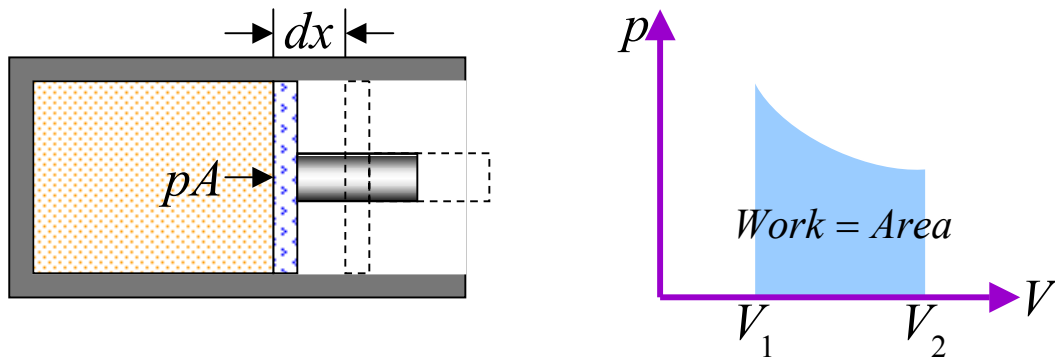
$\Delta Q$       มีค่าเป็นบวก เมื่อมีความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ

$\Delta W$       มีค่าเป็นบวก เมื่อระบบทำงานหรือขยายตัวออก

$\Delta U$       มีค่าเป็นบวก เมื่อพลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้น

### 7.3 งานจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร

พิจารณา ก๊าซหนึ่งระบบ บรรจุอยู่ในกระบอกสูบ ดังรูป



งานที่เกิดจากแรงดันของระบบกระทำต่อลูกสูบ

$$dW = pA dx = p dV$$

$$W = \int dW = \int p dV$$

กรณีที่ระบบเปลี่ยนแปลงโดยมีความดันคงที่ จะได้สมการของงานเป็น

$$W = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$$

### 7.4 ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซอุดมคติ

พิจารณา ก๊าซอุดมคติขณะที่ปริมาตรคงที่  $dV = 0$

$$W = \int dW = \int p dV = 0$$

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้ว่า

$$\Delta U = Q$$

จากนิยามของความจุความร้อนจำเพาะ จะได้ว่า

$$Q = mc_V \Delta T$$

เมื่อ  $c_V$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ เมื่อปริมาตรคงที่

กำหนด  $C_V$  เป็นความจุความร้อนโมลาร์ เมื่อปริมาตรคงที่ (ของก๊าซจำนวน 1 โมล) ได้ความสัมพันธ์ว่า

$$Q = nC_V \Delta T = \Delta U$$

$$C_V = \frac{\Delta U}{n\Delta T} \quad ; \quad n - \text{mole}$$

พิจารณาก๊าซอุดมคติจำนวนเต็มที่มีความดันคงที่  $p$   
 จากนิยามของความจุความร้อนจำเพาะ จะได้ว่า

$$Q = mC_p \Delta T$$

เมื่อ  $c_p$  คือ ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ เมื่อความดันคงที่  
 กำหนด  $C_p$  เป็นความจุความร้อนจำเพาะจำนวน 1 โมล เมื่อความดันคงที่  
 เรียกความจุความร้อนโมลาร์

$$Q = nC_p \Delta T \quad ; \quad dQ = nC_p dT$$

$$C_p = \frac{Q}{n\Delta T} \quad ; \quad C_p = \frac{dQ}{ndT}$$

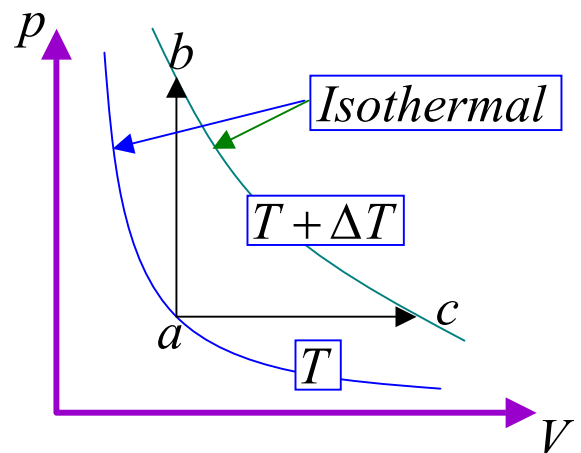
พิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน  $p$  และ ปริมาตรของก๊าซ  
 $V$  ที่อุณหภูมิคงที่ Isothermal ดังรูป

