

บทที่ 1

อุณหพลศาสตร์เบื้องต้น

(Introduction to thermodynamics)

1.1 บทนำ

อุณหพลศาสตร์ เป็นการศึกษาเรื่องเกี่ยวกับความร้อนของสารที่ได้รับความร้อนแล้วมีลักษณะทางกายภาพหรือสภาพที่เปลี่ยนไป โดยทั่วไปความร้อนนั้นเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง และอาจเกิดจากเปลี่ยนรูปมาจากพลังงานรูปอื่นตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน เช่น พลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี พลังงานความร้อนที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปเมื่อสารได้รับพลังงาน ความร้อนจะทำให้โมเลกุลภายในของสารเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น วัตถุเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการดูดกลืนความร้อน การถ่ายเทความร้อนหรือการถ่ายโอนความร้อนได้ โดยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่มีระดับความร้อนสูงหรือมีอุณหภูมิสูง ไปสู่จุดที่มีระดับความร้อนหรือมีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ จนกว่าจะมีอุณหภูมิเท่ากันจึงหยุดถ่ายเท เรียกว่า สมดุลความร้อน ในอุณหพลศาสตร์มีกฎที่สำคัญ ได้แก่ กฎข้อที่หนึ่ง และกฎข้อที่สอง ซึ่งถือว่าเป็นกฎที่สำคัญมากของฟิสิกส์ อย่างไรก็ตาม กฎบางข้อ เช่น กฎข้อที่สอง จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อมองธรรมชาติแบบมหภาคเท่านั้น ในระดับจุลภาคหรือระดับอะตอมมีความน่าจะเป็นที่กฎข้อที่สองจะถูกฝ่าฝืน เพียงแต่ความน่าจะเป็นนั้นมีค่าน้อยมาก จนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในระดับมหภาคเท่านั้น

อุณหพลศาสตร์ดั้งเดิม คือทฤษฎีแรก ๆ ในช่วงต้น ค.ศ.1800 ที่ให้ความสนใจกับสถานะทางอุณหพลศาสตร์ และคุณสมบัติของพลังงานรูปแบบต่าง ๆ เช่น พลังงานความร้อน พลังงานกล เป็นต้น ทว่าทฤษฎีทั้งหมดยังไม่สามารถอธิบายในระดับอะตอมได้ อุณหพลศาสตร์ดั้งเดิมพัฒนาขึ้นจากทฤษฎีของ โรเบิร์ต บอยล์ นักเคมี ที่ว่า “ความดัน (P) ของก๊าซปริมาตรหนึ่งจะแปรผกผันกับปริมาตร (V) ของก๊าซนั้น ๆ เมื่ออุณหภูมิคงตัว” ทำให้วิทยาศาสตร์ด้านอุณหภูมิมุ่งพัฒนาขึ้น โดยสามารถสร้างเครื่องจักรไอน้ำขึ้นได้เป็นครั้งแรกในประเทศอังกฤษโดยโทมัส ซาแวนอรี ในปี ค.ศ. 1697 และโทมัส นิวโคเมน ในปี ค.ศ. 1712 กฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ตั้งขึ้นในเวลาต่อมาตามลำดับ ประมาณปี ค.ศ. 1850 โดยอาศัยข้อมูลจากการศึกษาของวิลเลียม แรนकिन รูดีอล์ฟ เคลาซีอุส และวิลเลียม ทอมป์สัน อุณหพลศาสตร์ดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดเนื่องจากไม่สามารถ

อธิบายปรากฏการณ์หลายอย่างได้ จำเป็นต้องใช้กลศาสตร์สถิติ หรืออุณหพลศาสตร์สถิติมาช่วยอธิบาย ตัวอย่างเช่น กฎของอุณหพลศาสตร์อาจใช้อธิบายได้ว่าปฏิกิริยาหนึ่ง ๆ จะเกิดขึ้นได้เอง แต่ไม่ได้อธิบายเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำให้บางครั้งผลการทดลองได้ผลไม่ตรงตามกฎของอุณหพลศาสตร์ ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือ อุณหพลศาสตร์ไม่สามารถบอกได้ว่า งานที่เกิดขึ้นจริงในระบบจะมีค่าเท่าใด อย่างไรก็ตามอุณหพลศาสตร์ดั้งเดิมมีข้อดีตรงที่ ทฤษฎีนี้เป็นอิสระต่อทฤษฎีอะตอม ไม่ว่าทฤษฎีอะตอมจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรก็ตามก็ยังคงสามารถใช้อุณหพลศาสตร์ดั้งเดิมในการอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติในระดับมหภาคได้

1.2 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิ คือ ปริมาณที่ใช้วัดและเปรียบเทียบขนาดปริมาณความร้อนของสาร โดยถ้าสารใดมีมวลและปริมาตรเท่ากันที่ค่าอุณหภูมิสูงแสดงว่าสารนั้นมีปริมาณความร้อนมากตามไปด้วย และถ้ามีอุณหภูมิต่ำแสดงว่าสารนั้นมีปริมาณความร้อนน้อย ธรรมชาติของสารจะมีการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ โดยจะมีการถ่ายเทอุณหภูมิให้กันจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากันจึงจะหยุดการถ่ายเท เรียกสภาวะการที่สสารมีอุณหภูมิเท่ากันว่า สสารมีความสมดุลทางความร้อน เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิเรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ มีหลักการทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติการขยายตัวของสารเมื่อได้รับความร้อน และหดตัวเมื่อเย็นลง โดยสารที่ใช้บรรจุในเทอร์โมมิเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติคือ มีการเปลี่ยนค่าไปตามอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง สารที่มีคุณสมบัตินี้และที่นิยมใช้ในการบรรจุในเทอร์โมมิเตอร์ ได้แก่ปรอท แอลกอฮอล์ เป็นต้น สำหรับที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำมาก ๆ จะใช้อุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความร้อน หรืออุณหภูมิให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า

1.2.1 หน่วยของอุณหภูมิ (Unit of temperature)

ปัจจุบันมีหน่วยซึ่งเป็นที่นิยมใช้วัดขนาดของอุณหภูมิอยู่ 3 แบบ โดยอาศัยจุดเดือดและจุดเยือกแข็งของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันบรรยากาศ 1.013×10^5 ปาสคาล ได้แก่

1. สเกลองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ซึ่งตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อเซลเซียส สำหรับหน่วยองศาเซลเซียสเป็นหน่วยที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน โดยจุดเยือกแข็งของน้ำ คือ 0 องศาเซลเซียส และจุดเดือดของน้ำ คือ 100 องศาเซลเซียส

2. สเกลเคลวิน(K) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์ชื่อ เคลวิน (Kelvin) เป็นหน่วยระบบสากลที่ใช้กันทั่วไป สำหรับหน่วยเคลวินนั้น จะมีจุดเยือกแข็งของน้ำอยู่ที่ 273.15 เคลวิน และมีจุดเดือดของน้ำอยู่ที่ 373.15 เคลวิน

3. สเกลองศาฟาเรนไฮต์ (°F) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่นักวิทยาศาสตร์ชื่อ ฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit) สำหรับหน่วยองศาฟาเรนไฮต์จะมีจุดเยือกแข็งของน้ำอยู่ที่ 32 องศาฟาเรนไฮต์ และจุดเดือดของน้ำที่ 212 องศาฟาเรนไฮต์

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยของอุณหภูมิในหน่วยต่าง ๆ ได้จากสมการ

$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180} = \frac{T_K - 273.15}{100} \quad (1-1)$$

เมื่อ T_C คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ในหน่วยองศาเซลเซียส (°C)

T_F คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ในหน่วยองศาฟาเรนไฮต์ (°F)

T_K คือ อุณหภูมิที่อ่านได้ในหน่วยเคลวิน (K)

ในปัจจุบันระบบหน่วยมาตรฐานสากลได้กำหนดให้อุณหภูมิในหน่วยเคลวินเป็นหน่วยมาตรฐานสากล โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสัมบูรณ์ในหน่วยเคลวินแทนด้วย T_K และอุณหภูมิในหน่วยเซลเซียสแทนด้วย T_C มีความสัมพันธ์กันตามสมการดังนี้

$$T_K = T_C + 273.15 \quad (1-2)$$

โดยทั่วไปเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะปัดให้เป็นตัวเลขจำนวนเต็มเท่ากับ 273 ซึ่งจะได้

$$T_K = T_C + 273 \quad (1-3)$$

ตัวอย่างที่ 1.1 ผลไม้ชนิดหนึ่งจะไม่เน่าเสียเมื่อนำไปไว้ที่อุณหภูมิ 50 องศาฟาเรนไฮต์จะต้องปรับอุณหภูมิในตู้เย็นเท่าใดหน่วยองศาเซลเซียสจึงจะทำให้ผลไม้ไม่เสีย

วิธีทำ จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียสกับองศาฟาเรนไฮต์

$$\frac{T_C}{100} = \frac{T_F - 32}{180}$$

$$\begin{aligned}\frac{T_c}{100} &= \frac{50-32}{180} \\ T_c &= \frac{18 \times 100}{180} \\ &= 10^\circ\text{C}\end{aligned}$$

คำตอบ ดังนั้นจะต้องตั้งอุณหภูมิตั้งที่ 10 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างที่ 1.2 จงหาว่าที่อุณหภูมิเท่าใดที่ทำให้ องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ องศาฟาเรนไฮต์

วิธีทำ กำหนดให้ที่อุณหภูมิ X เป็นอุณหภูมิที่ องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ องศาฟาเรนไฮต์ จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน่วย องศาเซลเซียสกับ องศาฟาเรนไฮต์

$$\begin{aligned}\frac{T_c}{100} &= \frac{T_f - 32}{180} \\ \frac{X}{100} &= \frac{X - 32}{180} \\ 180X &= 100X - 3200 \\ X &= \frac{-3200}{80} \\ &= -40^\circ\end{aligned}$$

คำตอบ ดังนั้นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสจะมีค่าเท่ากับ -40 องศาฟาเรนไฮต์

1.3 ผลของความร้อนที่มีต่อวัตถุที่เป็นของแข็ง (The effect of heat on a solid object)

เมื่อวัตถุหรือสารได้รับความร้อนจะส่งผลให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้มีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนไป ได้แก่ ทำให้วัตถุขยายตัว ทำให้วัตถุเปลี่ยนสถานะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้สมบัติ เช่น สมบัติแม่เหล็กและสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไป เป็นต้น สำหรับในหัวข้อนี้จะศึกษาพฤติกรรมที่สำคัญของสารเมื่อได้รับความร้อนดังต่อไปนี้

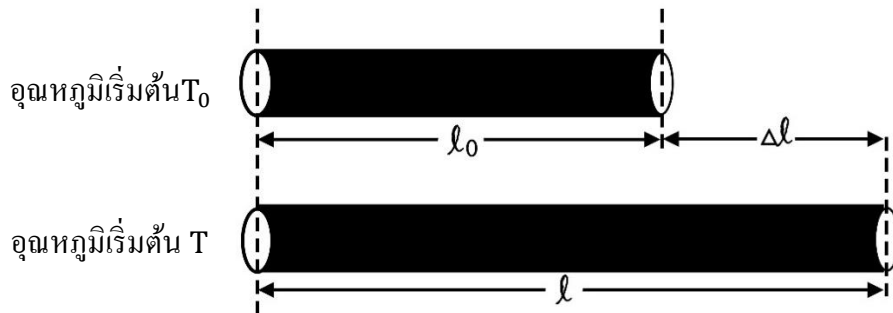
1.3.1 การขยายตัวของวัตถุเนื่องจากความร้อน

