

บทที่ 9

ความร้อนและอุณหพลศาสตร์

เค้าโครงเรื่อง

- 9.1 ความร้อนและอุณหภูมิ
 - 9.1.1 อุณหภูมิและกฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ศูนย์
 - 9.1.2 การขยายตัว
 - 9.1.3 ปริมาณความร้อนและพลังงานความร้อน
 - 9.1.4 การส่งผ่านความร้อน
- 9.2 กฎเกี่ยวกับก๊าซ
 - 9.2.1 กฎของบอยล์
 - 9.2.2 กฎของชาร์ล
 - 9.2.3 กฎของก๊าซอุดมคติ
 - 9.2.4 สมมติฐานของอาโวกาโดร
- 9.3 ทฤษฎีจลน์ของก๊าซ
 - 9.3.1 ความเร็วรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย
 - 9.3.2 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์
 - 9.3.3 ความจุความร้อนโมลาร์ของก๊าซอุดมคติ
 - 9.3.4 กระบวนการความร้อนคงที่ของก๊าซอุดมคติ
 - 9.3.5 สมการของวานเดอร์วาลส์
- 9.4 เครื่องยนต์ความร้อนและกฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สอง
 - 9.4.1 กระบวนการผันกลับได้
 - 9.4.2 เครื่องยนต์ความร้อน
 - 9.4.3 วัฏจักรคาร์โนต์
 - 9.4.4 ตู้เย็น
 - 9.4.5 กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สองและเอนโทรปี

สาระสำคัญ

1. วัตถุใด ๆ สมดุลเชิงความร้อนกับวัตถุอื่น ๆ วัตถุทั้งสองนั้นจะมีอุณหภูมิเดียวกัน กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ศูนย์กล่าวว่า ถ้าวัตถุหรือระบบ 2 ระบบต่างสมดุลเชิงความร้อนกับระบบที่สาม ระบบ 2 ระบบนั้นจะสมดุลเชิงความร้อนซึ่งกันและกันด้วย อุณหภูมิในหน่วยเอสไอจะใช้เคลวินหรือองศาสัมบูรณ์

$$T \text{ เคลวิน (K)} = t^{\circ} \text{ C} + 273.15$$

ของแข็งเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว โดยการขยายตัวตามเส้นขึ้นอยู่กับการขยายตัวเฉพาะของวัตถุ ซึ่งกำหนดตามสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

เมื่อ l คือ ความยาวที่อุณหภูมิ $t^{\circ} \text{ C}$ และ Δl คือความยาวที่เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น Δt การขยายตัวตามพื้นที่และตามปริมาตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวของพื้นที่และตามปริมาตรเป็น 2α และ 3α ตามลำดับ

ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุ 1 กิโลกรัมมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา เรียกว่า ความจุความร้อนจำเพาะ หรือ ความร้อนจำเพาะ

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

โดยปริมาณความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิของวัตถุเพิ่มขึ้น (หรือลดลง) คือ

$$\Delta Q = mc\Delta t$$

ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารเปลี่ยนสถานะ คือ

$$\Delta Q = mL$$

เมื่อ L คือ ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ

หลักของการคงตัวของพลังงานความร้อน คือ

$$\text{ความร้อนลด} = \text{ความร้อนเพิ่ม}$$

การถ่ายโอนความร้อน มี 3 วิธี คือ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

อัตราการนำความร้อน คือ

$$\Delta Q/\Delta t = -kA \Delta T/\Delta x$$

เมื่อ K คือ สภาพนำความร้อนของสาร A คือ พื้นที่ภาคตัดขวาง

และ $\Delta T/\Delta x$ คือ อัตราการลดลงของอุณหภูมิต่อหน่วยความยาว

อัตราการพาความร้อน คือ

$$\Delta Q/\Delta t = hA (T_2 - T_1)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

อัตราการแผ่รังสีความร้อน คือ

$$R = kA (T_1^4 - T_2^4)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงตัวของการแผ่รังสี

อัตราการคายความร้อนของวัตถุ ในเวลา t คือ

$$Q/t = K (T_1 - T_2)$$

ตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน และ K เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการเย็นตัว

2. กฎของก๊าซอุดมคติ คือ

$$PV = nRT$$

เมื่อ P คือ ความดัน V คือ ปริมาตร n คือ จำนวนโมล

และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ

โดย R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ = 8.314×10^3 J/kg-mole.K

สมมติฐานของอาโวกาโดร กล่าวว่า ก๊าซที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน จะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากัน ในหน่วยเอสไอ คือ

$$N_0 = 6.02 \times 10^{26} \text{ โมเลกุล/กิโลกรัม-โมล}$$

เมื่อ N เป็นจำนวนโมเลกุลทั้งหมดของก๊าซภายในปริมาตร V ดังนั้น

$$PV = NkT$$

โดย k คือ ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ $= R/n_0 = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

3. ทฤษฎีจลน์ของก๊าซ คือ

$$PV = \frac{2}{3} N \bar{E}_k$$

เมื่อ $\bar{E}_k = \frac{1}{2} m \bar{v}^2$ เป็นค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของแต่ละโมเลกุล

4. กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่หนึ่ง คือ

$$du = dQ - dW$$

ซึ่งกล่าวว่า ถ้าให้ความร้อน dQ แก่ระบบทำให้เปลี่ยนจากสภาวะ 1 ไปยังสภาวะ 2 และระบบทำงานได้ dW ดังนั้น ผลต่างของ dQ และ dW มีค่าคงที่เสมอเท่ากับพลังงานภายในของระบบที่เปลี่ยนไป dU

ในกระบวนการอุณหภูมิคงที่ งานกระทำโดยระบบก๊าซอุดมคติ คือ

$$W = -nRt \ln (v_f/v_i) = -nRT \ln (P_i/P_f)$$

ในกระบวนการความดันคงที่ งานกระทำโดยระบบก๊าซอุดมคติ คือ

$$W = P \Delta V$$

ความจุความร้อนโมลาร์ของก๊าซอุดมคติที่ความดันคงที่และปริมาตรคงที่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$C_p - C_v = R$$

ในกระบวนการความร้อนคงที่สำหรับก๊าซอุดมคติ คือ

$$PV^\gamma = \text{ค่าคงตัว}$$

พลังงานภายในของก๊าซอุดมคติชนิดอะตอมเดี่ยว คือ

$$U = E_k = \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT$$

สมการของวานเดอร์วาลส์สำหรับก๊าซจริงโดยทั่วไป คือ

$$(P + a/v^2)(V - b) = nRT$$

เมื่อ a และ b เป็นค่าคงที่

5. กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สอง กล่าวได้เป็น 3 นัย คือ “ไม่มีกระบวนการใดที่จะสร้างเครื่องยนต์ซึ่งสามารถทำงานเป็นวัฏจักรจะถ่ายเทความร้อนอย่างต่อเนื่องจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูงกว่าได้ นอกเสียจากจะให้งานภายนอกแก่ระบบ” หรือ “การแปลงรูปพลังงานเพื่อให้ผลสุดท้ายเป็นการแปลงความร้อนให้เป็นงานทั้งหมดจากแหล่งซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดย่อมเป็นไปไม่ได้” หรือ “กระบวนการใด ๆ ในธรรมชาติที่นำไปได้มากที่สุดคือกระบวนการที่ทำให้เอนโทรปีเพิ่มขึ้น หรือมีค่าคงตัว”

$$\Delta S \geq 0$$

โดยที่ $\Delta S = 0$ สำหรับกระบวนการผันกลับได้

และ $\Delta S > 0$ สำหรับกระบวนการผันกลับไม่ได้

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องยนต์ความร้อน คือ อัตราส่วนระหว่างงานสุทธิกับความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์

$$\eta = W/Q_2 = 1 - Q_1/Q_2$$

สำหรับเครื่องยนต์ความร้อนซึ่งทำงานแบบวัฏจักรคาร์โนต์ จะมีประสิทธิภาพ

$$\eta_{\text{คาร์โนต์}} = 1 - Q_1/Q_2 = 1 - T_1/T_2$$

โดย T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำและแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงตามลำดับ

วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาบทนี้แล้ว นักศึกษาควรมีความสามารถต่อไปนี้

1. อธิบายความหมายของกระบวนการและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการขยายตัว การส่งผ่านความร้อน กฎเกี่ยวกับก๊าซ กระบวนการอุณหภูมิคงที่ กระบวนการปริมาตรคงที่ กระบวนการความดันคงที่ กระบวนการผันกลับได้ กระบวนการผันกลับไม่ได้ เอนโทรปี วัฏจักรคาร์โนต์ กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ศูนย์ ข้อที่หนึ่งและข้อที่สองได้
2. แสดงที่มาของทฤษฎีจลน์ของก๊าซและการหาปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ สำหรับก๊าซได้
3. คำนวณหาปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องในบทนี้อย่างน้อยครั้งหนึ่งได้

9.1 ความร้อนและอุณหภูมิ

ความรู้สึกร้อนและเย็นเป็นความรู้สึกที่เราคุ้นเคยกันดีอยู่แล้ว ระดับของความร้อนดังกล่าวเรียกว่า อุณหภูมิ (temperature) วัตถุที่มีความร้อนสูง เรียกว่ามีอุณหภูมิสูง วัตถุที่มีความร้อนน้อย ๆ เรียกว่ามีอุณหภูมิต่ำ

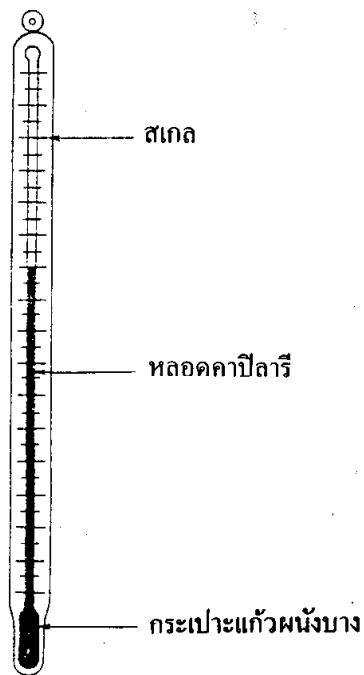
เมื่อนำวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่ามาสัมผัสกับวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิของวัตถุที่ร้อนจะลดลง และขณะเดียวกันอุณหภูมิของวัตถุที่เย็นจะเพิ่มขึ้น จนในที่สุดวัตถุทั้งสองจะมีอุณหภูมิเท่ากัน จึงกล่าวได้ว่าเกิดสมดุลความร้อน (thermal equilibrium) พลังงานภายในของวัตถุแรกจะลดลง และพลังงานภายในของวัตถุหลังเพิ่มขึ้น พลังงานที่ถ่ายเทจากวัตถุหนึ่งไปสู่อีกวัตถุหนึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งเรียกว่า ความร้อน ความร้อนจะถ่ายเทจากวัตถุร้อนไปยังวัตถุที่เย็นเสมอ จนกว่าอุณหภูมิจะเท่ากันจึงหยุดถ่ายเท

9.1.1 อุณหภูมิและกฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ศูนย์ เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิ เรียกว่า เทอร์มอมิเตอร์ (thermometer) ค่าที่อ่านได้บนเทอร์มอมิเตอร์ คือ อุณหภูมิของระบบต่าง ๆ ที่อยู่ในสมดุลความร้อนกับเทอร์มอมิเตอร์ ณ อุณหภูมินั้น ๆ

จากข้อความข้างต้นที่กล่าวถึงวัตถุ 2 สิ่งมีอุณหภูมิต่างกัน ชื่อนำมาสัมผัสกันในเวลาหนึ่ง เมื่ออยู่ในสมดุลความร้อนแล้ว กล่าวได้ว่า ถ้าระบบ 2 ระบบต่างก็อยู่ในสมดุลความร้อนกับระบบที่สาม ระบบ 2 ระบบนั้นจะอยู่ในสมดุลความร้อนซึ่งกันและกัน ข้อความนี้เป็นกฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่ศูนย์ (The zeroth Law of Thermodynamics)

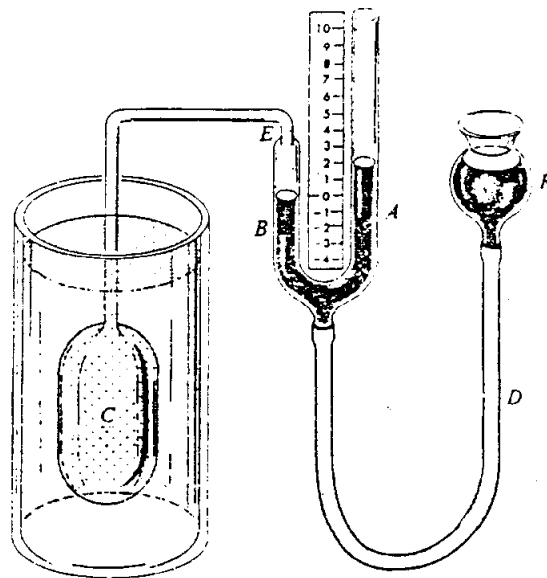
เทอร์มอมิเตอร์มีหลายชนิดตามลักษณะการใช้งาน ได้แก่

1. เทอร์มอมิเตอร์ปรอทและเทอร์มอมิเตอร์อัลกอฮอล์ เป็นเทอร์มอมิเตอร์ที่ใช้กันแพร่หลายมาก มีปรอทหรืออัลกอฮอล์บรรจุอยู่ในกระเปาะแก้ว ซึ่งมีหลอดเล็ก ๆ ต่ออยู่บนหลอดแก้วได้แบ่งสเกลเพื่อบอกอุณหภูมิโดยตรง



รูปที่ 9.1 เทอร์มอมิเตอร์

2. เทอร์มอมิเตอร์ก๊าซชนิดปริมาตรคงตัว (constant-volume gas thermometer) เป็นเทอร์มอมิเตอร์ที่ใช้วัดความกดดันของก๊าซ เมื่อปริมาตรคงตัวขณะอุณหภูมิเปลี่ยนไป เป็นเครื่องมือที่มีความไว แม่นยำในการวัด

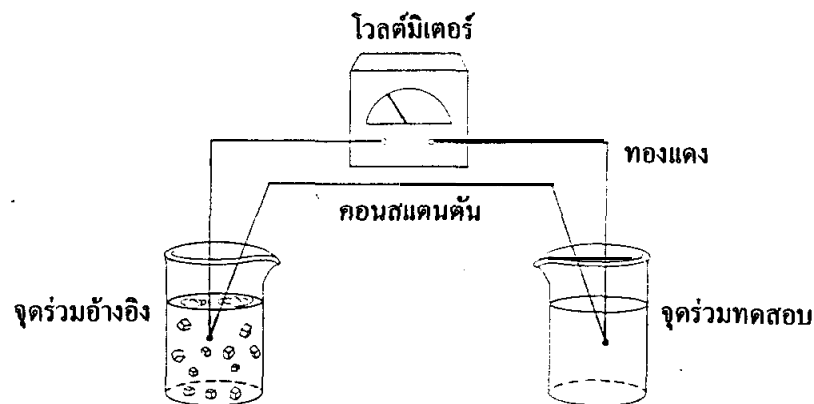


รูปที่ 9.2 เทอร์มอมิเตอร์ก๊าซชนิดปริมาตรคงตัว

โดยทั่วไปบรรจุก๊าซฮีเลียมในกระเปาะ C วัดความดันโดยใช้นานอมิเตอร์ปรอทปลายเปิดหลอด A, B และ R บรรจุปรอทและอ่างปรอท เทอร์มอมิเตอร์ก๊าซมักใช้ในสำนักงานมาตรฐานและสถาบันวิจัย มีขนาดใหญ่เทอะทะและถึงจุดสมดุลความร้อนช้า

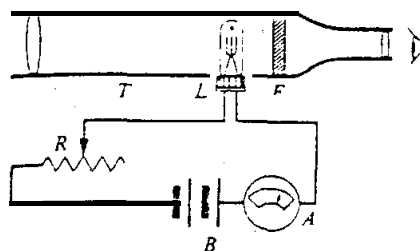
3. เทอร์มอมิเตอร์ชนิดความต้านทาน (resistance thermometer) เป็นเทอร์มอมิเตอร์วัดอุณหภูมิได้ละเอียดมากอันหนึ่ง ใช้ลวดแพลตตินัม ต่อสายลวดจากเทอร์มอมิเตอร์ไปยังเครื่องวัดความต้านทาน เช่น วิดสโตนบริดจ์