□  $ab$  คือกระบวนการปริมาตรคงที่  
 $dV = 0$  ;  $dQ = dU = nC_V dT$

□  $ac$  คือกระบวนการความดันคงที่

$$U_b = U_c \quad ; \quad dU = nC_V dT$$

$$dQ = nC_p dT$$



$$dW = pdV = p(V_2 - V_1) = nRdT$$

จากกฎของเทอร์โมไดนามิกส์

$$dQ = dU + dW$$

$$nC_p dT = nC_V dT + nRdT$$

$$; \quad C_p - C_V = R$$

## 7.5 กระบวนการต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์

### □ กระบวนการอุณหภูมิคงที่ (Isothermal process)

สำหรับก๊าซอุดมคติ  $\Delta U = 0$  ;  $\Delta Q = \Delta W$

งานที่ระบบกระทำต่อสิ่งแวดล้อม  $W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$

จากกฎของก๊าซ  $pV = nRT$  ;  $p = \frac{nRT}{V}$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

### □ กระบวนการความดันคงที่ (Isobaric process)

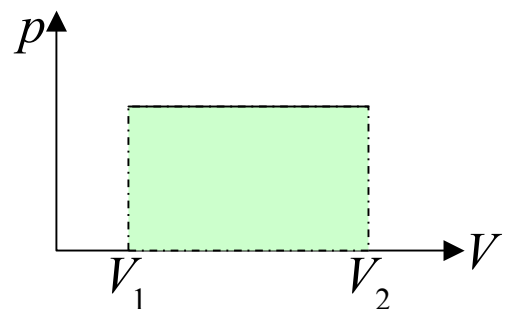
กระบวนการที่ความดันคงที่

งานที่เกิดขึ้น จะได้

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

$$W = p(V_2 - V_1) = p\Delta V$$

จากกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ ข้อที่ 1 ได้ว่า  $\Delta U = Q - W$



### □ กระบวนการปริมาตรคงที่ (Isovolumic process)

กระบวนการที่ ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง งานที่ได้มีค่าเป็นศูนย์  $dV = 0$

$$W = \int p dV = 0$$

ดังนั้นกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ข้อที่ 1 จะได้ว่า

$$\Delta U = \Delta Q$$

$$C_v = \frac{dQ}{ndT} = \frac{dU}{ndT} = \frac{3 nRdT}{2 ndT} = \frac{3}{2} R$$

## □ กระบวนการความร้อนคงที่ (Adiabatic process)

กระบวนการความร้อนคงที่ คือกระบวนการที่ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ปริมาตร โดยที่ไม่มีพลังงานความร้อนมาเกี่ยวข้อง แต่อุณหภูมิของก๊าซจะเปลี่ยนแปลง

ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์  $dU = dQ - dW$

กระบวนการความร้อนคงที่  $dQ = 0$

ดังนั้น  $dU = -dW = -pdV$

จากกราฟ  $p-V$  ระหว่างอุณหภูมิ  $T$  และ  $T + dT$  ทุกจุด

$$dU = nC_v dT$$

ดังนั้น  $dT = -\frac{pdV}{nC_v}$

จากกฎของก๊าซอุดมคติ  $pV = nRT$

$$pdV + Vdp = nRdT = n(C_p - C_v)\left(-\frac{pdV}{nC_v}\right)$$

$$pdV + Vdp = nRdT = -\frac{C_p}{C_v}pdV + pdV$$

$$Vdp + \frac{C_p}{C_v}pdV = 0$$

กำหนดให้  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  และหารสมการบนด้วย  $pV$

$$\frac{dp}{p} + \gamma \frac{dV}{V} = 0$$

ทำการอินทิเกรตสมการได้ว่า  $\int \frac{dp}{p} + \int \gamma \frac{dV}{V} = 0$

$$\ln p + \ln V = \ln K$$

ได้ความสัมพันธ์ว่า  $pV^\gamma = K$

ในกระบวนการความร้อนคงที่  $p_1V_1^\gamma = p_2V_2^\gamma$

หรือ  $pV = nRT$  ;  $p = \frac{nRT}{V}$

$$\frac{nRT_1}{V_1} V_1^\gamma = \frac{nRT_2}{V_2} V_2^\gamma$$

ได้ความสัมพันธ์ว่า  $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$  ทำนองเดียวกัน ได้ว่า  $\left(\frac{T_1}{T_2}\right)^\gamma = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\gamma-1}$