วัตถุเมื่อได้รับความร้อนนอกจากจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วยังอาจทำให้วัตถุเกิดการขยายตัว สำหรับวัตถุที่เฉลี่ยความร้อนได้ทั่วทั้งก้อน (Isotropic) เช่น แก้วและของเหลวทุกชนิดจะมีทิศทางการขยายตัวออกเท่ากันทุกทาง เนื่องจากอะตอมของวัตถุเมื่อได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจะเกิดการสั่นไปมารอบจุดจุดหนึ่งภายในโครงสร้างของวัตถุ เป็นเหตุให้ระยะห่างระหว่างอะตอมเปลี่ยนแปลง โดยถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมเพิ่มขึ้นวัตถุนั้นก็ขยายตัว แต่ถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงวัตถุนั้นก็จะหดตัว ซึ่งการขยายตัวของสารที่เป็นของแข็งของเหลวและแก๊สจะแตกต่างกัน ในที่นี้จะอธิบายเกี่ยวกับการขยายตัวของของแข็งและของเหลว

การขยายตัวของของแข็งโดยทั่วไปเมื่อให้ความร้อนแก่ของแข็งใดๆ ของแข็งนั้นจะขยายตัวทุกทิศทาง จึงมีผลทำให้รูปทรงของวัตถุนั้นเหมือนเดิม แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงในด้านของมิติความยาวพื้นที่ และปริมาตร โดยการขยายตัวนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของของแข็งนั้น การขยายตัวของของแข็งแบ่งการพิจารณาได้เป็น 3 แบบคือ

(1) การขยายตัวตามเส้น (Linear expansion)

พิจารณาจากภาพที่ 1.1 เมื่อวัตถุที่มีขนาดความยาวเริ่มต้น l_0 มีอุณหภูมิเริ่มต้น T_0 หลังจากนั้นได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิเป็น $t^\circ\text{C}$ ทำให้เกิดการขยายตัวและมีความยาวเปลี่ยนไปเป็น l โดยความยาวที่เพิ่มขึ้น $\Delta l = l - l_0$ จากการทดลองพบว่าความยาวที่เพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับความยาวเดิม (l_0) และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ($\Delta T = T - T_0$)



ภาพที่ 1.1 ความยาวของแท่งวัตถุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวเริ่มต้น ความยาวที่เปลี่ยนไปต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta l \propto l_0 \Delta T$$

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T \quad (1-4)$$

กำหนดให้ α เป็นค่าคงตัวเฉพาะของวัตถุแต่ละชนิด มีหน่วยเป็น วินาที⁻¹ ที่เรียกว่า

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad (1-5)$$

เมื่อนำสัมประสิทธิ์การขยายตัวมาแทนค่าด้วย $\Delta l = l - l_0$ ในสมการที่ (1-4) จะได้ความยาวของวัตถุดังนี้

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (1-6)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนตามเส้นของวัตถุหรือสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของสารบางชนิด

สาร	α (ต่อองศาเซลเซียส)	สาร	α (ต่อองศาเซลเซียส)
ทองเหลือง	19×10^{-6}	น้ำแข็ง	51×10^{-6}
ทองแดง	17×10^{-6}	ตะกั่ว	29×10^{-6}
แก้ว	9×10^{-6}	เหล็กกล้า	11×10^{-6}

ที่มา: ปิยพงษ์ สิทธิคง, 2548

โดยทั่วไปวัตถุหรือสารแต่ละชนิดเมื่อได้รับความร้อนจะมีการยืดหรือขยายตัวไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสารนั้น

(2) การขยายตัวตามพื้นที่ (Area expansion)

เมื่อวัตถุหรือสารได้รับความร้อนแล้วนอกจากจะมีการขยายตัวตามเส้นแล้ว ก็จะมีการขยายตัวตามพื้นที่ไปด้วย กำหนดให้วัตถุที่มีพื้นที่ A_0 เริ่มต้นมีอุณหภูมิเป็น T_0 ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิเป็น T องศาเซลเซียส และจะมีพื้นที่ A ดังนั้นพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นคือ $\Delta A = A - A_0$ โดยเขียนเป็นสมการได้คือ

$$A = A_0(1 + \gamma\Delta T) \quad (1-7)$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามพื้นที่ของวัตถุ ซึ่งคือพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เดิม และต่อหนึ่งองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป มีหน่วยเป็นต่อองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) เนื่องจากการคำนวณหาพื้นที่ได้มาจากผลคูณความยาวของด้าน 2 ด้าน ดังนั้นทำให้ความสัมพันธ์ระหว่าง γ และ α เป็นดังนี้

$$\gamma = 2\alpha \quad (1-8)$$

อย่างไรก็ตามถ้าต้องการจะหาพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจะสามารถหาได้จากการหาความยาวทั้งสองด้านที่เพิ่มขึ้น ทำให้ทราบพื้นที่ใหม่ จากนั้นนำมาลบกับพื้นที่เดิม จึงไม่มีการกำหนด

สัมประสิทธิ์การขยายตัวของพื้นที่ สมการ (1-8) ที่ใช้หาสัมประสิทธิ์ตัวนี้ ซึ่งต้องทราบค่าเฉพาะตัวของวัตถุ จึงไม่จำเป็นต้องใช้ก็ได้

(3) การขยายตัวตามปริมาตร (Volumn expansion)

การขยายตัวตามปริมาตรคือ การขยายตัวตามมวลทั้งหมดของสารหรือวัตถุเมื่อได้รับความร้อน ถ้ากำหนดให้ วัตถุที่มีปริมาตร V_0 ที่อุณหภูมิเริ่มต้น T_0 องศาเซลเซียส ถ้าได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีอุณหภูมิ T องศาเซลเซียส จะมีปริมาตร V ดังนั้นปริมาตรเพิ่มขึ้นคือ $\Delta V = V - V_0$ จะได้สมการความสัมพันธ์เป็น

$$V = V_0(1 + \beta\Delta t) \quad (1-9)$$

เมื่อ β เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามปริมาตรคือ ปริมาตรที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเดิม และต่อหนึ่งองศาของอุณหภูมิของวัตถุที่เปลี่ยนไปมีหน่วยเป็นต่อองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)⁻¹ โดยเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง α , γ และ β ได้คือ

$$\beta = 3\alpha = \frac{3}{2}\gamma \quad (1-10)$$

เนื่องจากปริมาตรกับความหนาแน่นของสารมีความสัมพันธ์กันดังนั้นแล้ว การขยายตัวของวัตถุตามปริมาตรจึงมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น โดยเมื่อปริมาตรของวัตถุเปลี่ยนทำให้ความหนาแน่นของวัตถุเปลี่ยนไปด้วยถ้ากำหนดให้

ρ_0 แทน ความหนาแน่นของวัตถุเมื่อปริมาตรเป็น V_0 เมื่ออุณหภูมิเป็น T_0

ρ แทน ความหนาแน่นของวัตถุเมื่อปริมาตรเป็น V เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น T

จาก $\rho = m/V$ โดยที่ m แทนมวลของวัตถุและ V แทนปริมาตรวัตถุดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0} \quad \text{และ} \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \frac{m}{V_0} \times \frac{V}{m} = \frac{V}{V_0}$$

และเนื่องจาก $V = V_0(1 + \beta\Delta T)$ แทนค่า

$$\frac{\rho_0}{\rho} = (1 + \beta\Delta T) = \frac{V}{V_0}$$

ดังนั้นจะได้

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta\Delta T} \quad (1-11)$$

โดยสมการที่ (1-11) แสดงความหนาแน่นของวัตถุเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

ตัวอย่างที่ 1.3 ถ้าเหล็กเส้นที่ใช้ในการทำถนนแต่ละช่วงยาว 30 เมตร ที่อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิสูงสุดของถนนเป็น 70 องศาเซลเซียส จะต้องเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นคอนกรีตอย่างน้อยเท่าใด เพื่อป้องกันความเสียหายจากการขยายตัวตามความร้อน กำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นของคอนกรีตเท่ากับ 1.2×10^{-5} ต่อองศาเซลเซียส

วิธีทำ ข้อมูลที่โจทย์กำหนด $l_0 = 30 \text{ m}$, $\Delta T = 70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}$

$$\alpha = 1.2 \times 10^{-5} (\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$$

ความยาวของวัตถุ

$$l = l_0(1 + \alpha\Delta T)$$

$$l = (30 \text{ m})[1 + (1.2 \times 10^{-5} (\text{ }^\circ\text{C})^{-1})(50^\circ\text{C})]$$

$$l = 30.018 \text{ m}$$

ความยาวในส่วนที่ขยายตัว

$$\Delta l = 30.018 \text{ m} - 30 \text{ m} = 0.018 \text{ m}$$

คำตอบ ดังนั้น จะต้องเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นคอนกรีตอย่างน้อยเท่ากับ 0.018 เมตร

1.4 การขยายตัวของของเหลว (Liquid expansion)

นอกจากสารที่มีสถานะเป็นของแข็งจะเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนแล้ว ของเหลวก็มีพฤติกรรมขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนเช่นกัน แต่เนื่องจากรูปร่างของของเหลวขึ้นอยู่กับภาชนะที่บรรจุของเหลว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจน คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือการขยายตัวตามปริมาตร ดังนั้นในการพิจารณาต้องคำนึงถึงการขยายตัวของภาชนะที่บรรจุของเหลวควบคู่กันไปด้วย กำหนดให้ γ แทนสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตรของของเหลวซึ่งมีหน่วยเป็น $(\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$ สมการสำหรับการขยายตัวของของเหลวคือ

$$V = V_0(1 + \gamma\Delta T) \quad (1-12)$$

ตัวอย่างที่ 1.4 กระเปาะทรงกลมของมาตรวัดอุณหภูมิปรอทอันหนึ่งมีรัศมี 0.1 เซนติเมตร ส่วนก้นมีปรอทเต็มพอดี ขณะที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ถ้าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตรของปรอทเท่ากับ 1.8×10^{-4} ต่อองศาเซลเซียส สมมติให้แก้วมีการขยายตัวน้อยมากเมื่อเทียบกับปรอทจืดที่แสดงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะอยู่ที่สูงจากขีด 0 องศาเซลเซียสอยู่เท่าใด

วิธีทำ หาปริมาตรของกระเปาะทรงกลม

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi(0.1)^3 = 4.19 \times 10^{-3} \text{cm}^3$$

หาค่าการขยายตัวของปรอท

$$V = V_0(1 + \beta\Delta T)$$

$$V = (4.19 \times 10^{-3} \text{cm}^3)[1 + (1.210^{-4} (\text{ }^\circ\text{C})^{-1})(100^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})]$$

$$V = 4.24 \times 10^{-3} \text{cm}^3$$

ส่วนขยายตัวของปรอท

$$\begin{aligned} \Delta V &= 4.24 \times 10^{-3} \text{cm}^3 - 4.19 \times 10^{-3} \text{cm}^3 \\ &= 8.43 \times 10^{-5} \text{cm}^3 \end{aligned}$$