4. เทอร์มोकัปเปิล (thermocouple) เป็นเทอร์มอมิเตอร์ที่ใช้กันมากในงานวิจัย งานห้องปฏิบัติการ และงานวิศวกรรม ประกอบด้วยลวดโลหะ 2 ชนิด ที่ปลายข้างหนึ่งเชื่อมต่อกันเป็นจุดร่วมทดสอบ (test junction) ปกติใช้รอยต่อนี้จุ่มกับวัสดุที่ต้องการวัดอุณหภูมิ และปลายเชื่อมต่อกันอีกข้างหนึ่งเป็นจุดร่วมอ้างอิง (reference junction) สำหรับอ่านอุณหภูมิ โดยอาศัยปริมาณทางไฟฟ้า คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf = electromotive force) วัดโดยเครื่องมือที่เรียกว่า โพลเทนชิออมิเตอร์ หรือ โวลต์มิเตอร์



รูปที่ 9.3 เทอร์มอคัปเปิล

5. มาตรอุณหภูมิสูงเชิงแสง (Optical Pyrometer) เป็นเทอร์มอมิเตอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิได้สูงกว่าเทอร์มอคัปเปิล และเทอร์มอมิเตอร์ชนิดความต้านทาน



รูปที่ 9.4 มาตรอุณหภูมิสูงเชิงแสง (Optical Pyrometer)

ประกอบด้วยกลังโทรทัศน์ T ภายในมี filter F ซึ่งเป็นแผ่นแก้วสีแดง หลอดไฟฟ้า L หลอดไฟฟ้าต่อเป็นวงจรกับแบตเตอรี่ B และ rheostat R และมีแอมมิเตอร์ A เนื่องจากเครื่องมือนี้ไม่ต้องนำไปแตะกับวัตถุร้อน จึงสามารถใช้วัดอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดละลายของโลหะต่าง ๆ ได้

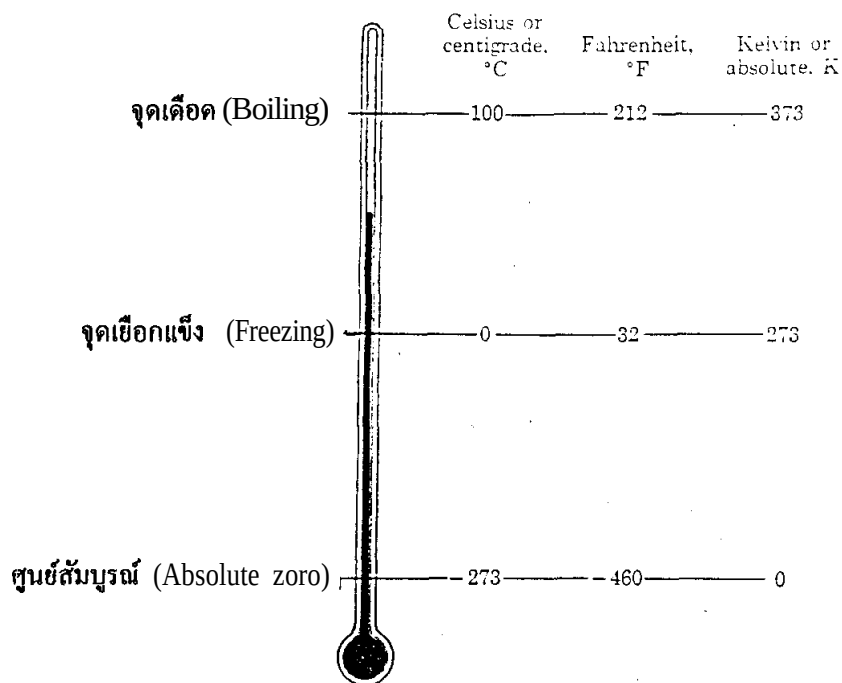
เทอร์มอมิเตอร์ที่นิยมใช้กันแพร่หลายจะเป็นแบบสเกลเซลเซียสและแบบสเกลฟาเรนไฮต์ องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่แอนเดอร์ส เซลเซียส (Anders Celcius) นักดาราศาสตร์ชาวสวีเดน และองศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}\text{F}$) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่เกเบรียล ฟาเรนไฮต์ (Gabriel Daniel Farenheit)

ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรวัดอุณหภูมิของสองระบบนี้ คือ

$$\frac{t^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}}{t^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}\text{C}} = \frac{100}{80}$$

$$t^{\circ}\text{F} = (9/5)t^{\circ}\text{C} + 32^{\circ}\text{F} \quad \text{.....9.1}$$

เมื่อ $t^{\circ}\text{C}$ เป็นอุณหภูมิเซลเซียส และ $t^{\circ}\text{F}$ เป็นอุณหภูมิฟาเรนไฮต์ จะเห็นว่าจุดเยือกแข็งเท่ากับ 32°F ($t = 0^{\circ}\text{C}$) และจุดเดือดเท่ากับ 212°F ($t = 100^{\circ}\text{C}$)



รูปที่ 9.5 จุดเดือดและจุดเยือกแข็งของน้ำ

อุณหภูมิในหน่วยเอสไอ คือ สเกลเคลวิน ใช้ K เป็นเคลวิน ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่เคลวิน (Lord Kelvin) ที่อุณหภูมิ 0 K จะเท่ากับ -273.15°C และ 273.15 K จะเท่ากับ 0°C
ความสัมพันธ์ระหว่างสเกลเคลวินและสเกลเซลเซียส หาได้จากสูตร.

$$\begin{aligned} T\text{ K} &= t^{\circ}\text{C} + 273.15 \\ &\approx t^{\circ}\text{C} + 273 \end{aligned} \quad \text{.....9.2}$$

เมื่อ T เป็นอุณหภูมิเคลวิน หน่วยของอุณหภูมิเคลวิน บางทีเรียกว่า องศาสัมบูรณ์ ในรูปที่ 9.5 จะเปรียบเทียบสเกลทั้ง 3 แบบ

กิจกรรม 9.1

ให้นักศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิฟาเรนไฮต์กับอุณหภูมิสัมบูรณ์หรือเคลวิน

9.1.2 การขยายตัว (expansion)

ก. การขยายตัวของของแข็ง ของแข็งเมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. การขยายตัวตามเส้น (linear expansion) ความยาวที่เพิ่มขึ้น หาได้จากสูตร

$$\Delta l = \alpha l \Delta t \quad \text{.....9.3}$$

เมื่อ l เป็นความยาวที่อุณหภูมิ $t^{\circ}\text{C}$ l_1 เป็นความยาวที่อุณหภูมิ $t_1^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นความยาวที่เพิ่มขึ้น $\Delta l = l_1 - l$ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น $\Delta t = t_1 - t$
 α คือ สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น (coefficient of linear expansion) ซึ่งมีนิยามว่าเป็นความยาวที่เพิ่มขึ้นต่อความยาวเดิมของสารเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศา

ตาราง 9.1 สัมประสิทธิ์ของการขยายตัว

สาร	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัว ตามเส้น α , ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัว ตามปริมาตร γ , ($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹
ของแข็ง :		
เหล็ก	11×10^{-6}	33×10^{-6}
อะลูมิเนียม	26	77
ทองเหลือง	19	56
ทองแดง	17	
แก้ว (ธรรมดา)	8.5	26
แก้ว (ไพเรกซ์)	3.3	10
แพลตตินัม	9.0	27
คอนกรีต	12	36
ตะกั่ว	29	87
ของเหลว :		
เมทิล อัลกอฮอล์		1134×10^{-6}
คาร์บอน เตตระคลอไรด์		581
น้ำ		210
กลีเซอริน		485
ปรอท		182
น้ำมันสน		900
ก๊าซโซลีน		960
ก๊าซ :		
อากาศ		3670×10^{-6}
คาร์บอนไดออกไซด์		3740
ไฮโดรเจน		3660
ฮีเลียม		3665

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \Delta t} \quad \dots\dots\dots 9.4$$

$$l_1 - l = \Delta l$$

$$l_1 = l + \Delta l$$

$$= l + \alpha l \Delta t$$

$$l_1 = l(1 + \alpha \Delta t) \quad \dots\dots\dots 9.5$$

ตัวอย่าง 9.1 ไม้มัด 2 อันซึ่งทำด้วยอะลูมิเนียม และเหล็กที่อุณหภูมิ 20°C และนำมาใช้ที่อุณหภูมิ 40°C จงหาความยาวขณะที่ใช้ไม้มัดเหล่านั้น และถ้านำมาใช้ที่อุณหภูมิ 10°C ให้หาความยาวที่อุณหภูมินี้

วิธีทำ ความยาวของไม้มัดที่อุณหภูมิ 20°C (1)	=	1	m
สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของอะลูมิเนียม (α_{Al})	=	26 x 10 ⁻⁶	/°C
สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของเหล็ก (α_{Fe})	=	11 x 10 ⁻⁶	/°C
ความยาวของไม้มัดอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 40°C l_1	=	$1(1 + \alpha \Delta t)$	
	=	$(1) [1 + (26 \times 10^{-6})(40 - 20)]$	
	=	1.00056	m
ความยาวของไม้มัดเหล็กที่อุณหภูมิ 40°C l_1	=	$(1)[1 + (11 \times 10^{-6})(40 - 20)]$	
	=	1.00022	m
ความยาวของไม้มัดอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 10°C l_2	=	$(1)[1 + (26 \times 10^{-6})(10 - 20)]$	
	=	0.99974	m
ความยาวของไม้มัดเหล็กที่อุณหภูมิ 10°C l_2	=	$(1)[1 + (11 \times 10^{-6})(10 - 20)]$	
	=	0.99989	m

2. การขยายตัวตามพื้นที่ (area expansion) วัตถุเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงวัตถุนั้นจะมีการขยายตัว หรือหดตัวตามพื้นที่ของผิวเช่นเดียวกับตามเส้น จะได้สมการดังนี้

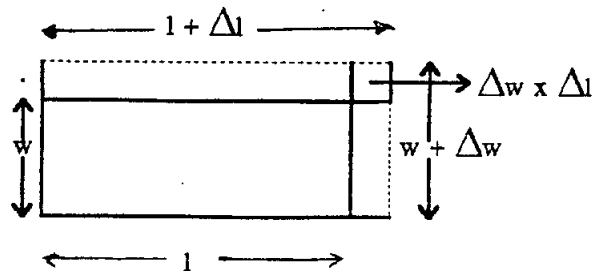
$$A_1 = A(1 + \beta \Delta t) \quad \dots\dots\dots 9.6$$

เมื่อ β เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามพื้นที่ A เป็นพื้นที่ที่อุณหภูมิ t และ A_1 เป็นพื้นที่ที่อุณหภูมิ t_1

สำหรับการขยายตัวของของแข็งที่มีเนื้อเดียวกัน จะได้ว่า

$$\beta = 2\alpha$$

ตัวอย่าง 9.2 จงพิสูจน์ว่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามพื้นที่ (β) สำหรับของแข็งที่มีเนื้อเดียวกัน มีค่าเท่ากับ 2α (α คือสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น)



วิธีทำ

ให้ l = ความยาวของสี่เหลี่ยมด้านขนาน
 w = ความกว้างของสี่เหลี่ยมด้านขนาน
 A = พื้นที่ของสี่เหลี่ยมด้านขนาน
 $= lw$

Δl = ความยาวที่เพิ่มขึ้น
 Δw = ความกว้างที่เพิ่มขึ้น
 ΔA = อณุมิติที่เพิ่มขึ้น

$$\begin{aligned} A_1 &= (l + \Delta l)(w + \Delta w) \\ &= lw + [w\Delta l + l\Delta w] + \Delta l\Delta w \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$w\Delta l$ และ $l\Delta w$ = พื้นที่ด้านข้าง 2 ข้าง

$\Delta l\Delta w$ = พื้นที่เล็ก ๆ ที่มุม

$$\begin{aligned} A_1 &= (l + l\alpha\Delta t)(w + w\alpha\Delta t) \\ &= lw + wl\alpha\Delta t + lw\alpha\Delta t + lw\alpha^2(\Delta t)^2 \\ &= lw + 2lw\alpha\Delta t + lw\alpha^2(\Delta t)^2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\begin{aligned} \Delta A &= A_1 - A \\ &= lw + 2lw\alpha\Delta t + lw\alpha^2(\Delta t)^2 - lw \\ &= 2lw\alpha\Delta t + lw\alpha^2(\Delta t)^2 \\ &= 2A\alpha\Delta t + A\alpha^2(\Delta t)^2 \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta A = 2\alpha A\Delta t$$

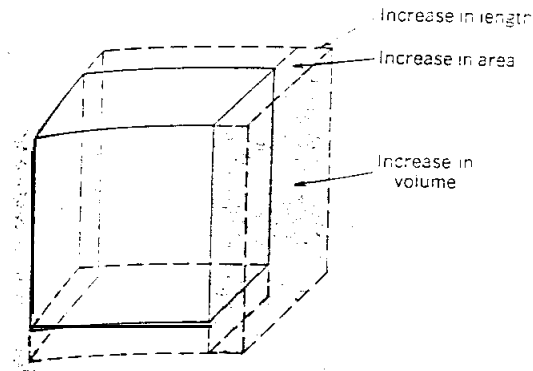
$$\text{นั่นคือ } \beta = 2\alpha$$

3. การขยายตัวตามบาศก์ (volume expansion) จะได้สมการดังนี้

$$V_1 = V(1 + \gamma \Delta t) \quad \dots\dots\dots 9.7$$

เมื่อ γ เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามบาศก์ โดยมี V เป็นปริมาตรที่อุณหภูมิ t และ V_1 เป็นปริมาตรที่อุณหภูมิ t_1

สำหรับของแข็ง จะได้ $\gamma = 3\alpha$



รูปที่ 9.6 การเปลี่ยนแปลงตามเส้น, พื้นที่ และปริมาตร กับอุณหภูมิ

ข. การขยายตัวของของเหลว

การขยายตัวตามบาศก์ของของเหลว (volume expansion of liquids) จะได้สมการคือ

$$V_1 = V[1 + \gamma_1(t_1 - t)] \quad \dots\dots\dots 9.8$$

เมื่อ γ_1 เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามบาศก์ของของเหลวซึ่งมีปริมาตร V ที่อุณหภูมิ t และมีปริมาตรให้ V_1 ที่อุณหภูมิ t_1 การวัดการขยายตัวของของเหลว ต้องตระหนักว่าปริมาตรของภาชนะก็ขยายตัวด้วย ดังนั้นจะได้ว่า

ส่วนขยายตัวปรากฏ = ส่วนขยายตัวจริงของของเหลว - ส่วนขยายตัวจริงของภาชนะ
หรือเขียนเป็นสมการ จะได้

$$\gamma_a = \gamma_l - \gamma_c \quad \dots\dots\dots 9.9$$

- ซึ่ง γ_a = สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวปรากฏ
 γ_l = สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามบาศก์ของของเหลว
 γ_c = สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามบาศก์ของภาชนะ

ตัวอย่าง 9.3 น้ำมีอุณหภูมิ 20°C อยู่ในภาชนะที่ทำด้วยอะลูมิเนียม ขนาด 1.00 ลูกบาศก์เมตร
ถามว่าน้ำจะไหลออกมามีปริมาตรเท่าใด ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 60°C

ในตัวอย่างนี้มีวิธีทำได้ 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1

$$\begin{aligned}\text{สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามบาศก์ของอะลูมิเนียม } \gamma_{\text{Al}} &= 3\alpha_{\text{Al}} \\ &= 3(26 \times 10^{-6}) \quad /^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

$$\text{สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามบาศก์ของน้ำ } \gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 210 \times 10^{-6} \quad /^{\circ}\text{C}$$

ปริมาตรของภาชนะที่เป็นอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 60°C

$$\begin{aligned}V_{\text{Al}} &= (1.00)[1 + 3(26 \times 10^{-6})(60 - 20)] \\ &= 1.003 \quad \text{m}^3\end{aligned}$$

ปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิ 60°C

$$\begin{aligned}V_{\text{H}_2\text{O}} &= (1.00)[1 + (210 \times 10^{-6})(60 - 20)] \\ &= 1.0084 \quad \text{m}^3\end{aligned}$$