ความสัมพันธ์ระหว่างงาน  $W$  กับอุณหภูมิ  $T$

จาก  $T_1, T_2$  สามารถหางานจากข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนี้

$$dU = -dW = mc_v dT$$

$$-dW = mc_v dT$$

$$W = \int -mc_v dT = -mc_v(T_2 - T_1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างงาน  $W$  กับความดัน  $p$  และปริมาตร  $V$  ได้ดังนี้

จากนิยาม งาน  $W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$  และจาก  $p = KV^{-\gamma}$  ได้ว่า

$$W = K \int_{V_1}^{V_2} V^{-\gamma} dV$$

$$W = \frac{K}{1-\gamma} (V_2^{(1-\gamma)} - V_1^{(1-\gamma)})$$

จาก  $p_2 = KV_2^{-\gamma}$  และ  $p_1 = KV_1^{-\gamma}$  ดังนั้น

$$W = \frac{(p_2 V_2 - p_1 V_2)}{1-\gamma}$$



## 7.6 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์

กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ พิจารณาได้เป็น 2 แบบ คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ และงานที่เกิดจากเครื่องจักรความร้อน

### □ เอนโทรปี (entropy)

การพิจารณาว่ากระบวนการใด ๆ จะเกิดขึ้นได้หรือไม่ในธรรมชาติ ต้องพิจารณาจากกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์ ที่กล่าวว่า “กระบวนการใด ๆ จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อเปลี่ยนแปลงจากสภาวะที่เป็นระเบียบ (Order) ไปสู่ความไม่เป็นระเบียบ (disorder)” ซึ่งปริมาณที่ใช้วัดความไม่เป็นระเบียบของระบบ เรียกว่า เอนโทรปี

การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี เท่ากับ อัตราส่วนพลังงานความร้อนปริมาณน้อย ๆ ต่ออุณหภูมิ  $dS = \frac{dQ}{T}$

ถ้าหากมีการเปลี่ยนจากสภาวะที่ 1 ไปยังสภาวะที่ 2 จะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี 
$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

หน่วยของเอนโทรปี ในระบบเอสไอ คือ จูลต่อเคลวิน จากกฎข้อที่ 2 ของอุณหพลศาสตร์ เมื่อกล่าวถึงในเทอมของเอนโทรปีได้ว่า “กระบวนการใด ๆ ในธรรมชาติจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อกระบวนการนั้น ทำให้การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบเพิ่มขึ้นหรือคงตัว” สรุปได้ว่า  $\Delta S > 0$

$\Delta S = 0$  เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นและผันกลับได้

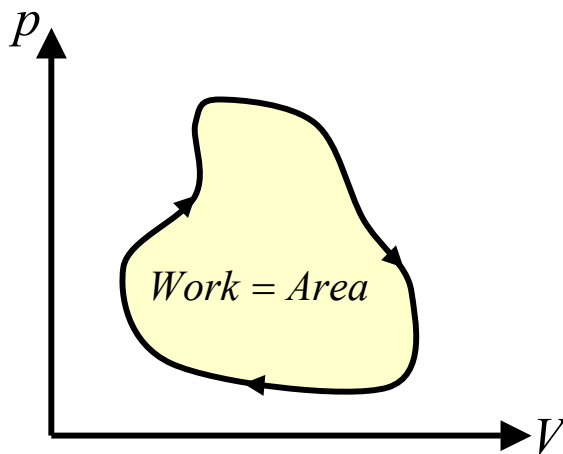
$\Delta S > 0$  เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้ แต่ผันกลับไม่ได้

$\Delta S < 0$  เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นไม่ได้เลยในธรรมชาติ

## □ เครื่องจักรความร้อน

เครื่องจักรความร้อนคือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับเปลี่ยนความร้อนให้เป็นพลังงานกล จะต้องเสียพลังงานไปส่วนหนึ่งโดยเปล่าประโยชน์ เช่น ไล่ให้กับสิ่งแวดล้อม

กฎของเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวอีกความหมายหนึ่งได้ว่า “ไม่มีเครื่องจักรประเภทใดที่จะสามารถเปลี่ยนความร้อนให้เป็นพลังงานกลได้ 100 %” ในเครื่องจักรระบบจะทำงานด้วยกระบวนการที่ครบรอบหรือเรียกว่า วัฏจักร