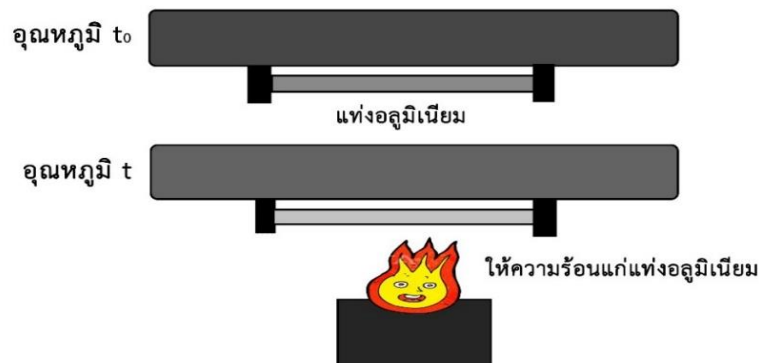
เนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์เป็นทรงกระบอก ดังนั้นส่วนขยายของปรอทจะเคลื่อนเข้าไปอยู่ในส่วนนี้ ทำให้ลำปรอทสูง h คำนวณหาค่า h จาก

$$\begin{aligned} \Delta V &= \pi R^2 h \\ 8.43 \times 10^{-5} \text{cm}^3 &= \pi(0.002 \text{cm})^2 h \\ h &= 6.71 \text{cm} \end{aligned}$$

คำตอบ ดังนั้น จี๊ดที่แสดงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสจะอยู่ที่สูงจากขีด 0 องศาเซลเซียส อยู่ 6.71 เซนติเมตร

1.5 ความเค้นที่เกิดจากการขยายตัวของวัตถุ (Stress of object expansion)

เมื่อสารที่มีสถานะเป็นของแข็งถูกตรึงไว้ทำให้ไม่สามารถขยายตัวหรือหดตัวได้ พิจารณาจากภาพที่ 1.2 เมื่อแท่งอลูมิเนียมถูกตรึงไม่ให้ยืดหรือหดตัวตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มหรือลดอุณหภูมิให้กับแท่งอลูมิเนียม ทำให้เกิดความเค้นที่เกิดจากความร้อน (Thermal stress)



ภาพที่ 1.2 การขยายตัวของแท่งอลูมิเนียม

จากภาพที่ 1.2 ถ้าแท่งอลูมิเนียมเริ่มต้นมีความยาว l_0 ที่อุณหภูมิ t_0 และเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป t จะทำให้ความยาวของแท่งอลูมิเนียมเปลี่ยนไป Δl ถ้า Y คือค่ายังโมดูลัสยืดหยุ่นของแท่งอลูมิเนียมนี้ โดยจากสมการของยังโมดูลัส

$$Y = \frac{\text{ความเค้น}}{\text{ความเครียด}} = \frac{S}{\phi} \quad (1-13)$$

เมื่อกำหนดให้ S คือ ความเค้น (stress) ซึ่งหมายถึงแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ และ ϕ คือ ความเครียด (strain) หมายถึง ความยาวที่เปลี่ยนไปต่อต่อยาวเดิม โดยจะได้สมการ

$$S = \frac{F}{A} \quad (1-14)$$

$$\phi = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-15)$$

$$Y = \frac{F/A}{\Delta l/l_0} \quad (1-16)$$

จากสมการที่ (1-14) จะได้ $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$ ดังนั้นเมื่อแทนในสมการที่ (1-16) จะได้

$$\frac{F}{A} = Y \alpha \Delta T \quad (1-17)$$

เมื่อ $\frac{F}{A}$ คือ ความเค้นที่เกิดจากความร้อน (นิวตันต่อตารางเมตร)
 α คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นของวัตถุต่อองศาเซลเซียส
 ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (องศาเซลเซียส)

ตัวอย่างที่ 1.5 สะพานเหล็กแห่งหนึ่งมีช่วงที่ยาวที่สุด 30 เมตร กำหนดให้ $\alpha_{เหล็ก} = 1.2 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$
 $Y_{เหล็ก} = 20 \times 10^{11}$ นิวตันต่อตารางเมตร ถ้าในฤดูหนาวอากาศมีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และในฤดูร้อนที่อากาศร้อนมีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ก) ถ้าตริงปลายข้างหนึ่งแน่นอยู่กับที่และปล่อยให้ปลายอีกข้างหนึ่งเคลื่อนอย่างอิสระจงหาความแตกต่างของความยาวของช่วงสะพาน 2 วันดังกล่าว

ข) ถ้าตริงปลายทั้ง 2 ข้างให้แน่นอยู่กับที่ในวันฤดูร้อน ความเค้นเป็นเท่าไรในวันฤดูหนาว
วิธีทำ ก) จาก

$$\Delta \ell = \ell_0 \alpha \Delta T$$

$$\Delta \ell = (30\text{m}) (1.2 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}) (40\text{°C} - 10\text{°C})$$

$$\Delta \ell = 0.0108\text{m}$$

คำตอบ ดังนั้นความแตกต่างของความยาวของช่วงสะพานเท่ากับ 0.0108 เมตร

ข) ความเค้นเนื่องจากความร้อน

$$\frac{F}{A} = Y \alpha \Delta T$$

$$\frac{F}{A} = (20 \times 10^{11} \text{ N/m}^2) (1.2 \times 10^{-5} (\text{°C})^{-1}) (40 - 10) \text{°C}$$

$$\frac{F}{A} = 7.2 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

คำตอบ ดังนั้นความเค้นในวันฤดูหนาวเท่ากับ 7.2×10^8 นิวตันต่อตารางเมตร

1.6 ปริมาณความร้อนและความจุความร้อน (Heat and heat capacity)

ความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งซึ่งในระบบหน่วยมาตรฐานสากลพลังงานเชิงกลมีหน่วยเป็นจูล (J) ซึ่งมีค่าเท่ากับ งานที่เกิดจากการออกแรง 1 นิวตันส่งผลให้วัตถุเคลื่อนที่ 1 เมตร ซึ่งบางครั้งเรามักจะรู้จักหน่วยของความร้อนโดยเฉพาะอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวกับอุณหภูมิ เช่น แอร์ตู้เย็น ในรูปแบบของหน่วย BTU (British Thermal Unit) โดยความหมายของหน่วย 1 BTU คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์ โดยสามารถเปรียบเทียบกับหน่วยของความร้อนเดิม แคลอรี (Calorie) ได้ดังนี้

$$1 \text{ จูล} = 1 \text{ นิวตัน-เมตร}$$

$$1 \text{ แคลอรี} = 4.186 \text{ จูล} \tag{1-18}$$

$$1 \text{ กิโลแคลอรี} = 1000 \text{ แคลอรี} = 3.968 \text{ บีทียู}$$

โดยที่ 1 แคลอรีคือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 กรัมมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ เมื่อสารได้รับความร้อนจะทำให้อุณหภูมิของสารเพิ่มขึ้น และถ้าได้รับความร้อนมากพอจะทำให้สารนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะ การที่สารจะมีความร้อนมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณหนึ่งของสาร ซึ่งจะมีค่าคงที่ตามแต่ละชนิดของสาร ปริมาณนี้คือ ความจุความร้อน

1.6.1 ความจุความร้อน (Heat capacity)

ความจุความร้อน (heat capacity) คือ ปริมาณของพลังงานความร้อนที่สารได้รับแล้วทำให้สารมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหนึ่งหน่วยของสเกลวิน ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีความจุความร้อนไม่เท่ากัน เวลาที่ให้ความร้อนกับสารใดๆ ถึงแม้จะเพิ่มอุณหภูมิของสารเท่ากัน แต่ถ้าเป็นสารต่างชนิดกันความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างความจุความร้อนและพลังงานความร้อนได้จาก

$$Q = C\Delta T \quad (1-19)$$

เมื่อ Q คือ ความร้อน มีหน่วยเป็น จูล

C คือ ความจุความร้อน มีหน่วยเป็น จูล/เคลวิน

ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป มีหน่วยเป็น เคลวิน

1.6.2 ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity)

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่าจะเป็นสารชนิดเดียวกันแต่ถ้ามีขนาดหรือมวลที่แตกต่างกันก็จะมีผลต่อความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการที่สารจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากหรือน้อย นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับมวลของสารด้วย จึงได้มีการกำหนดปริมาณที่มีมวลเข้ามาเกี่ยวข้อง นั่นคือ ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) โดยนิยามของความจุความร้อนจำเพาะคือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารละลายหนึ่งหน่วยมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหนึ่งองศาเคลวิน มีหน่วยเป็นจูล/กิโลกรัม.เคลวิน เขียนเป็นสมการได้คือ

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

$$\text{หรือ} \quad Q = mc\Delta T \quad (1-20)$$

เมื่อ m คือ มวลของสารมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

Q คือ ปริมาณความร้อนที่สารได้รับหรือคายออกไปมีหน่วยเป็นจูล (J)

ΔT คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

ค่าความจุความร้อนของสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 แสดงความจุความร้อนจำเพาะของสารชนิดต่างๆที่ความดันคงตัว

สาร	ความจุความร้อนจำเพาะ	ความจุความร้อนโมลาร์
	ระบบ SI (J/kg·K)	ระบบ SI (J/mol·K)
น้ำ (15°C)	4190	75.4
น้ำแข็ง (0°C)	2100	37.8
อะลูมิเนียม	910	24.6
ทองแดง	385	24.8
เหล็ก	470	26.3
ตะกั่ว	130	26.9
เงิน	234	25.3
ปรอท	138	27.7

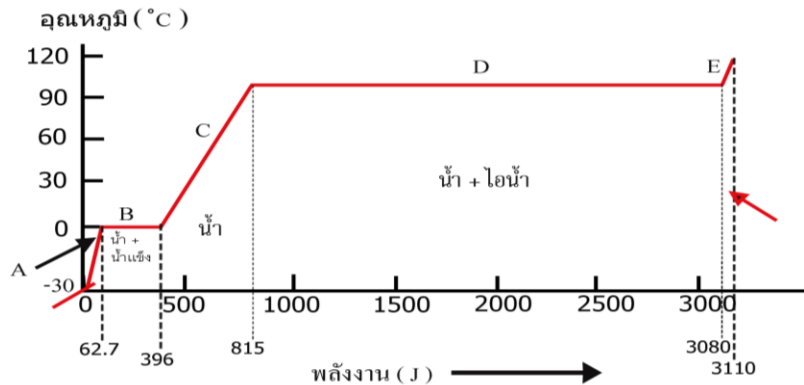
ที่มา: ปิยพงษ์ สิทธิคง, 2548.