จะเห็นว่า ปริมาณน้ำที่ล้นออกจากภาชนะ ได้จากผลต่างของปริมาตรน้ำกับภาชนะที่
อุณหภูมิ 60°C นั่นคือ

$$\begin{aligned}1.0084 - 1.003 &= 0.0054 \quad \text{m}^3 \\ &= 5400 \quad \text{cm}^3\end{aligned}$$

วิธีที่ 2 หาสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวปรากฏ จะได้

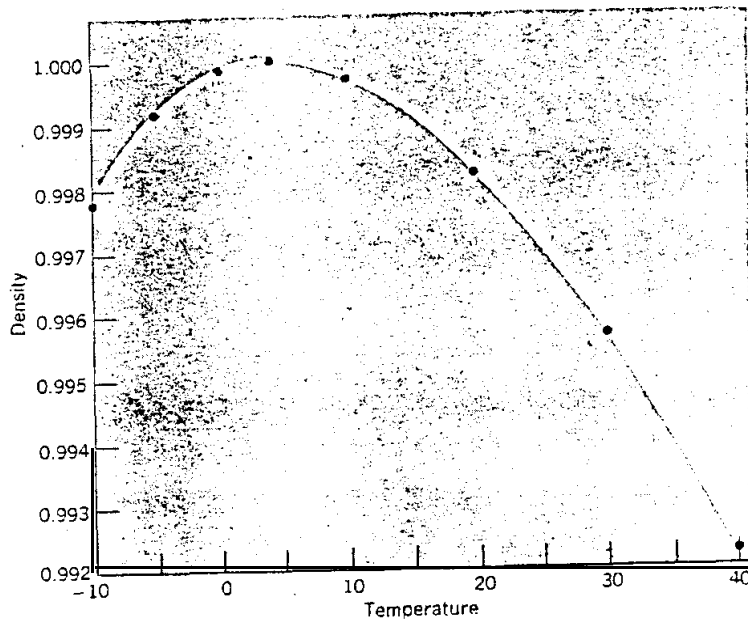
$$\gamma_a = \gamma_l - \gamma_c = 135 \times 10^{-6} \quad /^{\circ}\text{C}$$

ปริมาณน้ำที่ล้นออกมา ก็คือ ปริมาตรที่เพิ่มขึ้นปรากฏของน้ำ หาได้จาก

$$\begin{aligned}\Delta V &= V\gamma_a\Delta t \\ &= (1.00)(135 \times 10^{-6})(60 - 20) \\ &= 0.0054 \quad \text{m}^3 \\ &= 5400 \quad \text{cm}^3\end{aligned}$$

จะเห็นว่า ทั้งสองวิธีให้คำตอบเหมือนกัน แต่วิธีที่ 2 จะง่ายกว่า

การขยายตัวตามบาศก์ในธรรมชาติจะมีผลต่อความหนาแน่นของวัตถุ ความหนาแน่นจะ
ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สำหรับน้ำจะมีข้อยกเว้น นั่นคือ น้ำจะมีปริมาตรลดลง เมื่อได้รับ
ความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 4°C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 4°C ปริมาตรของน้ำจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำจึงมี
ความหนาแน่นมากที่สุดที่อุณหภูมิ 4°C และจะลดลงไม่ว่าจะมีอุณหภูมิลดหรือเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 9.7



รูปที่ 9.7 ความหนาแน่นขึ้นกับอุณหภูมิ

กิจกรรม 9.2

ให้นักศึกษาพิจารณาตาราง 9.1 ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวความปริมาตรของสารต่าง ๆ เป็น 3 เท่าของสัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นหรือไม่

9.1.3 ปริมาณความร้อนและพลังงานความร้อน เนื่องจากความร้อนเป็นพลังงานรูปหนึ่ง พลังงานกลสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้จากแนวความคิดของ Count von Rumford และงานจากการทดลองของ James Prescott Joule จึงกำหนดหน่วยของความร้อนในระบบ SI เป็น จูล จูลจึงเป็นหน่วยของความร้อน พลังงาน และงาน และหน่วยความร้อนอังกฤษ เป็น บีทียู (Btu)

สำหรับน้ำ มี 2 หน่วย คือ

1 กิโลแคลอรี (One kilocalorie) คือ ความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 กิโลกรัมมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส

1 บีทียู (One British Thermal Unit) คือ ความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์

$$1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal} = 3.968 \text{ Btu} = 4186 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal} = 0.252 \text{ kcal} = 1055 \text{ J}$$

ปริมาณความร้อนที่ต้องการทำให้วัตถุ 1 กิโลกรัมมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศา (เซลเซียส) เรียกว่า ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity, c) เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$c \equiv \frac{\Delta Q}{m\Delta t} \quad \text{.....9.10}$$

$$\Delta Q = mc\Delta t \quad \text{.....9.11}$$

เรานิยมเรียก c ว่า ความร้อนจำเพาะ มากกว่า ความจุความร้อนจำเพาะ
m เป็นมวลของวัตถุ ΔQ เป็นปริมาณความร้อนที่วัตถุมีอุณหภูมิเปลี่ยนไป Δt

c มีหน่วยเป็น J/kg.K หรือ J/kg.°C

ค่าของ c ของวัตถุ แสดงไว้ในตารางที่ 9.2

ตาราง 9.2 ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุ (c)

วัตถุ	c หน่วย J/kg.°C
ของแข็ง :	
เหล็ก	450
ทองแดง	390
อะลูมิเนียม	900
เงิน	234
ตะกั่ว	130
แก้ว	840
โซเดียมคลอไรด์	880
น้ำแข็ง	2090
ไม้	1680
ทราย	820
อิฐ	840
คอนกรีต	880
มนุษย์ (ร่างกาย)	3470

ตาราง 9.2 (ต่อ)

วัตถุ	c หน่วย J/kg.°C
ของเหลว :	
น้ำ	4180
เมทานอล	2250
เอทานอล	2480
เอทิลีน ไกลคอล	2380
เบนซีน	1720
ปรอท	138
ก๊าซ :	
ไอน้ำ	1970
ออกซิเจน	910
ไนโตรเจน	1040
อากาศแห้ง	1000

สมการ (9.11) ปริมาณความร้อน ΔQ ที่ไหลเข้าหรือออกจากวัตถุที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนไป Δt ค่า mc เรียกว่า ความจุความร้อน (thermal capacity) หรือ น้ำสมมูล (water equivalent) ของวัตถุ สมการนี้ใช้คำนวณหาปริมาณความร้อนเมื่อวัตถุอยู่ในสถานะเดิมแต่มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

เมื่อวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงผสมกับวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนจะถ่ายเทจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจนกว่าอุณหภูมิจะเท่ากัน ถ้าเราสมมติว่าไม่มีพลังงานเพิ่มหรือสูญเสียไปจากภายนอก พลังงานภายในที่ลดลงของวัตถุหนึ่งจะต้องเท่ากับพลังงานภายในที่เพิ่มขึ้นของอีกวัตถุหนึ่ง หลักของการคงตัวของพลังงาน จะได้ว่า

$$\text{ความร้อนลด} = \text{ความร้อนเพิ่ม}$$

กิจกรรม 9.3

ให้นักศึกษาพิจารณตาราง 9.2 ว่าค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุใดสูงสุดและเรียงลำดับลงมาจากต่ำสุด

ตัวอย่าง 9.4 ในการทดลองเพื่อหาความร้อนจำเพาะของทองแดง ทองแดงชิ้นหนึ่งหนัก 0.051 กิโลกรัม ทำให้ร้อนครั้งแรกที่ 100°C ในไอน้ำ แล้วจุ่มลงในน้ำที่ 27°C มวลของน้ำในแคลอริมิเตอร์หนัก 0.10 กิโลกรัม มวลของถ้วยอะลูมิเนียมชิ้นในหนัก 0.050 กิโลกรัม ถ้าอุณหภูมิสุดท้ายเป็น 30°C ความร้อนจำเพาะของทองแดง จะเป็นเท่าใด

วิธีทำ กำหนดให้

$$\begin{aligned} m_h &= 0.051 \text{ kg} , & T_h &= 100^\circ\text{C} \\ m_w &= 0.10 \text{ kg} , & T_c &= 27^\circ\text{C} \\ m_{Al} &= 0.050 \text{ kg} , & T_f &= 30^\circ\text{C} \\ c_{Al} &= 900 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ความร้อนลด = $c_h m_h (T_h - T_f)$

ความร้อนเพิ่มซึ่งเกิดจากน้ำและแคลอริมิเตอร์

$$= c_w m_w (T_f - T_c) + c_{Al} m_{Al} (T_f - T_c)$$

$\therefore c_h m_h (T_h - T_f) = c_w m_w (T_f - T_c) + c_{Al} m_{Al} (T_f - T_c)$

$$c_h (0.051)(100 - 30) = (4180)(0.10)(30 - 27) + (900)(0.050)(30 - 27)$$

$$c_h = 1389/3.57$$

$$= 389 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$$

ในการเปลี่ยนสถานะของวัตถุจากของแข็งเป็นของเหลว หรือจากของเหลวเป็นก๊าซ โดยดูดความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ มีชื่อเรียกว่า การเปลี่ยนสถานะ (phase change)

การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว เรียกว่า การหลอมเหลว (fusion or melting) และเรียก อุณหภูมินั้นว่า จุดหลอมเหลว (melting point temperature) ความร้อนที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนของแข็งหนึ่งหน่วยมวลที่จุดหลอมเหลวนี้ เรียกว่า ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (latent heat of fusion, L)

$$L_f = Q/m \quad \dots\dots\dots 9.12$$

ในทำนองเดียวกัน การเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ เรียกว่า การกลายเป็นไอ (vaporization) และอุณหภูมินั้น คือ จุดเดือด (boiling point temperature) จะได้รับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat of vaporization)

$$L_v = Q/m \quad \dots\dots\dots 9.13$$

หน่วยของความร้อนแฝง คือ J/kg หรือ J/g

ตาราง 9.3 Latent heats

Substance	Melting point, °C	Latent heat of fusion, kcal/kg	Boiling point, °C	Latent heat of vaporization, kcal/kg
oxygen	-218	3.30	-183	51
ammonia	-75	108	-33	327
water	0	80	100	540
mercury	-39	2.8	357	70
lead	327	5.9	1753	206
aluminium	660	90	2450	2720
copper	1083	32	2300	1211
uranium	1133	20	3900	454
tungsten	3410	44	5900	1150

ตัวอย่าง 9.5 น้ำแข็ง 10 กรัมที่อุณหภูมิ -10°C ใส่ลงไปในน้ำ 50 กรัมที่อุณหภูมิ 27°C ให้หาอุณหภูมิสุดท้ายเมื่อน้ำแข็งละลายหมด

วิธีทำ ในการผสมนี้ น้ำจะเสียความร้อน ส่วนน้ำแข็งได้รับความร้อน

ให้ T_f เป็นอุณหภูมิสุดท้าย

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำเสียความร้อน} &= m_w c_w (T_w - T_f) \\
 &= (50.0)(4180)(27 - T_f) \\
 &= 209(27 - T_f) \quad \text{J}
 \end{aligned}$$

น้ำแข็งได้รับความร้อน หาได้จาก 3 สถานะ คือ (1) จากอุณหภูมิ -10°C ถึง (2) จากการหลอมเหลว (3) จากการละลายของน้ำแข็ง ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำแข็งได้รับความร้อน} &= m_i c_i \Delta T + m_i L_f + m_i c_w \Delta T \\
 &= (10)(2.09)(10) + (10)(335) + (10)(4.18)(T_f - 0) \\
 &= 209 + 3350 + 41.8T_f \quad \text{J} \\
 \text{ความร้อนลด} &= \text{ความร้อนเพิ่ม} \\
 209(27 - T_f) &= 209 + 3350 + 41.8T_f \\
 T_f &= 8.3^{\circ}\text{C}
 \end{aligned}$$

กิจกรรม 9.4

ให้นักศึกษาพิจารณตาราง 9.3 ว่าสารใดมีจุดหลอมเหลวสูงสุดและสารใดมีจุดหลอมเหลวต่ำสุดและตรงกับปริมาณอื่น ๆ ในตารางดังกล่าวเท่าใด

9.1.4 การส่งผ่านความร้อน การส่งผ่านความร้อนมี 3 วิธี คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี (ความร้อน)

1. การนำความร้อน (heat conduction) การส่งผ่านพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่จุดสองจุดภายในเนื้อวัตถุมีค่าแตกต่างกัน เรียกว่า การนำความร้อน

พิจารณาแผ่นวัตถุหนา Δx มีพื้นที่หน้าตัด A อุณหภูมิที่หน้าตัดทั้งสองด้านไม่เท่ากัน คือ T_1 และ T_2 เมื่อ $T_2 > T_1$ วัตถุความร้อน ΔQ ที่ไหลผ่านตั้งฉากกับหน้าตัดทั้งสองในเวลา Δt จากการทดลองพบว่า ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน $= \Delta T$ ที่กำหนดให้ จะได้ว่า ΔQ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ ΔT และ A และถ้ากำหนด Δt กับ A ให้ จะได้ว่า ΔQ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ $\Delta T/\Delta x$ ถ้าทั้ง ΔT และ Δx มีค่าน้อย ดังนั้น

$$\Delta Q/\Delta t \propto A(\Delta T/\Delta x) \text{ โดยประมาณ}$$

เมื่อให้ค่าต่าง ๆ เข้าใกล้สูตร จะได้กฎการนำความร้อน ตามกฎของฟูเรียร์ คือ

$$dQ/dt = -kA(dT/dx) \quad \dots\dots\dots 9.14$$

ซึ่ง dQ/dt = อัตราการไหลของความร้อนผ่านพื้นที่ A

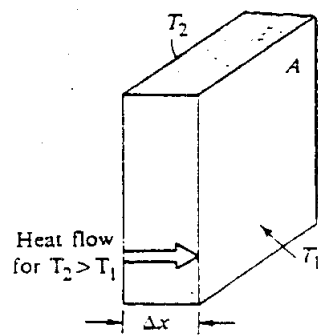
dT/dx = ค่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (temperature gradient)

= ค่าของอุณหภูมิที่ลดลงต่อหนึ่งหน่วยความยาว

k = ค่าคงที่ เรียกว่า สภาพนำความร้อน (thermal conductivity),

สารที่มีค่า k มาก จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดี แต่สารที่มีค่า k น้อย จะเป็นตัวนำความร้อนที่เลว หรือเป็นฉนวนความร้อนที่ดี

ทิศทางการไหลของความร้อนไปในทิศทางที่ x เพิ่มขึ้น เนื่องจากการไหลของความร้อนจะไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ จึงมีเครื่องหมายลบ อยู่หน้าเทอม dT/dx ในสมการ (9.14) [dQ/dt เป็น + แต่ dT/dx เป็น -]



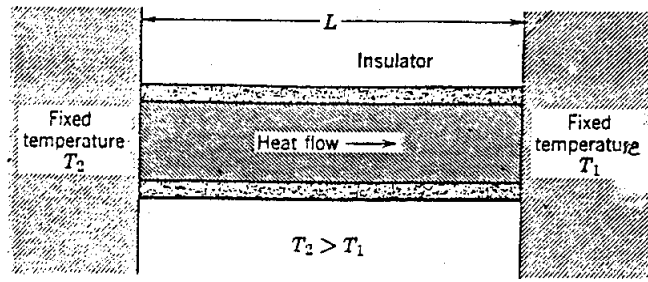
รูปที่ 9.8 การนำความร้อน

ตาราง 9.4 สภาพนำความร้อนของสาร

		REPRESENTATIVE VALUE OF			
METAL	$k, \text{J/s.m}^\circ \text{C}$	SOLID	$k, \text{J/s.m}^\circ \text{C}$	GAS	$k, \text{J/s.m}^\circ \text{C}$
Aluminum	205	Insulating brick	0.15	Air	0.024
Brass	109	Red brick	0.6	Argon	0.016
Copper	385	Concrete	0.8	Helium	0.14
Lead	34.7	Cork	0.04	Hydrogen	0.14
Mercury	8.3	Felt	0.04	Oxygen	0.023
Silver	406	Glass	0.8		
Steel	50.2	Ice	1.6		
		Rock wool	0.04		
		Styrofoam	0.01		
		Wood	0.12-0.04		