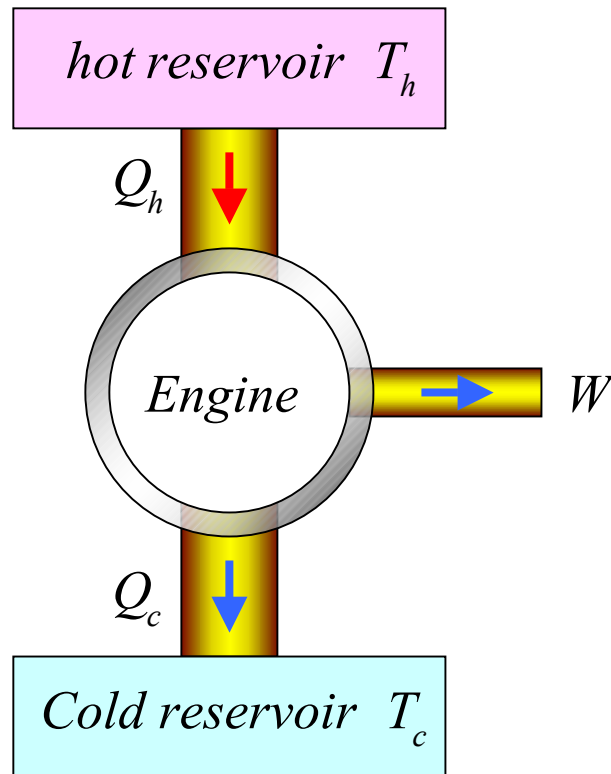
เมื่อระบบทำงานครบรอบแล้วพลังงานภายในระบบจะเท่าเดิม ดังนั้น  $\Delta U = 0$  จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์  $\Delta U = \Delta Q - \Delta W$  ได้ว่า

$$\Delta Q = \Delta W$$

หมายความว่า พลังงานความร้อนที่เครื่องจักรได้รับเท่ากับพลังงานกลที่เครื่องจักรทำ

โดยทั่วไป เครื่องจักรความร้อนจะมีแผนภาพดังรูป

แหล่งพลังงานความร้อน ให้ความร้อน  $Q_h$  เข้าสู่เครื่องจักร ส่งผลให้เครื่องจักรทำงาน  $W$  และปลดปล่อยความร้อน  $Q_c$  ออกมาจากระบบ ดังนั้น จากความสัมพันธ์ได้ว่า



$$Q_h = W + Q_c \quad ; \quad W = Q_h - Q_c$$

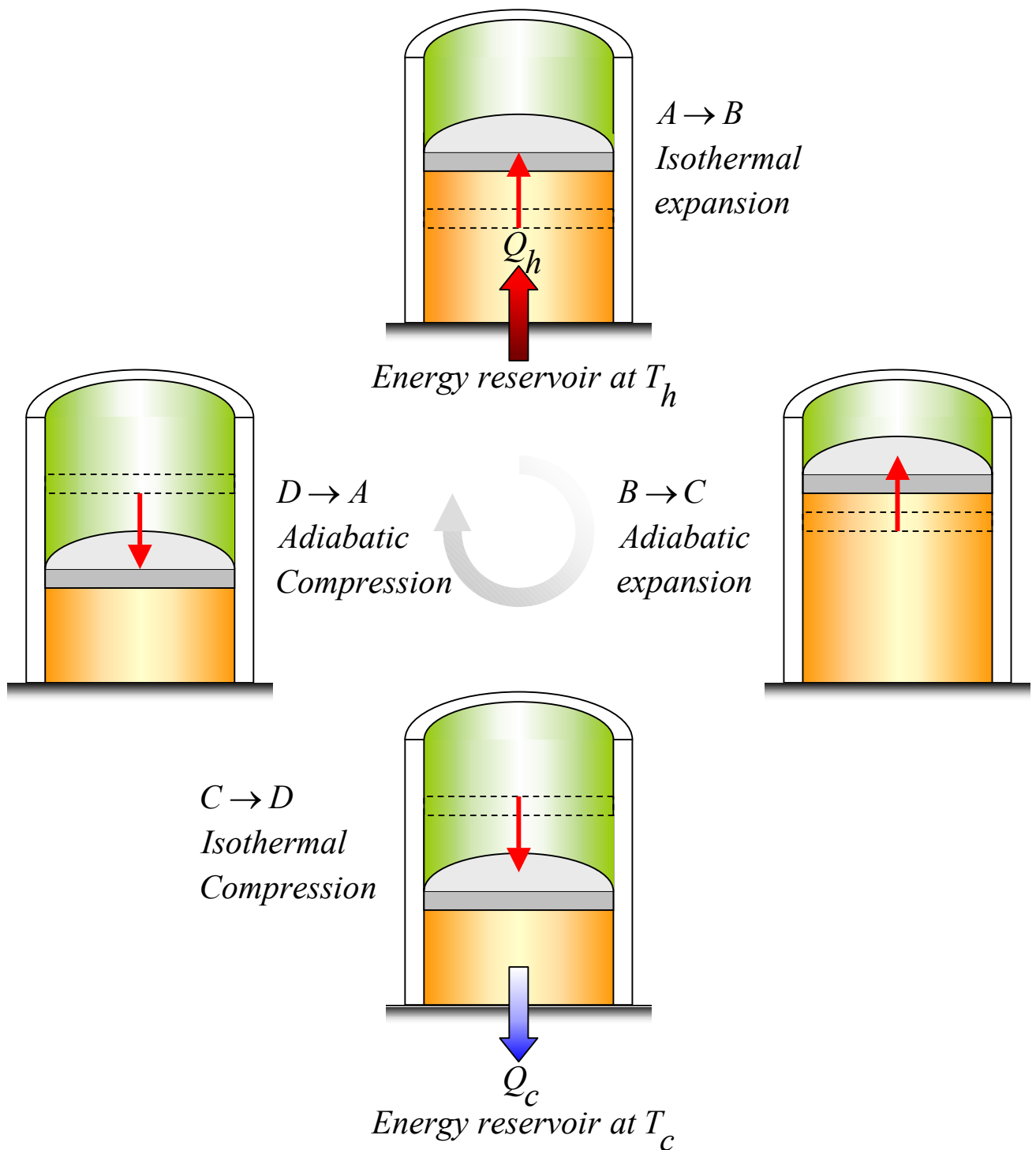
ประสิทธิภาพเครื่องจักร  $E$  เท่ากับ งานที่เครื่องจักรทำงานต่อพลังงานความร้อนที่ให้แก่เครื่องจักร