1.7 ความร้อนกับการเปลี่ยนสถานะของสาร (Heat and state transition)

เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนของสารจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งสารจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดจุดหนึ่ง สารนั้นจะมีการเปลี่ยนลักษณะทางกายภาพ นั่นคือ เปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง เช่น ของแข็งกลายเป็นน้ำ และจากน้ำกลายเป็นแก๊ส เป็นต้น ปริมาณพลังงานความร้อนที่ทำให้สารหนึ่งหน่วยเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะนี้เราเรียกว่า ความร้อนแฝง (Latent heat)

โดยทั่วไปสถานะของสารสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 สถานะได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เมื่อสารได้รับความร้อนเข้าไปหรือคายความร้อนออกมาในปริมาณที่มากเพียงพอจะทำให้เปลี่ยนสถานะ

การเปลี่ยนสถานะของสารจากของแข็งเป็นของเหลวเรียกว่า การหลอมเหลว ส่วนการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวเป็นของแข็งเรียกว่าการแข็งตัว การเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวเป็นแก๊ส เรียกว่า การกลายเป็นไอ การเปลี่ยนสถานะของสารจากแก๊สเป็นของเหลวเรียกว่า การควบแน่น



ภาพที่ 1.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนสถานะและอุณหภูมิของน้ำ 1 กรัม

ที่มา: Serway, R.A., and Jewett, J.W., 2014

พิจารณาจากภาพที่ 1.3 พบว่าเมื่อน้ำได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงคือ

1. ในช่วงอุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ถึง 0 องศาเซลเซียส น้ำแข็งใช้พลังงานความร้อนใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิให้สูงขึ้น
2. ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิคงที่ที่น้ำแข็งจะใช้พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะจากน้ำแข็งเป็นน้ำ
3. ในช่วงอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส น้ำใช้พลังงานความร้อนใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิให้สูงขึ้นถึง 100 องศาเซลเซียส
4. ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำให้อุณหภูมิคงที่ที่น้ำจะใช้พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอ
5. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ไอน้ำจะรับพลังงานความร้อนต่อไปอีกทำให้อุณหภูมิของไอน้ำสูงขึ้น

ในกรณีที่ให้ความร้อนแก่สารทำให้สารมีอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง เพราะสารจะใช้ความร้อนที่ได้รับหรือคายออกในการเปลี่ยนสถานะเท่านั้น ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารนี้เรียกว่า ความร้อนแฝง ถ้าความร้อนแฝงคิดต่อหนึ่งหน่วยของมวลเราเรียก ความร้อนแฝงจำเพาะ

โดยหาความสัมพันธ์ได้จากสมการ

$$L = \frac{Q}{m} \quad (1-21)$$

$$Q = mL \quad (1-22)$$

เมื่อ m คือ มวลของสารมีหน่วยเป็นกรัม (g) หรือกิโลกรัม (kg)

Q คือ ปริมาณความร้อนที่สารได้รับหรือคายออกไปมีหน่วยเป็นจูล (J)

L คือ ความร้อนแฝงจำเพาะมีหน่วยเป็นจูลต่อกิโลกรัม (J/kg)

สำหรับความร้อนแฝงแบ่งตามการเปลี่ยนสถานะของสาร ได้แก่

1. ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวหรือการแข็งตัว คือความร้อนที่สารใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารที่มีมวล 1 หน่วย จากของแข็งเป็นของเหลวหรือของเหลวเป็นของแข็งโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง

2. ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอหรือการควบแน่น คือความร้อนที่สารใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารที่มีมวล 1 หน่วย จากของเหลวเป็นไอหรือไอเป็นของเหลวโดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ตัวอย่างความร้อนแฝงของสารบางชนิดแสดงดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 ความร้อนของการหลอมเหลวและการกลายเป็นไอของสารชนิดต่างๆ

สาร	จุดหลอมเหลว		ความร้อนแฝง ของการ หลอมเหลว (kJ/kg)	จุดเดือด		ความร้อนแฝง ของการ กลายเป็นไอ (kJ/kg)
	K	°C		K	°C	
อีเธียม	3.5	-269.56	5.23	4.216	-268.93	20.9
ไฮโดรเจน	13.84	-259.31	58.6	20.26	-252.89	452
ไนโตรเจน	63.18	-209.97	25.5	77.34	-195.81	201
เอทานอล	159	-114	104.2	351	78	854
ปรอท	234	-39	11.8	630	357	272
น้ำ	273.15	0.00	333	373.15	100.00	2256
กำมะถัน	392	119	38.1	717.75	444.60	326

ที่มา: ปิยพงษ์ สิทธิคง, 2548.

ตัวอย่างที่ 1.6 ต้องใช้พลังงานความร้อนกี่จูลที่ทำให้ น้ำแข็ง 50 กรัม ละลายกลายเป็นน้ำทั้งหมด

วิธีทำ ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำแข็งเป็นน้ำมีค่า 333 กิโลจูลต่อกิโลกรัม

ดังนั้น

$$Q = mL$$

$$Q = (50 \times 10^{-3} \text{ kg}) (333 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}})$$

$$Q = 16650 \text{ J}$$

คำตอบ ดังนั้น จะต้องใช้พลังงานความร้อนเท่ากับ 16650 จูล

ตัวอย่างที่ 1.7 กระจ้อองบรรจูน้าไบหนึ่งมีน้ำ 150 กรัม ที่ 4 องศาเซลเซียสบรรจุอยู่ จากนั้นเอาชิ้นโลหะมวล 90 กรัม ที่ 100 องศาเซลเซียส ใส่องไปหลังจากถึงสภาพสมดุล อุณหภูมิของน้ำและโลหะเท่ากับ 21 องศาเซลเซียส ถ้าไม่มีการสูญเสียความร้อนให้กับกระตัก และให้ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 1 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส จงหา

ก) ปริมาณความร้อนที่โลหะคายออกมา

ข) ความจุความร้อนจำเพาะของโลหะ

วิธีทำ

ก) ปริมาณความร้อนที่โลหะคายออกมามีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนที่น้ำรับเข้าไปในการเปลี่ยนจาก 4 องศาเซลเซียส เป็น 21 องศาเซลเซียสดังนั้น

$$\begin{aligned} Q_{\text{คาย}} &= Q_{\text{รับ}} \\ &= (mc\Delta T)_{\text{น้ำ}} \\ &= (150\text{g})(1\text{cal/g}^{\circ}\text{C})(21^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}) \\ &= 2550 \text{ cal} \end{aligned}$$

คำตอบ จะต้องใช้พลังงานความร้อน 2550 แคลอรี

ข) หาความจุความร้อนจำเพาะของโลหะจาก

$$\begin{aligned} Q &= (mc\Delta T)_{\text{โลหะ}} \\ 2550 \text{ cal} &= (90\text{g})(c)(100^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}) \\ c &= 0.36 \text{ cal/g}^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

คำตอบ ความจุความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.36 แคลอรีต่อกรัมองศาเซลเซียส

1.8 การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer)

เมื่อสารได้รับพลังงานความร้อนจะมีพฤติกรรมในลักษณะการดูดกลืนความร้อน ส่งผลต่อการหดหรือการขยายตัว นอกจากนี้ยังมีพฤติกรรมอีกอย่างหนึ่งคือ การถ่ายโอนความร้อนโดยลักษณะการถ่ายโอนความร้อนมี 3 รูปแบบ ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวกลางคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนซึ่งไม่อาศัยตัวกลาง

1.8.1 การนำความร้อน (Heat conduction)

ลักษณะของการถ่ายโอนความร้อนแบบนำความร้อนคือ เมื่อสารที่เป็นตัวกลางได้รับความร้อนจะเป็นแค่ตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนไปเท่านั้น โดยอนุภาคของสารจะไม่มีเคลื่อนที่ตามไปด้วย โดยทั่วไปจะเกิดในสถานะของแข็ง

จากการทดลองพบว่าปริมาณความร้อน ΔQ ที่ส่งผ่านจากด้านที่ร้อนกว่าไปสู่ด้านที่เย็นกว่าเมื่อเวลาผ่านไป Δt และ $(\Delta Q/\Delta t)$ แปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัด A ความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT และเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนา Δx เขียนเป็นสมการได้ว่า

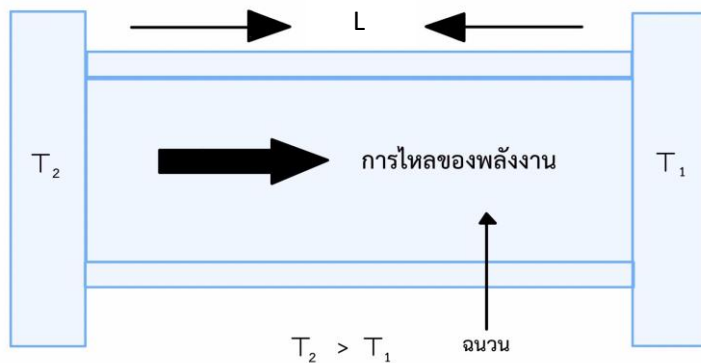
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1-23)$$

หรือ

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1-24)$$

สมการที่ (1-24) เรียกว่า กฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ค่าคงตัว k เรียกว่า สภาพนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัตถุ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ($W/m \cdot k$) โดยเครื่องหมายลบหมายความว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงมีค่าลดลงในทิศตรงข้ามกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงความร้อน แสดงให้เห็นว่าการนำความร้อนเป็นไปในลักษณะที่เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะลดลง สำหรับเกรเดียนของอุณหภูมิ dT/dx คือ ความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) สำหรับ dQ/dt เรียกว่า กระแสความร้อน (Heat current, H) คือ อัตราการไหลของความร้อนผ่านพื้นที่หน้าตัด A หรือพลังงานความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด A ในหนึ่งหน่วยเวลามีหน่วยเป็นวัตต์ (W) ดังนั้น

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1-25)$$



ภาพที่ 1.4 การไหลของความร้อนจากอุณหภูมิสูง (T_2) ไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า (T_1)

ถ้าพิจารณารูปทรงกระบอกยาว L พื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ A ซึ่งด้านข้างถูกหุ้มด้วยฉนวนป้องกันการรั่วไหลของความร้อนดังภาพที่ 1.4 ในสถานะคงตัว หมายถึง อุณหภูมิที่ปลายแต่ละด้านนั้นไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งพบว่า เกรเดียนของอุณหภูมิ dT/dx มีค่าคงตัวตลอดทั้งวัตถุ นั่นคือ

$$-\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1-26)$$

แทนในสมการที่ (1-25) จะได้

$$H = \frac{dQ}{dt} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} \quad (1-27)$$

จากสมการที่ (1-27) พบว่ากระแสความร้อน (H) แปรผันตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ ($T_2 - T_1$) ระหว่างปลายทั้งสองข้างและพื้นที่หน้าตัดของวัตถุ แต่จะแปรผกผันกับความยาวของวัตถุ โดยถ้าวัตถุยาวมากการนำความร้อนจะน้อยลง

สำหรับแผ่นตัวกลางนำความร้อนที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิดร้อนมีความหนา L_1, L_2, \dots และมีสภาพนำความร้อนเป็น k_1, k_2, \dots อัตราการถ่ายโอนความร้อนเขียนได้เป็น

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{A(T_2 - T_1)}{\sum_i \left(\frac{L_i}{k_i} \right)} \quad (1-28)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 เป็นอุณหภูมิด้านนอกสุดของแผ่นตัวนำ