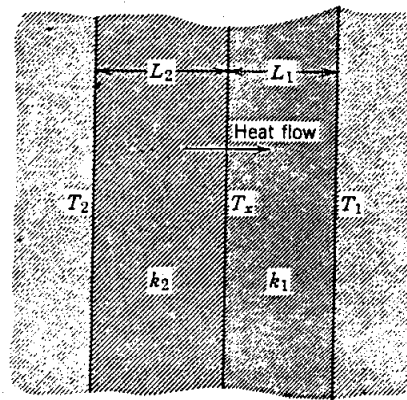
คราวนี้พิจารณากับแท่งวัตถุ (รูปทรงกระบอก) ยาว L ซึ่งด้านข้างถูกหุ้มด้วยฉนวนป้องกันการรั่วไหลของความร้อน มีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอ A ถ้าอยู่ในสภาวะคงตัว (steady state) อุณหภูมิจุดหนึ่ง ๆ จะคงที่ตลอดเวลา ดังนั้น dQ/dt เท่ากันทุก ๆ หน้าตัด แต่เพราะว่า $dQ/dt = -kA(dT/dx)$, dT/dx จะเท่ากันทุก ๆ หน้าตัดด้วย ถ้า k และ A คงที่ ดังนั้น T จะลดลงอย่างสม่ำเสมอตามความยาวของแท่งวัตถุ คือ $-dT/dx = (T_2 - T_1)/L$ เราจะได้

$$dQ/dt = kA[T_2 - T_1]/L \quad \text{.....9.15}$$



รูปที่ 9.9 การนำความร้อนของแท่งตัวนำหุ้มฉนวน

ตัวอย่าง 9.6 วัตถุแผ่นบางทำด้วยวัสดุสองชนิดที่มีความหนา L_1 และ L_2 มีสภาพนำความร้อน k_1 และ k_2 ถ้าอุณหภูมิที่ผิวนอกเป็น T_1 และ T_2 จงหาอัตราที่ความร้อนถ่ายเทผ่านวัตถุแผ่นบางนี้



วิธีทำ

ให้ T_x = อุณหภูมิที่ผิวระหว่างวัสดุทั้งสอง

$$\therefore \frac{dQ_2}{dt} = \frac{k_2 A (T_2 - T_x)}{L_2}$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{k_1 A (T_x - T_1)}{L_1}$$

ถ้าเป็นสภาวะคงตัวจะได้

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{dQ_2}{dt}$$

ให้ dQ/dt เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน (ซึ่งเท่ากันทุก ๆ หน่วยตัด)

$$[L_2 / (k_2 A)] \cdot (dQ/dt) = T_2 - T_x \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$[L_1 / (k_1 A)] \cdot (dQ/dt) = T_x - T_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$(1) + (2) \left[\frac{L_2}{(k_2 A)} + \frac{L_1}{k_1 A} \right] \frac{dQ}{dt} = T_2 - T_1$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{A(T_2 - T_1)}{(L_2/k_2) + (L_1/k_1)}$$

ถ้าแผ่นวัตถุบางประกอบด้วยวัสดุมากกว่าสองชนิด เราจะได้

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{A(T_2 - T_1)}{\sum_{i=1}^{\infty} (L_i/K_i)}$$

กิจกรรม 9.5

ให้นักศึกษาพิจารณาดูรูป 9.4 ว่าสารใดมีสภาพนำความร้อนสูงสุด และสารใดมีค่าดังกล่าวต่ำสุดเท่ากับเท่าใด และแตกต่างจากสารอื่น ๆ เพียงใด

2. การพาความร้อน (convection) การส่งผ่านความร้อนโดยการพาความร้อนโมเลกุลของตัวกลางที่ได้รับความร้อนจะเป็นตัวเคลื่อนที่พาความร้อนไป เช่น เมื่อเอามืออังเหนือเตาไฟจะรู้สึกร้อน เพราะโมเลกุลของอากาศที่ร้อนขยายตัวมีความหนาแน่นลดลง แล้วลอยสูงขึ้นมากระทบมือ จึงทำให้รู้สึกร้อน

การพาความร้อนแบ่งตามชนิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวกลางได้ 2 ชนิด คือ

2.1 การพาความร้อนอย่างอิสระ (free convection) เป็นการพาความร้อนที่โมเลกุลของตัวกลางเคลื่อนที่ไปเพราะมีความหนาแน่นต่างกัน เช่น การเกิดลม และการระบายอากาศเสียของโรงงานทางปล่องไฟ เป็นต้น

2.2 การพาความร้อนที่ถูกบังคับ (forced convection) เป็นการพาความร้อนที่โมเลกุลของตัวกลางถูกทำให้เคลื่อนที่โดยแรงภายนอก เช่น การระบายความร้อนของหม้อน้ำรถยนต์พัดลม ตู้เย็น และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

อัตราการส่งผ่านความร้อนโดยการพาความร้อน คือ $\Delta Q/\Delta t = hA (T_2 - T_1)$ เมื่อ h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหล

3. การแผ่รังสี (ความร้อน) (radiation) วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิเหนือศูนย์องศาสัมบูรณ์จะคายพลังงานหรือแผ่รังสีออกจากผิวของมันในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นต่าง ๆ กัน รังสีที่มีผลทำให้เกิดความร้อนอยู่ในช่วงความยาวคลื่น วัตถุจากคลื่นแสงที่ตาเห็นถึงคลื่นวิทยุ (หรือจาก 8×10^2 ถึง 10×10^{15} nm) เรียกว่า รังสีอินฟราเรด รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จึงมีคุณสมบัติเหมือนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น คลื่นแสง และรังสีเอ็กซ์เคลื่อนที่ในสุญญากาศด้วยความเร็วเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที สามารถสะท้อนและหักเหได้ แต่มีความยาวคลื่นต่างกัน และให้ผลต่อผู้รับต่างกัน

จากการทดลองพบว่า อัตราการแผ่รังสีออกจากผิววัตถุ R แปรผันตามพื้นที่ผิว A และกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ T ของวัตถุ นั่นคือตามกฎของสเตฟาน

$$R \propto AT^4$$

ขณะที่วัตถุแผ่รังสีความร้อนออก จะมีการดูดกลืนรังสีความร้อนที่วัตถุอื่นแผ่มาด้วย ถ้าอัตราการแผ่มากกว่าอัตราการดูดกลืน วัตถุจะเย็นลง หรือถ้าอัตราการแผ่น้อยกว่าอัตราการดูดกลืน วัตถุจะร้อนขึ้น ถ้าอัตราทั้งสองเท่ากันเมื่อใด วัตถุจะมีอุณหภูมิคงที่

ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิ T_1 ขณะที่สิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิ T_2

อัตราการแผ่รังสีระหว่างวัตถุกับสิ่งแวดล้อม มีค่าเท่ากับผลต่างของอัตราการแผ่และการดูดกลืนรังสี เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ว่า

$$R = kA(T_1^4 - T_2^4) \quad \text{.....9.16}$$

เมื่อ k เป็นค่าคงตัวของการแผ่รังสี (radiation constant)

$$\begin{aligned}(T_1^4 - T_2^4) &= (T_1^2 - T_2^2)(T_1^2 + T_2^2) \\ &= (T_1 - T_2)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)\end{aligned}$$

ถ้า T_1 และ T_2 มีค่าใกล้เคียงกัน $T_1 \approx T_2$

$$\begin{aligned}\therefore (T_1^4 - T_2^4) &= (T_1 - T_2)(2T_2)(2T_2^2) \\ &= 4T_2^3 (T_1 - T_2)\end{aligned}$$

สมการ (9.16) เขียนใหม่ได้ว่า

$$R = 4kAT_2^3 (T_1 - T_2) \quad \text{.....9.17}$$

ถ้าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมีค่า T_2 คงที่ตลอดเวลาที่เกิดการแผ่รังสี

$$\therefore R = K(T_1 - T_2) \quad \text{.....9.18}$$

เมื่อ $K = 4kAT_2^3$

ถ้า R เป็นอัตราการคายความร้อนของวัตถุ

$$R = Q/t$$

เมื่อ Q เป็นปริมาณความร้อนที่คายออกมาในเวลา t

$$\therefore Q/t = K(T_1 - T_2) \quad \text{.....9.19}$$

สมการนี้ เรียกว่า กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) และค่า K เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการเย็นตัว

ตัวอย่าง 9.7 คาลอริมิเตอร์อันหนึ่งบรรจุน้ำร้อน ซึ่งเย็นลงจาก 70°C ถึง 60°C ในเวลา 5 นาที จงหาว่าต้องใช้เวลาเท่าใดในการเย็นตัวลงจาก 50°C ถึง 40°C ถ้าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเป็น 20°C ให้ความจุความร้อนจำเพาะของคาลอริมิเตอร์และน้ำ $= c \text{ J/}^{\circ}\text{C}$

วิธีทำ

$$\frac{Q}{t} = K(T_1 - T_2)$$

$$\frac{c(70^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C})}{5 \times 60 \text{ s}} = K \left[\frac{(70^{\circ}\text{C} + 60^{\circ}\text{C})}{2} - 20^{\circ}\text{C} \right]$$

$$\therefore K = \frac{2c}{60 \times 45} \quad /s$$

$$\frac{c(50^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C})}{t} = \frac{2c}{60 \times 45} \left[\frac{50^{\circ}\text{C} + 40^{\circ}\text{C}}{2} - 20^{\circ}\text{C} \right]$$

$$t = \frac{10^{\circ}\text{C} \times 60 \times 45 \text{ s}}{2 \times 25 \times 60 \text{ s/min}}$$

$$= 9 \text{ min}$$

9.2 กฎเกี่ยวกับก๊าซ

9.2.1 กฎของบอยล์ (Boyle's law) ในปี ค.ศ. 2203 บอยล์ (Robert Boyle) ได้ทำการทดลองศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างความกดดันกับปริมาตรของก๊าซ พบว่า เมื่ออุณหภูมิคงที่ความกดดันของก๊าซเป็นปฏิภาคกลับกับปริมาตร

$$P \propto 1/V \quad \text{เมื่อมวลและอุณหภูมิคงที่}$$

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \dots\dots 9.20$$

เมื่อ P = ความกดดันของก๊าซ

V = ปริมาตรของก๊าซ

9.2.2 กฎของชาร์ล (Charles' Law) ในปี ค.ศ. 2330 ชาร์ล (Jacques Charles) ได้ทดลองโดยให้ความกดดันของก๊าซคงที่ พบว่า ปริมาตรจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ

$$V \propto T$$

$$V_1/T_1 = V_2/T_2 \quad \dots\dots 9.21$$

เมื่อ v = ปริมาตรของก๊าซ

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

9.2.3 กฎของก๊าซอุดมคติ (ideal gas law)

จากกฎของบอยล์ $V \propto 1/P$

จากกฎของชาร์ล $V \propto T$

ดังนั้น $V \propto T/P$ (เมื่อมวลคงที่)

$$\therefore P_1 V_1 / T_1 = P_2 V_2 / T_2 \quad \text{.....9.22}$$

สมการ (9.22) เรียกว่า กฎของก๊าซ หรือเขียนใหม่เป็น

$$\frac{PV}{T} = C$$

C เป็นค่าคงที่ จากการทดลองพบว่า $C \propto m$ หรือ $C = mR$

เมื่อ m เป็นมวลของก๊าซ, R เป็นค่าคงที่

$$\begin{aligned} \therefore \frac{PV}{T} &= mR \\ PV &= mRT \end{aligned} \quad \text{..... 9.23}$$

ค่าคงที่ของก๊าซไม่เท่ากันสำหรับก๊าซต่างชนิดกัน ถ้าคิดน้ำหนักของก๊าซเป็นโมลแล้ว ค่าคงที่ของก๊าซทุกชนิดจะเท่ากัน เรียก R ว่า ค่าคงที่สากลของก๊าซ ดังนั้น สมการใหม่ที่ได้จึงเรียกว่า กฎของก๊าซอุดมคติ นั่นคือ

$$PV = nRT \quad \text{.....9.24}$$

โดยที่

P = ความกดดัน	นิวตันต่อตารางเมตร
T = อุณหภูมิสัมบูรณ์	เคลวิน
v = ปริมาตร	ลูกบาศก์เมตร
n = จำนวนโมล	กิโลกรัมโมล
R = ค่าคงที่สากลของก๊าซ	จูลต่อกิโลกรัมโมล.เคลวิน

ดังนั้น ที่ STP (Standard temperature and pressure) ซึ่งมี $T = 273.15 \text{ K}$, $P = 1 \text{ atmosphere}$
 $= 1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ก๊าซ 1 กิโลกรัมโมล จะมีปริมาตร 22.4 ลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned} R &= \frac{PV}{nT} \\ &= \frac{(1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(22.4 \text{ m}^3)}{(1 \text{ kg-mole}) \times (273.15 \text{ K})} \\ \therefore R &= 8.314 \times 10^3 \text{ J/kg-mole.K} \end{aligned}$$

9.2.4 สมมติฐานของอาโวกาโดร (Avogadro's hypothesis) อาโวกาโดร (Amedeo Avogadro) นักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี พบว่า แก๊สที่มีปริมาตรเท่ากันที่อุณหภูมิและความกดดันเดียวกัน จะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากัน จำนวนโมเลกุลในหนึ่งกิโลกรัม-โมล เรียกว่า เลขอาโวกาโดร (Avogadro's number) แทนด้วย N_0 มีค่าดังนี้

ในหน่วย SI $N_0 = 6.02 \times 10^{26}$ โมเลกุล/กิโลกรัม-โมล

ถ้าให้ N เป็นจำนวนโมเลกุลทั้งหมดในปริมาตรที่พิจารณา ดังนั้น

$$N = nN_0$$

จากสมการของแก๊ซอุดมคติ สมการ (9.24) เขียนใหม่ได้ว่า

$$PV = nRT$$

$$= (N/N_0)RT$$

$$\therefore PV = NkT \quad \text{.....9.25}$$

เมื่อ $k = R/N_0$ เรียกว่า ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant)

$$= \frac{8.314 \times 10^3}{6.02 \times 10^{26}}$$

$$= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

กิจกรรม 9.8

ให้นักศึกษาเปรียบเทียบกฎต่าง ๆ เกี่ยวกับแก๊สว่าแต่ละกฎใช้ได้ถูกต้องในกรณีใดบ้าง

9.3 ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

พิจารณาแก๊สจำนวนหนึ่งซึ่งประกอบด้วยอะตอมที่ประกอบขึ้นเป็นแก๊ส การอธิบายพฤติกรรมของอะตอมเหล่านี้ เราไม่จำเป็นต้องสนใจอะตอมทุกๆ ตัวที่มีอยู่ แต่จะใช้กฎของวิชากลศาสตร์อธิบายพฤติกรรมเหล่านี้หมดทีเดียวพร้อมๆ กันในเชิงสถิติ เรียกทฤษฎีนี้ว่าทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (kinetic theory of gas) แก๊สที่นำมาศึกษาพฤติกรรมต่าง ๆ คือ แก๊ซอุดมคติซึ่งมีลักษณะเป็นเพียงแบบจำลองของแก๊สที่เราได้ตั้งขึ้น เพื่อให้เราสามารถอธิบายคุณสมบัติต่างๆ ของแก๊สได้ถูกต้องตามที่ทดลองได้

แบบจำลองของแก๊ซอุดมคติ

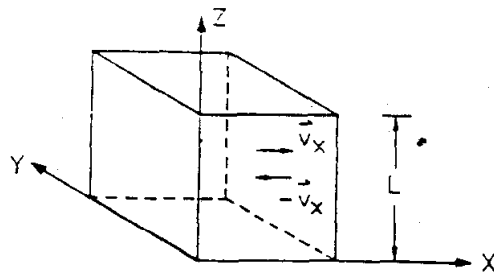
1. แก๊ซอุดมคติเป็นแก๊สซึ่งแรงระหว่างโมเลกุล มีค่าน้อยมากตัดทิ้งได้

2. กำหนดให้โมเลกุลของแก๊ซอุดมคติเป็นมวลทรงกลมขนาดเล็กมาก ดังนั้นพลังงานภายในของแก๊ซอุดมคติเป็นพลังงานจลน์ตามเส้นอย่างเดียว

3. การชนกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซอุดมคติ หรือระหว่างโมเลกุลกับผนังภาชนะที่บรรจุเป็นแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์ คือ พลังงานจลน์ก่อนชนเท่ากับพลังงานจลน์หลังชน

4. การเคลื่อนที่ของโมเลกุลเป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ความเร็วของแต่ละโมเลกุลไม่จำเป็นต้องเท่ากัน แต่ถือว่ามีค่าคงตัว เมื่อเวลาผ่านไป เดิมโมเลกุลหนึ่งมีความเร็วอย่างหนึ่งหลังจากถูกชนแล้วจะมีความเร็วเพิ่มขึ้น แต่เมื่อไปชนโมเลกุลตัวอื่นอีกความเร็วก็จะลดลง แม้ว่าจะไม่เป็นไปตามนี้โดยตรง เมื่อคำนึงว่ามีโมเลกุลเหมือน ๆ กันอยู่จำนวนมาก ทำให้ไม่อาจติดตามการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวหนึ่งตัวใดโดยเฉพาะได้ ฉะนั้นจึงถือว่าค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของโมเลกุลเหล่านั้นเป็นหลักเปรียบเทียบกับแรงของสถิติ

9.3.1 ความเร็วรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย พิจารณาโมเลกุลของก๊าซอุดมคติทั้งหมด N โมเลกุล อยู่ในภาชนะลูกบาศก์ซึ่งมีด้านยาวด้านละ L แต่ละโมเลกุลมีมวล m เมื่อโมเลกุลชนกับผนังแล้วสะท้อน จะเกิดแรงกระทำต่อผนังนั้น เนื่องจากมีโมเลกุลจำนวนมาก แรงเช่นนี้ก็จะมิตัดต่อกันไปก่อให้เกิดเป็นความกดดัน



รูปที่ 9.9 โมเลกุลเคลื่อนที่ในภาชนะที่มีความเร็ว v ชนผนังตามแกน x ด้วยความเร็วย่อย v_x

พิจารณาโมเลกุลที่มีความเร็ว v ซึ่งแยกเป็นความเร็วย่อยตามแกนได้ v_x , v_y และ v_z เมื่อไปชนผนังทางแกน x จะมีโมเมนตัมไปทางแกน x เป็น mv_x และเมื่อสะท้อนกลับจะได้เป็น $-mv_x$ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมทางแกน x เป็น

$$\Delta p_x = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$$

เนื่องจากการชนเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดเวลา ดังนั้น Δt = เวลาที่โมเมนตัมของก๊าซเคลื่อนที่ไปและกลับ

การเปลี่ยนโมเมนตัมนี้เกิดในเวลา

$$\Delta t = \frac{2L}{v_x}$$

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ที่กล่าวว่า แรงลัพธ์เท่ากับอัตราการเปลี่ยนโมเมนตัม

$$F_x \cdot \Delta t = \Delta p_x = 2mv_x$$

ดังนั้นขนาดของแรงเฉลี่ย F_x ที่เกิดจากการชนของโมเลกุลตัวหนึ่ง คือ

$$F_x = \frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$$

เนื่องจากแต่ละโมเลกุลอาจมีความเร็วต่าง ๆ ได้ ดังนั้น ค่า v_x ของแต่ละโมเลกุลก็ย่อมต่างกันได้ด้วย

กำหนดให้ โมเลกุล N_1 มีความเร็ว v_x

โมเลกุล N_2 มีความเร็ว v_x

ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของความเร็วกำลังสอง $\overline{v_x^2}$ หาได้จาก

$$\overline{v_x^2} = \frac{N_1 v_x^2 + N_2 v_x^2 + \dots}{N}$$

และ $\sqrt{\overline{v_x^2}}$ เรียกว่า รากที่สองของค่าเฉลี่ยของความเร็วกำลังสอง (root mean square speed = v_{rms})

แรงทั้งหมดที่กระทำต่อผนังที่ขนทางด้านแกน x

$$F = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L} \quad \dots\dots 9.26$$

พื้นที่ของผนังที่ถูกชน

$$A = L^2$$

ความกดดัน

$$p = \frac{F}{A} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L}$$

$$P = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{V}$$

$$\therefore pV = Nm\overline{v_x^2} \quad \dots\dots 9.27$$

ในทำนองเดียวกัน

$$pV = Nm\overline{v_y^2}$$

$$pV = Nm\overline{v_z^2}$$

เนื่องจากโมเลกุลมีโอกาสชนผนังทั้ง 3 ทิศ (x, y, z) เท่า ๆ กัน โดยมี

$$\begin{aligned} \overline{v_x^2} &= \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} \\ \text{แต่} \quad \overline{v^2} &= \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} \\ \text{ดังนั้น} \quad \overline{v_x^2} &= \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = (1/3)\overline{v^2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots 9.28$$

$$\begin{aligned} PV &= (1/3)Nm\overline{v^2} \\ &= (2/3)N[(1/2)m\overline{v^2}] \\ PV &= (2/3)N\overline{E_k} \quad \dots\dots\dots 9.29 \\ \text{ซึ่ง} \quad \overline{E_k} &= (1/2)m\overline{v^2} \text{ เป็นค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของแต่ละโมเลกุล} \\ \text{จาก} \quad PV &= (2/3)N\overline{E_k} \\ \text{และ} \quad PV &= NkT \\ \therefore (2/3)N\overline{E_k} &= NkT \\ \overline{E_k} &= (3/2)kT \quad \dots\dots\dots 9.30 \\ (1/2)m\overline{v^2} &= (3/2)kT \\ \overline{v^2} &= 3kT/m \end{aligned}$$

$$\text{ความเร็วรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย} \quad v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{3kT/m} \quad \dots\dots\dots 9.31$$

เนื่องจากมีโมเลกุลอยู่เป็นจำนวนมากในก๊าซปริมาตรหนึ่ง ๆ จะทำให้ค่า v_{rms} และ $\overline{v}$ ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในการคำนวณโดยทั่ว ๆ ไปที่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลจำนวนมาก ๆ อยู่ในปริมาตรใด ๆ ความกดดันไม่สูงนัก ค่า v_{rms} ถือว่าเป็นค่าเดียวกับค่า $\overline{v}$ ได้ โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในผลลัพธ์มากนัก

ตัวอย่าง 9.8 ก๊าซไบนหนึ่งมีปริมาตร 0.3 ลูกบาศก์เมตร บรรจุก๊าซฮีเลียม 2 โมล ที่อุณหภูมิ 27° C โดยสมมติว่าฮีเลียมมีพฤติกรรมเหมือนก๊าซอุดมคติ จงหา

- ก. พลังงานภายในของระบบ
- ข. พลังงานเฉลี่ยต่ออะตอม
- ค. v_{rms} ของอะตอม
- ง. v_{rms} ถ้าอุณหภูมิเท่ากับ -30° C
- จ. ถ้าก๊าซที่บรรจุเป็นไนโตรเจน ให้หา v_{rms} ของอะตอมไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 20° C

วิธีทำ $n = 2 \text{ mole} \quad , \quad T = 273 + 27 = 300 \text{ K}$
 $R = 8.314 \text{ J/mole-K} \quad , \quad k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

ก. พลังงานภายในของระบบ

$$\begin{aligned}\overline{E_k} &= (3/2)nRT \\ &= (3/2)(2 \text{ mole})(8.314 \text{ J/mole.K})(300 \text{ K}) \\ &= 7,479 \text{ J} \\ &= 7.5 \times 10^3 \text{ J}\end{aligned}$$

ข. พลังงานเฉลี่ยต่ออะตอม

$$\begin{aligned}(1/2)m\overline{v^2} &= (3/2)kT \\ &= (3/2)(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(300 \text{ K}) \\ &= 6.21 \times 10^{-21} \text{ J}\end{aligned}$$

ค. v_{rms} ของอะตอม

M เป็นน้ำหนักโมเลกุลของฮีเลียม

$$\begin{aligned}&= 4 \text{ g/mole} \\ &= 4 \times 10^{-3} \text{ kg/mole}\end{aligned}$$

∴

$$\begin{aligned}v_{rms} &= \sqrt{\frac{3RT}{M}} \\ &= \sqrt{\frac{(3)(8.314 \text{ J/K})(300 \text{ K})}{(4 \times 10^{-3} \text{ kg/mole})}} \\ &= 1,368 \text{ m/s} \\ &= 1.37 \times 10^3 \text{ m/s}\end{aligned}$$

ง. v_{rms} เมื่ออุณหภูมิเป็น -30°C

จาก

$$\sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

เพราะว่า k และ m จะคงที่ สำหรับก๊าซฮีเลียม

$$\text{ที่ } T = 300 \text{ K} \quad v_{rms} = \sqrt{\frac{3k(300 \text{ K})}{m}}$$

$$\text{ที่ } T = 273 - 30 = 243 \text{ K}$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3k(243 \text{ K})}{m}}$$

$$\therefore \frac{v_{\text{rms}} (\text{ที่ } T_1 = 300 \text{ K})}{v_{\text{rms}} (\text{ที่ } T_2 = 243 \text{ K})} = \sqrt{\frac{(300 \text{ K})}{(243 \text{ K})}}$$

$$v_{\text{rms}} (\text{ที่ } T_2 = 243 \text{ K}) = \sqrt{\frac{243}{300}} \cdot (1,368 \text{ m/s})$$

$$= (0.9)(1,368)$$

$$= 1,231 \text{ m/s}$$

$$= 1.23 \times 10^3 \text{ m/s}$$

จ. ถ้าเป็นก๊าซไนโตรเจน อุณหภูมิ 20°C

$$T = 273 + 20 = 293 \text{ K}$$

$$M = 28 \times 10^{-3} \text{ kg/mole}$$

$$\therefore v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

$$= \sqrt{\frac{(3)(8.314)(293)}{(28 \times 10^{-3})}}$$

$$= 510.88 \text{ m/s}$$

$$= 511 \text{ m/s}$$

กิจกรรม 9.7

ให้นักศึกษาเปรียบเทียบ v_{rms} ของก๊าซในตัวอย่าง 9.8 ที่อุณหภูมิต่างกันและเมื่อก๊าซต่างชนิดกัน

9.3.2 กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ พลังงานอาจถ่ายเทเข้าหรือออกจากระบบอุณหพลศาสตร์ได้ในรูปแบบของพลังงานความร้อนหรือพลังงานกลโดยอาจจะเป็นชนิดใดชนิดหนึ่งหรือพร้อมกันทั้งสองชนิด การเปลี่ยนแปลงสุทธิของพลังงานความร้อนหรือพลังงานกล ย่อมจะมีผลต่อพลังงานที่ระบบมีอยู่ พลังงานที่สะสมอยู่ในระบบ เรียกว่า พลังงานภายใน (Internal energy)

ถ้าให้ความร้อน Q แก่ระบบแล้วระบบมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะที่ 1 ไปเป็นสถานะที่ 2 และระบบทำงานได้ W จากการทดลองพบว่า ผลต่างของ Q และ W มีค่าคงที่เสมอไม่ว่าเส้นทางของการเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานะที่ 1 และสถานะที่ 2 จะเป็นอย่างไร $Q - W$ มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในของระบบ คือ พลังงานที่สะสมอยู่ในระบบซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานจลน์ พลังงานศักย์ และพลังงานรูปอื่น ๆ ทุกชนิดของระบบ จากสถานะที่ 1 ไปยังสถานะที่ 2 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการของการเปลี่ยนแปลง

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W \quad \text{.....9.32}$$

ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

$$dU = dQ - dW \quad \text{.....9.33}$$

Q มีเครื่องหมายเป็น บวก เมื่อความร้อนไหลเข้าสู่ระบบ

W มีเครื่องหมายเป็น บวก เมื่อระบบทำงาน

สมการ (9.32) และสมการ (9.33) เรียกว่า กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (the first law of thermodynamics)

กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์เป็นกฎที่เกี่ยวกับการคงตัวของพลังงาน กล่าวได้ว่า ในการเปลี่ยนแปลงทางอุณหพลศาสตร์ใด ๆ พลังงานรวมกันทั้งหมดย่อมมีค่าคงที่ จะไม่มีพลังงานถูกสร้างขึ้นหรือถูกทำลาย นำมาประยุกต์กับระบบที่มีอนุภาคเป็นจำนวนมากได้ พลังงานภายในของระบบอาจแยกเป็นสองส่วนคือ งานกับพลังงานความร้อน

ถ้ากระบวนการเป็นแบบวัฏจักร (cyclic process) คือ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการแล้วระบบกลับมาสู่สถานะเริ่มต้น การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\begin{aligned} 0 &= Q - W \\ W &= Q \end{aligned} \quad \text{.....9.34}$$

งานที่ระบบกระทำได้ เท่ากับความร้อนที่ระบบดูดกลืนเข้าไป

ถ้าระบบใดทำงานได้โดยไม่ดูดกลืนความร้อนหรือพลังงานใด ๆ เลย คือ $Q = 0$ เรียกว่า กระบวนการแอดิแบติก (adiabatic process) หรือกระบวนการที่มีความร้อนคงที่

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -W \quad \text{.....9.35}$$

แสดงว่า พลังงานภายในของระบบลดลงเท่ากับงานที่ระบบทำได้

ในทางอุณหพลศาสตร์ เราสนใจงานที่ได้จากการเปลี่ยนปริมาตรของสาร เช่น การทำงานของก๊าซที่ขยายตัวภายใต้ความกดดัน

พิจารณาก๊าซบรรจุอยู่ในกระบอกสูบพร้อมลูกสูบก๊าซจะเป็นระบบซึ่งอยู่ในสถานะสมดุลกับสิ่งแวดล้อม คือ กระบอกสูบกับแหล่งให้ความร้อน เริ่มต้น ก๊าซมีความกดดัน p_1 ปริมาตร V_1

หลังจากก๊าซได้รับความร้อน Q เกิดการขยายตัวดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ได้เป็นระยะทาง ds แล้วกลับมาสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งมีความกดดัน p_2 และปริมาตร V_2

$$\text{งานที่ก๊าซกระทำ} \quad dW = F \cdot ds = pA \cdot ds = p dV$$

เมื่อ p = ความกดดัน

A = พื้นที่หน้าตัด

dV = การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของก๊าซ

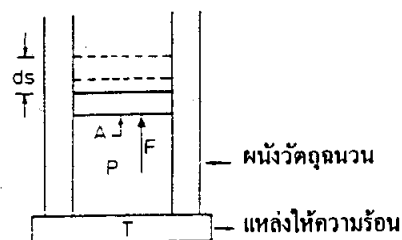
ถ้าก๊าซเปลี่ยนจาก V_1 ไปเป็น V_2

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

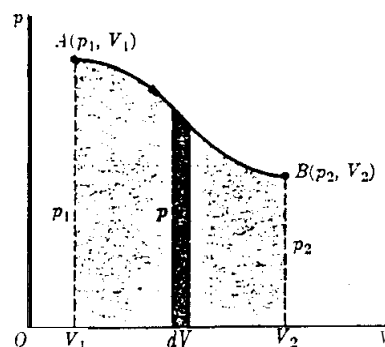
ระหว่างที่ก๊าซมีการขยายตัว งานที่กระทำโดยก๊าซ หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟในแผนภาพ $P - V$

$$W_{AB} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \text{พื้นที่ใต้กราฟ AB} \quad \dots\dots 9.36$$

แสดงว่างานไม่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะสุดท้ายเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับเส้นทางที่กระบวนการมีการเปลี่ยนสภาวะด้วย



รูปที่ 9.10 ก๊าซในกระบอกสูบ ทำงานโดยการขยายตัว



รูปที่ 9.11 พื้นที่ใต้กราฟ คือ งานที่ระบบกระทำ

จากสมการสถานะของก๊าซอุดมคติ $PV = nRT$ จะคำนวณหางานซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการดังนี้

1. กระบวนการอุณหภูมิคงที่ (isothermal process) หางานได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 W &= \int p dV \\
 \text{และ } PV &= nRT \\
 P &= nRT/V \\
 W &= \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV \\
 &= nRT \int_{V_1}^{V_2} dV/V \\
 &= nRT \ln (V_2/V_1) \quad \dots\dots 9.37 \\
 &= nRT \ln (p_1/p_2) \quad \dots\dots 9.38
 \end{aligned}$$