$$E = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

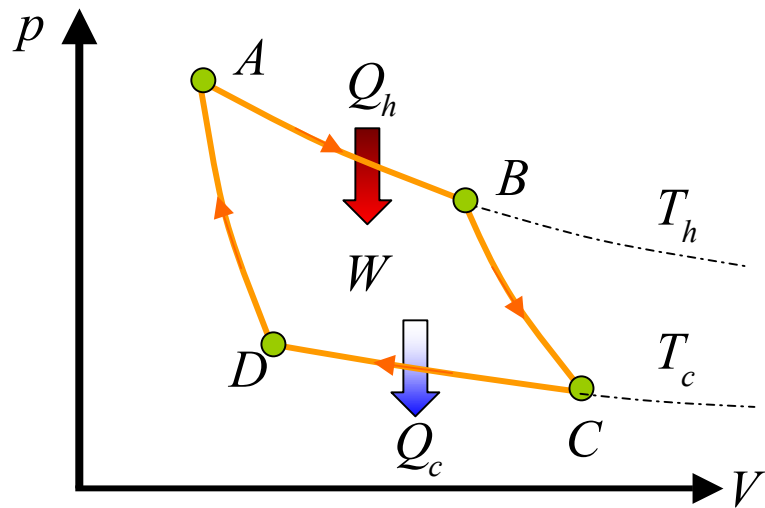
### 7.7 วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot engine)

วัฏจักรคาร์โนต์ เป็นวัฏจักรของเครื่องยนต์อุดมคติที่มีประสิทธิภาพสูงสุด มีแผนภาพการทำงานของระบบดังรูป

การทำงานของระบบคาร์โนท์ประกอบด้วย 4 กระบวนการดังนี้



1. จากจุด  $A \rightarrow B$  เป็นการขยายตัวโดยกระบวนการอุณหภูมิคงที่  $T_h$  พลังงานภายในไม่เปลี่ยนแปลง  $\Delta U = 0$  ถ้าจุดพลังงานความร้อน  $Q_h$  ทำให้เกิดการขยายตัวได้งาน  $Q_h = W_{AB} = nRT_h \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$



2. จากจุด  $B \rightarrow C$  เป็นกระบวนการความร้๑นคงที่  $\Delta Q=0$  โดยก้ำ๑ซขยายตัวเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของก้ำ๑ซลดลงจาก  $T_h$  ไปเป็น  $T_c$  พลังงานภายใน  $U_B > U_C$  งานที่ได้เท่ากับกการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน  $W = U_B - U_C$