สารที่มีค่า k มากเป็นตัวนำความร้อนที่ดีแต่สารที่มีค่า k น้อยจะเป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี หรือเป็นฉนวนความร้อน จากตารางข้างต้นจะพบว่า โลหะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีกว่าสารอื่นๆ

ตัวอย่างที่ 1.8 ก่อ่งใส่ น้ำแข็ง ทำด้วยโฟมหนา 2 เซนติเมตร ภายในบรรจุ น้ำแข็งจนเต็ม ถ้ากระติกนี้มีพื้นที่ทั้งหมด 0.8 ตารางเมตร นำกระติกไปตั้งไว้กลางแจ้ง ซึ่งมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน จงหาอัตราการไหลของความร้อนเข้ากระติกและมวลของน้ำแข็งที่ละลายมีค่าเท่าใด กำหนดให้ สภาพนำความร้อนของโฟมเท่ากับ 0.01 วัตต์/เมตร.เคลวิน ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวมีค่า 3.33×10^5 จูลต่อกิโลกรัม

วิธีทำ หาอัตราการไหลของความร้อนเข้ากระติกจาก

$$\begin{aligned} H &= \frac{dQ}{dt} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} \\ H &= \left(0.010 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \right) (0.80 \text{m}^2) \frac{(30^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})}{0.020 \text{m}} \\ H &= 12 \text{W} \end{aligned}$$

นั่นหมายความว่าใน 1 วินาที มีความร้อนไหลเข้ากระทิก 12 จูล ดังนั้นใน 1 วัน = 86,400 วินาที
มีความร้อนไหลเข้ากระทิก $Q = 12 \times 86400 = 1.04 \times 10^6 \text{ J}$

คำตอบ ดังนั้นความร้อนที่ไหลเข้ากระทิกเท่ากับ 1.04 เมกะจูล
ให้ m แทนมวลที่น้ำแข็งละลาย ดังนั้น

$$Q = mL$$

$$1.04 \times 10^6 \text{ J} = m(3.33 \times 10^5 \text{ J/kg})$$

$$m = 3.1 \text{ กิโลกรัม}$$

คำตอบ ดังนั้นมวลที่น้ำแข็งละลายเท่ากับ 3.1 กิโลกรัม

1.8.2 การพาความร้อน (Heat convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยโมเลกุลของตัวกลางที่ได้รับความร้อนเป็นตัวเคลื่อนที่พาไปส่วนโมเลกุลของของเหลวหรือแก๊สเมื่อได้รับความร้อนทำให้ความหนาแน่นของโมเลกุลบริเวณนั้นน้อยลง โมเลกุลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้นและพาเอาความร้อนเคลื่อนที่ไปด้วย ส่วนโมเลกุลที่ยังไม่ได้รับความร้อนจะเคลื่อนเข้ามาแทนที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนของความร้อนขึ้น

อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = hA(T_2 - T_1) = K(T_2 - T_1) \quad (1-29)$$

เมื่อ $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนมีหน่วยเป็นวัตต์

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของตัวกลางขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหล
อัตราเร็วรูปร่างและลักษณะการวางตัวของวัตถุ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

A คือ พื้นที่ผิวตัวกลางที่พิจารณา (m^2)

$T_2 - T_1$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิของตัวกลาง 2 จุดที่พิจารณา (K)

สมการที่ (1-29) บางทีเรียกว่า กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) และค่าคงตัว K เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการเย็นตัว

ตัวอย่างที่ 1.11 จงหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนโดยการพาจากร่างกายของมนุษย์ ซึ่งอยู่ในห้องที่อากาศนี้มีอุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส สมมติผิวมนุษย์มีอุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส และผิวภายนอก

ของร่างกายมีพื้นที่ 1.5 ตารางเมตร ให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่า 6 จูล/เมตร²·วินาที-องศาเซลเซียส

วิธีทำ จากสมการที่ (1-29)

$$\begin{aligned}\frac{\Delta Q}{\Delta t} &= hA(T_2 - T_1) \\ \frac{\Delta Q}{\Delta t} &= (6\text{J/m}^2\text{s}^\circ\text{C})(1.5\text{m}^2)(34^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) \\ \frac{\Delta Q}{\Delta t} &= 100\text{J/s} = 100\text{W}\end{aligned}$$

คำตอบ ดังนั้นอัตราการถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 100 วัตต์

1.8.3 การแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นลักษณะการถ่ายโอนความร้อนอีกรูปแบบหนึ่งที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ เป็นลักษณะการถ่ายโอนความร้อนจากผิววัตถุโดยพลังงานความร้อนที่ถูกส่งออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง และความร้อนที่แผ่ออกมานั้น ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิมากกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ สามารถแผ่รังสีได้และรับรังสีได้ โดยถ้าอัตราการแผ่รังสีความร้อนมีค่ามากกว่าการดูดกลืนความร้อนแล้ว อุณหภูมิของวัตถุจะสูงขึ้น และถ้าอัตราการแผ่รังสีความร้อนมีค่าเท่ากับการดูดกลืนความร้อนแล้ว อุณหภูมิของวัตถุจะคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง โดยรังสีที่แผ่ออกมาจะอยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับอัตราการแผ่รังสีของวัตถุใดแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวของวัตถุและกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุเรียกว่า กฎของสเตฟาน(Stefan's law) เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$R = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \sigma AeT^4 \quad (1-30)$$

เมื่อ R คือ อัตราการแผ่รังสีของวัตถุหรือพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ($\frac{\Delta Q}{\Delta t}$) ที่แผ่ออกมาจาก

ผิวที่วัตถุในหนึ่งหน่วยเวลามีหน่วยเป็นวัตต์

e คือ สภาพแผ่รังสี (Emissivity) ของผิววัตถุซึ่งขึ้นกับชนิดของผิววัตถุโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลซ์มาน (Stefan – Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ

$$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

A คือ พื้นที่ผิวทั้งหมดของวัตถุที่แผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา มีหน่วยเป็นตารางเมตร

T คือ อุณหภูมิของวัตถุ มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

สำหรับวัตถุใดๆ จะพบว่าวัตถุที่มีสีดำจะดูดกลืนและแผ่รังสีความร้อนได้ดีกว่าวัตถุที่มีสีขาวและสีอื่นๆ ดังนั้นวัตถุที่สามารถดูดกลืนพลังงานทั้งหมดที่ตกกระทบผิววัตถุจะเรียกว่า “**วัตถุดำ (Black body)**” ซึ่งค่าสภาพส่งรังสีของผิววัตถุดำ (ϵ) จะมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิ T_1 ขณะที่สิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิ T_2 อัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิเขียนได้เป็น

$$R_{\text{สุทธิ}} = \sigma A \epsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-31)$$

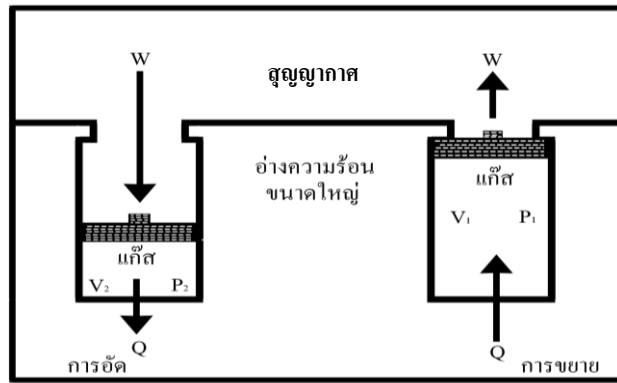
โดย $R_{\text{สุทธิ}}$ คืออัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิ โดยถ้า $R_{\text{สุทธิ}}$ มีค่าเป็นบวกแสดงว่าวัตถุแผ่รังสีให้กับสิ่งแวดล้อม รายละเอียดจะกล่าวถึงในบทต่อไป

1.9 กฎข้อที่ศูนย์ของอุณหพลศาสตร์ (Zero law of thermodynamics)

กฎข้อที่ศูนย์ทางอุณหพลศาสตร์กล่าวไว้ว่า ถ้าระบบสองระบบอยู่ในภาวะสมดุลทางความร้อนกับระบบที่สามแล้ว ระบบสองระบบนี้จะสมดุลทางความร้อนซึ่งกันและกัน นั่นก็คือ กรณีให้วัตถุอยู่สามชนิด ถ้าวัตถุ A มีอุณหภูมิเท่ากับ B หรือมีสมดุลความร้อนต่อกัน และวัตถุชนิด C มีอุณหภูมิเท่ากับ B ดังนั้นวัตถุ A จะมีอุณหภูมิเท่ากับ C หรือเกิดสมดุลความร้อนต่อกันและกัน

1.10 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (First law of thermodynamics)

กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์เป็นกฎที่อธิบายถึงลักษณะของการอนุรักษ์พลังงานความร้อนที่จะเหมือนกับกฎการอนุรักษ์พลังงานทั่วไปที่บอกไว้ว่าพลังงานไม่สูญหายไปไหนแต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้เป็นกฎที่อธิบายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน โดยอธิบายไว้ว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของระบบ พลังงานที่อยู่ภายในระบบจะต้องมีค่าคงตัวเสมอ



ภาพที่ 1.5 การอัดและขยายตัวของแก๊สในลูกสูบระบบปิด

พิจารณาจากภาพที่ 1.5 ถ้า W แทนพลังงานกลของระบบในรูปของการทำงานและ Q แทนพลังงานที่ให้กับระบบโดยการถ่ายเทความร้อนและ U แทนพลังงานภายในระบบ ซึ่ง Q ได้จากพลังงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในระบบรวมทั้งงานที่ทำได้ของระบบจะได้

$$Q = U + W \quad (1-32)$$

U เป็นบวก (+) เมื่อพลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้น

U เป็นลบ (-) เมื่อพลังงานภายในระบบลดลง

W เป็นบวก (+) เมื่อระบบทำงาน

W เป็นลบ (-) เมื่อมีการทำงานเข้าสู่ระบบหรือทำงานให้แก่ระบบ

Q เป็นบวก (+) เมื่อมีความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ

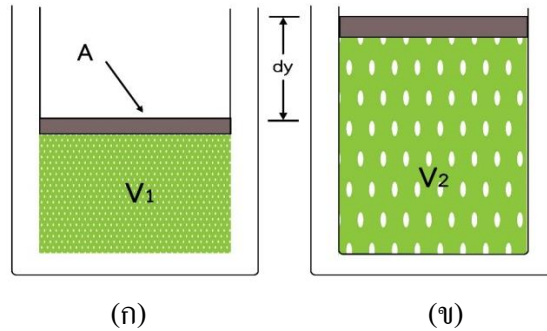
Q เป็นลบ (-) เมื่อมีความร้อนไหลออกจากระบบ

โดย Q , U และ W จะต้องมียุ่หน่วยเดียวกัน

ในกรณีที่สถานะเริ่มต้น (1) และสถานะสุดท้าย (2) ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ๆ จากสมการที่ (1-32) จะได้ว่า

$$dQ = dU + dW \quad (1-33)$$

กฎนี้ใช้ได้กับกระบวนการทุกกระบวนการในธรรมชาติที่ดำเนินอยู่ในสภาวะสมดุล เช่น ลูกสูบถูกอัดขยายภายในท่อปลายปิด ระบบการหมุนเวียนของแก๊ส เป็นต้น จากภาพที่ 1.6 จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างงานที่เกิดขึ้นในระบบมีความสัมพันธ์กับความดันและปริมาตรของแก๊ส