2. กระบวนการความกดดันคงที่ (isobaric process) ถ้าก๊าซในกระบอกสูบได้รับความร้อนในขณะที่ลูกสูบมีความกดดันคงที่ ก๊าซก็จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นพร้อมกับขยายตัวทำงานดันลูกสูบให้เคลื่อนที่ไป

$$\begin{aligned}
 W &= \int_{V_1}^{V_2} p dV \\
 &= p \int_{V_1}^{V_2} dV \\
 &= p(V_2 - V_1) \quad \dots\dots 9.39
 \end{aligned}$$

3. กระบวนการปริมาตรคงที่ (isometric process) เมื่อเราเผาก๊าซโดยไม่ให้ปริมาตรเปลี่ยน ก๊าซจะไม่สามารถขยายตัวออกทำงานได้ ดังนั้น งานจึงเป็นศูนย์ ($W = 0$)

9.3.3 ความจุความร้อนโมลาร์ของก๊าซอุดมคติ

ความจุความร้อนโมลาร์ (molar heat capacity) ของสารใด ๆ คือ ปริมาณความร้อนที่สารนั้น 1 โมล ดูดกลืนเข้าไปเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศา ดังนั้นถ้าสาร 1 โมลดูดกลืนความร้อน dQ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น dT

$$\text{ความจุความร้อนโมลาร์ } C = (1/n)(dQ/dT) \quad \dots\dots 9.40$$

เนื่องจากการดูดกลืนความร้อนของระบบขึ้นอยู่กับกระบวนการ ดังนั้นความจุความร้อนในแต่ละกระบวนการจึงมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. ความจุความร้อนโมลาร์เมื่อปริมาตรคงที่

$$C_v = (1/n)(dQ/dT)_v \quad \text{.....9.41}$$

2. ความจุความร้อนโมลาร์เมื่อความกดดันคงที่

$$C_p = (1/n)(dQ/dT)_p \quad \text{.....9.42}$$

$$C_p/C_v = \gamma \quad \text{.....9.43}$$

ถ้ากระบวนการเป็นแบบปริมาตรคงที่ ระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลง จะไม่มีการทำงานเกิดขึ้น $dW = 0$

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

$$dU = dQ - dW$$

$$\because dW = 0, \quad dU = dQ$$

$$\text{จากสมการ (9.41)} \quad dU = nC_v dT \quad \text{.....9.44}$$

ถ้ากระบวนการเป็นแบบความกดดันคงที่ จากสมการ (9.42) จะได้

$$dQ = nC_p dT \quad \text{.....9.45}$$

จากกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์

$$dU = dQ - dW$$

$$dU = nC_p dT - PdV \quad \text{..... 9.46}$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้น ไม่ขึ้นกับกระบวนการ พลังงานภายในจากสมการ (9.44) จึงเท่ากับสมการ (9.46) จะได้ว่า

$$nC_v dT = nC_p dT - PdV$$

$$n(C_p - C_v)dT = PdV$$

สมการของก๊าซอุดมคติ

$$PV = nRT$$

$$\text{เมื่อความดันคงที่} \quad PdV = nRdT$$

$$\therefore n(C_p - C_v)dT = nRdT$$

$$C_p - C_v = R \quad \text{..... 9.47}$$

สมการ (9.47) ใช้สำหรับก๊าซอุดมคติ

9.3.4 กระบวนการความร้อนคงที่ของก๊าซอุดมคติ

สำหรับก๊าซอุดมคติเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีความร้อนคงที่ (adiabatic

, process)

จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์

$$dU = dQ - dW$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีความร้อนคงที่ $dQ = 0$

จากสมการ (9.44)

$$dU = nC_v dT$$

$$nC_v dT = 0 - pdV$$

$$0 = nC_v dT + pdV$$

$$dT = - \frac{pdV}{nC_v} \quad \dots\dots\dots (1)$$

สำหรับก๊าซอุดมคติ

$$pV = nRT$$

$$pdV + Vdp = nRdT$$

$$dT = \frac{(pdV + Vdp)}{nR} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1) = (2)

$$\frac{-pdV}{nC_v} = \frac{(pdV + Vdp)}{nR}$$

$$pC_v dV + VC_v dp = -pRdV$$

$$pC_v dV + VC_v dp + pRdV = 0$$

$$pC_v dV + VC_v dp + p(C_p - C_v)dV = 0$$

$$VC_v dp + pC_p dV = 0$$

เอา pVC_v หารทั้งสองข้าง และแทน $C_p/C_v = \gamma$ จะได้

$$dp/p + \gamma(dV/V) = 0$$

$$dp/p + \gamma \ln V = k$$

$$pV^\gamma = k \quad \dots\dots\dots 9.48$$

นั่นคือ

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma = \dots$$

ตัวอย่าง 9.9 เผลาก๊าซออกซิเจน 2 กรัม โมเลกุลจากอุณหภูมิ 0°C ถึง 100°C โดย ก. ปริมาตรคงที่ และ ข. ความกดดันคงที่ ความร้อนที่ให้ งานที่ได้รับและการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของแต่ละกรณีจะเป็นอย่างไร ถ้าออกซิเจนมีค่า C_v 21.1 J/g-mole.K ในช่วงอุณหภูมินั้น

วิธีทำ ทั้งสองกรณี อุณหภูมิเปลี่ยนจาก 273 K เป็น 373 K

ก. ปริมาตรคงที่ ใช้สมการ (9.41)

$$\begin{aligned}dQ_v &= mC_vdT \\Q_v &= \int_{T_1}^{T_2} nC_vdT \\&= nC_v\Delta T \\&= (2)(21.1)(373 - 273) \\&= 4.32 \text{ kJ}\end{aligned}$$

งาน $W_v = \int_{V_1}^{V_2} p dV = 0$

พลังงานภายใน $\Delta U = Q_v - W_v$

$$= 4.22 \text{ kJ}$$

ข. ความกดดันคงที่ ใช้สมการ (9.39)

$$\begin{aligned}W_p &= p(V_2 - V_1) = p\Delta V \\&= nR\Delta T \\&= (2)(8.314)(373-273) \\&= 1.66 \text{ kJ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}dQ_p &= nC_pdT \\Q_p &= \int_{T_1}^{T_2} nC_pdT = nC_p\Delta T \\&= n(C_v + R)\Delta T \\Q_p &= nC_v\Delta T + nR\Delta T \\&= Q_v + W_p \\&= 4.22 + 1.68 \\&= 5.88 \text{ kJ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}AU &= Q_p - W_p \\&= (Q_v + W_p) - W_p\end{aligned}$$

$$= Q_v$$

$$= 4.22 \quad \text{kJ}$$

จะเห็นว่า ΔU ทั้งสองกรณีเท่ากัน โดย U ของก๊าซอุดมคติขึ้นกับ T เท่านั้น และ

$$Q_p = Q_v + W_p = \Delta U + W_p$$

ความจุความร้อนโมลาร์ของก๊าซอุดมคติชนิดอะตอมเดี่ยว (monatomic) เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซเป็นเสมือนวัตถุยืดหยุ่นรูปทรงกลม ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุล นอกจากเมื่อเกิดการชนกันเท่านั้น พลังงานศักย์ภายในจึงไม่มี พลังงานภายในทั้งหมดของก๊าซจึงอยู่ในรูปของพลังงานจลน์อย่างเดียว

$$E_k = (3/2)kT$$

พลังงานภายใน U ของก๊าซอุดมคติ N โมเลกุล มีค่าเป็น

$$U = (3/2)NkT = (3/2)nRT$$

$$dU = (3/2)nRdT$$

จากสมการ (9.44) $dU = nC_vdT$

$$\therefore C_v = (3/2)R$$

สมการ (9.47) $C_p = C_v + R = (5/2)R$

ค่า C_v และ C_p ดังกล่าวใช้ได้ถูกต้องสำหรับก๊าซชนิดอะตอมเดี่ยวเท่านั้น

ถ้าเป็นก๊าซชนิดอะตอมคู่หรือหลายอะตอม ค่าพลังงานจลน์ของก๊าซมีค่ามากขึ้นโดยคิดพลังงานจลน์ที่โมเลกุลมีการเคลื่อนที่แบบหมุนเพิ่มขึ้น

กรณีก๊าซชนิดอะตอมคู่ จะได้

$$C_v = (5/2)R, \quad C_p = (7/2)R$$

กรณีก๊าซชนิดหลายอะตอม จะได้

$$C_v = 3R, \quad C_p = 4R$$

9.3.5 สมการของวานเดอร์วาลส์ สมการ $pV = nRT$ เป็นสมการที่ได้จากการทดลอง มีขอบเขตจำกัด ใช้ได้เฉพาะก๊าซอุดมคติ เมื่อก๊าซมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวมากพอก๊าซนี้จะเป็นไปตามกฎของก๊าซอุดมคติอย่างดี แต่ก๊าซจริงที่ใกล้จุดหลอมเหลวจะผิดไปจากกฎนี้มาก วานเดอร์วาลส์ (J.D. van der Waals) ได้พิจารณาแก้ไขปรับปรุงสมการให้ใช้สำหรับก๊าซจริงดังนี้

$$\left[p + \frac{an^2}{V^2} \right] (V - nb) = nRT$$

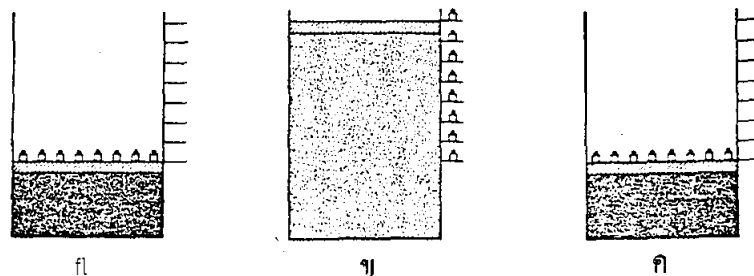
ให้ $n = 1$ โมล และ a, b เป็นค่าคงที่ จะได้

$$(p + a/V^2)(V - b) = nRT \quad \dots 9.49$$

พิจารณาสมการ (9.49) จะเห็นว่าแต่ละโมเลกุลมีขนาด นั่นคือ แต่ละโมเลกุลมีปริมาตรจำกัดค่าหนึ่ง ดังนั้นที่ว่างในภาชนะปริมาตร V จึงเหลือน้อยลงสำหรับเป็นที่ที่จะให้โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ไปมา ดังนั้นเทอมปริมาตรจึงเป็น $(V - b)$ อีกประการหนึ่งโมเลกุลของก๊าซจะส่งแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน แม้แต่เพียงเล็กน้อยแต่ก็มากพอที่จะไปลดโมเมนตัมเมื่อไปชนผนังคิดเป็นความกดดันภายในของก๊าซ ดังนั้นเทอมความกดดันจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(p + a/V^2)$

9.4 เครื่องยนต์ความร้อนและกฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สอง

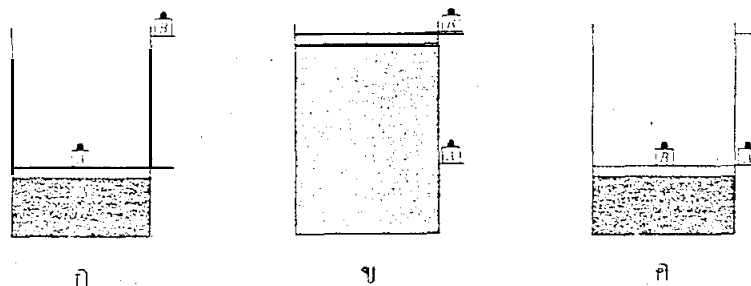
9.4.1 กระบวนการผันกลับได้ (Reversible process) คือ กระบวนการที่ระบบสามารถจะเปลี่ยนกลับไปสู่สภาวะเริ่มต้นได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสุทธิของสภาพแวดล้อม



รูปที่ 9.12 การขยายตัวและการหดตัวของก๊าซแบบผันกลับได้

การขยายตัวของก๊าซแสดงกระบวนการผันกลับได้ ตามรูปที่ 9.12 (ก) ณ ตำแหน่งสมดุล ความดันของก๊าซเท่ากับความดันที่เกิดจากค้อนน้ำหนักต่าง ๆ บวกกับความดันบรรยากาศ ถ้าเอาค้อนน้ำหนักออกหนึ่งอันโดยนำไปไว้ข้างๆ ความดันภายนอกจะลดลงเล็กน้อยก๊าซจะขยายตัวเล็กน้อยจนกระทั่งได้สมดุลอีก เมื่อทำซ้ำๆ กันเช่นนี้ก๊าซก็จะขยายตัวจนได้ปริมาตรตามรูป (ข) และน้ำหนักซึ่งเดิมวางอยู่บนลูกสูบนำออกมาวางไว้ข้างนอก เนื่องจากเป็นกระบวนการซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จึงอาจสมมติว่าก๊าซคงอยู่ในสมดุลต่อเนื่องแบบสถิต เพื่อที่จะอัดก๊าซให้กลับไปสู่สภาวะเริ่มต้น จึงเอาค้อนน้ำหนักวางกลับบนลูกสูบทีละอันตามเดิมโดยเอาอันที่เอาออกทีหลังวางก่อนตามลำดับ เมื่อวางหมดแล้วก๊าซก็จะกลับไปสู่สภาวะเริ่มต้น เป็นการครบรอบพอดีตามรูป (ค) และไม่ทำให้สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลง จึงสรุปได้ว่า ในวัฏจักรที่เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้ ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของทั้งในระบบและสิ่งแวดล้อม

กระบวนการผันกลับไม่ได้ (Irreversible process) คือ กระบวนการที่ระบบหรือสภาพแวดล้อมอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้นที่อาจกลับไปสู่สภาวะเดิมได้ เกิดขึ้นเมื่อระบบเบี่ยงเบนไปจากสภาพสมดุลมากและเกิดขึ้นในอัตราสูงมาก

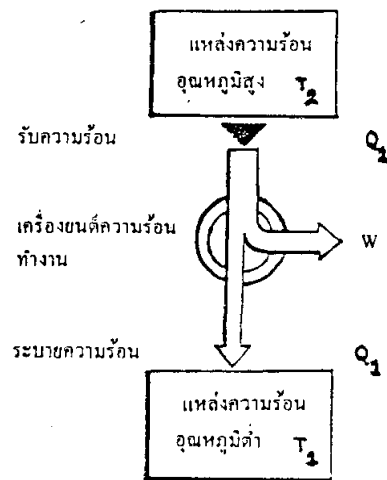


รูปที่ 9.13 การขยายตัวและการหดตัวของก๊าซแบบผันกลับไม่ได้

พิจารณารูปที่ 9.13 (ก) ตั้มน้ำหนัก A วางอยู่บนลูกสูบ และมีตั้มน้ำหนัก B ซึ่งมีมวลเท่ากันวางอยู่ที่ระดับบน ถ้ายกตั้มน้ำหนัก A ออกทันทีทันใด ความดันภายนอกจะลดลงทันที ก๊าซก็จะขยายตัวอย่างรวดเร็ว ในที่สุดลูกสูบจะอยู่นิ่ง ณ ตำแหน่งหนึ่ง และอยู่ในสมดุลด้วยความดันและอุณหภูมิหนึ่ง ตามรูป (ข) การทำให้ก๊าซกลับคืนสู่สภาวะเริ่มต้น อาจใช้ลูกตัม B วางลงบนลูกสูบ ก๊าซก็จะหดตัวมาอยู่ในสภาวะเริ่มต้น ตามรูป (ค) ในกระบวนการอาจจะช้าหรือไม่ช้ากับกระบวนการขยายตัวก็ได้ ก๊าซจึงขยายตัวและหดตัวครบวัฏจักร และทำให้สิ่งแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง สรุปได้ว่า ในวัฏจักรที่ประกอบด้วยกระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับไม่ได้ แต่เพียงบางส่วน หรือทั้งหมดทุกส่วน ระบบกลับมาอยู่ในสภาวะเดิมได้แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงถาวรแก่สิ่งแวดล้อม

9.4.2 เครื่องยนต์ความร้อน เครื่องยนต์ความร้อนทุกชนิดมีไว้ใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์ตรงกัน คือ การเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานกล เครื่องยนต์ความร้อนมีองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ประการ คือ แหล่งให้ความร้อนอุณหภูมิสูง สารปฏิบัติงาน และแหล่งระบายความร้อนอุณหภูมิต่ำ