3. จากจุด  $C \rightarrow D$  เป็นกระบวนการที่อุณหภูมิคงที่  $T_c$  พลังงานภายในคงที่ โดยก้ำ๑ซหดตัวลง ความร้๑นถูกปลดปล่อยออกจากระบบ  $Q_c$  งานที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ  $Q_c = W_{CD} = nRT_c \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$

4. จากจุด  $D \rightarrow A$  เป็นกระบวนการที่ความร้๑นคงที่  $\Delta Q=0$  ก้ำ๑ซหดตัว ส่งผลอุณหภูมิเปลี่ยนจาก  $T_c$  ไปเป็น  $T_h$  พลังงานภายใน  $U_A > U_D$  ดังนั้นงานที่กระทำต่อระบบ เท่ากับ  $W = U_D - U_A$  ซึ่งงานมีค่าเป็น ลบ

งานลัพธ์ในกระบวนการย้อนกลับได้ทั้งหมดเท่ากับพื้นที่ภายในกระบวนการตามเส้นทาง  $ABCD A$

$$W = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}$$

$$W = Q_h + (U_B - U_C) + Q_c + (U_D - U_A) \text{ โดยที่ } U_B = U_A, U_D = U_C$$

$$W = Q_h + Q_c = Q_h - Q_c \quad ; \quad (Q_c = -)$$

ประสิทธิภาพเครื่องจักรความร้อน คาร์โนต์ เท่ากับ

$$E_{Carnot} = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h}$$

จากอุณหภูมิตั้งที่  $Q_h = nRT_h \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$  ;  $Q_c = nRT_c \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)$

$$\frac{Q_c}{Q_h} = \frac{T_c \ln(V_C/V_D)}{T_h \ln(V_B/V_A)}$$

จากความสัมพันธ์  $PV^\gamma = constant$  แทนค่าด้วย  $PV = nRT$  ได้ว่า

$$\frac{nRT}{V} V^\gamma = constant$$

สามารถเขียนอีกรูปได้ว่า  $TV^{\gamma-1} = constant$  ดังนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ที่ตำแหน่งใด ๆ ของกระบวนการ ได้ว่า

$$T_h V_B^{\gamma-1} = T_c V_C^{\gamma-1} \quad ; \quad T_h V_A^{\gamma-1} = T_c V_D^{\gamma-1}$$

$$(V_B/V_A)^{\gamma-1} = (V_C/V_D)^{\gamma-1}$$

ดังนั้น จากสมการ  $\frac{Q_c}{Q_h} = \frac{T_c \ln(V_C/V_D)}{T_h \ln(V_B/V_A)}$  ได้ว่า