ภาพที่ 1.6 แก๊สบรรจุในทรงกระบอกที่ความดัน P (ก) สถานะเริ่มต้น (ข) สถานะสุดท้าย

พิจารณากระบอกสูบซึ่งบรรจุแก๊สดังรูป (ก) เป็นสถานะเริ่มต้นแก๊สมีปริมาตร V_1 และมีค่าความดัน P แรงกระทำบนลูกสูบเป็น PA ถ้าลูกสูบถูกแก๊สดันออกไปได้ระยะทางสั้น ๆ dy ทำให้สถานะสุดท้ายแก๊สมีปริมาตรเพิ่มเป็น V_2 ดังรูป (ข) งาน dW จะเป็น

$$dW = PAdy \quad (1-34)$$

เมื่อ $Ady = dV$ แทนปริมาตรที่เคลื่อนที่ของลูกสูบ ดังนั้น

$$dW = PdV \quad (1-35)$$

และงานทั้งหมดที่เกิดขึ้น

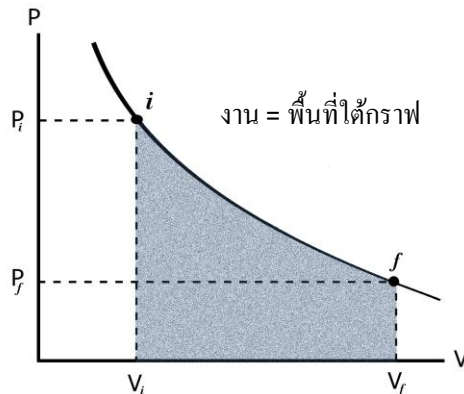
$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV \quad (1-36)$$

โดยที่ งานจะมีค่าเป็นบวก (W เป็น +) เมื่อ V_2 มากกว่า V_1 (ระบบขยายตัว)

งานจะมีค่าเป็นลบ (W เป็น -) เมื่อ V_2 น้อยกว่า V_1 (ระบบถูกอัด)

งานจะเป็นศูนย์ ($W = 0$) เมื่อ $V_2 = V_1$

งานตามสมการที่ (1-35) และ (1-36) ถ้าระบบเปลี่ยนแปลงปริมาตรจาก V_1 เป็น V_2 ขณะที่ความดันเป็น P_1 และ P_2 ตามลำดับ งานที่ได้สามารถแสดงได้ด้วยพื้นที่ใต้กราฟที่แรงเงาดังภาพที่ 1.7



ภาพที่ 1.7 แก๊สขยายตัวจากสถานะ 1 เป็นสถานะ 2

ตัวอย่างที่ 1.8 พลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้น 25 กิโลจูล ในระหว่างที่มีการให้งานแก่ระบบ 99 กิโลจูล ในการนี้การถ่ายเทความร้อนเป็นปริมาณเท่าใด และความร้อนนี้ไหลเข้าหรือออกจากระบบ

วิธีทำ จากโจทย์ $U = +25$ กิโลจูล (พลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้น U เป็นบวก)

$W = -99$ กิโลจูล (ทำงานให้แก่วระบบ W เป็นลบ)

$$Q = U + W$$

$$Q = 25\text{kJ} + (-99\text{kJ})$$

$$Q = -74\text{kJ}$$

คำตอบ เครื่องหมาย Q ที่ได้เป็นลบแสดงว่าระบบสูญเสียความร้อนหรือความร้อนไหลออกจากระบบ 74 กิโลจูล

1.11 งานที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ (Work done by thermodynamics process)

ในระบบทางอุณหพลศาสตร์เมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นจะส่งผลให้เกิดงานซึ่งการพิจารณา รูปแบบของการเกิดงานนั้นจะมีกระบวนการที่ตัวแปรหนึ่งของระบบคงที่ โดยแบ่งได้เป็น

1.11.1 กระบวนการอุณหภูมิกคงตัว (Isothermal process) คือกระบวนการที่เกิดขึ้นโดย อุณหภูมิของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับแก๊สอุดมคติเมื่ออุณหภูมิของแก๊สคงตัวจะทำให้ พลังงานภายในของแก๊สคงตัวด้วย ดังนั้นจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์จะได้ว่า

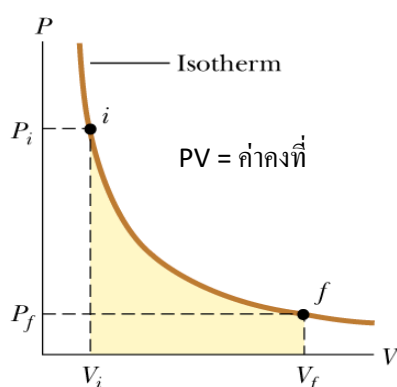
$$dQ = dU + dW \quad (1-33)$$

สำหรับแก๊สอุดมคติในกระบวนการอุณหภูมิกคงที่การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบจะเป็นศูนย์

($U = 0$) ดังนั้นจะได้ว่า งานที่ทำได้เท่ากับความร้อนที่ดูดกลืน

$$Q = W \quad (1-34)$$

ในการเกิดกระบวนการความร้อนคงที่ตลอดกระบวนการจากสถานะเริ่มต้น (1) ถึงสถานะสุดท้าย (2) ของแก๊สอุดมคติได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรดังภาพที่ 1.8



ภาพที่ 1.8 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่ออุณหภูมิคงตัว

โดยงานที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากพื้นที่แรเงาใต้กราฟหางานได้ดังนี้

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

และจากกฎของแก๊สอุดมคติ $P = \frac{nRT}{V}$ หรือ $P = \frac{Nk_B T}{V}$ (ที่มาอยู่ในภาคผนวก)

งานหาได้ดังนี้

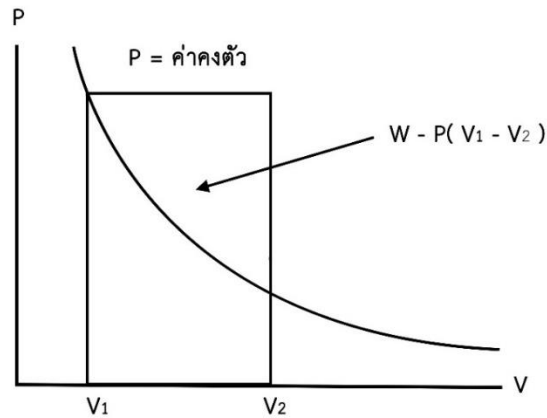
$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (1-35)$$

ในการขยายตัว $V_2 > V_1$ และ W เป็นบวก นอกจากนั้น T คงตัว จะได้ $p_1 V_1 = p_2 V_2$ หรือ

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$ ดังนั้นเราอาจเขียนงานที่อุณหภูมิคงตัวได้เป็น

$$W = nRT \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \quad (1-36)$$

1.11.2 กระบวนการความดันคงตัว (Isobaric process) คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงความดันของระบบเช่นการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายใต้ความดันที่แสดงด้วยกราฟดัง ภาพที่ 1.9



ภาพที่ 1.9 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่อความดันคงตัว

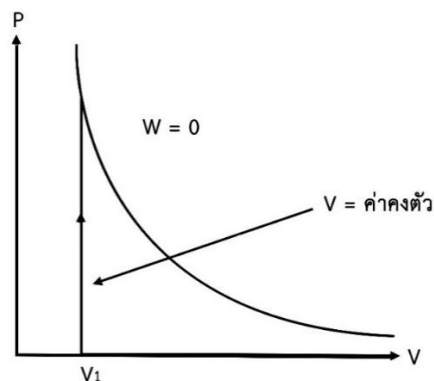
โดยงานที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ

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

เมื่อความดันที่ดังนั้น

$$W = P(V_2 - V_1) = P\Delta V \quad (1-37)$$

1.11.3 กระบวนการปริมาตรคงตัว (Isometric process) คือกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของระบบแม้ว่าจะให้ความร้อนแก่ระบบ ตัวอย่างที่เช่น การเผากระป๋อง สเปรย์ฉีดสีแล้วทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ เป็นต้น ทำให้ได้กราฟดังภาพที่ 1.10



ภาพที่ 1.10 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่อปริมาตรคงตัว

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นกระบวนการปริมาตรคงที่แสดงว่า $\Delta V = 0$ ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นศูนย์

$$W = 0$$

จะได้

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T \quad (1-38)$$

1.11.4 กระบวนการความดันคงตัว (Adiabatic process) คือกระบวนการที่ไม่มีมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม $Q = 0$ ถ้าให้ปริมาตรของระบบเปลี่ยนแปลง dV และอุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลงเป็น dT และ dU เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในระบบ dU จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้นเนื่องจาก $dU = \left(\frac{3}{2}\right)nRdT = nc_vdT$ โดยนิยาม c_v คือความจุความร้อนโมลาร์ที่ปริมาตรคงตัว สามารถเขียนได้ว่า $C_v = \frac{1}{n} \frac{dU}{dT}$ การวัดความจุความร้อนของแข็งและของเหลวมักกระทบในบรรยากาศภายใต้ความดันบรรยากาศคงตัว เรียกว่าความจุความร้อนโมลาร์ที่ความดันคงตัว c_p ดังนั้นจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์เราจะได้

$$dU = -dW \quad (1-39)$$

$$nc_vdT = -PdV \quad (1-40)$$

โดยจากกฎของแก๊ส $P = \frac{nRT}{V}$ แทนค่า

$$\begin{aligned} nc_vdT &= -\frac{nRT}{V}dV \\ \left(\frac{c_v}{R}\right) \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} &= -\int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \\ \left(\frac{c_v}{R}\right) \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) &= \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{R/c_v} \end{aligned} \quad (1-41)$$

จากนิยาม $c_p = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT}$ และจะได้ $dW = pdV = nRdT$ นำไปแทนในสมการ (1-33) จะได้

$$nc_pdT = dU + nRdT \quad (1-42)$$

เมื่อหารแต่ละพจน์ด้วยตัวประกอบร่วม ndT จะได้ $C_p = C_v + R$ หรือ

$$C_p - C_v = R \quad (1-43)$$

แทนสมการ (1-43) ในสมการ (1-41) และให้ $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ จะได้

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{(\gamma-1)}$$

$$T_2 V_2^{(\gamma-1)} = T_1 V_1^{(\gamma-1)}$$

$$T V^{(\gamma-1)} = \text{ค่าคงที่} \quad (1-44)$$

ในทำนองเดียวกันถ้าหาความสัมพันธ์ระหว่างความดัน P และปริมาตร V จะได้

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad (1-45)$$

PV^γ เป็นค่าคงตัว

หางานที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้โดย $Q = 0$ และ $W = -\Delta U$ โดยที่ $\Delta U = nc_v \Delta T$ ดังนั้น