เครื่องยนต์ความร้อนมีวิธีการทำงานเป็นวัฏจักรเมื่อเผาไหม้ก๊าซก็จะขยายตัวและทำงานได้ แต่ก็ไม่สามารถขยายตัวได้เรื่อยไปเพราะเครื่องยนต์มีขนาดจำกัด เมื่อขยายตัวเต็มที่แล้ว จึงอัดก๊าซให้กลับคืนสู่สภาวะเดิม (เริ่มต้น) และพร้อมที่จะเริ่มวัฏจักรใหม่ ทั้งนี้เพื่อจะได้รับการสุทธิจากเครื่องยนต์ งานที่ก๊าซทำในการขยายตัวต้องมากกว่างานที่ใช้อัดก๊าซ ความดันในขณะอัดจะต้องต่ำกว่าในขณะก๊าซขยายตัว นั่นคือ อุณหภูมิในช่วงอัดจะต้องน้อยกว่าอุณหภูมิในช่วงก๊าซขยายตัว ดังนั้นในช่วงการอัดก๊าซจึงต้องทำให้ก๊าซเย็นลงโดยระบายความร้อนให้แก่แหล่งรับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 9.14 แผนภาพเครื่องยนต์ความร้อน

เครื่องยนต์ความร้อนดูดปริมาณความร้อน Q_2 จากแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง T_2 ทำงาน W แล้วระบายความร้อน Q_1 สู่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ T_1 โดยที่เครื่องยนต์ทำงานเป็นวัฏจักร พลังงานภายในมีค่าคงเดิม ($\Delta U = 0$) ดังนั้น ตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ $Q = W$ นั่นคือ ปริมาณความร้อนสุทธิที่เครื่องยนต์รับไว้เท่ากับปริมาณงานสุทธิที่เครื่องให้ หรือ

$$W = Q_2 - Q_1$$

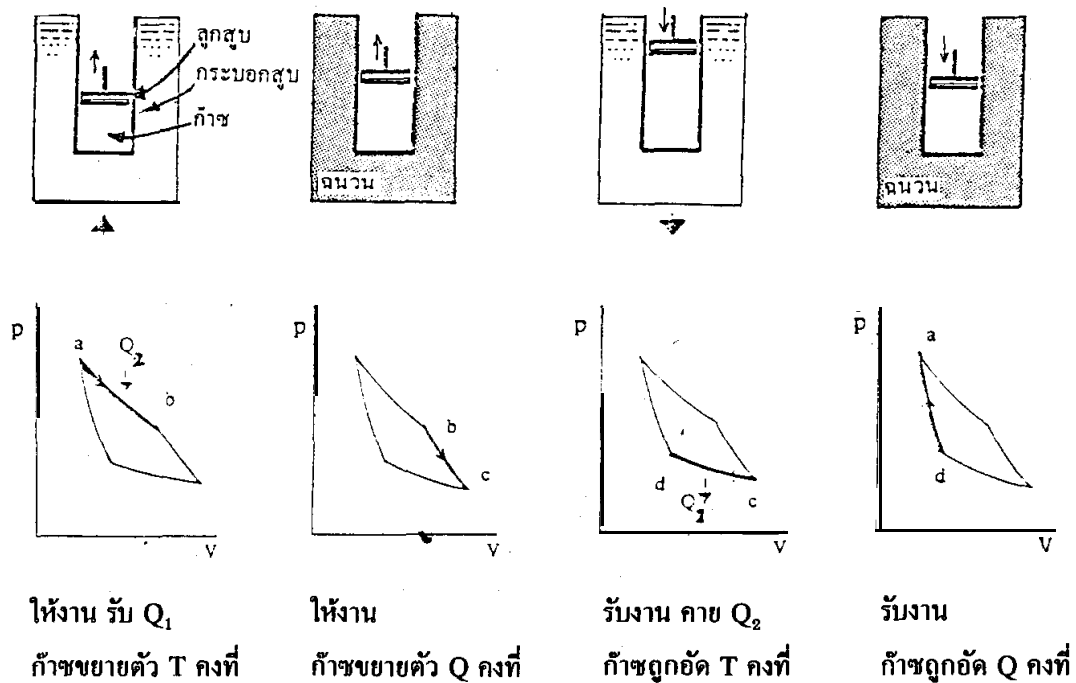
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) η ของเครื่องยนต์ความร้อน มีนิยามว่า เป็นอัตราส่วนของงานสุทธิต่อความร้อนที่ให้แก่เครื่องยนต์

$$\begin{aligned} \eta &= W/Q_2 \\ &= \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \end{aligned}$$

$$\eta = 1 - Q_1/Q_2 \quad \text{.....9.50}$$

เครื่องยนต์ความร้อนจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อ Q_1 น้อย โดยจะทำให้ปริมาณความร้อน $Q_2 - Q_1$ ซึ่งใช้ทำงานสุทธินั้นมีมาก η มีค่าน้อยกว่า 1

9.4.3 วัฏจักรคาร์โนต์ (Carnot Cycle) ในปี พ.ศ. 2367 คาร์โนต์ (Sadi Carnot) เป็นผู้แนะนำวัฏจักรแบบผันกลับได้ เรียกว่า วัฏจักรคาร์โนต์ ซึ่งเป็นวัฏจักรที่ประกอบด้วย กระบวนการแบบอุณหภูมิคงตัวสองกระบวนการและกระบวนการแบบความร้อนคงตัวสองกระบวนการ



รูปที่ 9.15 วัฏจักรคาร์โนต์ ใช้แก๊สอุดมคติเป็นสารปฏิบัติงาน

ศึกษาหลักการทำงานและประสิทธิภาพของเครื่องจักรความร้อนที่ทำงานแบบวัฏจักรคาร์โนต์ โดยใช้แก๊สอุดมคติเป็นสารปฏิบัติงาน โดยบรรจุแก๊สปริมาณ n กรัมโมลในกระบอกสูบ และปฏิบัติงานในช่วงอุณหภูมิ T_2 และ T_1 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 9.15 ดังนี้

1. กระบวนการอุณหภูมิคงที่ T_2 นั่นคือ $\Delta U = 0$ ช่วงจาก a ถึง b แก๊สรับความร้อน Q_2 จากแหล่งอุณหภูมิ T_2 และนำมาใช้ขยายตัวทำงาน

$$\begin{aligned} W_{ab} &= nRT_2 (V_b/V_a) \\ &= Q_2 \end{aligned} \quad \text{.....9.51}$$

2. กระบวนการความร้อนคงที่จาก b ถึง c แก๊สยังคงขยายตัวไปสุดที่ c โดยอุณหภูมิลดลงจาก T_2 เป็น T_1 ทำงานได้ W_{bc}

3. กระบวนการอุณหภูมิคงที่จาก c ถึง d เริ่มอัดแก๊ส งาน W_{cd} ซึ่งแก๊สรับไว้จะเปลี่ยนเป็นความร้อน Q_1 และคายออกให้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ T_1

$$\begin{aligned} -W_{cd} &= -nRT_1 \ln (V_d/V_c) \\ &= Q_1 \end{aligned} \quad \text{.....9.52}$$

4. กระบวนการความร้อนคงที่ จาก d ถึง a ยังคงอัดแก๊สต่อไปโดยไม่ให้แก๊สระบายความร้อนออก งานที่แก๊สรับไว้ W_{da} จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานภายใน อุณหภูมิจึงสูงขึ้นจาก T_1

ไปเป็น T_2 และก๊าซกลับคืนสู่สถานะเดิมที่ความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิเดียวกับเมื่อเริ่มต้น จึง
ครบวัฏจักรพอดี

งานสุทธิ	w	$=$	$W_{ab} + W_{bc} - W_{cd} - W_{da}$
หรือในรูปของ	Q	$=$	$Q_2 + (U_2 - U_1) - Q_1 - (U_2 - U_1)$
		$=$	$Q_2 - Q_1$
โดยรับความร้อน	Q	$=$	$AU + W$
		$=$	$0 + (Q_2 - Q_1)$
		$=$	$Q_2 - Q_1$
	η	$=$	$1 - Q_1/Q_2$
	$\frac{Q_1}{Q_2}$	$=$	$\frac{T_1 \ln(V_d/V_c)}{T_2 \ln(V_b/V_a)}$

ใช้กฎของบอยล์และกระบวนการอุณหภูมิคงที่ จาก a ถึง b และ c ถึง d จะได้ $p_a V_a = p_b V_b$

กับ $p_c V_c = p_d V_d$

กระบวนการความร้อนคงที่ จาก b ถึง c และจาก d ถึง a

$$p_b V_b^\gamma = p_c V_c^\gamma$$

และ

$$p_d V_d^\gamma = p_a V_a^\gamma$$

นำมาคูณกันจะได้

$$p_a V_a \cdot p_c V_c \cdot p_b V_b^\gamma \cdot p_d V_d^\gamma = p_b V_b \cdot p_d V_d \cdot p_c V_c^\gamma \cdot p_a V_a^\gamma$$

$$V_a V_b^\gamma V_c V_d^\gamma = V_a^\gamma V_b V_c^\gamma V_d$$

$$(V_b V_d)^{\gamma-1} = (V_a V_c)^{\gamma-1}$$

นั่นคือ

$$V_b/V_a = V_c/V_d$$

แทนค่าลงใน Q_1/Q_2 จะได้

$$Q_1/Q_2 = T_1/T_2$$

$$\therefore \eta = 1 - (T_1/T_2)$$

แสดงว่าประสิทธิภาพของเครื่องยนต์คาร์โนต์ซึ่งใช้กับก๊าซอุดมคติขึ้นกับอุณหภูมิ T_2
ของแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิ T_1 ของแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ

ตัวอย่าง 9.10 เครื่องยนต์ความร้อนทำงานระหว่างแหล่งความร้อนอุณหภูมิ 300 เคลวิน และ 500 เคลวินในแต่ละวัฏจักร เครื่องยนต์ดูดความร้อน 200 แคลอรีจากแหล่งความร้อนที่ร้อนกว่า จงหา

ก. ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์

ข. งานกลที่ทำโดยเครื่องยนต์ในแต่ละรอบ

วิธีทำ

ก. $T_2 = 500 \text{ K}$

$T_1 = 300 \text{ K}$

$Q_2 = 200 \text{ cal}$

$W = ?$, $\eta = ?$

$$\eta = 1 - T_1/T_2$$

$$= 1 - 300/500$$

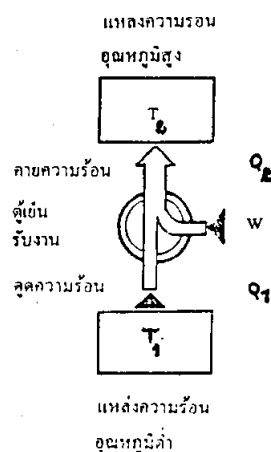
$$= 0.4$$

$$= 40\%$$

ข. $\frac{W_{\max}}{Q_2} = \eta$

$$\begin{aligned} \therefore W_{\max} &= \eta Q_2 \\ &= (0.4)(200) \\ &= 80 \text{ cal} \end{aligned}$$

9.4.4 ตู้เย็น (Refrigerator) ตู้เย็นคือเครื่องยนต์ความร้อนที่ปฏิบัติการย้อนกลับ โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะดูดความร้อนออกจากบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำภายในตู้เย็นแล้วคายออกสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงภายนอกตู้เย็น



รูปที่ 9.16 แผนภาพการทำงานของตู้เย็น

ระบบต้องได้รับงานกล W เพื่อไปใช้ในการทำงาน คือ การดูดความร้อน Q_1 จากแหล่งอุณหภูมิต่ำ T_1 เพื่อไปถ่ายเทความร้อน Q_2 ให้แก่แหล่งอุณหภูมิสูง T_2

เพื่อความสะดวกในการวัดการทำงานของตู้เย็น กำหนดให้อัตราส่วนของปริมาณ Q_1 ที่ระบบดูดจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำต่องานกล W ที่ระบบต้องการเพื่อใช้ในการทำงาน คือ ประสิทธิภาพของการทำงาน หรือสัมประสิทธิ์ของสมรรถนะ (coefficient of performance, COP) แทนด้วย E

$$E = \frac{Q_1}{W_1} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} \quad \dots\dots \text{..9.53}$$

Q_1 เป็นขนาดของความร้อนที่ตู้เย็นดูดจากภายในที่อุณหภูมิต่ำ T_1 และคาย Q_2 ออกสู่ภายนอกที่อุณหภูมิสูง T_2 ทั้งนี้ W คืองานที่ต้องให้แก่ตู้เย็น ย่อมเป็นผลต่างของค่าความร้อนทั้งสองตามกฎข้อที่หนึ่ง เพราะวัฏจักรมีค่า U เป็นศูนย์

ประสิทธิภาพของการทำงานของตู้เย็นที่ดีควรมีค่ามาก เพราะแสดงว่าเราไม่ต้องใช้งานมากในการดูดความร้อนออกไปจากภายในตู้เย็น

ตัวอย่าง 9.11 เครื่องทำความเย็นเครื่องหนึ่งมีขดลวดอยู่ที่อุณหภูมิต่ำ -13°C แก๊สอัดตัวในเครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ 27°C จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การทำงานของเครื่องทำความเย็นเครื่องนี้

วิธีทำ

$$\begin{aligned} E &= \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1} \\ \frac{1}{E} &= \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \\ &= Q_2/Q_1 - 1 \end{aligned}$$

จาก

$$\begin{aligned} Q_1/T_1 &= Q_2/T_2 \\ \frac{Q_2}{Q_1} &= \frac{T_2}{T_1} \\ 1/E &= T_2/T_1 - 1 \\ &= \frac{T_2 - T_1}{T_1} \\ E &= \frac{T_1}{T_2 - T_1} \end{aligned}$$

$$T_1 = 273 - 13 = 260 \text{ K} \quad , \quad T_2 = 273 + 27 = 300 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} E &= \frac{260}{300 - 260} \\ &= \frac{260}{40} \\ &= 6.5 \end{aligned}$$

กิจกรรม 9.8

ให้นักศึกษาพิจารณาว่าเครื่องทำความเย็นตามตัวอย่าง 9.11 ทำงานแบบวัฏจักรการโน้ดหรือไม่

9.4.5 กฎอุณหพลศาสตร์ข้อที่สองและเอนโทรปี เครื่องยนต์ความร้อนที่สร้างขึ้นในตอนแรก ๆ มีประสิทธิภาพต่ำมาก ความร้อนที่ดูดจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นงานที่เป็นประโยชน์ แม้ว่าการออกแบบทางวิศวกรรมจะก้าวหน้าขึ้นมากก็ตาม แต่ก็ยังปรากฏว่าส่วนใหญ่ของความร้อนที่ดูดเข้ามาถูกปล่อยออกที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ โดยไม่อาจแปลงเป็นพลังงานกลที่เป็นประโยชน์ได้ ในทำนองเดียวกันความหวังว่าจะสามารถสร้างเครื่องทำความเย็นซึ่งนำความร้อนออกจากวัตถุที่เย็นไปยังวัตถุที่ร้อนได้โดยไม่ต้องใช้งานจากภายนอก ซึ่งทั้งสองกรณีนี้ไม่ขัดกับกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ เครื่องยนต์ความร้อนเพียงแต่แปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานกลหมด โดยที่พลังงานรวมคงที่ในกระบวนการนั้น ๆ เครื่องทำความเย็นก็เช่นเดียวกัน พลังงานความร้อนก็เพียงแต่ย้ายจากวัตถุที่เย็นไปยังวัตถุที่ร้อน โดยไม่มีการสูญเสียของพลังงานในกระบวนการนั้น ๆ แต่ความประสงค์ทั้งสองนี้จะประสบความสำเร็จไม่ได้แต่อย่างใด

ดังนั้นกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์จะบอกเหตุผลว่าทำไมจึงไม่สามารถสร้างเครื่องมือเหล่านั้นได้จริงๆ กฎข้อที่สองสามารถบอกได้หลายแบบ แต่ละแบบก็เน้นให้เห็นแง่มุมต่างๆ กันของกฎนี้ และสามารถพิสูจน์ได้เสมอว่า คำกล่าวทั้งหมดมีความหมายเดียวกัน