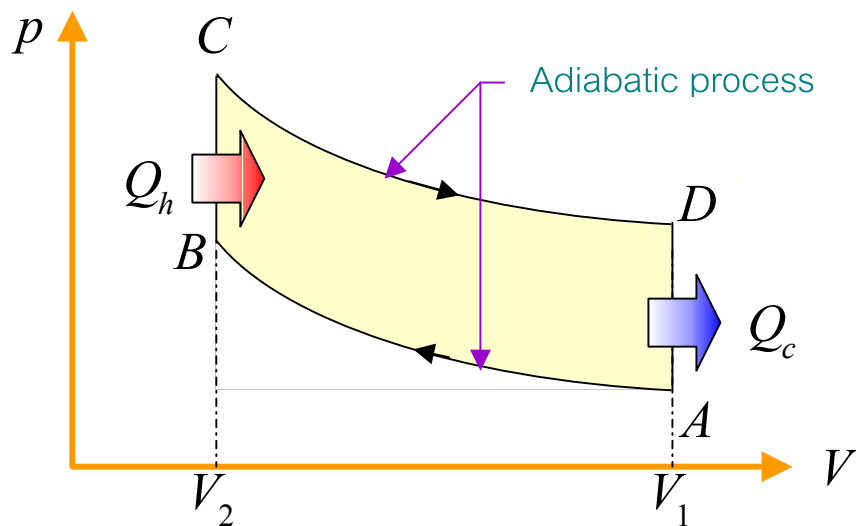
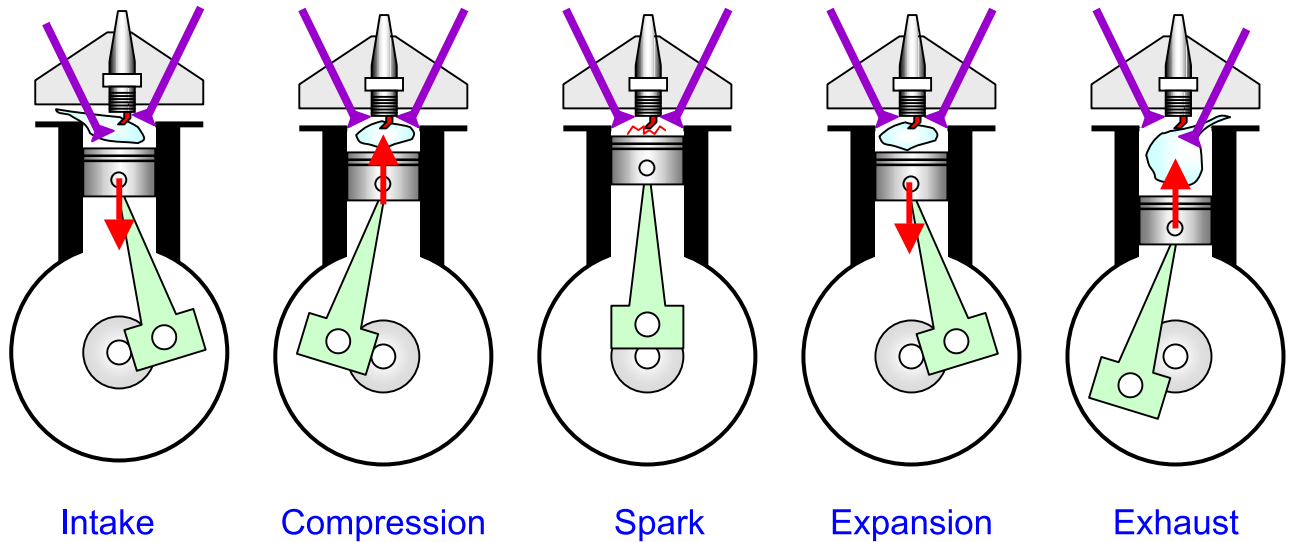
$$\frac{Q_c}{Q_h} = \frac{T_c}{T_h}$$

ประสิทธิภาพของวัฏจักรคาร์โนต์ ในเทอมของอุณหภูมิตั้งที่

$$E_{Carnot} = \frac{W}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

## 7.8 เครื่องยนต์เบนซินและดีเซล (Gasoline and diesel engine)

เครื่องยนต์ 4 จังหวะ เมื่อลูกสูบทำงานครบหนึ่งรอบ ทำให้เพลาคើนที่ 2 รอบ การทำงานของเครื่องยนต์เบนซินเป็นเครื่องยนต์ 4 จังหวะเรียกว่าวัฏจักรออตโต (Otto cycle)



- **INTAKE STROKE** ลูกสูบเคลื่อนตัวลง เชื้อเพลิงและอากาศถูกดูดเข้ากระบอกสูบด้วยความดันบรรยากาศ ปริมาตรกระบอกสูบขยายตัวจาก  $V_2$  ไปเป็น  $V_1$  พลังงานภายในถูกสะสมในเชื้อเพลิง

- **COMPRESSION STROKE** ลูกสูบเคลื่อนตัวขึ้น เชื้อเพลิงและอากาศ ถูกกดอัดด้วยกระบวนการ **Adiabatic** จากปริมาตร  $V_1$  ไปเป็น  $V_2$  อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก  $T_A$  ไปเป็น  $T_B$  งานที่ได้มีค่าเป็น ลบ
- **SPARK** หัวเทียนจุดสตาร์ทด้วยเวลาสั้น ๆ ในตำแหน่งสูงสุดของลูกสูบ สามารถอธิบายได้ว่า พลังงานภายในระบบเกิดจากปฏิกิริยาเคมีในการเผาไหม้ ความดันและอุณหภูมิภายในสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จาก  $T_B$  ไปเป็น  $T_C$  ปริมาตรยังคงที่เนื่องจาก ช่วงเวลาสั้นมาก ๆ ดังนั้นระบบไม่มีการทำงานจากก๊าซ เสมือนการนำความร้อนเข้าระบบ  $Q_h$
- **POWER STROKE (EXPANSION)** ก๊าซขยายตัวด้วยกระบวนการ จากปริมาตร  $V_2$  ไปเป็น  $V_1$  อุณหภูมิลดลงจาก  $T_C$  ไปเป็น  $T_D$  ลูกสูบ ดันเคลื่อนตัวลง งานที่ได้มีค่าเป็น บวก หลังจากนั้นแกนไอเสียถูกเปิด ออก ความดันลดลงกระทันหัน
- **EXHAUST STROKE** ลูกสูบเคลื่อนตัวขึ้น เชื้อเพลิงหลังจากเผาไหม้ เคลื่อนตัวออกจากกระบอกสูบด้วยความดันบรรยากาศ ปริมาตรลดลง จาก  $V_1$  ไปเป็น  $V_2$  และกระบวนการจะซ้ำรอบเดิมตลอด