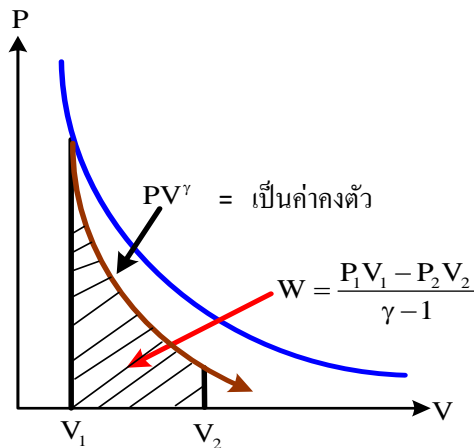
$$W = nc_v (T_1 - T_2) \quad (1-46)$$

จากกฎของแก๊ส $PV = nRT$ ดังนั้น

$$W = c_v \left(\frac{P_1 V_1}{R} - \frac{P_2 V_2}{R} \right)$$

$$W = \frac{P_1 V_1}{\gamma-1} - \frac{P_2 V_2}{\gamma-1} \quad (1-47)$$

สมการที่ (1-47) แสดงงานที่ระบบกระทำในกระบวนการอะเดียแบติกจะแสดงด้วยกราฟดังภาพที่



ภาพที่ 1.11 กราฟระหว่างความดันกับปริมาตรเมื่อความร้อนคงตัว

ตัวอย่างที่ 1.9 น้ำ 1 กรัม ปริมาตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถูกต้มให้เดือดที่ความดัน 10^5 นิวตันต่อตารางเมตร จนเป็นไอหมดที่มีปริมาตร 1,670 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าความร้อนแฝงจำเพาะของการเป็นไอของน้ำเท่ากับ 2.268×10^6 จูลต่อกิโลกรัม จงหา

- ก) งานที่เกิดขึ้นเป็นงานชนิดใดและมีค่าเท่าใด
- ข) พลังงานภายในระบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด

วิธีทำ ก) หางานที่เกิดขึ้นได้จาก

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

$$W = P(V_2 - V_1)$$

$$W = \left(10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) (1670 - 1) \times 10^{-6} \text{m}^3$$

$$W = 166.9 \text{ J}$$

คำตอบ ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นเป็นงานที่ทำโดยระบบมีค่าเท่ากับ 166.9 จูล (W เป็นบวก) เป็นกระบวนการความดันคงตัวและปริมาตรของระบบเพิ่มขึ้น (จากน้ำกลายเป็นไอ)

- ข) จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้ว่า

$$Q = \Delta U + W$$

โดยที่ $Q = mL = 1 \times 10^{-3} \times 2.268 \times 10^6 = 2.268 \times 10^3 \text{ J}$ และ $W = 166.9 \text{ J}$ แทนค่าจะได้

$$\Delta U = 2.268 \times 10^3 \text{ J} - 166.9 \text{ J}$$

$$\Delta U = 2.10 \times 10^3 \text{ J}$$

คำตอบ ดังนั้นพลังงานภายในของระบบเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.10×10^3 จูล

ตัวอย่างที่ 1.10 แก๊สอุดมคติมีปริมาตรเริ่มต้น 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ความดัน 2×10^5 นิวตันต่อตารางเมตรและอุณหภูมิ 250 เคลวิน ถูกอัดด้วยกระบวนการความร้อนคงที่ (Adiabatic process) จนกระทั่งมีปริมาตรสุดท้ายเป็น 0.25 ลูกบาศก์เมตร (กำหนดให้ $\gamma = 1.4$)

ก) จงหาความดันสุดท้ายและอุณหภูมิสุดท้ายของแก๊ส

ข) งานที่เกิดขึ้นเป็นงานชนิดใดและมีค่าเท่ากับเท่าใด

วิธีทำ ก) กระบวนการความร้อนคงที่จะได้ว่า

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma$$

$$P_2 = (2 \times 10^5 \text{ N/m}^2) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{0.25 \text{ m}^3} \right)^{1.4}$$

$$P_2 = 1.39 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

ความดันสุดท้ายของแก๊ส P_2 มีค่าเท่ากับ $1.39 \times 10^6 \text{ N/m}^2$

จาก
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{(\gamma-1)}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{(\gamma-1)}$$

$$T_2 = (250 \text{ K}) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{0.25 \text{ m}^3} \right)^{(1.4-1)}$$

$$T_2 = 435.27 \text{ K}$$

คำตอบ ดังนั้น อุณหภูมิสุดท้ายของแก๊สมีค่าเท่ากับ 435.27 K

ข) หางานที่เกิดขึ้นได้จาก

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

$$W = \frac{(1.39 \times 10^6 \text{ N/m}^2)(0.25 \text{ m}^3) - (2 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(1 \text{ m}^3)}{1.4 - 1}$$

$$W = 3.71 \times 10^5 \text{ J}$$

คำตอบ ดังนั้น งานที่ทำมีขนาด 3.71×10^5 จูล เป็นงานที่กระทำต่อระบบ

1.12 กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ (Second law of thermodynamics)

หลักฐานที่ได้จากการทดลองทำให้ทราบว่า เป็นไปไม่ได้ที่จะสร้างเครื่องจักรความร้อนที่สามารถเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดไปเป็นงานได้ นั่นคือไม่มีเครื่องจักรความร้อนใดที่มีประสิทธิภาพเป็น 100% นี่เป็นที่มาของคำอธิบายหนึ่งของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ กล่าวคือ “ไม่มีระบบใดที่สามารถเปลี่ยนสถานะแบบวัฏจักร โดยดึงความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิหนึ่งแล้วเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดไปเป็นงานกล” คำอธิบายอีกอันหนึ่งสำหรับกฎข้อที่สองนี้ คือ ความร้อนไหลจากที่ที่ร้อนกว่าไปยังที่ที่เย็นกว่า ไม่มีการผันกลับ ซึ่งกล่าวได้ว่า “ไม่มีระบบการใดที่สามารถส่งผ่านความร้อนจากที่ที่เย็นกว่าไปยังที่ที่ร้อนกว่าด้วยตนเองได้”

1.12.1 วัฏจักรคาร์โนต์

ตามกฎข้อที่สอง ไม่มีเครื่องยนต์ความร้อนใดที่มีประสิทธิภาพ 100% ถ้าอย่างนั้น ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่เครื่องจักรสามารถมีได้จะเป็นเท่าไร คำถามนี้สามารถตอบได้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1824 โดยวิศวกรชาวฝรั่งเศส Sadi Carnot ผู้ซึ่งคิดค้นเครื่องจักรความร้อนในอุดมคติที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดที่เป็นไปได้ตามกฎข้อที่สอง วัฏจักรของเครื่องจักรแบบนี้เรียกว่า **วัฏจักรคาร์โนต์** พิจารณาการผันกลับได้ซึ่งเกี่ยวกับทิศทางของกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ การเปลี่ยนงานให้เป็นความร้อนเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ เครื่องจักรความร้อนเป็นกระบวนการที่ตรงกันข้าม คือมันเปลี่ยนความร้อนไปเป็นงาน เพื่อให้เครื่องจักรความร้อนมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยต้องพยายามไม่ให้มีกระบวนการผันกลับได้เกิดขึ้น

การไหลของความร้อนโดยที่มีการลดลงของอุณหภูมิเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ดังนั้นในช่วงที่มีการส่งผ่านความร้อนในวัฏจักรคาร์โนต์ จะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเกิดขึ้น เมื่อเครื่องจักรดึงเอาความร้อนจาก hot reservoir ที่อุณหภูมิ T_H working substance ของเครื่องจักรจะต้องอยู่ที่อุณหภูมิ T_H ด้วย มิเช่นนั้นความร้อนอาจไหลย้อนกลับได้ ในทำนองเดียวกันเมื่อเครื่องจักรถ่ายเทความร้อนไปยัง cold reservoir ที่อุณหภูมิ T_C เครื่องจักรเองก็ต้องมีอุณหภูมิ T_C ด้วย นั่นคือทุกกระบวนการที่มีการส่งผ่านความร้อน จะต้องเป็นกระบวนการที่อุณหภูมิของระบบคงตัว กระบวนการใดที่อุณหภูมิของ working substance ของเครื่องจักรมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง T_H และ T_C จะต้องไม่มีการส่งผ่านความร้อนเกิดขึ้นระหว่างเครื่องจักรกับแหล่งความร้อน ดังนั้น กระบวนการใดที่อุณหภูมิของ working substance เปลี่ยน จะต้องเป็น adiabatic process

ประสิทธิภาพของเครื่องจักรความร้อนคาร์โนต์หาได้จาก

$$e_{\text{carnot}} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (1-48)$$

เมื่อ e_{carnot} คือ ประสิทธิภาพของเครื่องจักรคาร์โนต์

$$\frac{Q_C}{Q_H} \text{ คือ อัตราส่วนของความร้อนที่ถ่ายเทออกไปต่อความร้อนที่ได้รับเข้ามา}$$

$$\frac{T_C}{T_H} \text{ คือ อัตราส่วนของอุณหภูมิที่ก๊าซถูกอัดต่ออุณหภูมิที่ก๊าซขยายตัว}$$

จะเห็นว่าประสิทธิภาพของเครื่องจักรคาร์โนต์มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งสองเท่านั้น โดยจะมีค่ามากเมื่อผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองมีค่ามาก และประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดเป็น 1 ก็ต่อเมื่อ T_C เท่ากับศูนย์องศาเคลวิน

ข้อสังเกต ไม่มีเครื่องจักรใดที่มีประสิทธิภาพมากไปกว่าเครื่องจักรคาร์โนต์ และเครื่องจักรคาร์โนต์ทุกเครื่องที่ทำงานระหว่างอุณหภูมิสองอุณหภูมิเหมือนกัน จะมีประสิทธิภาพเท่ากัน

1.12.2 เอนโทรปีและความไม่เป็นระเบียบ

เมื่อสารได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโมเลกุลของสาร ทำให้ระบบที่ได้รับความร้อนจะเปลี่ยนจากสถานะที่เป็นระเบียบ (Order) ไปสู่สถานะที่ไม่เป็นระเบียบ (Disorder) โดยกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์กล่าวไว้ว่า “ในระบบที่ประกอบด้วยโมเลกุลจำนวนมากถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงเองระบบนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปในสู่สถานะไร้ระเบียบเพิ่มขึ้นหรืออย่างดีที่สุดคือไม่ลดลง ซึ่งก็คือ กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งปริมาณที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงการไร้ระเบียบของระบบ เรียกว่า เอนโทรปี (Entropy) โดยการกำหนดให้เอนโทรปีเป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยเคลวินตามสมการ

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (1-49)$$

โดยที่ ΔS คือ เอนโทรปีมีหน่วยเป็นจูลต่อเคลวิน

ΔQ คือ ปริมาณความร้อนมีหน่วยเป็นจูล

T คือ อุณหภูมิมีหน่วยเคลวิน

เมื่อระบบใดๆมีการเปลี่ยนแปลงโดยได้รับพลังงานความร้อนปริมาณน้อยๆ dQ ขณะที่อุณหภูมิ T จะกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีน้อยๆ dS เป็นไปตามสมการ

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (1-50)$$

ถ้าหากมีการเปลี่ยนจากสถานะที่ 1 ไปสู่สถานะที่ 2 จะได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS) ดังนั้น