เคลาซิอุส (Clausius) ได้กล่าวถึงกฎข้อที่สองไว้ว่า ไม่มีกระบวนการใดที่จะสร้างเครื่องยนต์ซึ่งสามารถทำงานเป็นวัฏจักร จะถ่ายเทความร้อนอย่างต่อเนื่องจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งอุณหภูมิสูงกว่าได้ นอกเสียจากจะให้งานจากภายนอกแก่ระบบ

ข้อความนี้ทำลายความประสงค์ที่จะสร้างเครื่องทำความเย็นที่สมบูรณ์จริง ๆ อย่างหมดสิ้น

ชี้ให้เห็นว่าการนำความร้อนออกจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งอุณหภูมิที่สูงกว่า จำต้องใช้ทำงานภายนอกเข้าไป เราทราบแล้วว่าเมื่อแหล่งความร้อนสองอันต่อถึงกัน ความร้อนจะไหลจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าไปยังแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ กฎข้อที่สองนี้ยืนยันว่า ในกรณีเช่นนี้ความร้อนจะไหลจากแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไปสู่แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าไม่ได้ ดังนั้น จึงสามารถกำหนดทิศทางการไหลของความร้อนได้ ทิศการไหลจะกลับได้ต่อเมื่อมีงานทำงานภายนอกเข้าไปช่วยเท่านั้น

เคลวิน (Kelvin) และ พลังค์ (Planck) กล่าวถึงกฎข้อที่สองในอีกแบบหนึ่งซึ่งมีความหมายอย่างเดียวกัน ดังนี้ การแปลงรูปพลังงานเพื่อให้ผลสุดท้ายเป็นการแปลงความร้อนให้เป็นงานทั้งหมดจากแหล่ง (source) ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำเท่ากันตลอดย่อมเป็นไปไม่ได้

ข้อความนี้จะตัดความประสงค์ในการสร้างเครื่องยนต์ความร้อนที่สมบูรณ์ ซึ่งจะชี้ให้เห็นว่าเราไม่สามารถผลิตงานขึ้น โดยแต่เพียงดึงความร้อนจากแหล่งความร้อนเดียวโดยไม่มีส่วนหนึ่งของความร้อนที่ดึงมาเสียไปแก่แหล่งความร้อนอีกแห่งหนึ่งที่อุณหภูมิต่ำกว่าได้

เอนโทรปี (entropy) กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์เป็นกฎของพลังงาน กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์เป็นกฎของเอนโทรปี และกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติจะสอดคล้องกับกฎทั้งสองนี้ทั้งสิ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างเอนโทรปีและความร้อน สามารถพิสูจน์ได้ว่าในกระบวนการผันกลับ การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี dS ความร้อนที่ดูดกลืน dQ และอุณหภูมิสัมบูรณ์ T ของระบบ มีความเกี่ยวข้องกันดังสมการ

$$dS = dQ/T \quad \text{.....9.54}$$

dQ มีหน่วยเป็นจูล (J) T เป็น เคลวิน (K) ดังนั้น เอนโทรปี dS จึงมีหน่วยเป็น จูลต่อเคลวิน (J/K)

เมื่อระบบผ่านจากสภาวะ 1 ไปยังสภาวะ 2 โดยวิธีกระบวนการผันกลับ การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี คือ

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 dQ/T \quad \text{..... 9.55}$$

การเปลี่ยนแปลงของ $S_2 - S_1$ ขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะสุดท้ายเท่านั้นไม่ขึ้นกับกระบวนการ

การเปลี่ยนแปลงแบบความร้อนคงตัวผันกลับได้ (Reversible adiabatic process)

$$dQ = 0$$

$$S_2 - S_1 = 0 \quad \text{.....9.56}$$

$$S = \text{constant}$$

เมื่อเอนโทรปีของระบบไม่เปลี่ยนแปลง เรียกว่า การแปลงแบบไอเซนทรอปิก (isentropic transformation)

ตัวอย่าง 9.12 น้ำแข็งมวล 1 กิโลกรัม อุณหภูมิ 0°C ละลายเป็นน้ำที่อุณหภูมิเดียวกัน จะมีเอนโทรปีเปลี่ยนไปเท่าไร

วิธีทำ กำหนดให้การเปลี่ยนสถานะเป็นกระบวนการผันกลับได้ และอุณหภูมิคงตัวด้วย

$$\begin{aligned}
 S_2 - S_1 &= Q/T = mL/T \\
 L = \text{ความร้อนแฝง} &= 80 \text{ kcal/kg} \\
 \therefore S_2 - S_1 &= \frac{(1 \text{ kg})(80 \text{ kcal/kg})}{(273 \text{ K})} \\
 &= 293 \text{ cal/K} \\
 &= 1.23 \text{ kJ/K}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่าง 9.13 จงคำนวณค่าเอนโทรปีที่เปลี่ยนไปเมื่อต้มน้ำ 1 กิโลกรัมที่ 0°C ให้มีอุณหภูมิ 100°C โดยยังไม่มี การเปลี่ยนสถานะ

วิธีทำ ในกรณีนี้ อุณหภูมิไม่คงที่

$$\begin{aligned}
 S_2 - S_1 &= \int_{273}^{373} dQ/T \\
 &= \int_{273}^{373} mcdT/T \\
 &= (1000 \text{ g})(1) \ln(373/273) \\
 &= 312 \text{ cal/K} \\
 &= 1.31 \text{ kJ/K}
 \end{aligned}$$

กฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในพจน์ของเอนโทรปี กล่าวได้ว่า กระบวนการใด ๆ ในธรรมชาติที่นำไปได้มากที่สุด คือ กระบวนการที่ทำให้เอนโทรปีเพิ่มขึ้นหรือมีค่าคงตัว

$$\begin{array}{lll}
 \Delta S \geq 0 & & \text{.....9.57} \\
 \text{ถ้า } \Delta S = 0 & \text{สำหรับกระบวนการผันกลับได้} & \\
 \Delta S > 0 & \text{สำหรับกระบวนการผันกลับไม่ได้} &
 \end{array}$$

กิจกรรม 9.9

ให้นักศึกษาพิจารณากระบวนการในตัวอย่าง 9.12 และ 9.13 ว่าเป็นกระบวนการผันกลับได้หรือไม่

ตัวอย่าง 9.14 จงแสดงว่าในกระบวนการผันกลับไม่ได้ $\Delta S > 0$

วิธีทำ พิจารณาการเปลี่ยนของเอนโทรปีในกระบวนการนำความร้อน ซึ่งเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้

สมมติให้วัตถุ 2 อันมีอุณหภูมิ T_1 และ T_2

ให้ $T_2 > T_1$ นำวัตถุทั้งสองมาสัมผัสกัน

พลังงานในรูปของความร้อนย่อมถ่ายเทจากวัตถุอุณหภูมิ T_2 ไปสู่วัตถุอุณหภูมิ T_1

ถ้า Q เป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท

การเปลี่ยนของเอนโทรปีของวัตถุ T_2

$$\Delta S_2 = -Q/T_2$$

การเปลี่ยนเอนโทรปีของวัตถุ T_1

$$\Delta S_1 = Q/T_1$$

เพราะว่าวัตถุอุณหภูมิ T_2 คายความร้อนออกมา Q และวัตถุอุณหภูมิ T_1 ดูดกลืนความร้อนเข้าไปทั้งหมด คือ Q

ดังนั้น การเปลี่ยนเอนโทรปีของระบบ ΔS

$$\begin{aligned}\Delta S &= \Delta S_2 + \Delta S_1 \\ &= -Q/T_2 + Q/T_1 \\ &= \frac{Q(T_2 - T_1)}{T_1 T_2} \\ &> 0\end{aligned}$$

จะเห็นว่าในกระบวนการผันกลับไม่ได้ ΔS มากกว่าศูนย์ นั่นคือ เอนโทรปีของระบบใด ๆ ซึ่งผ่านกระบวนการชนิดผันกลับไม่ได้จะเพิ่มขึ้นเสมอ

สรุป

การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและกฎทางอุณหพลศาสตร์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อน และกระบวนการทางอุณหพลศาสตร์ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์กับการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อน

แบบฝึกหัดที่ 9

- 9.1 ค่าจำกัดของอัตราส่วนของความดันของก๊าซ ณ จุดหลอมละลายของตะกั่วกับที่จุดไตรภาคของน้ำ เมื่อกำหนดให้ก๊าซมีปริมาตรคงที่ มีค่าเท่ากับ 2.19816 ถ้าวัดจุดหลอมละลายของตะกั่วเท่ากับกี่เคลวิน

ตอบ 600.45 K

- 9.2 ก. จุดเดือดปกติของออกซิเจนเหลว = -182.97°C ถ้าวัดเป็นกี่เคลวิน และฟาเรนไฮต์
 ข. ณ อุณหภูมิใดที่องศาฟาเรนไฮต์ และเซสเซียสอ่านได้เท่ากัน
 ค. ฟาเรนไฮต์และเคลวิน อ่านได้เท่ากันที่อุณหภูมิเท่าไร

ตอบ ก. 90.18 K, -297.35°F ข. -40 ค. 574.6

- 9.3 ก. ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ρ มวล m และปริมาตร V คือ $\rho = m/V$ จงพิสูจน์ว่า $\gamma = \frac{-1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$

ข. ความหนาแน่นของเกลียวหินระหว่างอุณหภูมิ -193°C และ -13°C กำหนดได้โดยสมการจัดเจน $\rho = 2.1680 \times (1 - 11.2 \times 10^{-5}t - 0.5 \times 10^{-7}t^2)$ จงคำนวณหา γ ณ อุณหภูมิ -100°C

ตอบ 0.0087 K^{-1}

- 9.4 ปริมาตรที่เปลี่ยนไป ΔV ของโลหะชนิดหนึ่ง ๆ มีค่าเป็นเศษส่วนน้อย ๆ ของปริมาตรเดิม เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจากอุณหภูมิห้อง ($T_r = 300\text{K}$) ไปยังจุดหลอมละลาย T_m ดังนั้น

$$\Delta V/V = \int_{T_r}^{T_m} \beta dT$$

กำหนดข้อมูลตามตาราง จงคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ $\Delta V/V$ ของโลหะทั้งสามชนิดนี้

โลหะ	T_m, K	$\gamma, 10^{-6}\text{K}^{-1}$
ทองแดง	1,360	$43 + 0.022 \text{ T}$
พลาเดียม	1,830	$30 + 0.015 \text{ T}$
แพลตตินัม	2,050	$24 + 0.0086 \text{ T}$

ตอบ 0.066, 0.070, 0.060

- 9.5 ณ อุณหภูมิ 20°C ขวดแก้วใบหนึ่งมีปริมาตรถึงขีด ๆ หนึ่งบนก้านหลอดเท่ากับ 100 cm^3 พอดี ต่อมาบรรจุของเหลวชนิดหนึ่งถึงขีดนี้ ณ อุณหภูมิ 20°C สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามยาวของของเหลว $= 120 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของแก้ว $= 0.8 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ พื้นที่หน้าตัดของก้านหลอด $= 1\text{ mm}^2$ และสามารถอนุมานว่ามีค่าคงตัวได้ ถามว่าของเหลวในก้านหลอดจะสูงขึ้นหรือต่ำลงเท่าไร เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 40°C

ตอบ 2.35 เมตร

- 9.6 แท่งโลหะยาว 30.0 ซม. ขยายตัว 0.075 ซม. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 0°C ถึง 100°C แท่งโลหะอีกชนิดหนึ่งยาวเท่ากันขยายตัว 0.045 ซม. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเท่ากันนี้ แท่งที่สามยาว 30.0 ซม. เช่นกัน แต่ใช้โลหะทั้งสองชนิดมาต่อปลายกัน ปรากฏว่าขยายตัว 0.65 ซม. ระหว่าง 0°C และ 100°C จงหาความยาวแต่ละส่วนของแท่งโลหะที่สามนี้

ตอบ 20 ซม, 10 ซม.

- 9.7 สะพานเหล็กยาว 200 เมตร

ก. ถ้าสมมติว่าเป็นสะพานช่วงเดียว ตรึงปลายข้างหนึ่งแน่นกับที่และปล่อยปลายอีกปลายหนึ่งเคลื่อนอย่างอิสระ ถามว่าระหว่างฤดูหนาว (10°C) กับฤดูร้อน (40°C) สะพานยาวต่างกันเท่าไร

ข. ถ้าตรึงปลายทั้งสองให้แน่นอยู่กับที่ตอนฤดูร้อน ถามว่าความเค้นเป็นเท่าไรในฤดูหนาวกำหนดให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้นของเหล็ก $= 1.1 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ และมอดุลัสของยังของเหล็ก $= 2.0 \times 10^{11}$ นิวตันต่อตารางเมตร

ตอบ 6.6 ซม. , 6.6×10^7 นิวตันต่อตารางเมตร

- 9.8 ลวดเหล็กยาว 30 เมตร ณ อุณหภูมิ 20°C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 520°C ลวดยาวขึ้น 19 มิลลิเมตร จงหา

ก. สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้น

ข. ความเค้นในลวดซึ่งขึงตึงที่อุณหภูมิ 520°C แล้วปล่อยให้เย็นลงเหลือ 20°C โดยไม่ยินยอมให้หดตัว คำนวณมอดุลัสของยังของเหล็ก (ดูจากข้อ 7)

ตอบ $1.27 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$, 1.27×10^8 นิวตันต่อตารางเมตร

- 9.9 แท่งเหล็กกลมยาว 40 ซม. และทองแดงกลมยาว 36 ซม. ทั้งสองแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ถูกวางต่อกันแบบปลายชนปลายแท่งระหว่างหมุดตรึงแน่น 2 หมุด ซึ่งตอนแรกไม่มีความเค้นในแท่งทั้งสองเลย ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 50°C ถามว่าความเค้นในแต่ละแท่งเป็นเท่าไร สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวตามเส้นของเหล็กและทองแดง ดูจากตารางที่ 9.1 มอดุลัสของยังของเหล็กและทองแดง เท่ากับ 2.0×10^{11} นิวตันต่อตารางเมตร และ 1.1×10^{11} นิวตันต่อตารางเมตร

ตอบ 9.97×10^7 นิวตันต่อตารางเมตร

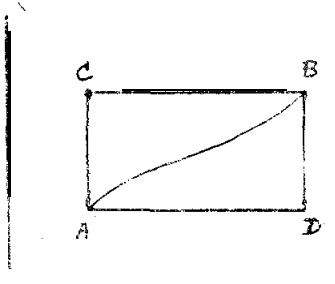
- 9.10 จงคำนวณค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของโมเลกุลของก๊าซอุดมคติชนิดอะตอมเดี่ยวที่อุณหภูมิ 127°C

ตอบ 8.28×10^{-21} จูล

- 9.11 จงคำนวณหาค่าความเร็วของรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของโมเลกุลฮีเลียมที่อุณหภูมิ 40°C โดยใช้ค่าความเร็วรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของออกซิเจน ซึ่งมีค่า 460 เมตร/วินาที ที่อุณหภูมิ 0°C โดยกำหนดให้มวลของโมเลกุลของออกซิเจนและฮีเลียมเป็น 32 กรัมต่อโมลและ 4 กรัมต่อโมลตามลำดับ

ตอบ 1,394 เมตร/วินาที

- 9.12 เมื่อระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะ A ไปสภาวะ B ตามแนวเส้นทาง ACB ดังรูป ระบบดูดกลืนความร้อน 80 จูล และทำงาน 30 จูล



ก. ถ้าระบบทำงานได้ 10 จูล จงคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ระบบดูดกลืนตามเส้นทาง ADB

ข. ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับจากสภาวะ B ไป A ตามเส้นโค้ง BA โดยมีงานภายนอกกระทำ 20 จูล ระบบจะคายความร้อนออกเท่าใด

ตอบ ก. 60 จูล ข. 70 จูล

- 9.13 เครื่องยนต์คาร์โนต์ทำงานระหว่างแหล่งอุณหภูมิ 320 เคลวิน และแหล่งอุณหภูมิ 260 เคลวินที่อุณหภูมิ 320 เคลวิน เครื่องยนต์ดูดกลืนความร้อน 500 จูล งานที่ทำมีค่าเท่าใด

ตอบ 94 จูล