ประสิทธิภาพของวัฏจักรออตโต (E otto) คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$E_{otto} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$$

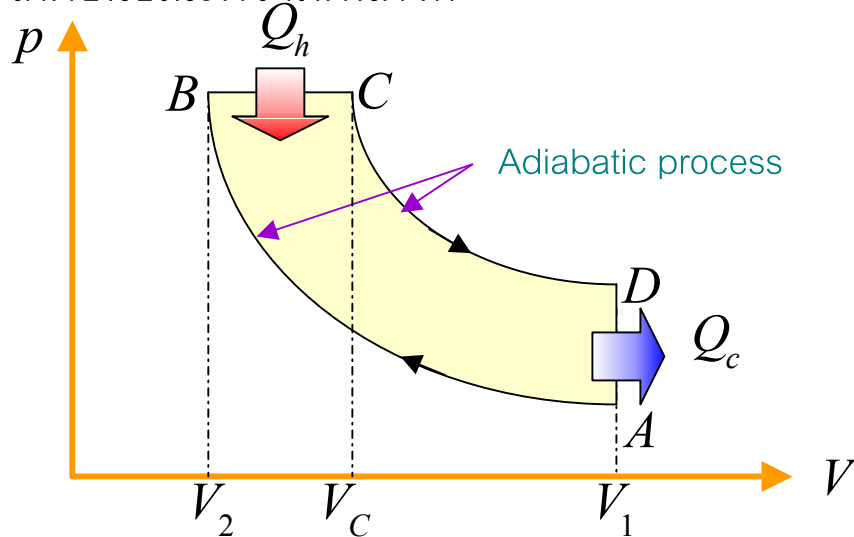
อัตราส่วน  $\frac{V_1}{V_2}$  เรียกว่า อัตราส่วนการอัด (Compression ratio) โดยทั่ว

ไปประมาณ 8 ในกรณี  $\gamma = 1.4$  จะได้ประสิทธิภาพประมาณ 56 %



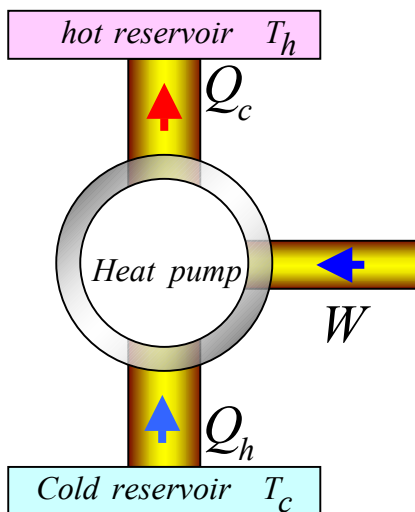
## เครื่องยนต์ดีเซล (Diesel engine)

เครื่องยนต์ดีเซล เป็นหลักการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลเผาไหม้โดยไม่ต้องใช้หัวเทียน เกิดขึ้นขณะความดันคงที่



## 7.9 ตู้เย็น (Heat pump and Refrigerators)

หลักการทำงานของตู้เย็น ตรงข้ามกับเครื่องจักรความร้อน โดยที่ตู้เย็นต้องรับพลังงานกลจากมอเตอร์ Compressor เพื่อไปดูดความร้อน  $Q_c$  (ความเย็น) ออกจากภายในตู้เย็นที่อุณหภูมิ  $T_c$  แล้วไปคายความร้อน  $Q_h$  ให้แก่แหล่งภายนอกที่มีอุณหภูมิ  $T_h$



ประสิทธิภาพของตู้เย็น คือความสามารถในการดูดความร้อน  $Q_c$  ออกจากภายในตู้โดยใช้ งาน  $W$  เข้าไปในระบบ

$$\omega = \frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c}$$

ถ้าเครื่องยนต์ทำงานด้วยวัฏจักรคาร์โนที่ได้ว่า

$$\omega = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$