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (1-51)$$

โดยถ้าระบบใดๆ ได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น (Q เพิ่มขึ้น) และระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นคงที่ (T) แสดงว่าระบบให้เอนโทรปีมากขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{Q}{T}$ และถ้าระบบใดๆ ได้รับความสูญเสียความร้อน (Q ลดลง) และระบบมีอุณหภูมิลดลงคงที่ (T) แสดงว่าระบบได้สูญเสียเอนโทรปีซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{Q}{T}$

จากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ เมื่อก้าวถึงเอนโทรปีจะได้ว่า “กระบวนการใดๆ ในธรรมชาติจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อกระบวนการนั้นทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของระบบเพิ่มขึ้นหรือคงตัว” โดยสามารถสรุปได้ว่า

$$\Delta S \geq 0 \quad (1-46)$$

โดย $\Delta S = 0$ สำหรับกระบวนการผันกลับได้

$\Delta S > 0$ สำหรับกระบวนการผันกลับไม่ได้

1.13 บทสรุป

อุณหพลศาสตร์เป็นวิชาที่อธิบายเกี่ยวกับความร้อนและพฤติกรรมของสสารเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สำหรับสเกลของอุณหภูมิตามที่นิยมในปัจจุบันมีสามสเกลคือเซลเซียส เคลวิน และฟาเรนไฮต์ สสารแต่ละชนิดจะมีความสามารถรับความร้อนได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าคงตัวที่เรียกว่า ความจุความร้อนจำเพาะ วัตถุเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัวเนื่องจากความร้อนทางอุณหพลศาสตร์เป็นกฎที่อธิบายเกี่ยวกับลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับพลังงานภายในที่อยู่ในสสารเมื่อได้รับความร้อนวัฏจักรทางความร้อนคือ การเปลี่ยนแปลงที่ครบรอบโดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะต้องใช้กระบวนการต่างๆทางอุณหพลศาสตร์ เพื่อนำพลังงานมาใช้ในงานได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งถ้ากระบวนการใดๆที่ระบบสามารถกลับสู่สภาวะเริ่มต้นได้ โดยทั่วไปแล้วความร้อนนั้นเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง และอาจเกิดจากเปลี่ยนรูปมาจากพลังงานรูปแบบอื่นตามหลักการอนุรักษ์พลังงาน เช่น พลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี พลังงานความร้อนที่เกิดจากพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปเมื่อสารได้รับพลังงานความร้อนจะทำให้โมเลกุลภายในของสารเกิดการสั่นและเคลื่อนที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้น วัตถุเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการดูดกลืนความร้อน การถ่ายเทความร้อนหรือการถ่ายโอนความร้อนได้ โดยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่มีระดับความร้อนสูงหรือมีอุณหภูมิสูงไปสู่จุดที่มีระดับความร้อนต่ำหรือมีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ จนกว่าจะมี

อุณหภูมิต่างกันจึงหยุดถ่ายเทเรียกว่า สมดุลความร้อน โดยอุณหพลศาสตร์เป็นการศึกษาที่สำคัญมาก และมีกฎที่ถือว่าสำคัญมากที่สุดในฟิสิกส์เลยทีเดียวนะ อย่างไรก็ตาม กฎบางข้อ เช่น ข้อที่สอง จะเป็นจริงเมื่อเรามองธรรมชาติแบบมหภาคเท่านั้น เมื่อพิจารณาในระดับจุลภาคหรือระดับอะตอม มีความน่าจะเป็นที่กฎข้อที่สองจะถูกฝ่าฝืน เพียงแต่ความน่าจะเป็นนั้นมีความน้อยมาก จนไม่สามารถสังเกตเห็นได้ในระดับมหภาคเท่านั้น

แบบฝึกหัด

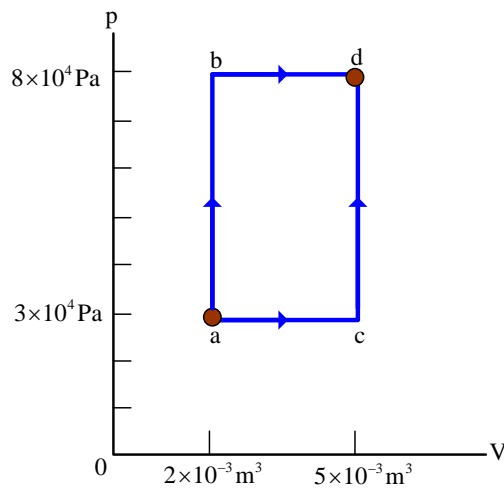
1. ลวดที่ยืดสะพานแห่งหนึ่งยาว 160 เมตรที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสจงหาความยาวส่วนที่เพิ่มขึ้นของลวดเส้นนี้ในวันที่มีอุณหภูมิถึง 38 องศาเซลเซียสถ้าลวดนี้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นเท่ากับ 1.2×10^{-5} องศาเซลเซียส⁻¹ [คำตอบ 7.3 เซนติเมตร]
2. แก้วใบหนึ่งมีปริมาตร 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร ภายในแก้วเติมปรอทจนเต็มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสถ้าอุณหภูมิห้องเพิ่มเป็น 40 องศาเซลเซียส จะทำให้ปรอทล้นออกมาเท่าใดกำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามปริมาตรของแก้วและปรอทเป็น 1.2×10^{-5} องศาเซลเซียส⁻¹ และ 1.8×10^{-5} องศาเซลเซียส⁻¹ ตามลำดับ [คำตอบ: 24 มิลลิเมตร³]
3. โลหะชนิดหนึ่งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น 1.1×10^{-5} องศาเซลเซียส⁻¹ และมีค้ำยโมดูลัส 2×10^{11} นิวตันต่อตารางเมตรยาว 10 เมตรและมีพื้นที่ภาคตัดขวาง 100 ตารางเซนติเมตรขณะนั้นอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสจงหาขนาดของแรงเค้นในโลหะนี้ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 20 องศาเซลเซียส [คำตอบ: 4.4×10^5 นิวตัน]
4. จะต้องให้พลังงานความร้อนเท่าใดแก่น้ำแข็ง 500 กรัมที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียสจึงจะเป็นไอที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสให้ความร้อนแฝงการหลอมเหลว = 80 แคลอรีต่อกรัม
 ความร้อนแฝงการกลายเป็นไอ = 540 แคลอรีต่อกรัม·องศาเซลเซียส
 ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำแข็ง = 0.493 แคลอรีต่อกรัม·องศาเซลเซียส
 ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ = 1 แคลอรีต่อกรัม·องศาเซลเซียส
 ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ = 0.519 แคลอรีต่อกรัม·องศาเซลเซียส
 [คำตอบ 419,295 แคลอรี]
5. ภาชนะหุ้ดัม ชนิดหนึ่ง มีมวล 400 กิโลกรัมและมีน้ำอยู่ 180 กิโลกรัมสมมติว่า 70 % ของความร้อนจากเตาส่งให้กับภาชนะและน้ำ จงหาว่าเตาจะส่งความร้อนออกไปเท่าไรจึงจะทำให้เพิ่มอุณหภูมิของระบบจาก 5 องศาเซลเซียสเป็น 100 องศาเซลเซียสได้ถ้าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กเท่ากับ 460 จูลต่อกิโลกรัม·เคลวิน [คำตอบ 1.27×10^8 จูล]
6. นำก้อนน้ำแข็งมวล 0.50 กิโลกรัม อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ใสลงในน้ำ 3 กิโลกรัม อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จงหาสถานะและอุณหภูมิสุดท้ายของผสมนี้ กำหนดให้ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำแข็ง c_i เท่ากับ 0.50 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม·องศาเซลเซียส จุความร้อนจำเพาะของน้ำ c_w เท่ากับ 1 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม·องศาเซลเซียส ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลว (L) เท่ากับ 80 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม·องศาเซลเซียส [คำตอบ 5 องศาเซลเซียส]
7. วัตถุชนิดหนึ่งยอมให้ความร้อนผ่าน 3.6×10^5 จูลใน 1 วันในพื้นที่ 1 ตารางเมตรเมื่อเกรเดียนต์

ของอนุกรมมีค่า 1 เคลวินต่อเซนติเมตรจะมีความร้อนไหลผ่านแผ่นวัตถุนี้ที่มีพื้นที่ 0.75×1.8 ตารางเมตร หนา 4 เซนติเมตร ก็จุดต่อวัน ถ้าผิวด้านหนึ่งมีอนุกรม 0 องศาเซลเซียส และอีกด้านมีอนุกรม 18 องศาเซลเซียส [คำตอบ 2.21×10^6 จูลต่อวัน]

8. กระบวนการทางความร้อนแสดงได้ด้วยแผนภาพ p-V ดังภาพ ระบบเกิดกระบวนการทางความร้อนเปลี่ยนแปลงจากสภาวะ a ไปยังสภาวะ d ตามเส้นทาง ab มีความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ 600 จูลและตามเส้นทาง bd มีความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ 200 จูล จงหา

- การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในตามทาง ab
- การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในตามทาง abd
- ปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าสู่ระบบตามทาง acd

[คำตอบ: (ก) 600 จูล (ข) 560 จูล (ค) 650 จูล]



ภาพที่ 1.12 แผนภาพ P-V สำหรับข้อ 8

เอกสารอ้างอิง

- คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2549). **ฟิสิกส์ 1**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เชิญโชค ศรขวัญ และคณะ, มหาวิทยาลัยมหิดล. (2546). **ฟิสิกส์ทั่วไป 1**. กรุงเทพฯ: คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- ปิยพงษ์ สิริทคิง. (2548). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2**. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดุกะซัน จำกัด
ยัง และ เฟรดแมน. (2548). **ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2**. (แปลจาก **University Physics with
Modern Physics** โดย ปิยพงษ์ สิริทคิง). กรุงเทพมหานคร: เพียร์สัน เอ็ดดุกะซันอินโด
ไชน่า.
- สุชาติ สุภาพ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. (2558). **ฟิสิกส์ทั่วไป**. กรุงเทพฯ:
สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดดุกะซัน.
- สุมาลี เทียนทองดี. (2560). **การสอนแบบเพียร์ในวิชาฟิสิกส์ Peer instruction in Physics**.
กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ ศูนย์สื่อและสิ่งพิมพ์แก้วเจ้าจอม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.
- Bellance, J, and Brandt, R. (2010). **21st Century Skills Rethinking How Students Learn**.
Solution Tree Press.
- Halpern, A. (2011). **Schaum's outlines 3,000 Solved Problems in Physics**. New York: The
McGraw-Hill Companies, Inc.
- Serway, R. A., and Jewett, J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern
Physics 9th ed**. Belmont: Brooks/Cole-Thomson Learning.
- Serway, R.A., Vuille, C., and Hughes, J. (2015). **College Physics 10th ed**. Stamford: Cengage
Learning.
- Thornton, T.S., and Rex, A. (2013). **Modern Physics for Scientists and Engineers 4th ed**.
Boston: Brooks/Cole- Cengage Learning.
- Young, H.D., and Freedman, R.A. (2016). **Sear's & Zemansky's University Physics with
Modern Physics 14th ed**. Essex: Pearson Education Limited.
- <https://www.youtube.com/watch?v=gI246k9vMCM>